



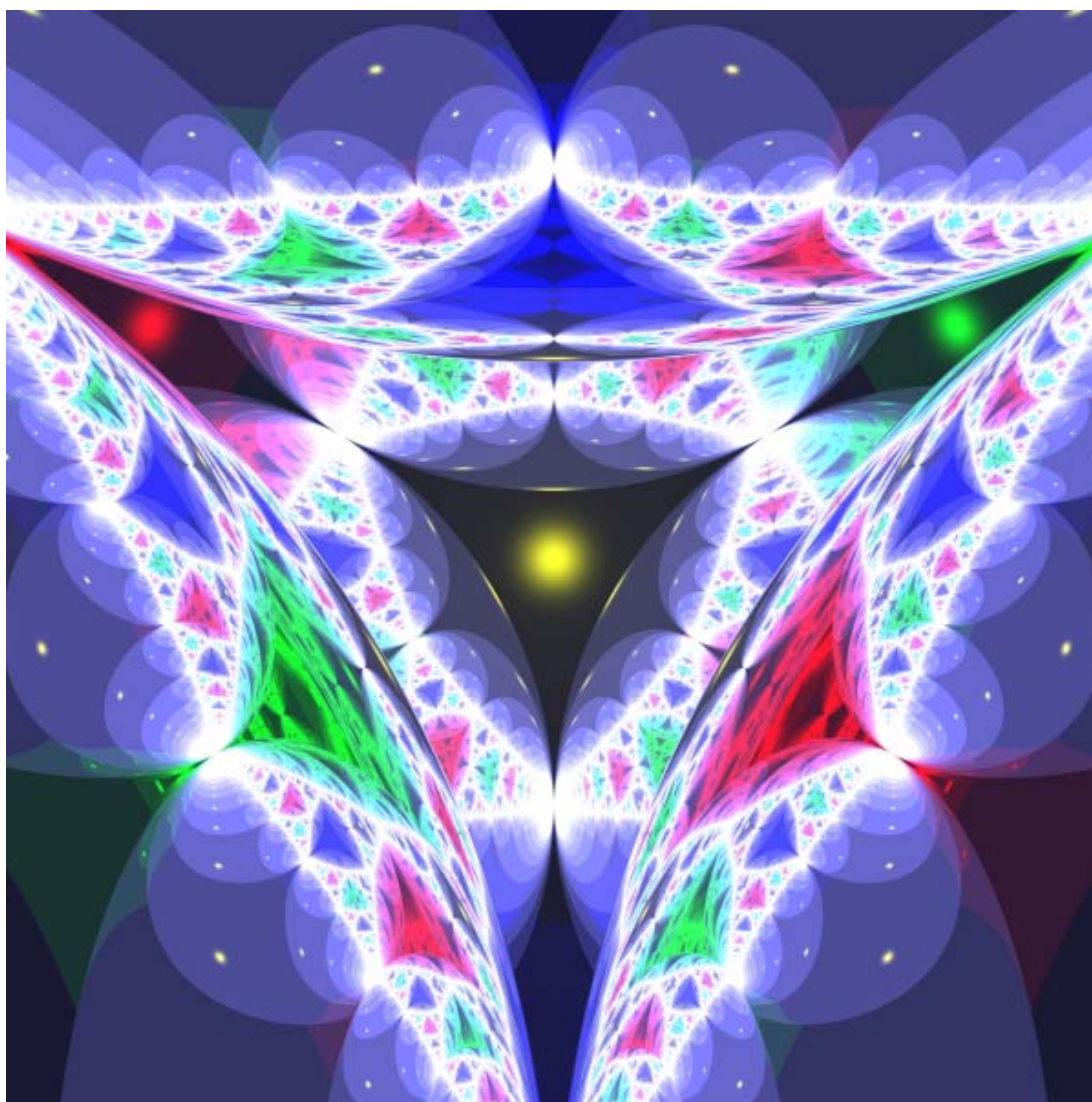
LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION

www.journal.lapen.org.mx

Volume 2

Number 3

September 2008



A publication sponsored by Research Center on Applied Science and Advanced Technology
of National Polytechnic Institute and the Latin American Physics Education Network



LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION

Volume 2, Number 3, September 2008

CONTENTS/CONTENIDO

Papers/Artículos

- The Effects of Problem Solving Instruction on Physics Achievement, Problem Solving Performance and Strategy Use,
Gamze Sezgin Selçuk, Serap Çalışkan, and Mustafa Erol 151-166
- Measurement of the conceptual change produced in pre-school and elementary teachers based on MECIBA training methodology,
Carla Hernández S., Ricardo Buzzo G. and Rodrigo Rivera C. 167-173
- Effectiveness of Analogy on Students' Success and Elimination of Misconceptions,
Refik Dilber, Bahattin Duzgun 174-183
- Students' Difficulties in Understanding the Concepts of Magnetic Field Strength, Magnetic Flux Density and Magnetization,
Zafer Tanel and Mustafa Erol 184-191
- Motion of an electric dipole in a static electromagnetic field,
Carl E. Mungan and Andrew Lasinski 192-194
- True/untrue explanations in Physics: the Bohr's atom model,
E. Marín 195-196
- Standing Human - an Inverted Pendulum,
Kui Fu Chen 197-200
- Explain the latent heat and specific heat of water, ammonia, and methanol with degrees of freedom,
Lianxi Ma and Feng Li 201-202
- Water Evaporation: Apparent Anomaly and its Resolution,
D. C. Agrawal and V. J. Menon 203-204
- Teaching Nonlinear Dynamics and Chaos for Beginners,
Jesús M. Seoane, Samuel Zambrano and Miguel A. F. Sanjuán 205-211
- About the Project Education at the Secondary School at Czech Republic,
Zdenek Kluiber and Hana Pokorna 212-213
- Space Programme for Pupils and Teachers,
Zdenek Kluiber 214-217



continued/continuación

LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION Vol. 2, No. 3, Sept. 2008

contents/contenido

Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz?, Breno Arsioli Moura and Cibelle Celestino Silva	218-227
Os Desafios do Ensino de Física e Ciências na Amazônia ante às TIC's, Josefina Barrera Kalhil and Ana Paula Sá Menezes	228-232
Resolución de problemas, comprensión, modelización y desempeño: un caso con estudiantes de ingeniería, Zulma Gangoso, María Elena Truyol, Isabel Brincones y Alberto Gattoni	233-240
Explicación con experimentos sencillos y al alcance de todos de la primera ley de Newton (la ley de la inercia), así como la diferencia entre inercia e inercialidad, J.Vila y C.J. Sierra	241-245
Los Experimentos Discrepantes en el aprendizaje activo de la Física, Luis H. Barbosa	246-252
Acerca de la enseñanza-aprendizaje de los conceptos de Fuerza y Trabajo, Antonio Lara-Barragán Gómez	253-258
Conductividad térmica de una barra de cobre. Estudio experimental del transitorio, José A. Ibáñez, Francisco J. Abellán, Ramón P. Valerdi y José A. García Gamuz	259-267
Implementación del software DivYX en el laboratorio de Mecánica, Leonor Pérez-Trejo, Arturo F. Méndez Sánchez y Héctor A. González Flores	268-274
¿Cómo definir la energía en los cursos básicos?, Arnaldo González Arias	275-276
La multimedia y la hipermedia en el estudio del movimiento browniano, R. Valdés Castro, V. Tricio Gómez y P. Valdés Castro	277-283
El uso de la plataforma Moodle con recursos info-tecnológicos interactivos en la docencia en Física. Una experiencia en el Curso de Física Moderna II, J. Fuentes Betancourt y A. Pérez Perdomo	284-288
Enseñanza de la Física en la Educación Media Tecnológica a través de un diseño curricular por competencias, una experiencia en marcha, Andrea Cabot Echevarría	289-293

LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION Vol. 2, No. 3, Sept. 2008

contents/contenido

Fundamentación del holograma como un medio de enseñanza de la Física, Rolando Serra Toledo, Gilda Vega Cruz, Angel Ferrat Zaldo, José Joaquín Lunazzi y Daniel S. F. Magalhães	294-302
Comportamiento dual de la fuerza: como vector y como covector, Yolanda Benítez Trejo, Zbigniew Oziewicz y César Mora	303-306
Deformaciones de un frente de onda, Magdalena Marciano-Melchor, María Aurora Molina-Vilchis y Ramón Silva-Ortigoza	307-310
Introducción a las ondas gravitacionales, Claudia Moreno, R. García-Salcedo, Arturo Lara y Jaime Ramírez	311-319
Sobre la existencia del Potencial de Lanczos, César Mora y Rubén Sánchez	320-322
Un proceso de formalización matemática: Desde las rotaciones hasta las matrices de spin de Pauli, Orlando Organista, Juan C. Rodríguez y Andrés C. Sevilla	323-330
¡Cuando la tostada resbala de la mano!, Adrián Corona Cruz y Guillermo Martínez Peña	331-335
El potencial redox y la espontaneidad de las reacciones electroquímicas, Erik Albarrán-Zavala	336-345
La aceleración en el espacio y en el tiempo: cinemática de los arrancones, Adrián Corona Cruz	346-350
Notes/Notas	
La Prueba PISA de la OCDE H. G. Riveros	351-352
Book reviews/Revisión de libros	
Burbuja viajera de la ciencia. La ciencia en verso, Carmen del Pilar Suárez Rodríguez	353-353
Announcements/Anuncios	
Próximos congresos	354-358

LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION

Electronic version of this journal can be downloaded free of charge from the web-resource:

<http://www.journal.lapen.org.mx>

Production and technical support

Daniel Sánchez Guzmán
dsanchez@ipn.mx

EDITORIAL POLICY

Latin American Journal of Physics Education is a peer-reviewed, electronic international journal for the publication of papers of instructional and cultural aspects of physics. Articles are chosen to support those involved with physics courses from introductory up to postgraduate levels.

Papers may be comprehensive reviews or reports of original investigations that make a definitive contribution to existing knowledge. The content must not have been published or accepted for publication elsewhere, and papers must not be under consideration by another journal.

This journal is published three times yearly (January, May and September), one volume per year by Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional and The Latin American Physics Education Network (LAPEN). Manuscripts should be submitted to cmoral@ipn.mx or lajpe@lapen.org.mx. Further information is provided in the "Instructions to Authors" on www.journal.lapen.org.mx

Direct inquiries on editorial policy and the review process to: Cesar Mora, Editor in Chief, CICATA-IPN Av. Legaria 694, Col Irrigación, Del. Miguel Hidalgo, CP 11500 México D. F.

Copyright © 2007 César Eduardo Mora Ley, *Latin American Physics Education Network*. (www.lapen.org.mx)

ISSN 1870-9095

EDITOR-IN-CHIEF

Cesar Mora, Instituto Politécnico Nacional (México)

INTERNATIONAL ADVISORY COMMITTEE

Ann-Marie Pendrill, Göteborgs University (Sweden)
Carl Wenning, Illinois State University (USA)
Diane Grayson, Andromeda Science Education (South Africa)
David Sokoloff, University of Oregon (USA)
Dean Zollman, Kansas State University (USA)
Edward Redish, University of Maryland (USA)
Elena Sassi, University of Naples (Italy)
Freidrich Herrmann, University of Karlsruhe (Germany)
Gordon Aubrecht II, Ohio State University (USA)
Hiroshi Kawakatsu, Kagawa University (Japan)
Jorge Barojas Weber, Universidad Nacional Autónoma de México (México)
José Zamarro, University of Murcia (Spain)
Laurence Viennot, Université Paris 7 (France)
Lillian C. McDermott, University of Washington (USA)
Marisa Micheli, University of Udine (Italy)
Marco Antonio Moreira, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brazil)
Minella Alarcón, UNESCO (France)
Pratibha Jolly, University of Delhi (India)
Priscilla Laws, Dickinson College (USA)
Ton Ellermeijer, AMSTEL Institute University of Amsterdam (Netherlands)
Verónica Tricio, University of Burgos (Spain)
Zdenek Kluber, Technical University (Czech Republic)

EDITORIAL BOARD

Amadeo Sosa, Ministerio de Educación y Cultura Montevideo (Uruguay)
Carola Graziosi, Asociación de Profesores de Físics de Argentina (Argentina)
Deise Miranda, Universidade Federal do Rio de Janeiro (Brasil)
Eduardo Moltó, Instituto Superior Pedagógico José Varona (Cuba)
Eduardo Montero, Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador)
Josefina Barrera, Universidade do Estado do Amazonas (Brasil)
Josip Slisko, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (México)
Juan Evertsz, Universidad Pontificia Católica Maestra y Maestra, (Rep. Dominicana)
Julio Benegas, Universidad Nacional de San Luis (Argentina)
Leda Roldán, Universidad de Costa Rica (Costa Rica)
Manuel Reyes, Universidad Pedagógica Experimental Libertador (Venezuela)
Mauricio Pietrocola Universidad de Sao Paulo (Brasil)
Nelson Arias Ávila, Universidad Distrital, Bogotá (Colombia)
Octavio Calzadilla, Universidad de la Habana (Cuba)
Ricardo Buzzo Garrao, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (Chile)

With this issue we have accomplished our first year on-line. We would like to thank all people who have supported this project, authors, referees, readers, editorial and technical team, and of course the network LAPEN and the National Polytechnic Institute. We are happy because the excellent response of Physics teachers and researchers on Physics Education around the world. We have received papers from Argentina, Brazil, Czech Republic, Chile, China, Colombia, Cuba, France, Finland, Germany, India, Mexico, Syria, Spain, Turkey, Uruguay and USA. Now, the next step is to become an indexed journal, also we will start to publish proceedings of Physics Education meetings. Indeed the *Latin American Journal of Physics Education* is a young open journal and we need the effort of physicist, teachers, students, universities, academic networks, physical societies and associations of Physics teachers. The production and teaching of scientific knowledge is a true way to get a better world, then as Physics teachers we have one of the most beautiful challenge and task: we are building the science of teaching Physics, even more Physics Education. In this issue you will find papers related with a great variety of topics, Classical Mechanics, Quantum Mechanics, Magnetism, Thermodynamics, Information and Communication Technologies applied to teaching Physics, History of Physics, Laboratory of Physics and Mathematical Methods.

Unfortunately, we would like to inform that Prof. Nizar Handam from Syria passed away on March 17, 2008 following a distinguished career as a Physics teacher in the University of Aleppo, Syria. He died at the age of 49 after spending more than two decades as a theoretical physicist. Prof. Handam was interested in Modern Physics, he constructed De Broglie theory and the derivation of the spin of electron from classical electrodynamics, and he sent two related papers for the last January issue of LAJPE.

Again, thanks for your contributions, comments and suggestions; our goal is to improve as much is possible, together we will achieve it.

César Mora
Editor in Chief

Con este número completamos nuestro primer año en línea. Nos gustaría agradecer a toda la gente que ha apoyado este proyecto, autores, revisores, lectores, el equipo editorial y técnico, y seguro también a la red LAPEN y al Instituto Politécnico Nacional. Nos sentimos felices debido a la excelente respuesta de maestros de Física e investigadores en Física Educativa de todo el mundo. Hemos recibido artículos de Alemania, Argentina, Brasil, Chile, China, Colombia, Cuba, España, Francia, Finlandia, India, México, República Checa, Siria, Turquía, Uruguay y Norte América. Ahora, nuestro siguiente paso es llegar a ser una revista indexada, y también comenzaremos a publicar actas de reuniones de Enseñanza de la Física. En verdad, la *Revista Latinoamericana de Educación Física* es una revista joven de libre acceso, y necesitamos el esfuerzo de físicos, profesores, estudiantes, universidades, redes académicas, sociedades de Física y asociaciones de profesores de Física. La producción y la enseñanza del conocimiento científico es un camino verdadero para lograr un mundo mejor, entonces como profesores de Física tenemos una de los más bellos desafíos y tarea: estamos construyendo la ciencia de la enseñanza de la Física, más aún, la Física Educativa. En este número encontrarán artículos relacionados con una gran variedad de temas, Mecánica Clásica, Mecánica Cuántica, Magnetismo, Termodinámica, Tecnologías de Información y Comunicación aplicadas a la enseñanza de la Física, Historia de la Física, Laboratorio de Física y Métodos Matemáticos.

Lamentablemente, nos gustaría informar del fallecimiento del profesor Nizar Handam de Siria el 17 de marzo de 2008, después de una distinguida carrera como profesor de Física en la Universidad de Alepo, Siria. Murió a la edad de 49 años después de pasar más de dos décadas como un físico teórico. El Prof Handam estaba interesado en la Física Moderna, construyó la teoría De Broglie y la obtención de spin de los electrones de la Electrodinámica Clásica, y envió dos artículos relacionados para el pasado número de LAJPE de enero.

Una vez más, gracias por sus aportaciones, comentarios y sugerencias, nuestro objetivo es mejorar tanto como sea posible, juntos lo lograremos.

César Mora
Editor en Jefe

The Effects of Problem Solving Instruction on Physics Achievement, Problem Solving Performance and Strategy Use



Gamze Sezgin Selçuk, Serap Çalışkan, and Mustafa Erol

Buca Education Faculty, Department of Physics Education, Dokuz Eylül University, 35160, Izmir, TURKEY.

E-mail: gamze.sezgin@deu.edu.tr

(Received 31 July 2008; accepted 26 August 2008)

Abstract

This study has investigated the effects of problem solving instruction on physics achievement, problem-solving performance and strategy use in an introductory physics course at university level. In this study, pretest-posttest and quasi-experimental design with nonequivalent control group was used. Two groups of student teachers ($n=74$) participated in this study. During the 8-week study, one group received the strategy instruction while the other group acted as control. Data of the study were collected by Physics Achievement Test (PAT), Problem-Solving Performance Test (PSPT) and Problem-Solving Strategies Scale (PSSS). Findings of the study indicate that strategy instruction was effective on physics achievement, problem-solving performance, and strategy use. The implications of these results for physics instruction are discussed.

Keywords: Physics education, Problem solving strategies, Strategy instruction.

Resumen

Este estudio ha investigado los efectos de la instrucción de resolución de problemas en logros de física, el rendimiento en solución de problemas y el uso de estrategia en un curso introductorio de física a nivel universitario. En este estudio, se utilizó el diseño de pretest y posttest cuasi-experimental con grupo de control no equivalente. En este estudio participaron dos grupos de profesores estudiantes ($n = 74$). Durante las 8 semanas del estudio, un grupo recibió la estrategia de instrucción, mientras que el otro grupo actuó como control. Los datos del estudio fueron recogidos mediante el Test de Logros en Física (PAT), el Test de rendimiento en solución de problemas (PSPT) y la Escala de Estrategias en solución de problemas (PSSS). Los resultados del estudio indican que la estrategia de instrucción es eficaz en en logros de física, en rendimiento de solución de problemas, y el uso de estrategia. Se discuten las implicaciones de estos resultados para la instrucción física.

Palabras clave: Educación en Física, Estrategias de resolución de problemas, Instrucción de estrategias.

PACS: 01.40.Fk, 01.40.gb, 01.40.gf

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

One of the most important target of the modern education is to educate individuals who are overcoming the problems which they encountered in their daily lives and social lives on their own, in other words, individuals who can easily solve the problems which they encountered. Gagné [1] stated that educational programs had the important ultimate purpose of teaching students to solve problems-mathematical and physical problems, health problems, social problems, and problems of personal adjustment.

Serway and Beichner [2] strongly advise developing the skills necessary to solve a wide range problems in keeping with the statement "You do not know anything until you have practiced." said by R.P. Feynman, Nobel laureate in physics. They express that problem solving ability would be

one of the main tests of knowledge of physics, and they advice trying to solve as many problem as possible.

Problem solving is usually defined as formulating new answers, going beyond the simple application of previously learned rules to create a solution [3]. Problem solving is an investigative task whereby the solver explores the solution path to reach a goal from given information [4]. According to Heller and Reif [5], that is an intellectually demanding activity of central importance in any science. All the sciences, both pure and applied, are centrally concerned with developing and systematizing knowledge useful for solving various kinds of problems. Problem solving is a complex, multi-layered skill, and not one that most students can be expected to develop unaided [6]. Hence, education in the sciences must address the crucially important task of teaching students to become more proficient problem-solvers [7].

The basic problem solving process is a linear, hierarchical process. Each step is a result of the previous step and a precursor to the next step. A popular method, teaching problem solving, involves the use of “stage models”. Stage models are simplified lists of stages and steps used in general problem solving [8]. Polya's prescription for solving problems consists of four steps (adapted from [9]):

1. Understanding the problem (Recognizing what is asked for)

Example approaches for doing so: Asking yourself, “What am I looking for?” or “What information is given in the problem?”

2. Devising a plan for solving the problem (Responding to what is asked for)

Example approaches for doing so: Asking yourself, “Do I know a similar problem?”, “Can I restate the problem?”.

3. Carrying out the problem (Developing the result of the response)

4. Looking Back (Checking. What does the result tell me?)

Example approaches for doing so: Check the calculations and result or try to get the same result using a different method.

Whereas each of these steps are considered as separate skills, each step is categorized into sub skills. These skills can be considered as the analytical parts (heuristics) of the problem solving process which requires defining, investigating, reviewing and processing of the information regarding the problem. Somewhat synonymous term is “strategies”. A problem-solving strategy is a technique that may not guarantee solution, but serves as a guide in the problem solving process [10].

As the research literature on problem solving is reviewed, it is seen that the individuals who use the problem solving strategies effectively and consciously were called as “expert problem solvers” and who can not use it sufficiently were called as “novice problem solvers”. Differences among experts and novices had constituted a well foundation for the research done on problem solving in the subject areas such as physics, mathematics, and chemistry.

The research related to the problem solving in physics are focussed on two main titles. First one of these is the research regarding the comparison of the problem solving behaviour differences among expert and novice problem solvers [4, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. According to the results obtained from certain research investigating the strategy use of the expert and novice problem solvers [4, 7, 11, 13, 19]. Experts have a tendency of firstly analyzing the problem qualitatively by depending on the fundamental physics concepts before passing to solve the problems by means of mathematical equations. Whereas, novices mostly start to solve the problem by means of mathematical equations, substitute the given variables, and then investigate the other equations where they can substitute the other quantitative variables.

Expert problem solvers proceed through the following four phases of analysis when they faced with a challenging quantitative problem (rather than a standard one which they recognize and remember the solution of it): conceptual

analysis (orienting, exploring); strategic analysis (planning, choosing); quantitative analysis (executing, determining, answering); and meta-analysis (reflecting, checking, challenging, relating). In typical instruction, only quantitative analysis is explicitly modeled for students, leaving them to develop the other skills on their own [20]. And the research existing in the second group is directed towards teaching problem solving strategies in order to make the novices become expert problem solvers [7, 19, 21, 22, 23].

One instructional method that has been used to address problem solving performance is explicit problem solving instruction. Explicit problem solving is instruction that directly teaches students how to use more advanced techniques for solving problems [22].

The studies related to explicit instruction of problem solving skills fall into two categories: (1) Laboratory-based experiments where students were extracted from a class and taught expert-like skills, and (2) Classroom-based experiments where an entire class was taught these skills [24]. Most problem solving studies have been set in laboratories, so few have taken place in actual classrooms. The following section will describe the details of our study in classroom-based format.

A. The Present Study

Mestre *et al.* [19] stated that two important goals of physics instruction were to help students achieve a deep, conceptual understanding of the subject and to help them develop powerful problem solving skills. In light of this statement, we designed our explicit problem solving instruction which is integrated content instruction.

In this study, we aimed to determine the effects of the explicit problem-solving strategy instruction on student teachers' physics achievement, problem-solving performance and the frequency of problem-solving strategy use. The following research questions were posed:

1. Is there any significant difference between the strategy and control groups' physics achievement?
2. Is there any significant difference between the strategy and control groups' problem solving performances?
3. Are there any significant differences in mean frequencies of problem solving strategy use between the strategy and control groups?

B. The Description of the Course “Physics II”

The Faculty of Education of Dokuz Eylul University offers a two semester introductory physics courses (called Physics I and Physics II) that are required by 6 different departments (e.g., Mathematics Education, Physics Education, Chemistry Education, Biology Education, Science Education, Computer Education and Instructional Technology). The course “Physics II” is one of the spring term compulsory courses for the first-year undergraduate programs of these departments. The course consists of four lesson hours (45 minutes) of

lecture and two hours of laboratory activity per week. The content of the course is based on the knowledge acquired during the course "Physics I" and the book *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 2* by Serway and Beichner [2]. The course focuses on fundamental concepts, laws and problems of the electricity and magnetism and covers about two-thirds of the book chapters in this level.

II. METHOD

A. Participants

In Turkey, access to university higher education requires to have a high school graduation and take highly selective National University Entrance Exam. Applicants are placed at a university program according to the exam scores and their options. Among the applicants' placed at four-year Chemistry and Biology Teacher Education Programs, exam scores are close to each other. This means that the applicants' background knowledge level related with Mathematics, Physics, Chemistry, and Biology was almost equal. For this reason, the researchers determined to implement this study with these programs' first-year students.

All the students who enrolled Physics II course were included in the research. The subjects of the research consisted of 74 first-grade students teachers who are students of Chemistry ($n=37$) and Biology Education ($n=37$) departments of Education Faculty in Dokuz Eylul University in Izmir (Turkey). 40 female (19 chemistry education and 20 biology education) and 34 male (17 chemistry education and 17 biology educations) students, whose ages ranged from 17 to 19, took part in this study.

B. Research Design

In this study, pre-test-post-test quasi-experimental design (classroom-based) with non-equivalent control group was used. There were one control and one experimental group, namely, the strategy group. Since Chemistry and Biology Education departments were not equivalent, they were assigned by lottery to strategy and control groups.

The strategy group received strategy plus traditional instruction and the control group received only traditional instruction.

Both groups were tested before and after the intervention to measure their physics achievement and the frequency of problem solving strategy use. Before and after the intervention, the researchers also examined the physics problem solving performance of strategy group.

Control variables were prior physics achievement, strategy use, and prior problem solving performance scores. The independent variable was the intervention (the strategy and/or the traditional instruction). The dependent variables were post-test physics achievement, problem solving performance and strategy use.

C. Materials

The data of this study were collected by Physics Achievement Test (PAT), Problem-Solving Performance Test (PSPT) and Problem-Solving Strategies Scale (PSSS). These measuring instruments were explained in detail below.

Physics Achievement Test

In the study, in order to determine the students' physics achievement, Physics Achievement Test (PAT) developed by the researchers was used. The instrument contained 34 five-option, multiple-choice questions. First six sections from the book *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 2* by Serway and Beichner [2] were selected for this research. Major topics on test were respectively as follows: Electric Fields, Electric Potential, Gauss' Law, Capacitance and Dielectrics, Current and Resistance and Direct Current Circuits. The test was intended to determine the knowledges of the students related to the fundamental concepts, and their skills on recalling the relationships between the concepts, and applying them to the problems (see Appendix A). The Kuder-Richardson reliability of the test was found as .83.

Problem-Solving Performance Test

To assess student teachers' physics problem-solving performance, Problem-Solving Performance Test (PSPT) developed by the researchers was used before and after the intervention. This test included 5 multiple-step open-ended problems which were chosen from the books *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 2* by Serway and Beichner [2] and *Fundamentals of Physics* by Halliday, Resnick, and Walker [25]. The problems (see Appendix B) covered in this test were related to the PAT topics.

PSPT was scored according to the four-criterion Performance Assessment Rubric (see Appendix C) developed by the researchers, with a maximum score of 12 points for each problem, 60 points totally. Rubric criterions were designed to measure the quality of problem solving. The PSPT was independently scored by two researchers. The interrater agreement was calculated using the following formula recommended by Posner, Sampson, Ward, and Cheney [26]:

$$R = \frac{\text{number of agreements}}{\text{number of agreements} + \text{number of disagreements}} \times 100$$

Interrater agreement was found as 0.86 on average for the two performance measures.

Problem-Solving Strategies Scale

Students were administrated the Problem-Solving Strategies Scale (PSSS) developed by the researchers before and after the intervention (Cronbach's Alpha=0.82). The scale contained a 35 Likert-type items that provided information on each student's frequency of strategy use (see Appendix D). The items were designed to fit into the four categories of the problem solving process prescribed by Polya [9]. The scale was provided to the students with these options: Always, Frequently, Sometimes, Rarely, Never. Ratings ranged from a high score of 5 (Always) to a low score of 1 (Never) with respect to frequency of strategy use (maximum score=175 and minimum score=35).

The scale consisted of four sub-scales including "understanding", "planning", "solving", "checking and

Gamze Sezgin SELÇUK, Serap ÇALIŞKAN, & Mustafa EROL
evaluating”. A brief description of the sub-scales is provided
in Table I.

TABLE I. Descriptions of the PSSS sub-scales

<i>Sub-scales</i>	<i>Description</i>
Understanding	Rereading the problem. Paraphrasing the problem. Visualizing the problem. Imagining the problem (use concrete models). Determining the givens. Determining the desired quantities. Identifying the constraints. Determining the significant information. Making a simpler problem. Using the appropriate physics vocabulary.
Planning	Thinking aloud the solution of the problem. Creating alternative solution ways. Identifying the principles. Rules and laws about the problem. Dividing the problem into sub-problems. Determining the mathematical equations to solve the problem. looking for patterns
Solving	Selection of an appropriate solution. Using the rules. Principles and laws to obtain the desired quantity(ies). Using the mathematical equations to solve the problem. Using trial and error.
Checking and Evaluating	Checking the problem-solving pathway (algorithm). Checking the answer. Checking the magnitude and unit of the answer. evaluating the result

D. Intervention Materials

Turkish translated version of the book *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* by Serway and Beichner (5th edition) was used as a textbook. Approximately forty multistep physics problems were selected from this textbook for using in the strategy and traditional instruction sessions. During the instruction process, researcher scripts containing example problem solution (one per session, see Appendix E for an example) and problem solving work sheets developed by the researchers were used in the strategy group.

E. Procedure

The study was conducted during the spring term in Physics II course. The duration of the study was eight weeks from mid-February to mid-April. Pretest measures of physics achievement, problem-solving performance and problem-solving strategy use were collected in the first week of spring term. The students were asked to solve problems specifying their all ideas and behaviours during the problem-solving period in written expressions in details. The tests were not handed back or discussed and students' scores were not reported to them. During the intervention, the strategy group received explicit strategy plus traditional instruction in whole-class format for four lesson hours (45-minute) a week. Problem solving instruction composed of two training phases called strategy acquisition and strategy application used in the Montague & Bos' [27] study. The first phase of the

intervention involved the strategy acquisition training. Strategy acquisition training was implemented during the first week of this term at three 45-minute training sessions. Guidelines for strategy acquisition training include the following steps:

- 1) Direct explanation: explaining the problem solving process and strategies to raise student awareness of the purpose and rationale of strategy use,
- 2) Modelling: modelling of the strategies by the teacher/researcher (by thinking-aloud),
- 3) Independent Practice: to give students opportunities to practice the strategies which they are being taught,
- 4) Explicit Feedback: to provide frequent feedback to students on the quality and the strengths of their strategy using.

These steps were followed until a 100% criterion in attaining the knowledge of process and strategy use. Second phase of the intervention consisted of eight 2-lecture hour traditional instructions and eight 2-lecture hour strategy application practices. During the second phase of the intervention, firstly, the course content instruction was given by the researchers in the first two-hour and then strategy application practices were implemented in the next two-hour for each eight week within the regularly scheduled physics lectures. During practice sessions to facilitate strategy application, students were given a problem solving work sheet which contained five-multistep problems related with the course subjects. They were strongly encouraged to solve these problems by using strategies taught and complete the worksheets by hand-written. Students worked individually. This format allowed them to work at their own pace. The teacher did not provide assistance in this process. Problem solutions were presented on the board by the volunteer students thinking aloud within the last 15 minutes of every session.

All completed work sheets were collected and examined to determine the extent to which students effectively used the strategies taught. In the first ten minutes of the next lesson, students received feedback showing how they had responded and corrections if necessary.

Students in the control group received only traditional instruction at the same instructional period with each lesson following the same instructional sequence like students in the strategy group. Students in the control group were encouraged to solve the same problems individually during the problem solving hours (two 45-minute lessons per week) without explicit problem solving instruction. The amount of the time allotted for the problem solving tasks was equal for both groups.

The strategy and traditional instruction implemented by the researchers who had almost equal professional experiences and were subject-area experts. The investigators arbitrarily selected the treatment and control groups between them. Because of having large groups, the course content-instruction was made by the lecture method for each group. Two groups were equally conditioned in the progression of the instructional period. In the explicit strategy instruction, researchers used the stages from Polya's prescription for solving problems. Outline of the four-stage problem-solving

process and the strategies used in this study were presented in Table II.

TABLE II. Outline of the four-stage problem solving process.

<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Understanding the problem</i> <ul style="list-style-type: none"> • Read and reread the problem • Determine the givens and desired quantities • Identify the constraints in the problem • Determine the significant information in the problem • Restate the problem by different forms (paraphrase the problem, drawing figure(s), diagram or graph(s) about the problem) 2. <i>Devising a plan</i> <ul style="list-style-type: none"> • Identify the principles, rules and laws about the problem • Determine the appropriate mathematical equations to solve the problem 3. <i>Carrying out the plan</i> <ul style="list-style-type: none"> • Use the mathematical equations to solve the problem 4. <i>Looking back</i> <ul style="list-style-type: none"> • Checking the problem-solving pathway • Checking the magnitude and the unit of the answer

The posttest measures were administered two days after the completion of the training. The test methodology and the time allotted for the posttest measures were equal to those of the pretest measures.

F. Analysis of Data

The collected data from the PAT and PSSS were analyzed by SPSS, 10.0 versions. Frequency, percentage, mean (*M*), standard deviation (*SD*), t-test were employed. All statistical tests reported in this paper were conducted with a significance level of $\alpha = 0.05$. The obtained data from PSPT were analyzed by hand.

III. RESULTS

There are three sub-sections to the presentation of the results. These subsections answer the research questions.

A. The Effects of Problem-Solving Instruction on Physics Achievement

At the beginning and end of the study, both strategy and control groups were asked to respond to PAT to measure their physics achievement. Means and standard deviations of pretest and posttest scores were calculated. Independent samples t-tests were employed to compare the groups' mean pretest and posttest scores respectively (see Table III).

TABLE III. Comparisons between strategy and control groups for PAT pretest and posttest

Measure	Groups	n	M	SD	df	t-value	p-value
Pretest	Strategy Group	37	5.08	1.36	72	.18	.85
	Control Group	37	5.02	1.17			
Posttest	Strategy Group	37	23.29	5.18	72	4.50*	.00
	Control Group	37	17.48	5.88			

Note: *Statistically significant (significance defined as $p < .05$).

Both groups had failure on the pretest, with means 5.08 ($SD=1.36$) for the strategy group and 5.02 ($SD=1.17$) for the control group. Analysis showed that there was no statistically significant difference between the groups' prior physics achievement, $t(72)=0.18$, $p>.05$. For the scores on the posttest, data analysis showed that students in the strategy group scored significantly higher ($M=23.29$, $SD=5.18$) than those in the control group ($M=17.48$, $SD=5.88$), $t(72)=6.29$, $p<.05$. Effect size was computed using Cohen's *d* to measure the magnitude of the intervention effect. Cohen's effect size value ($d=1.04$) was very large according to Cohen's standards (1988). Paired samples t-tests were used to test the differences between the pretest and posttest achievement measures for each group (see Table IV).

TABLE IV. PAT pretest-posttest comparisons for the strategy and control groups

Groups	Pretest		Posttest		t-value	Cohen's d
	M	SD	M	SD		
Strategy Group (n=37)	5.08	1.36	23.29	5.18	19.72*	3.24
Control Group (n=37)	5.02	1.17	17.48	5.88	12.74*	2.09

Note: *Statistically significant (significance defined as $p < .05$).

Results indicated that the differences from pretest to posttest for both groups were statistically significant $t(36)=19.72$, $p<.05$; $t(36)=12.74$, $p<.05$; for strategy and control groups, respectively). The Cohen's *d* effect sizes (3.24 and 2.09 for strategy and control groups, respectively) pertaining to these differences were very large.

B. The Effects of Problem-Solving Instruction on Problem-Solving Performance

In order to investigate whether or not there was a significant difference in the problem solving performance between two groups before and after the intervention, means and standard deviations of pre and posttest scores were calculated. The mean pretest scores were very close to each other ($M=8.38$, $SD=2.70$; $M=8.22$, $SD=2.74$, for strategy and control groups, respectively). Thus, both groups were equal on the aspect of problem solving performance before the intervention. On the other hand, the mean posttest score of the strategy group ($M=44.70$, $SD=7.59$) was higher than that of the control

group ($M=34.81$, $SD=8.58$). t -tests were used to analyze the differences between the groups.

TABLE V. Comparisons between the strategy and control groups for PSPT pretest and posttest

Measure	Groups	n	M	SD	df	t-value	p-value
Pretest	Strategy Group	37	8.38	2.70	72	.25	.80
	Control Group	37	8.22	2.74			
Posttest	Strategy Group	37	44.70	7.59	72	5.25*	.00
	Control Group	37	34.81	8.58			

Note: *Statistically significant (significance defined as $p < .05$).

As shown from Table V, results for the pretest indicated no significant difference in performances between the groups, $t(72) = 0.25$, $p = .80$. But, on the posttest, there was statistically significant difference between the groups, which favoured the strategy group, $t(72)=5.25$, $p=.00$. Paired samples t -test was undertaken in order to test the differences between the pretest and posttest problem solving performance measures for the strategy and control groups.

TABLE VI. PSPT pretest-posttest comparisons for the strategy and control groups.

Groups	Pretest		Posttest		t-value	Cohen's d
	M	SD	M	SD		
Strategy Group (n=37)	8.38	2.70	44.70	7.59	33.80*	5.55
Control Group (n=37)	8.22	2.74	34.81	8.58	20.31*	3.34

Note: *Statistically significant (significance defined as $p < .05$).

The results are shown in Table VI. From Table VI, it can be seen that the improvements from pretest to posttest for both groups were statistically significant, ($t(36)=33.80$, $p<.05$; $t(36)=20.3$, $p<.05$; for strategy and control groups, respectively). The Cohen's d effect sizes (5.55 and 3.34 for strategy and control groups, respectively) pertaining to these improvements were very large.

C. The Effects of Problem-Solving Instruction on Strategy Use

In order to determine the groups' mean frequencies of problem solving strategy use, means and standard deviations were calculated for each sub-scales and total before and after the intervention. t -tests were conducted to determine if there were significant differences between the means of the groups. Results were presented in Table VII.

The pretest results for both groups indicated no significant differences in total strategy use and sub-scales including understanding, planning, solving, checking and evaluating. Thus two groups were equal in the aspect of strategy use before the intervention.

As shown from Table VII, on the posttest, students in the strategy group scored significantly higher in all sub-scales and totally than those in control group, ($t(72)=5.24$, $p<.05$; $t(72)=2.98$, $p<.05$; $t(72)=5.41$, $p<.05$; $t(72)=5.86$, $p<.05$; $t(72)=6.48$, $p<.05$; for understanding, planning, solving, checking and evaluating, and total, respectively).

Paired samples t -tests were used to test the differences between the pretest and posttest strategy measures for the strategy and control groups (see Table VIII). Results showed that the improvements from pretest to posttest for strategy group were statistically significant ($t(36)=14.55$, $p<.05$; $t(36)=9.90$, $p<.05$; $t(36)=9.23$, $p<.05$; $t(36)=7.78$, $p<.05$; $t(36)=20.55$, $p<.05$). Effect sizes for each sub-scale and total were computed. Using Cohen's [28] criteria, these values were very large, ranging from 1.28 to 3.38.

IV. DISCUSSION

The results of this study revealed that instruction of problem-solving strategies was effective for enhancing physics achievement, problem solving performance and strategy use. The first result of the study is consistent with the findings of problem solving instruction research in different subject matters at different grade level, from secondary to university.

Being effective of the strategy instruction on increasing the students' achievements on physics course supports various research findings which determine that the strategy instruction increased the success in different education levels and in different subject matters. For instance, in physics, in college level Foster [24]; and in first-year college level Ghavami [29] have found in their research which they did related to physics principles and application of them in college level that strategy instruction was effective on physics course achievement or conceptual understanding; and in eight grade on earth science achievement [30], and in adolescents with learning disabilities on mathematics [31].

In this study, both groups showed significant improvements from pretest to posttest. As the effect sizes of the instruction given to both groups were compared, it was seen that both instruction was effective on increasing the students' achievement; however, the effect size of the instruction applied on the strategy group (Cohen's $d=3.24$) was higher than the effect size of the instruction applied on the control group (Cohen's $d=2.09$). Although being the instruction applied on the control group also effective on increasing the students' achievement was an expected result of the research; in this context it may be commented that the students in the control group may have unconsciously developed their problem solving skills in order to pass the course and/or get better course grades. Because, during the research, it was observed that the students in the control group also participated voluntarily into problem solving process substantially, and they were eager to solve the problems, and more ambitious than those in the strategy group in passing the class.

And being the instruction applied on the strategy group more effective than the instruction applied on the control group is a natural result of the strategy instruction. In

classroom observations, it was observed that the students in strategy group reviewed the learning materials in order to solve the problems, asked questions to instructor who execute the lecture, and requested help. By means of the problem solving activities, active participating of the students to the problem solving instructions was obtained. Problem solving activities required a student to use previously learned knowledge to solve a problem and identify their own learning deficiencies; and the environments which can maintain them to realize their learning deficiencies were obtained. Hence, using an explicit problem-solving instruction can help students' achievement more than traditional problem solving exercises.

Having positive effect of the strategy instruction on problem solving performance supports various research findings which determine that the strategy instruction increased the performance in physics and in science (5, 6, 7, 19, 21, 23, 32, 33, 34, 35) had come to this conclusion that strategy instruction was effective on problem solving performance. In chemistry Sutherland [36]; Jeon, Huffman and Noh [37]; in mathematics, Montague and Bos [27]; Montague [38]; Montague, Warger and Morgan [39]; Schurter [40] obtained similar findings in their research.

As the problem solving sheets collected from the students at the end of the problem solving session were examined, it was determined that all of the students had participated into these activities, and as the research progressed, there was an improvement in usage of problem solving strategy. The subjects in the strategy group displayed minimal knowledge of problem solving strategies on the pre-intervention interviews, but showed considerable improvement in such knowledge in the following treatments.

In the study, both groups showed significant improvements from pre to post performance measures. Students who received strategy instruction were significantly more successful in the problem solving tasks ($p < .05$) than students in control group. As the effect sizes of the problem solving activities done in both groups were compared, it was seen that both instruction was effective on increasing performance; however, the effect size of the instruction applied on the strategy group (Cohen's $d=5.55$) was higher than the effect size of the instruction applied on the control group (Cohen's $d=3.34$). There were major differences between both groups in their performances on the PSPT.

These differences appeared in the number and the quality of problems each group solved. Strictly speaking, students in the strategy group performed better than those in the control group on all dimensions of problem solving process. This result of the study might be due to the fact that problem solving instruction increased students' awareness of their problem-solving process knowledge and skills. From that point, we can say that using a problem-solving instruction could help students' problem-solving performance more than traditional problem-solving tasks (exercises).

Having positive effect of the problem solving strategy instruction on strategy usage was an expected result of the research; and it has consistency with the problem solving performance result. As the problem solving literature was

reviewed, no research where problem solving strategy usage was investigated by scale in physics area had been encountered. The research done in physics area was focussed on to determining the problem solving skills by open-ended problems and coding rubrics. It was determined that scale usage was widespread only in following areas such as health sciences (medicine, nursing...), psychology, etc.

To sum up, the strategy group showed important gains in relation to physics achievement, problem solving performance and strategy use.

V. IMPLICATIONS

This study provides some evidences of the effects of using problem solving instruction on students' physics achievement, problem solving performance and strategy use. In comparison, explicit problem solving instruction was more effective in developing all aforementioned characteristics than traditional instruction. Explicit instruction fosters these student learning outcomes by engaging students actively in solving problems and becoming aware of every phases in this complex process. On the basis of findings, it is strongly recommended that physics instructors should use explicit problem solving instruction in their lessons to develop students' problem solving performance and the related outcomes such as course achievement. Further research is needed in different educational settings to determine the effects of strategy instruction on the affective learning outcomes (e.g. interests, attitudes and motivation).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are very grateful to Dokuz Eylul University for support of this study and each of the student teachers who participated in this study.

REFERENCES

- [1] Gagné, R. M., *The Conditions of Learning and Theory of Instruction* (Holt, Rinehart and Winston, New York, 1977), p. 1-20.
- [2] Serway, R. A. and Beichner, R. J., *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, 5th ed. (Saunders College Publishing, USA, 2000).
- [3] Woolfolk, A. E., *Educational Psychology*, 5th ed. (Pearson Education, New York, 1993).
- [4] Dhillon, A. S., *Individual differences within problem-solving strategies used in physics*, *Science Education* **82**, 379-405 (1998).
- [5] Heller, J. I. and Reif, F., *Prescribing effective human problem-solving processes: problem description in physics*, *Cognition and Instruction* **1**, 177-216 (1984).
- [6] Bolton, J. and Ross, S., *Developing students' physics problem-solving skill*, *Physics Education* **32**, 176-85 (1997).

- [7] Larkin, J. H. and Reif, F., *Understanding and teaching problem-solving in physics*, European Journal of Science Education **1**, 191-203 (1979).
- [8] Johnson, S. D., *Research on problem solving instruction: What works, what doesn't*, The Technology Teacher **53**, 27-29 (1994).
- [9] Polya, G., *How to solve it*, 2nd ed. (Princeton University Press, USA, 1957).
- [10] Mayer, R., *Thinking, problem solving, cognition* (Freeman, New York, 1983).
- [11] Chi, M., Feltovich, P. and Glaser, R., *Categorisation and representation of physics problems by experts and novices*, Cognitive Science **5**, 121-152 (1981).
- [12] de Jong, T. and Ferguson-Hessler, M. G. M., *Cognitive structures of good and poor novice problem solvers in physics*, Journal of Educational Psychology **78**, 279-288 (1986).
- [13] Larkin, J., McDermott, J., Simon, D. P. and Simon, H.A., *Expert and novice performance in solving physics problems*, Science **208**, 1335-1342 (1980).
- [14] Hardiman, P. T., Dufresne, R. J. and Mestre, J. P., *The relation between problem categorization and problem solving among novices and experts*, Memory & Cognition **17**, 627-638 (1989).
- [15] Veldhuis, G. H., *The use of cluster analysis in categorization of physics problems*, Science Education **74**, 105-118 (1990).
- [16] Priest, A. G. and Lindsay, R. O., *New light on novice-expert differences in physics problem-solving*, British Journal of Psychology **83**, 389-405 (1992).
- [17] Reif, F. and Heller, J., *Knowledge structure and problem solving in physics*, Educational Psychologist **17**, 102-127 (1982).
- [18] Zajchowski, R. and Martin, J., *Differences in the problem solving of stronger and weaker novices in physics: Knowledge, strategies, or knowledge structure?*, Journal of Research in Science Teaching **30**, 459-470 (1993).
- [19] Mestre, J. P., Dufresne, R. J., Gerace, W. J., Hardiman, P. T. and Touger, J. S., *Promoting skilled problem-solving behavior among beginning physics students*, Journal of Research in Science Teaching **30**, 303-317 (1993).
- [20] Gerace, W. J. and Beatty, I. D., *Teaching vs. learning: changing perspectives on problem solving in physics instruction*, 9th Common Conference of the Cyprus Physics Association and Greek Physics Association: Developments and Perspectives in Physics-New Technologies and Teaching of Science, Nicosia, Cyprus, February 4-6 2005.
- [21] Heller, P., Keith, R. and Anderson, S., *Teaching problem solving through cooperative grouping. Part 1: Group versus individual problem solving*, Am. J. Phys. **60**, 627-636 (1992).
- [22] Huffman, D., *Effect of problem solving instruction on high school students' problem solving performance and conceptual understanding of physics*, Journal of Research in Science Teaching **34**, 551-570 (1997).
- [23] van Weeren, J. H. P., de Mul, F. F. M., Peters, M. J., Kramers-Pals, H. and Roossink, H. J., *Teaching problem-solving in physics: a course in electromagnetism*, Am. J. Phys. **50**, 725-732 (1982).
- [24] Foster, T. M., "The development of students' problem-solving skill from instruction emphasizing qualitative problem-solving", Ph.D. dissertation, University of Minnesota, 2000, available in <http://proquest.umi.com/pqdweb?did=732235961&sid=2&Fmt=6&clientId=42977&RQT=309&VName=PQD>
- [25] Halliday, D., Resnick, R. and Walker, J., *Fundamentals of Physics*, 6th ed. (Wiley, New York, 2001).
- [26] Posner, K. L., Sampson, P. D., Ward, R. J. and Cheney, F. W., *Measuring interrater reliability among multiple raters: An example of methods for nominal data*, Statistics in Medicine **9**, 110-1115 (1990).
- [27] Montague, M. and Bos, C. S., *The effect of cognitive strategy training on verbal math problem solving performance of learning disabled adolescents*, Journal of Learning Disabilities **19**, 26-33 (1986).
- [28] Cohen, J., *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, 2nd ed. (NJ: Lawrence Earlbaum Associates Hillsdale, 1988).
- [29] Ghavami, P., *Cognitive aspects of problem solving and the achievement of first-year college physics students*, Ph.D. dissertation, University of Houston, 2003, available in <http://proquest.umi.com/pqdweb?did=765255801&sid=4&Fmt=6&clientId=42977&RQT=309&VName=PQD> .
- [30] Russell, J. M. and Chiapetta, E. L., *The effects of a problem solving strategy on the achievement of earth science students*, Journal of Research in Science Teaching **18**, 295-301 (1981).
- [31] Hutchinson, N. L., *Effects of cognitive strategy instruction on algebra problem solving of adolescents with learning disabilities*, Learning Disability Quarterly **16**, 34-63 (1993).
- [32] Reif, F., Larkin, J. H. and Brackett, G.C., *Teaching general learning and problem-solving skills*, Am. J. Phys. **44**, 212-217 (1976).
- [33] Wright, D. S. and Williams, C. D., *A wise strategy for introductory physics*, The Physics Teacher, 211-216. (1986).
- [34] Van Heuvelen, A., *Overview, case study physics*. Am. J. Phys. **59**, 898-907 (1991).
- [35] Dufresne, R., Gerace, W. J., Hardiman, P.T. Y. and Mestre, J. P., *Constraining novices to perform expert-like problem analyses: Effects on schema acquisition*, Journal of the Learning Sciences **2**, 307-331(1992).
- [36] Sutherland, L., *Developing problem solving expertise: The impact of instruction in a question analysis strategy*, Learning and Instruction **12**, 155-187 (2002).
- [37] Jeon, K., Huffman, D. and Noh, T., *The effects of thinking aloud pair problem solving on high school students' chemistry problem-solving performance and verbal interactions*, Journal of Chemical Education **82**, 1558-1564 (2005).
- [38] Montague, M., *The effects of cognitive and metacognitive strategy instruction on the mathematical problem solving of middle school students with learning disabilities*, Journal of Learning Disabilities **25**, 230-248 (1992).

[39] Montague, M., Warger, C. and Morgan, T. H., *Solve it! Strategy instruction to improve mathematical problem solving*, Learning Disabilities Research & Practice **15**, 110-116 (2000).

[40] Schurter, W. A., *Comprehension monitoring: An aid to mathematical problem solving*, Journal of Developmental Education **26**, 22-33 (2002).

TABLE VII. Comparisons between strategy and control groups for PSSS pretest and posttest.

Sub-scales	Measure	Groups	M	SD	df	t-value	p-value
Understanding	Pretest	SG	48.22	6.64	72	.93	.35
		CG	46.67	7.59			
	Posttest	SG	55.35	6.27	72	5.24*	.00
		CG	46.84	7.62			
Planning	Pretest	SG	45.54	7.64	72	1.21	.23
		CG	43.54	6.47			
	Posttest	SG	48.78	7.97	72	2.98*	.01
		CG	43.70	6.60			
Solving	Pretest	SG	11.27	2.46	72	0.75	.46
		CG	11.65	1.84			
	Posttest	SG	14.13	2.07	72	5.41*	.00
		CG	11.62	1.92			
Checking and Evaluating	Pretest	SG	9.02	1.74	72	0.54	.59
		CG	8.78	2.14			
	Posttest	SG	12.48	2.98	72	5.86*	.00
		CG	8.84	2.33			
Total	Pretest	SG	114.05	13.65	72	1.13	.26
		CG	110.65	12.20			
	Posttest	SG	130.75	13.72	72	6.48*	.00
		CG	111.00	12.47			

Note: SG=strategy group (n=37); CG=control group (n=37).

*Statistically significant (significance defined as $p < .05$).

TABLE VIII. PSSS pretest and posttest comparison for the strategy and control groups.

Sub-scales	Groups	Pretest		Posttest		t-value	Cohen's d
		M	SD	M	SD		
Understanding	SG (n=37)	48.22	6.64	55.35	6.27	14.55*	2.39
	CG (n=37)	46.67	7.59	46.84	7.62	1.23	.20
Planning	SG (n=37)	45.54	7.64	48.78	7.97	9.90*	1.63
	CG (n=37)	43.54	6.47	43.70	6.59	1.53	.25
Solving	SG (n=37)	11.27	2.46	14.13	2.07	9.23*	1.52
	CG (n=37)	11.65	1.84	11.62	1.92	.22	.03
Checking and Evaluating	SG (n=37)	9.02	1.74	12.48	2.98	7.78*	1.28
	CG (n=37)	8.78	2.14	8.84	2.33	.46	.07
Total	SG (n=37)	114.05	13.65	130.75	13.72	20.55*	3.38
	CG (n=37)	110.65	12.20	111.00	12.47	1.43	.24

Note: SG=strategy group; CG=control group.

*Statistically significant (significance defined as $p < .05$).

APPENDIX A

PHYSICS ACHIEVEMENT TEST (PAT)

Name, Surname:

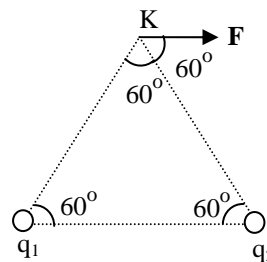
Student Number:

Dear Students,

You are given a physics achievement test consisting of 34 questions below. Each of the questions is followed by five suggested answers. Please mark your answers on the answer sheet given to you. Mark only one answer to each question. Please use "Table of Information" in the end of the test paper. Total time given for this test is 90 minutes. At the end

of the test, hand the test paper and answer sheet. Thank you for your participation. Good luck.

1.

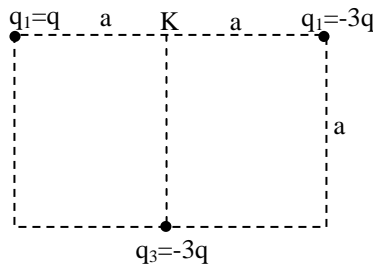


Which one/ones of the following expression(s) is(are) correct where the resultant force vector applied on the positive unit charge at point K by q_1 and q_2 charges was as in the figure above?

- I. q_1 has positive charge, q_2 has negative charge.
- II. Magnitude of the forces applied on the unit charge at point K by q_1 and q_2 charges are equal.
- III. $q_1 = 2q_2$

- (A) Only II (B) I and II (C) I and III
- (D) II and III (E) I, II and III

2. $q_1=q$, $q_2=-3q$ $q_3=-3q$ charges were placed on the rectangle whose edge lengths are a , and $2a$ as in the figure below. If the magnitude of the electric field of q_1 charge at point K is E , then, how many E is the total electric field magnitude at point K ?



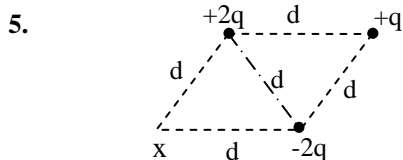
- (A) E (B) $2E$ (C) $3E$ (D) $4E$ (E) $5E$

3. Two plates having surface area of $20 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, and distance of $0.4 \times 10^{-3} \text{ m}$ between them are connected to a 120 V battery. How much charge flows to the plates in nC?

- (A) 5.31 (B) 4.12 (C) 2.30
- (D) 8.56 (E) 12

4. An air capacitor is connected to a battery, and charged, and after charged, it is disconnected from the battery, and then, connected to an ideal voltmeter. If a nonconductive material having higher dielectric constant is placed between its plates, then, which one/ones of the following(s) occur(s)?

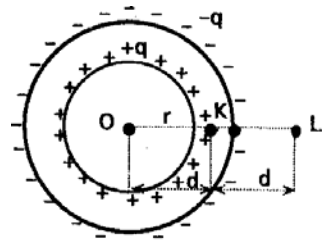
- I. Its capacity increases
 - II. Its energy increases
 - III. The potential difference between its ends increases
 - IV. Its charge does not change
- (A) Only III (B) Only II (C) Only II
 - (D) I and IV (E) I,II, III and IV



Which one of the followings does the potential at point x generated by the charges placed as in the figure above equal to?

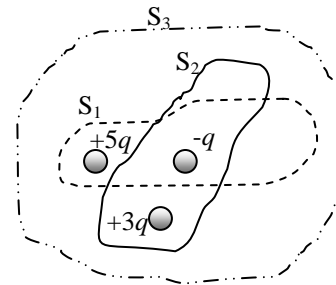
- (A) $\sqrt{3}k \frac{q}{d}$ (B) $2k \frac{q}{d\sqrt{3}}$ (C) $k \frac{q}{d\sqrt{3}}$
- (D) $k \frac{q}{d\sqrt{2}}$ (E) $k \frac{q}{2d}$

6. There is $+q$ charge at the inner sphere, and $-q$ charge at the outer sphere from the conductive empty spheres which were placed one inside the other in the figure on the right. If the magnitude of the electric field at point K is E , then, how many E is the electric field magnitude at point L?



- (A) 1/3 (B) 1/2 (C) 1 (D) 2 (E) 0

7.



Three charges were given as in the figure above. What are the electric flux values passing through the closed surfaces S_1 , S_2 and S_3 ?

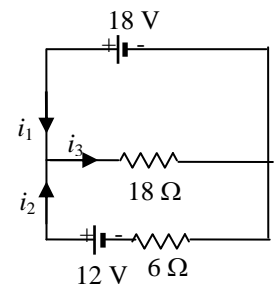
- | | <u>S1</u> | <u>S2</u> | <u>S3</u> |
|-----|------------------|------------------|-----------------|
| (A) | $4q/\epsilon_0$ | $2q/\epsilon_0$ | $7q/\epsilon_0$ |
| (B) | $-q/\epsilon_0$ | $3q/\epsilon_0$ | $8q/\epsilon_0$ |
| (C) | $5q/\epsilon_0$ | $3q/\epsilon_0$ | 0 |
| (D) | 0 | $-3q/\epsilon_0$ | $5/\epsilon_0$ |
| (E) | $-3q/\epsilon_0$ | 0 | $7q/\epsilon_0$ |

8. A point charge of $-8\mu\text{C}$ is located at the center of a sphere with a radius of 20 cm. What is the electric flux through the surface of this sphere in $\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}$?

- (A) 9×10^5 (B) 8×10^5 (C) 2×10^5
- (D) 10^5 (E) 6×10^5

9. Which of them is the concept defined as "Work done against electrical forces in order to bring a positive charge to a certain distance from infinity"?

- (A) Electrical potential energy
- (B) Electric potential
- (C) Electric force
- (D) Electric field



(E) Electric flux

10. Find i_1 , i_2 and i_3 currents at the circuit in the figure. (The internal resistances of the batteries are neglected)

- | | | | |
|-----|-------|-------|-------|
| | i_1 | i_2 | i_3 |
| (A) | 2 | -1 | -1 |
| (B) | 1 | 1 | 2 |
| (C) | 1 | 2 | 1 |
| (D) | 2 | -1 | 1 |
| (E) | -1 | 2 | 1 |

11. A circular surface with a radius of 30 cm is turned to a position where the maximum flux was obtained in a regular electric field. At this position, the flux is measured as $5.4 \times 10^4 \text{ N.m}^2/\text{C}$. How many N/C is the magnitude of the electric field?

- (A) 1.10^5 (B) 2.10^5 (C) 4.10^5
 (D) 6.10^5 (E) 8.10^5

12. A proton is ejected to a regular electric field zone having $\vec{E} = -5 \times 10^5 \vec{i} \text{ N/C}$ to +x direction. What is the acceleration of the proton (in terms of m/s^2)?

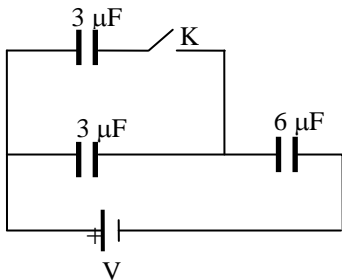
- (A) $\vec{a} = -5 \times 10^{13} \vec{i}$
 (B) $\vec{a} = -2 \times 10^{13} \vec{i}$
 (C) $\vec{a} = +5 \times 10^{13} \vec{i}$
 (D) $\vec{a} = +1 \times 10^{13} \vec{i}$
 (E) $\vec{a} = -2 \times 10^{13} \vec{i}$

13. Which one/ones of the followings are not the features of a conductor in an electrostatic equilibrium?

- I. The electric field in a conductor is zero.
- II. Excess charge is collected at the surface.
- III. Distribution of the charges is regular, and independent of the geometry of the conductor.
- IV. No charge exists within the conductor.

- (A) Only II (B) Only III (C) Only IV
 (D) I, II and III (E) III and IV

14.



If the charge of a capacitor with a capacity of $6 \mu\text{F}$ is q_1 when the switch K was open, and q_2 when the switch was closed, what is the ratio of q_1/q_2 ?

- (A) 3 (B) $3/2$ (C) $2/3$ (D) 2 (E) 1

15. Among the electrical charged spheres K, L, M, N; K attracts L, and repels N, and M attracts N. According to this, which ones of the following spheres have the same charge sign?

- (A) K and L, M and N
 (B) K and M, L and N
 (C) K and N, L and M
 (D) L, M, N
 (E) K, L, M

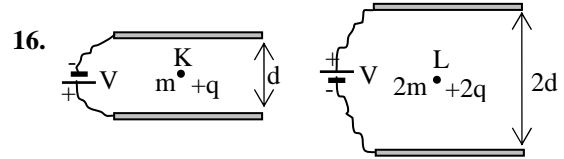


Figure 1

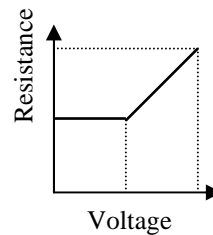
Figure 2

The resultant force affecting onto charged body K between the plates at the Figure 1 is zero.

According to this, how many mg is the resultant force affecting onto charged body L between the plates at the Figure 2? (g:gravitational acceleration)

- (A) 1 (B) 2 (C) 3 (D) 4 (E) 5

17.



Which one of them is the current-voltage graph of the conductor whose resistance-voltage graph is as in the figure above?

- (A) (B)
 (C) (D)
 (E)

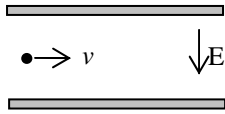
18. How many ohms is a resistance of a silver wire having a vertical cross section area of 0.4 mm^2 and a length of 40 m at

20 °C temperature? (at 20 °C, the resistivity of the silver is $\rho=1.6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$)

- (A) 4 (B) 10 (C) 1.6 (D) 1.2 (E) 50

19. The electric field between parallel plates are downwards. If a proton (p), an electron (e) and a neutron (n) were ejected with a horizontal velocity of V as in the figure, how do their orbits become?

(The gravitational effect will be neglected)



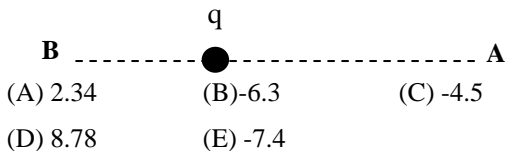
- (A)
- (B)
- (C)
- (D)
- (E)

20. Which one/ones of the following informations given for the electric field lines constituted by the standing charges are correct?

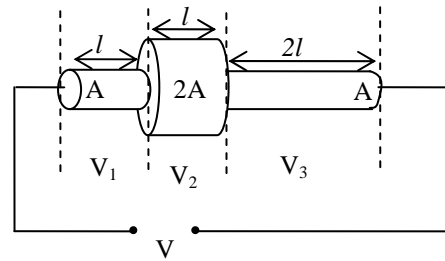
- I. The lines must begin on positive charges and terminate on negative charges.
 II. The electric field vector is tangent to the electric field line at each point.
 III. E is small when the field lines are close together and large when they are far apart.

- (A) Only I (B) Only II (C) Only III
 (D) I and II (E) II and III

21. The charge value of a point charge is $q=+1\mu C$. Let's think a point A 2 m far from the charge, and a point B 1m far from the charge at the opposite direction. How many kilovolts is the potential difference $V_A-V_B=?$



22.

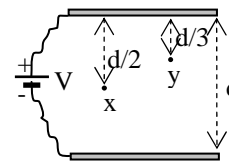


The lengths of the conductors made of same type of material and at the same temperature are $l, l, 2l$, and their cross sections are $A, 2A, A$ respectively.

How is the correlation among the voltages V_1, V_2, V_3 occurred on each conductor?

- (A) $V_1 = V_2 = V_3$ (B) $V_1 > V_2 = V_3$
 (C) $V_3 > V_2 > V_1$ (D) $V_3 > V_1 > V_2$
 (E) $V_3 = V_1 > V_2$

23.



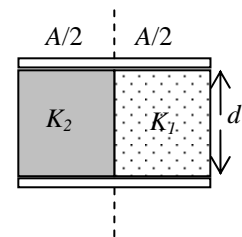
The electric field E between the plates at the figure above is regular. What is the difference between the potentials of the points x and y chosen between the plates ($V_y - V_x$)?

- (A) $-Ed/2$ (B) $-Ed/6$ (C) $Ed/3$
 (D) $-Ed/5$ (E) $Ed/4$

24. The total electric flux passing through a cylindric shape closed surface is $8.6 \times 10^4 \text{ N} \cdot m^2/C$. How many nC is the net electric charge within the cylinder?

- (A) 860 (B) 124.2 (C) 570
 (D) 213 (E) 761.1

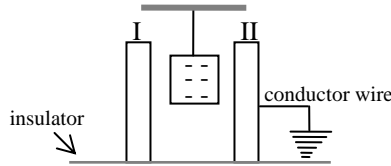
25. The space between the plates of the parallel plate capacitor in the figure on the right was totally filled with two different dielectric materials. What is the capacity of the system in terms of the given variables? (A is the area of the plates, d is the distance between the plates, and K_1 and K_2 are the dielectric constants of the materials)



- (A) $(K_1 + K_2) \epsilon_o \frac{A}{d}$
 (B) $\left(\frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} \right) \epsilon_o \frac{A}{2d}$
 (C) $(K_1 + K_2) \epsilon_o \frac{A}{2d}$
 (D) $\left(\frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} \right) \epsilon_o \frac{A}{d}$

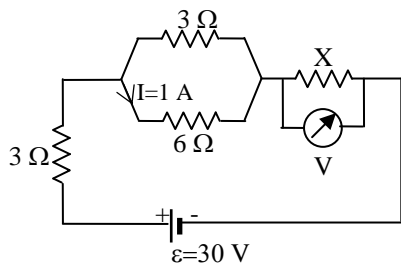
(E) $(K_1 + K_2)\epsilon_0 \frac{2A}{d}$

26. A negative (-) charged plate was hanged between the conductors I and II as in the figure below. If the conductive wire is cut first, and then the negative (-) charged plate is taken away, how would be the charge distribution on the conductors?



- (A)
- (B)
- (C)
- (D)
- (E)

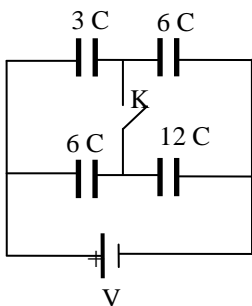
27.



According to the given values at the circuit in the figure above, how many volts does the voltmeter display? (The internal resistance of the generator was neglected.)

- (A) 5 (B) 10 (C) 15 (D) 12 (E) 20

28.

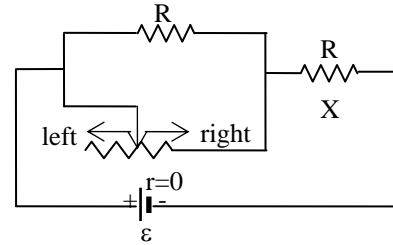


At the circuit in the figure above, when the switch K is open, equivalent capacity becomes C_1 , and when the switch K is closed, it becomes C_2 . (The capacities are given as the times of C)

According to this, what is the ratio of C_1 / C_2 ?

- (A) 1/3 (B) 1/2 (C) 1 (D) 2 (E) 3

29.



Which ones of the following processes should be performed in order to increase the current flowing through the resistance X at the circuit in the figure above?

- I. Pulling the rheostat handle to the left
- II. Pulling the rheostat handle to the right
- III. Connecting a resistance R parallel to the resistance X

- (A) Only I (B) Only II (C) Only III
(D) I and III (E) II and III

30.

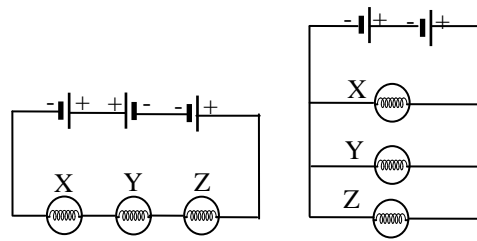


Figure 1

Figure 2

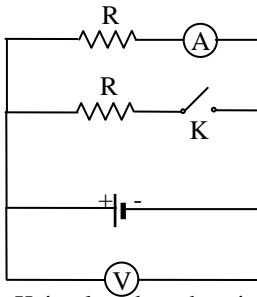
When the circuit formed by the identical generators at Figure 1 was connected as in the Figure 2, how do the brightnesses of the lamps change?

- (A) X and Y lighten brighter, Z does not change
- (B) The brightnesses of X, Y and Z do not change
- (C) The brightnesses of X, Y and Z increase
- (D) The brightnesses of X, Y and Z decrease
- (E) Y and Z lighten brighter, X does not change

31. An electric heater is made of a nickel-chrome wire having a total resistance of 10Ω , and 110 V potential difference was applied between its ends. How many watts does the electric heater consume?

- (A) 100 (B) 1500 (C) 1210
(D) 250 (E) 600

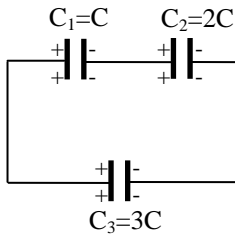
32.



If the switch K is closed at the circuit in the figure above formed by the identical resistances and generator whose internal resistance was neglected; how do the values displayed by the amperemeter A, and voltmeter V change as compared to the previous ones?

- (A) A decreases, V does not change
- (B) A increases, V does not change
- (C) A and V increase
- (D) A and V do not change
- (E) A and V decrease

33.

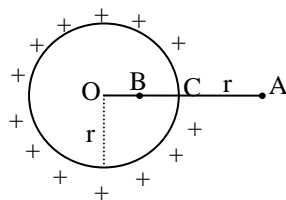


Which ones of the followings are correct for the charged capacitors at the figure above?

- I. $V_1 + V_2 = V_3$
- II. $q_1 = q_2 < q_3$
- III. $V_2 < V_1 < V_3$

- (A) Only I
- (B) Only II
- (C) I and II
- (D) II and III
- (E) I, II and III

34. In the figure on the right, a charged conductor sphere is given. What is the ratio of the potential differences at point A and B (V_A/V_B)?



($|OB| = |BC|$)

- (A) 1
- (B) 1/2
- (C) 1/4
- (D) 1/8
- (E) 1/6

TABLE OF INFORMATION

Coulomb's constant $k=9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$
 Permittivity of free space $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$
 $1\mu=10^{-6}$
 $1n=10^{-9}$

APPENDIX B

Name, Surname:

Student Number:

Dear Students,

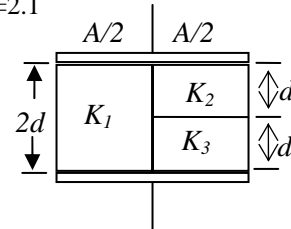
This test was prepared to determine your-our valuable students' - problem solving performances. For the validity of this research, while solving the problems, specifying your all ideas and behaviours during the problem-solving period in written expressions in details has a special importance. Thank you, Good luck.

PROBLEM SOLVING PERFORMANCE TEST

Question 1: An electron moving parallel to the x axis has an initial velocity of $3.7 \times 10^6 \text{ m/s}$ at the origin. The velocity of the electron is reduced to $1.5 \times 10^5 \text{ m/s}$ at the point $x=2 \text{ cm}$. Calculate the potential difference between the origin and the point $x=2 \text{ cm}$. Which point is the higher potential?

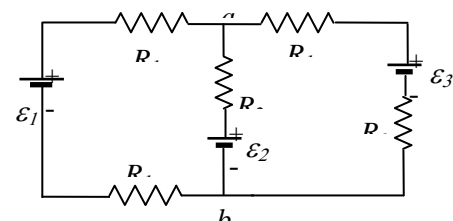
Question 2: Two charged concentric spheres have radii of 10.0 and 15.0 cm. The charge on the inner sphere is $4.00 \times 10^{-8} \text{ C}$ and that on the outer sphere is $2.00 \times 10^{-8} \text{ C}$. Find the electric field (a) at $r=12.0 \text{ cm}$ and (b) at $r=20.0 \text{ cm}$.

Question 3: A parallel-plate capacitor is constructed using three different dielectric materials, as shown in figure below. (a) Find the expression for the capacitance of the device in terms of the plate area A and d , K_1 , K_2 and K_3 . (b) Calculate the capacitance using the values $A=1 \text{ cm}^2$, $d=2 \text{ mm}$, $K_1=4.9$, $K_2=5.6$, and $K_3=2.1$



Question 4: A certain toaster has a heating element made of nichrome resistance wire. When first connected to a 120-V voltage source (and the wire is at a temperature of 20°C) the initial current is 1.8 A, but the current begins to decrease as the resistive element heats up. When the toaster has reached its final operating temperature, the current has dropped to 1.53 A. (a) Find the power the toaster consumes when it is at its operating temperature. (b) What is the final temperature of the heating element?

Question 5: Calculate the current through each ideal battery in figure below. Assume that $R_1=1.0 \Omega$, $R_2=2.0 \Omega$, and $\epsilon_1=2.0 \text{ V}$, $\epsilon_2=\epsilon_3=4.0 \text{ V}$. (b) Calculate V_a-V_b



APPENDIX C

PERFORMANCE ASSESSMENT RUBRIC

I. UNDERSTANDING THE PROBLEM

1. No understanding of the problem. (0 point)
2. Partial understanding of the problem. (1 point)
3. Adequate understanding of the problem. (2 points)
4. Superior understanding of the problem. (3 points)

II. PROBLEM SOLVING PATHWAY (ALGORITHM)

1. No suitable problem solving pathway. (0 point)
2. Inaccurate problem solving pathway. (1 point)
3. Adequate problem solving pathway. (2 points)
4. Superior problem solving pathway. (3 points)

III. CALCULATIONS

1. No calculations. (0 point)
2. Inaccurate calculations. (1 point)
3. Minor errors. (2 points)
4. Calculations are complete and right. (3 points)

IV. FINDING AND REPORTING OF SOLUTIONS

1. No response. (0 point)
2. Inaccurate response. (1 point)
3. Adequate reporting. (2 points)
4. Superior reporting. (3 points)

APPENDIX D

PROBLEM SOLVING STRATEGIES SCALE (PSSS)

Dear Students,

This scale was prepared to determine the strategies which you used while solving the physics problems, and how frequently you used them. For the validity of this research, specifying your actual ideas has a special importance. For each item below, please mark how frequently you did each activity by putting a check mark into the appropriate box. Thank you for participating in this study.

How frequently you do each activity below while solving physics problems?	Always	Frequently	Sometimes	Rarely	Never
1. I reread the problem.					
2. I try to comprehend the problem.					
3. I think of concept/concepts about the problem.					
4. I express the problem by my own sentences.					
5. I write the given variables about the problem.					
6. I express the problem by figures and diagrams.					

7. I review the rules and principles about the problem.					
8. I think of whether I encountered a similar problem before.					
9. I chart the given variables about the problem.					
10. I write the asked variables about the problem.					
11. I use the trial and error method in order to find a solution.					
12. I concrete abstract concepts about the problem.					
13. I think aloud the problem.					
14. I find possible solutions for the problem.					
15. I estimate the solution of the problem.					
16. I review the solution of the problem.					
17. I check the operation steps used in the solution of the problem.					
18. I divide the problems into sub problems.					
19. I write the remembered formulas related to the problem.					
20. I think of whether the answer given to the problem was logical.					
21. I table the given variables in the problem.					
22. I apply the first remembered solution.					
23. I visualize the problem by drawing.					
24. I think of the correlation among the given variables in the problem.					
25. I try different ways for the solution.					
26. I visualize the problem.					
27. I think of what about the problem was.					
28. I think of the different aspects of the problem from the similar problems.					
29. I categorize the information in the problem.					
30. I define the problem in more simple language.					
31. I underly the important points in the problem.					
32. I focus onto the solution of the problem.					
33. I interpret the results obtained from the problem.					
34. I think of the limitations in the problem.					
35. I plan for the solution.					

APPENDIX E

EXAMPLE PROBLEM SOLUTION

Dear Students,

As steps during the solving of each problem, please follow scripted directions as below.

Problem: Suppose that you wish to fabricate a uniform wire out of 1.00 g of copper. If the wire is to have a resistance of 0,500 Ω , and if all of the copper is to be used, what will be a) the length and b) the diameter of this wire? ($d_{Cu} = 8,93 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{Cu} = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$) (Serway & Beichner, 2000, p. 863, problem 17)

STAGE 1: Understanding the problem

- Read and reread the problem carefully
- Determine the givens and desired quantities
 $m = 1 \text{ g}$, $R = 0,500 \Omega$ $L = ?$ $2r = ?$
- Identify the constraints in the problem
 Copper wire is ohmic substance
- Determine the significant information in the problem
 All of the copper is to be used
- Restate the problem by different forms (paraphrase the problem, drawing figure(s), diagram or graph(s) about the problem)

I have copper wire out of 1.00 g. If the wire is to have a resistance of 0,500 Ω , and if all of the copper is to be used, what will be the length and the diameter of it?

STAGE 2: Devising a plan

- Identify the principles, rules and laws about the problem
 Physics principles: Mass and density relation and changing of resistance

Formulas: *Mass and density relation: $m = d \cdot V$

*changing of resistance: $R = \rho \cdot \frac{L}{A}$

- Determine the appropriate mathematical equations to solve the problem

$$m = d \cdot V = d \cdot A \cdot L \quad A = \frac{m}{dL} \quad \text{and} \quad R = \frac{\rho L}{A} \Rightarrow$$

$$R = \frac{\rho L}{\left(\frac{m}{dL}\right)} = \frac{\rho d L^2}{m} \rightarrow$$

$$\text{finally formul for desired first quantity } L = \sqrt{\frac{mR}{\rho d}}$$

And finally formul for desired second quantity

$$\rightarrow V = \frac{m}{d} \Rightarrow \pi r^2 L = \frac{m}{d} \text{ hence } r = \sqrt{\frac{m}{\pi d L}}$$

STAGE 3: Carrying out the plan

- Use the mathematical equations to solve the problem

$$L = \sqrt{\frac{mR}{\rho d}} = \sqrt{\frac{(1 \cdot 10^{-3} \text{ kg}) \cdot (0,5 \Omega)}{(1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m) \cdot (8,93 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3)}} = 1,81 \text{ m}$$

$$r = \sqrt{\frac{m}{\pi d L}} = \sqrt{\frac{(1 \cdot 10^{-3} \text{ kg})}{3,14 \cdot (8,93 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3) \cdot (1,81 \text{ m})}} = 0,00014 \text{ m} = 0,14 \text{ mm} \Rightarrow$$

diameter of wire is $2r = 0,28 \text{ mm}$

STAGE 4: Looking back

- Checking the problem-solving pathway
- Checking the magnitude and the unit of the answer

Measurement of the conceptual change produced in pre-school and elementary teachers based on MECIBA training methodology



Carla Hernández S., Ricardo Buzzo G., Rodrigo Rivera C.

Instituto de Física, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Av. Brasil 2950, Valparaíso, Chile.

E-mail: carla.hernandez.s@mail.ucv.cl, rbuzzo@ucv.cl, rodrigo.rivera@ucv.cl

(Received 5 May 2008; accepted 30 June 2008)

Abstract

In this work we intend to measure the conceptual change produced in a group post-graduate program called "MECIBA" (*Mejoramiento de las Ciencias en la Enseñanza Básica / Improving Science in Elementary Teaching*), whose goal it is to enhance the quality of science teaching. To achieve this goal we designed and applied tests and interviews aimed to know more about the pre-conceptions that the participants had in two areas of Physics that were covered during the workshops: "Moving Objects" and "Nature of Light". With the results obtained on the pre and post tests, and the interviews made before each workshop to increase our knowledge of the preconceptions of the participants, we could observe an important improvement on the replacement of the preconceptions by formal conceptions, and also in the capacity to apply them to different situations, all of which are exposed through quantitative data.

Key words: Conceptual Change, Preconceptions in Physics, Teacher Training.

Resumen

En este trabajo pretendemos medir el cambio conceptual producido en un grupo de profesores de educación básica y prebásica como fruto de su participación en un programa de post título que busca elevar la calidad de la docencia en ciencias, "MECIBA" (*Mejoramiento de las Ciencias en la Enseñanza Básica*). Para lograr nuestro objetivo diseñamos y aplicamos entrevistas y tests dirigidos a conocer las preconcepciones que los participantes poseían respecto a dos áreas de la Física a tratar en los talleres: "Movimiento de los objetos" y "Naturaleza de la luz". A partir de los resultados obtenidos en los pre y post-tests, así como también en las entrevistas realizadas antes de cada taller, para ampliar nuestro conocimiento sobre los preconceptos de los participantes, pudimos apreciar un gran avance en el reemplazo de preconcepciones por concepciones formales, así como también en la capacidad de aplicarlas a distintas situaciones, lo cual queda expuesto a través de datos cuantitativos.

Palabras clave: Cambio conceptual, Preconcepciones en Física, Formación de profesores.

PACS: 01.40.-d, 01.40.Fk, 01.40.gb, 01.40.J-, 01.50.-i

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Just a few years ago in our country, the teaching of science in elementary and middle schools was reduced to the development of subjects that mainly belonged to Biology. This is a result of the fact that almost all programs of elementary and pre-school teaching preparation only have Biology courses, and teachers do not receive preparation in Physics and Chemistry.

Nevertheless, since 1996 the Educational Reform that has been put into practice in our country includes a new curriculum that includes specific contents of Physics and Chemistry, which, according to the information gathered, cannot be implemented because elementary and middle school teachers are not sufficiently prepared to do so. In

general terms, they do not have a good management of the content that must be taught and need to update their didactics to teach science from an inquiry-based approach. It is necessary to face up to the challenge of improving the knowledge and methodologies used nowadays by elementary and middle school teachers in order to bring the Educational Reform to the classrooms and to Chilean students.

The MECIBA project responds to the necessity of offering professional development programs of high quality for teachers. It fosters a better student learning through the development of a curriculum that seeks to improve the capacities of the elementary and pre-school teachers to teach science. This curriculum has been modeled based on the Operation Primary Physical Sciences (OPPS) program [1],

developed in the Physics and Astronomy Department of the Louisiana State University, United States of America, to prepare leader teachers who can offer training to their colleagues. The professional development between colleagues is an innovating course of action taken in Chile. The MECIBA project develops a line of investigation to examine its impact and enhance the knowledge about its characteristics for its effective use.

Within this framework, it will be determined if the above-mentioned curriculum can produce a conceptual change in the 21 participants in the program in accordance with the new demands of our Educational Reform, always considering that the knowledge that our teachers have corresponds only to preconceptions built due to the early and frequent interactions between the individual and its environment. It is for this reason that in Physics, unlike in other subject matters, we can find more preconceptions, because these are the first ones built by the individuals.

II. THEORETICAL FRAMEWORK

Nowadays, diverse constructivist models agree on different aspects: learners build meanings and do not reproduce exactly what it is taught to them; to understand something presumes the establishment of relationships with other elements; all learning depends on previous knowledge (Resnick in [2] and references therein). All these aspects point to meaningful learning and to achieve this, according to Ausubel [3], the previous ideas are crucial. When learning is meaningful, learners are able to relate the new knowledge with the one they already have, achieving a new logical, meaningful connection between them.

But, how difficult it is to change a preconception? Different researches [4, 5, 6] have shown that an important reason for the persistence of the conceptual mistakes is the fact that in the teaching-learning process the previous conceptual structures of students are not considered. The importance of using the preconceptions as a starting point is one of the most important aspects of the constructivist conception of knowledge.

This is the reason why we are basing our work on the model of conceptual change of Strike and Posner [7], which seeks a change on the assimilation (addition of new information to the previously existing schemas) and then on the accommodation (modification of the existing schemas) of the new concepts acquired, using motivation and causing a conflict between the previous ideas and the new ones. Following this model, when the subject faces a problematic situation, he or she looks for a solution on the basis of his preconceptions. The inability to find a solution results in dissatisfaction with his existing ideas. Therefore, he or she then tries to find an answer in the new acquired concepts (alternative conceptions) that turn out to be more adequate and more useful. Since scientific conceptions differ greatly from the individual's preconceptions, they cannot coexist. Otherwise, the expected conceptual change cannot be achieved.

To achieve the goal set by the above-mentioned model, the teachers participating in the MECIBA program worked on the basis of the Learning Cycle. This inquiry-based methodology is founded on the "Learning from Experience" model proposed by David Kolb [8] and on Piaget's theory ([9] and the references therein). According to Piaget, learning occurs by means of two complementary processes: the Assimilation and the Accommodation of knowledge. Individuals assimilate a new knowledge when they face it, experience it and investigate it, that is, when they try to appropriate it. Accommodation of the new knowledge takes place when they modify their preconceptions or schemas depending on that new knowledge. It is through these two processes and the corresponding adaptation of the individual that a cognitive restructuring of the learning process is achieved.

Kolb's learning model can be applied to both children and adults and it has 4 stages:

- **Concrete Experience:** participants confront a specific situation and try to give an explanation of the phenomenon on the basis of their preconceptions. In this stage we can infer which the erroneous preconceptions.
- **Observation and Processing:** in this stage the participants develop an inquiry attitude. They work in groups, executing experimental activities from which questions and ideas come up to try to explain or interpret the observed phenomenon.
- **Conceptualization and Generalization:** In this stage, through new experiences, new concepts or definitions, related to the activities they performed on the previous stage, are given to the participants. These activities lead the participants to question their preconceptions and a cognitive conflict occurs. Through the formulation of certain questions the participants are then guided through a reflection process to clarify their misconceptions.
- **Application:** Finally, participants have to face up to new activities where they have to apply the new ideas and scientific concepts acquired, clarify their difficulties and establish a firm command of the subject taught.

III. METHODOLOGY

There are many instruments used to measure alternative conceptions and the subsequent conceptual change. We have chosen to work with two kinds of strategies: interviews and tests. In both cases the general objective was to gain knowledge, from another point of view, of the participants' preconceptions and the way in which the participants applied those preconceptions in practice when confronting a given problematic situation.

- **Interviews.** Due to time constraints the interviews were applied to a sample of participating teachers, which was selected using criteria such as age, gender, teaching experience, speciality and teaching level to obtain a wide spread of teaching environments and variables. The interview included questions that addressed the beliefs held by teachers related to a specific situation. But as the

interview progresses, the questions lead the teachers to a contradiction, which means that they have 2 or more answers to explain the same phenomenon; their preconceptions are in conflict.

• **Test.** Tests were designed and administered to all participants 15 days before the workshop and immediately after each workshop. In these tests the questions were selected such that participants could give coherent answers according to their preconceptions.

In the “Moving Objects” unit, the test had 12 questions (see Appendix 1).

The results obtained on the pre-test showed an average of 21% of correct answers among the 21 participating teachers. The pre-test application identified the teacher’s preconceptions when they first came to the workshop. Similar results have been obtained in [10] and [11] in studies of high school students’ preconceptions. The most frequent preconceptions we found are shown in Table I.

IV. RESULTS

The tables presented below show the number of participants and also the percentage of them that manifested in their answers the existence of each listed preconception listed.

TABLE I. Teacher’s preconceptions in the “Moving Objects” unit according to the pretests.

Preconception	Total	%
Speed, velocity and acceleration are the same.	21	100
When 2 bodies of different masses interact with each other, the force exerted by the more massive body is greater than the force exerted by the less massive body.	15	71
In a free fall situation, the acceleration depends on the mass of the bodies.	10	47
There is no gravity in a vacuum.	5	23

The interviews on this unit (see Appendix 2) were made to 12 teachers and included 8 questions. The results obtained reaffirmed the answers on the pre-test. Some of these answers were:

TABLE II. Teacher’s preconceptions in the “Moving Objects” unit according to the interviews.

Preconception	Total	%
When throwing a ball vertically, the “force of the hand” acts on it, which disappears when the ball reaches its maximum height.	11	92
There is no gravity in a void.	9	75
Velocity is the same as acceleration.	6	50

Likewise, in the “Nature of Light” unit, an 11 question pre-test (see Appendix 3) was administered to 21 teachers, showing an average of 33 % of correct answers.

TABLE III. Teacher’s preconceptions in the “Nature of light” unit, according to the pretests.

Preconception	Total	%
Inserting a plate with a little hole between a source of light (bulb) and a screen will show a spot of light that corresponds to the beam of light that goes through the hole.	13	62
When a ray of light hits a reflecting surface, the reflected ray goes in any direction.	8	38
The shadow is created because the object “cuts off” (interrupts) the rays of light coming from the source.	13	62
When a ray of light hits a reflecting surface, the reflected ray goes in any direction.	6	29
When a white and a black surface are exposed for a long time to a source of light, the black surface is more heated because it “attracts” the light, and the white surface “rejects” it.	6	29
Reflection is the same as refraction.	6	29

In the same unit a 6 question interview (see Appendix 4) was administered to 12 teachers. The most common preconceptions were:

TABLE IV. Teacher’s preconceptions in the “Nature of light” unit, according to the interviews.

Preconception	Total	%
We look because we have eyes and we can see.	11	92
Light does not travel in a straight line.	6	50

The results obtained on the interviews and on the pre-tests helped us to identify the subject matter that needed to be reinforced during the workshops. The results of the post-test, applied after each workshop, showed great improvement. The averages of correct answers between the 21 participants in each unit are shown in the following chart:

TABLE V. Post-test results in each unit after MECIBA workshops.

Unit	% Correct Answers	
	Pre-Test	Post-Test
Moving Objects	21	63
Nature of Light	33	78

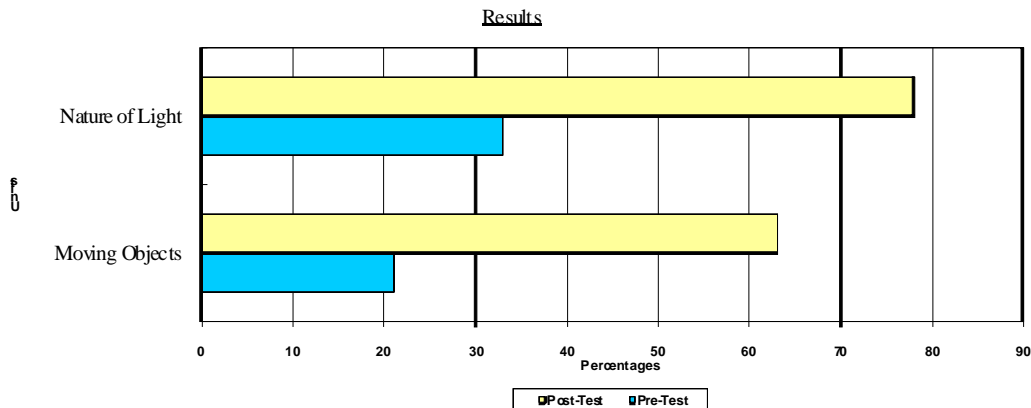


FIGURE 1. Average pre-test and post-test results in each unit.

Among the conceptual mistakes that persisted after each workshop we found:

1. Unit: “Moving Objects”

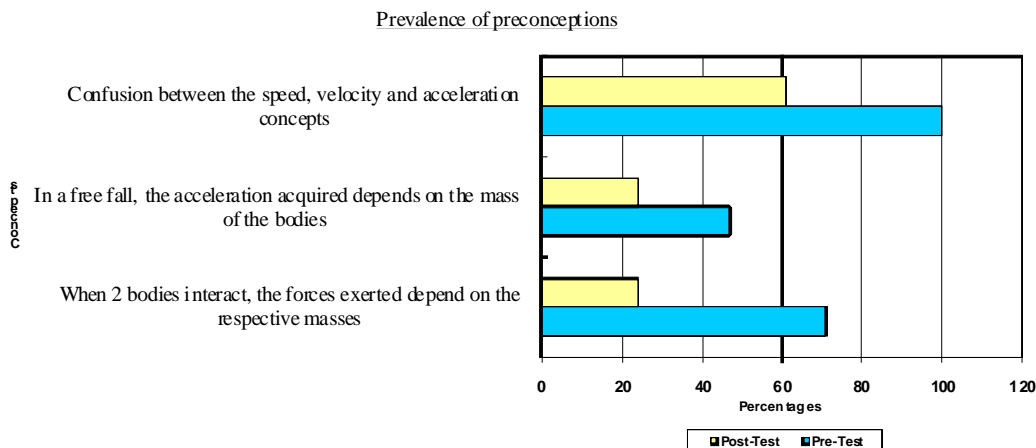


FIGURE 2. Persistent preconceptions in the “Moving Objects” unit after the MECIBA workshops.

2. Unit: "Nature of Light"

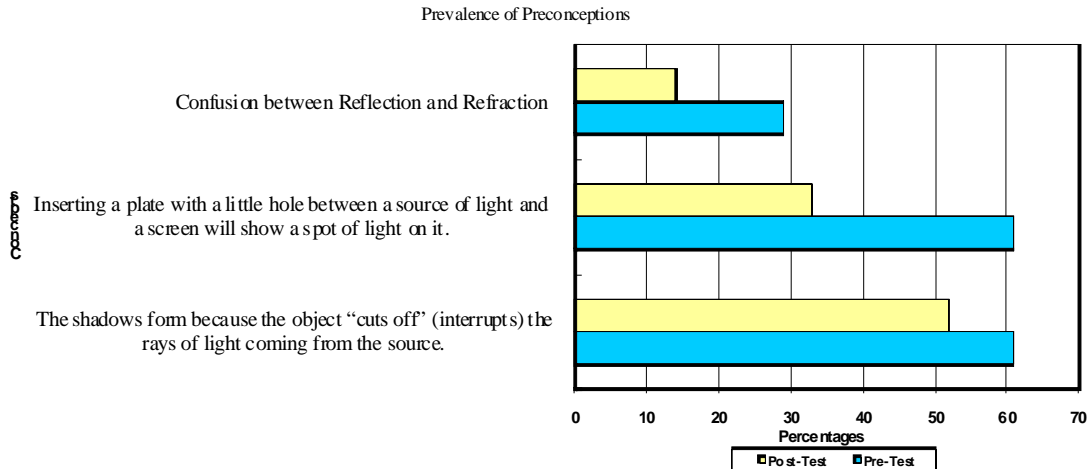


FIGURE 3. Persistent preconceptions in the "Nature of Light" unit after the MECIBA workshops.

V. CONCLUSIONS

The use of interviews as a tool to know the teachers' preconceptions gave us the possibility to manage a greater number of variables that could affect their answers, for example, the fact that the participating teachers are aware of their lack of knowledge and preparation.

The good results obtained on the post-test give us evidence that the methodology used for achieving a change in the teachers' cognitive structure is effective, although the fact that certain conceptual mistakes persisted after the workshops indicates that there may be non-considered factors in their development. For instance, the length of the workshops may not be long enough if we consider that every person learns with a different rhythm, and the participants' fear of facing up something new and somewhat unknown impeded their ability to state all their doubts and questions related to the subjects taught.

Besides, we believe that it is very important not to just create a conflict and dissatisfaction between ideas, but there must also exist a change in the individual's attitude about the ways he or she faces up to the new situations that rise. The person must really assimilate the new concepts to know how to apply them correctly in the future.

ACKNOWLEDGMENTS

We thanks to:

- "MECIBA" Project FONDEF DO2I1035.
- Professor Gloria Contreras P. Education Institute, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Dr. David Laroze N. Physics Institute, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

REFERENCIAS

[1] OPPS guides, <http://www.phys.lsu.edu/dept/opps/>, Visited on August 2004.

[2] Gil, D. y De Guzmán, M., *Enseñanza de las Ciencias y la Matemática*, (Editorial Popular, España, 1993).

[3] Ausubel, D. P., Novak, J. D. y Hanesian, H., *Psicología Educativa. Un Punto de Vista Cognoscitivo. Spanish translation*, (Trillas, México, 1983).

[4] Brincones, I., *La construcción del conocimiento. Aplicaciones para la enseñanza de la Física*, (Ediciones de la Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 1995).

[5] Carretero, M., *Construir y enseñar. Las Ciencias Experimentales*, (Editorial Aique, Buenos Aires, 1996).

[6] Prosser, M., Trigwell, K. and Taylor, P., *A phenomenographic study of academics' conceptions of science learning and teaching*, *Learning and Instruction* **4**, 217-231 (1994).

[7] Strike, K. A. and Posner, G. J., A revisionist theory of conceptual change. In R. A. Duschl y R. J. Hamilton (Eds.), *Philosophy of Science, Cognitive Psychology and Educational Theory and Practice* (pp. 147-176), (State University of New York Press., Albany, New York, 1992).

[8] Kolb, D. A., *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*, (Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, NJ, 1984).

[9] Rodríguez, M., *Conocimiento previo y Cambio conceptual*, (Editorial Aique, Buenos Aires, 1999).

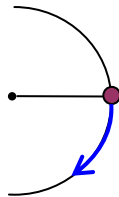
[10] Fetherstonhaugh, T. and Treagust, D. F., *Students' understanding of light and its properties: Teaching to engender conceptual change*, *Science Education* **76**, 653-672 (1992).

[11] Twigger, D., Byard, M., Driver, R., Draper, S., Hartley, R., Hennessy, S., Mohamed, R., O'Malley, C. E., O'Shea, T. and Scanlon, E., *The conception of force and motion of students aged between 10 and 15 years: an interview study designed to guide instruction*, *International Journal of Sciences Education* **16**, 215-229 (1994).

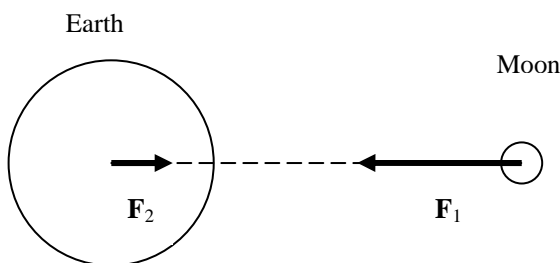
APPENDIX 1

Test Module 1: Moving Objects.

1. Light travels in a straight line with a constant speed of 300.000 km/s. What is its acceleration?
2. Two objects move on a straight line: a car, whose speed increases from 50 km/h to 60 km/h in certain time interval, and a bicycle, which starts at rest and reaches a speed of 10 km/h in the same time interval than the car. Which object has a greater acceleration?
3. If the speedometer of a car shows a constant speed of 40 km/h, is it correct to state that the velocity of the car is constant?
4. The speedometer of a car that travels north shows 60 km/h. The car moves beside another car that travels south at 60 km/h. Do the cars travel at the same speed? Do they travel with the same velocity?
5. A heavy book and a sheet of paper are released simultaneously from the same height.
 - a) If they were to fall through air, which object would arrive first to the ground?
 - b) If they were to fall in vacuum, which object would arrive first to the ground?
6. Two bodies, one heavier than the other, fall freely near the surface of the Earth.
 - a) Which is the value of the free fall acceleration for the heavier object? and for the lighter object?
 - b) What is the name given to the acceleration of a body that falls freely?
7. A ball tied by a string to a fixed axis performs uniform circular motion.
 - a) Draw and specify all the forces that act on the ball.



8. A small car collides with a large, heavy loaded truck. During this interaction, is the force exerted by the car on the truck larger than, equal to, or less than the force exerted by the truck on the car?
9. It is well known that the Earth exerts an attractive force on the moon. Therefore, according to Newton's third Law, the moon also exerts a force on the Earth. The figure below was found in the internet. It shows these interaction forces between the Earth and the moon. However, there is a serious mistake in this figure. Explain in what consists this error.



10. Can a body in equilibrium be in motion? If possible, what kind of motion would it be?
11. Some people can quickly remove the tablecloth of a fully set table in such a way that the things on the table remain in their place. How would you explain this magician trick?
12. A man stands in a moving bus. If the bus conductor slows down abruptly, the man is "pushed" towards the front of the bus. How can you explain this fact?

APPENDIX 2

Interview Module 1: "Moving Objects"

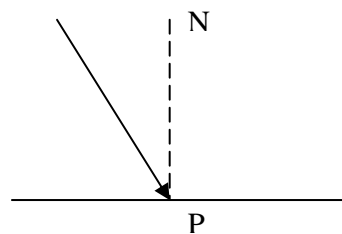
Using your hand, you throw a ball vertically up with a given initial speed.

1. Describe the trajectory of the ball. Make a drawing.
2. Use arrows to show the velocity of the ball at several points of its trajectory.
3. Use arrows to show the acceleration of the ball at several points of its trajectory.
4. What forces act on the ball while it is in motion? Represent those forces using arrows.
5. What difference does it make if the motion takes place in air or in vacuum?
6. Let's assume that you stand inside a vacuum chamber on the surface of the Earth, and that you throw the ball up under the same conditions that before. Which trajectory will the ball follow in this case?
7. What will happen in this case with the velocity of the ball (in vacuum)?
8. What will happen in this case with the acceleration of the ball?
9. What forces act on the ball while it moves in vacuum?

APPENDIX 3

Test Module 2: "Nature of Light"

1. We know that the Moon is not a source of light. Then, why is it possible for us to observe it?
2. Why is a shadow formed when we interpose an object in between a source of light and a wall?
3. The figure below shows a ray of light incident on a mirror (the line NP is perpendicular to the mirror's surface).
 - a) Draw, in an approximate way, the trajectory of the reflected ray.
 - b) Show in your drawing the angle of reflection. If the angle of incidence is 32°, which is the value of the angle of reflection?

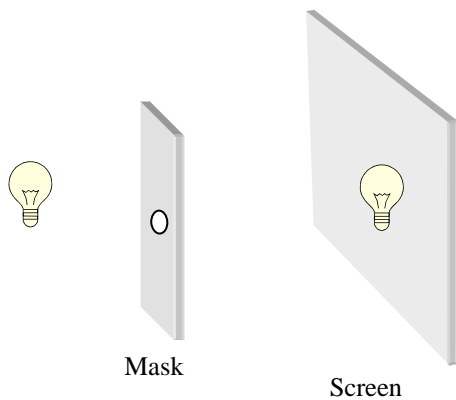


4. What evidence can you give for light propagation in vacuum?
5. Why well-polished metallic surfaces behave like mirrors?
6. Why does a black surface become hotter than a white surface when both of them are exposed to a light source for a long time?
7. Why do ambulances have the word "Ambulance" written backwards on their front? Explain your answer using a drawing.

1



11. A small bulb is in front of a screen in a dark room. If a mask with a small circular opening at its center is placed between the bulb and the screen, and then the bulb is turned on, what will you see on the screen?



APPENDIX 4

Interview Module 2: "Nature of Light"

1. Why can we see an object placed in front of us, for instance, the pencil I hold in my hand?

8. If you are in front of a plane mirror, at 1 m from it, at what distance is located your image from the mirror?
9. From the Earth we see the sky blue. However, astronauts far away of the Earth (for instance on the surface of the Moon) see the sky black. Explain this discrepancy.
10. You stand in a windowless, L-shaped room whose walls are non reflective. There is only one source of light in the room. Can you see the armchair located in the other extreme of the room, as shown in the figure?

2. Can we see the pencil if we are in a room that is completely dark? The room has no source of light at all.
3. While we are in the completely dark room of the previous question somebody hands you a flashlight turned on. Can we see the pencil? In what direction must the flashlight shine in order to see better the pencil?
4. If we put the flashlight in front of the pencil and behind of the pencil there is a wall, what do we see on the wall? If in the last question the answer given is that a shadow appears on the wall, then the following question is asked:
5. What happens to the shadow if the pencil is moved away from the wall and closer to the flashlight?
6. Question on refraction: Why a spoon or a straw appears to be broken when introduced in a glass of water? See the attached figure.



Effectiveness of Analogy on Students' Success and Elimination of Misconceptions



Refik Dilber, Bahattin Duzgun

Ataturk University, K. K. Education Faculty, Dept. of Physics, 25240 ERZURUM – TURKEY.

E-mail: refikdilber@yahoo.com

(Received 13 May 2008; Accepted 2 July 2008)

Abstract

This study investigated the effects of analogy instruction on students' success and removing misconceptions as compared with traditional instruction. The sample of this study consisted of 78 high school students from two classes enrolled in an introductory physics course. These students are about 15-16 years old. One of the classes was assigned randomly to the control group, and the other class was assigned to the experimental group. During teaching the topic of electric concepts in the physics curriculum, analogical instruction was applied in the experimental group whereas traditional instruction was followed in the control group. The results showed that the students in the experimental group performed better performance with respect to electric concepts than control groups' students.

Keywords: Analogical instruction, misconceptions, success, conceptual change and physics education.

Resumen

Este estudio investigó los efectos de la instrucción analógica en el éxito de alumnos y la remoción de errores conceptuales comparados con la instrucción tradicional. La muestra del estudio consiste de 78 alumnos de secundaria de dos clases matriculados en un curso de física introductoria. Estos estudiantes son de edades entre 15 y 16 años. Una de las clases fue asignada al azar como grupo control, y la otra clase fue asignada como grupo experimental. Durante la enseñanza de tópicos de conceptos de electricidad en el currículo de física, se aplicó la instrucción analógica en el grupo experimental mientras que en el grupo control se siguió con la instrucción tradicional. Los resultados muestran que los alumnos en el grupo experimental tuvieron un mejor desempeño en conceptos de electricidad que los alumnos del grupo de control.

Palabras clave: Instrucción analógica, errores conceptuales, éxito, cambio conceptual y educación en física.

PACS: 01.40.Fk, 01.40.gb, 01.40.gf

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

Simply stated, an analogy is a process of identifying similarities between two concepts. The familiar concept is called the analog and the unfamiliar science concept is called the target [1]. Many models have been presented regarding analogy by Brown and Clement [2] bridging analogies, Dupin and Johsua [3] analogy teaching model, Glynn [1] Teaching-With-Analogy (TWA) and Zeitoun [4] general model of analogy teaching. When using an analogy in science teaching, teachers should select an appropriate student world analog to assist in explaining the science concept. The analog and target share attributes that allow a relationship to be identified and contribute to the concept being taught; however, there are features of the analog which are unlike the target, and these can cause impaired learning if incorrectly matched. Consequently, the use of analogies in science teaching does not always produce the intended effects, especially when students take the analogy too far and are unable to separate it from the content being

Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 2, No. 3, Sept. 2008

learned. Some students only remember the analogy and not the content under study, while others focus upon extraneous aspects of the analogy and draw spurious conclusions about the target concept.

Analogies are believed to help student learning by providing visualization of abstract concepts, by helping compare similarities of the students' real world with the new concepts, and by increasing students' motivation [5]. Concrete analogs facilitate understanding of the abstract concept by pointing to similarities between objects or events in the students' world and the phenomenon under discussion. Analogies can be motivational in that, as the teacher uses ideas from the students' real world experience, a sense of intrinsic interest is generated. From a teaching perspective, the use of analogies can enhance conceptual change learning science they open new perspectives [6, 7, 8].

Despite their advantages and usefulness, analogies can cause incorrect or impaired learning depending on the analog-target relationship. For example, if the analog is

unfamiliar to the learner, development of systematic understanding is precluded. Although analogies may be more useful to students who primarily function at the concrete operational level [9], if students lack visual imagery, analogical reasoning may be limited. Students already functioning at a formal operational level may have an adequate understanding of the target and the inclusion of an analogy might add unnecessary information or noise [10]. For these reasons, some teachers choose not to use analogies at all and thereby avoid these problems while, at the same time, forsaking the advantages of analogy use.

Unshared attributes between analog and target are often a cause of misunderstanding for learners who attempt to transfer or map unshared attributes from the analog to target. No analog shares all its attributes with the target, or by definition, it would become an example; therefore, every analog breaks down somewhere. For instance, when electric currents in wires are compared to water flowing in pipes, some students conclude that electricity will leak out of a switched-on power point that has no plug in it. Indeed, some students try to transfer most, or all, of the analog structure into the target content and then describe the target content with direct reference to analog features. Other students may only remember the analogy and not the content under study. Nevertheless, a significant body of research suggests that although analogies are commonplace in human communication, they are not as effective in the classroom as might be expected [5]. Uncritical use of analogies may generate misconceptions and this is especially so when unshared attributes are treated as valid, or where learners are unfamiliar with the analogy. Indeed, in using any analogy, care needs to be taken to ensure that an impression is not conveyed that the analog is a true description of target concept [11, 12].

Many students do not realize that analogies operate at two levels. In simple appearance matches or descriptive analogies, one or more superficial attributes of the analog corresponds with the target, whereas true inductive analogies share both superficial and higher-order causative relations [13, 14]. Systemic similarities between analog and target induce functional relationships in the target which transfer explanatory structure from the analog to the target. Superficial attributes promote analogy recognition, accessibility, and recall but produce little growth in knowledge [15]. The systematic mapping of true inductive analogies promotes deep understanding but is difficult for unskilled learners to transact. Because students have difficulty recognizing the relational and explanatory power of an analogy, they often miss the real point of the analogy, and this is an excellent reason for teachers to use a systematic approach when teaching with analogies [16].

Many researchers have provided different perspectives of the functions of analogies [17]. According to Holyoak and Thagard [18], scientific analogies have at least four distinguishable uses: discovery, development, evaluation, and exposition. Among them, the most exciting is discovery, in which the analogy contributes to the formation of a new hypothesis. Once a hypothesis has been formed, the analogy may facilitate further theoretical or experimental development. Analogy can also serve to form arguments for

or against a hypothesis' acceptance, and then analogy can convey the new ideas to other people. For instance, Benjamin Franklin [17] derived not only the idea for his experiment but also the basic hypothesis that lightning is electricity by grasping the lightning/electricity analogy. He also used that analogy to develop experiments. This implies that scientific analogies have been and can be used for more than one function for particular purposes. Wong [19] considered that generative analogies are dynamic tools that facilitate understanding, rather than representations of the correct and static explanations or solution. Other researchers [11, 20, 47] consider the use of analogies beneficial for conceptual change in science learning. Glynn *et al.* [21], stated that analogies serve an explanatory and creative function. Duit [5] also agrees with Glynn that analogical reasoning can facilitate understanding and problem solving. There is substantial support for Glynn's conclusion [22]. However, there are some studies that conclude that findings on analogical reasoning are not especially promising because most students are unable to employ analogical reasoning to solve similar problems regarding different phenomena, and learners are not able to "see" the analogy [2, 9, 23, 24].

Analogies allow new material, especially abstracts concepts, to be more easily assimilated with students' prior knowledge, enabling them to develop a more scientific understanding of concept. Dagher [25] reviewed several studies and comments on the role of analogies. She argues that although several studies claim conceptual change occurred, analogies simply served as references for initial explanations or conjectures rather than bringing forth a conceptual change. Chi [26] argues that analogies are considered a way of assimilating new knowledge to an existing structure and, thus, is not a conceptual change.

Various studies have been conducted where children were observed and interviewed while learning about electric circuits and current. For instance, Osborne [27] and Tiberghien [28] point out those children aged 8–12 years tend to believe that batteries provide flashlight bulbs with some type of material to make them work. Again Osborne and Freyberg [29] show that students ages eight to twelve years old in New Zealand used four learning models—unipolar model, clashing currents model, attenuation models, and scientific model—when exploring the different types of electrical current. Maichle [30] found that 85% of the 400 secondary school students he studied considered that a battery is a reservoir for electricity or energy. Shepardson and Moje [31] interviewed fourth graders and found that a majority of students understood the electric circuit via prior procedural and declarative knowledge. Before instruction, the students used more than one model and tended to use operational processes of procedure to describe an electrical circuit. After instruction, the students had more precise procedural knowledge but still had difficulty conceptualizing the concepts of current with respect to parallel or series circuits. Magnusson, Boyle, and Templin [32] argue that many studies have focused on serial connections; however, students might conceive serial or parallel connections differently. The researchers designed a variety of problems to explore students' ideas of parallel circuits. The results

showed that students mainly have eight mental models: crossing currents model, bipolar bouncing model, bipolar serpentine model, bipolar branch model, bouncing model, loop mode, serpentine model, and scientific model.

Analogies are ubiquitous in physics. They are used by working physicists, physics teachers, and students learning physics. James Clerk Maxwell explicitly stated his feeling that analogies were essential to his own work. In formulating a theory of electrical phenomena, Maxwell claimed:

“Instead of using the analogy of heat, a fluid, the properties of which are entirely at our disposal, is assumed as the vehicle of mathematical reasoning...The mathematical ideas obtained from the fluid are then applied to various parts of electrical science.” [33].

On an analogy between heat conduction and electricity, Maxwell wrote that “The similarity is a similarity between relations, not a similarity between the things related.” [34]. Over a century later, this idea is reflected in contemporary theories of analogy.

Some analogies may be both communicative and generative. David Bartlett has written recently on “Analogies between electricity and gravity” [35], providing an historical account and application of analogy. As an historical example, consider Rutherford’s planetary model of the atom [36]. While the original utility was generative – producing a model that explained experimental results (which it accomplished better than competing analogies, such as the “plumb pudding” model of the atom) - the analogy is often used to communicate an introductory atomic model to physics students.

Thus, analogies are not only useful to working physicists, but to physics teachers as well. For instance, Coulomb’s law is often taught in introductory courses as analogous to Newton’s law of gravitation. Electric current is often likened to water flowing through a pipe. Understanding how these analogies work is a rich area of physics education research. A significant effort has gone into developing a theoretical framework for describing analogies, discussed in depth below. Simultaneously, experimentalists have asked specific research questions about the use of analogy in teaching physics concepts. For example, which analogy leads to better student learning about electric circuits – water in a pipe, or a moving crowd? In the 18th century the first serious experimenters with electricity saw analogies between the flow of charge and the flow of water, an analogy that persists today in the term ‘electric current’ [37].

The purpose of this study was to examine the effectiveness of analogical instruction on students’ learning of electric concepts and how eliminate students’ misconceptions. The aim of this study was not to test the effectiveness of any analogical model. It was aimed to learn how the analogical instruction affected students’ success and their understandings of electric concepts.

II. MATERIALS AND METHODS

Subjects: Participants in this study were 78 high school students who enrolled in the introductory physics courses, from the two classes of the same teacher. One class was randomly assigned to the experimental group ($n = 40$) while the other formed the control group ($n = 38$). These groups were selected according to an examination result by school administrative committee. Therefore, both groups’ students have very similar knowledge levels. So, selecting one of the groups as control and the other as experimental group randomly is not a problem. While the experimental group was taught with the analogical instruction, the control group was taught with traditional instruction. During a four-week period, each group received an equal amount of instructional time and was provided with the same materials and assignments, apart from the analogical instruction in the experimental group. Duration of the lessons was four 50-min periods and the language of the instruction used for both the experimental and control class was Turkish.

In this study, nonequivalent control group design is used to find out the effectiveness of two different methods. The dependent variable was students’ electric concept achievement test measured by post concept test scores. The independent variable was type of treatment referred to as group.

Materials: In this study, analogical instruction was used on the experimental group treatment. The analogies used were collected from the literature cited [1, 3, 17, 38].

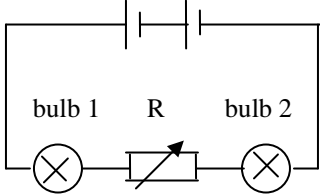
Electric concepts test (ECT): The ECT test consisted of 12 items. The items of this test comprised three parts. In the first step, students are asked to give an answer to the question. In the second step, the reason of his/her answer to the first questions is asked and in the third step, the student is asked to reveal how confident she/he is about the answers given to the first two questions. A blank box is added for the students who have different ideas on the first two questions. One example of test questions is presented in Figure 1. In this study, the responses of the students who gave wrong answers to the first two questions and marked the “very confident” choice were accepted as misconceptions. The responses like “Fairly confident”, “Not confident” and “just guessed” were not accepted as misconceptions because the students who gave such answers may have forgotten the subject or may have given such responses because of the lack of knowledge.

During the development stage of the test, which constituted the qualitative part of the study, the following steps were taken into consideration: First, instructional objectives related to electric concepts were developed, based on the national curriculum. This step was carried out to define the content of the test. Literature related to students’ alternative conceptions about electric concept was then examined. The test was composed of questions that were intended to measure students’ understanding of different concepts related to electric concepts. In some cases, however, the same concept was tested using two different types of questions. All questions were piloted and the required modifications were made prior to the administration of the test. A group consisting of one professor of physics

and two research assistants carried out the content validity of the test items. The reliability coefficient of the test, was computed by Cronbach Alpha estimates of internal consistency, was found to be 0.75. The final form of the test was administered to both experimental and control groups as

a pre-test before the treatment and post-test after the treatment. The questions in the text are about amount of current, resistance connected series and parallel, brightness of the bulbs, conservation of current.

Q1. This circuit consists of two bulbs and a variable resistor, R. Both bulbs are lit.



a) The resistance of R is increased.

What will happen to the brightness of bulb 1? Tick ONE box ()

What will happen to the brightness of bulb 2? Tick ONE box ()

It will get brighter
 It will stay the same
 It will get dimmer

It will get brighter
 It will stay the same
 It will get dimmer

b) Tick ONE box () below to explain your reason for choosing these answers.

Increasing R makes the current smaller all round the circuit.
 Increasing R makes the current smaller after it. It has no effect on a bulb before it.
 Increasing R makes the current smaller after it. So the current before it gets bigger.
 The battery always supplies the same current to the circuit.

How confident are you that your answers to these questions are correct? Tick ONE box ()

Very confident	Fairly confident	Not confident	Just guessing

Procedure: In this study, the same topics were covered for both experimental and control groups. In general, students were given equal opportunities to perform the activities in each group. The control group received traditional instruction which involves lessons using lecture/discussion methods to teach the concepts. Teaching strategies relied on teacher explanation and textbooks, with no direct consideration of the students' alternative conceptions. The students studied the textbooks individually before the class hour. The teacher structured the entire class as a unit, wrote notes on the chalkboard about the definition of concepts, and passed out worksheets to students for completing the treatment. The teacher described and defined the concepts and after teacher explanation, some concepts were discussed and were directed by teacher-directed questions. The majority of instruction time was devoted to instruction and engaging in discussion stemming from the teacher's explanation and questions.

The remaining time was taken up with a worksheet study. Worksheets developed specifically for each lesson were used as practice activities; they required written responses and reinforced the concepts presented in the classroom sessions. While the students were studying worksheet exercises, the teacher circulated and provided assistance if needed. The students had the opportunity ask questions, and the teacher was available to both answer questions and make suggestions. The worksheets were collected and corrected by the teacher, and the students reviewed their sheets after correction.

Students in the experimental group worked with analogical instruction. Glynn's Teaching-With-Analogy (TWA) model to teach each topic was used and topics were developed from an analysis of science textbooks to provide the most adaptable to classroom teaching [11]. At the instruction time, the step-by-step TWA model was used and six such analogies were analyzed (see Appendix). During the instruction, some analogies were showed directly to

students in classroom by using needed tools; for example; train, aquarium, u-pipe and water circuits-electric circuit analogies. However, the pictures of other analogies were drawn on the blackboard to be presented to the students. During the presentation of the analogies in the classroom, students were assisted to both join the lesson and make relation between basic electricity concepts and analogies by the help of some questions. By this way, we contributed to maximum participation of students in the lessons. At the end of the presented analogies (after the discussion between students) the teacher explained the similarities and differences between analog and target concepts again. So the students who found incorrect relation between analog and target concepts re-organized their opinions.

1

TABLE I. Independent group t-test results for pre and post test scores of concept test.

	PREECA		POSTECA	
	Experimental Group	Control Group	Experimental Group	Control Group
N	40	38	40	38
Mean (12 item)	7.05	7.8	10.8	8.7
Standart Deviation	1.64	1.68	0.97	0.90
t	-0.77		9.12	
p	>0.05		<0.05	

PREECA: Pre electric concept test. POSTECA: Post electric concept.

As seen in Table I, in the pre-test, there is no statistical differences between experimental and control groups in terms of success. It means there were no differences between the control and experimental group in terms of knowledge about the topic at the beginning. Again in Table I, after treatment according to the post-test results there are meaningful statistical difference between experimental and control groups indicating the successful nature of the experimental group compared to the control group.

While the correct answer percentage of experimental group was approximately 58.25% for the pre-test, for the post test the correct answer percentage has been approximately 90%. These results indicated that the success percentage of experimental group was considerably increased after

III. RESULTS

In this study, the independent group t-test was used in order to compare the effectiveness of analogical instruction and traditionally designed physics instruction with respect to students' understanding of electric concepts. The dependent variable was students electric concept achievement measured by post electric concept test scores (POSTECA). The independent variable was students' pre electric concept achievement (PREECA) measured by pre electric concept test scores.

treatment. While the correct answer percentage of control group was approximately 65% for the pre-test, the correct answer percentage reached approximately 72.5% for the post test. So, it indicated that the success rate of control group, which were learned the topic in traditional way, was increased slightly. According to pre-test results, control group's students are more successful than experimental group's students. But this situation didn't cause significant statistical difference favour of control group (as seen Table I, $P > 0.05$). After treatment, experimental group's students showed better performance than control group's students. This success ratio caused significant statistical difference favour of experimental group ($P < 0.05$).

TABLE II. Percentages of the misconceptions according to pre and post test scores.

Questions	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Experimental group (%)	Pre-test	55 (22)	47.5 (19)	50 (20)	37.5 (15)	42.5 (17)	52.5 (21)	32.5 (13)	40 (16)	30 (12)	35 (14)	25 (10)	22.5 (9)
	Post-test	15 (6)	17.5 (7)	20 (8)	12.5 (5)	10 (4)	7.5 (3)	2.5 (1)	7.5 (3)	5 (2)	10 (4)	5 (2)	7.5 (3)
Control Group (%)	Pre-test	60.5 (23)	68.4 (26)	47.3 (18)	50 (19)	39.4 (15)	44.7 (17)	36.8 (14)	36.8 (14)	42.1 (16)	44.7 (17)	21 (8)	28.9 (11)
	Post-test	28.9 (11)	34.2 (13)	21 (8)	23.6 (9)	18.4 (7)	15.7 (6)	10.5 (4)	13.1 (5)	18.4 (7)	13.1 (5)	7.8 (3)	5.2 (2)

(): Students' numbers having misconceptions for two groups before and after instruction.

According to results, conceptual misunderstandings were not eliminated completely in two groups, but the

experimental group's misunderstandings were reduced more than other group.

TABLE III. Percentages of the success of experimental and control groups' students (pre and post test).

Questions		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Experimental group (%)	Pre-test	54	46	45.3	61.7	64.7	56.2	73.5	53.5	64.3	58.2	63.2	76.9
	Post-test	91.3	84.7	83	86.9	82	94.5	97.8	82.6	95.6	93.6	97.8	96
Control Group (%)	Pre-test	58.3	48.6	62.4	57.2	58.2	66.8	85.9	64.3	59.3	61	83.8	69.5
	Post-test	69.1	57.1	67.3	76.5	63.2	75.5	96.5	58.1	77.5	79	88	74

As seen in Table III, experimental and control groups students' correct answers rates for diagnostic test to pre-test and post-test are shown. Generally before the instruction both of two groups correct answers ratio are similar (experimental group 58.25 % and control group 65%). According to the pre-test scores, there is no significant statistical difference between the two groups. Nevertheless, as seen in Table III, after the instruction, the rates of experimental groups' correct answers considerably increased; but control group students' correct answers didn't increase at the same rate as that of the experimental one (experimental group 90% and control group 72.5%).

IV. DISCUSSION

There is considerable evidence [26] that students in science courses have confronted difficulties understanding complex and abstract concepts at a qualitative level. Most often, these concepts are contradictory to personal experiences in daily life. This phenomenon is not unique to physics but is also seen in chemistry and biology. To overcome these inconsistent conceptions of scientific concepts, many interventions were designed to challenge those conceptions. Among them, analogies were considered to be powerful for theory construction, mental model change, concept understanding and reasoning [17, 39].

The main purpose of the present study was to determine whether an instructional manipulation was designed to facilitate conceptual change and learning about electric concepts would improve students' performance. Research related to instruction which is designed to remove students' alternative conceptions focused on strategies to promote conceptual change by challenging students' alternative conceptions, causing dissatisfaction followed by a correct explanation which is understandable and plausible to the students. We hypothesized that those students using the analogical instruction would demonstrate better conceptual understanding of electric concept than students exposed to traditionally designed instruction. As hypothesized, the analogical instruction did lead to better conceptual understanding of electric concepts. These results confirm the findings of previous

studies in that an analogical instruction can facilitate learning of scientific concepts [1, 3, 8, 11, 17, 20, 40, 41, 48, 49].

The results from this study suggest that analogical instruction helped students change their pre-existing conceptions or alternative conceptions with the scientific ones by activating their alternative conceptions, producing dissatisfaction and presenting a correct explanation which is both understandable and plausible.

Analogies were helpful for learning abstract and complex concepts of electricity. As delineated earlier, the analogies served several functions in promoting conceptual understanding: namely supplementation, correction, alteration, enhancement, magnification, perspective shift, competition and sequential collocation [17, 42].

The current study revealed that there were still some alternative conceptions held onto, even in the experimental group after treatment. Chinn & Brewer [43] explained why conceptual change is so difficult. Given information that contradicts a strongly held belief, an individual can ignore it, trivialize it, compartmentalize it, hold it in abeyance, change an insignificant part of the current belief but otherwise keep it intact, or undergo a more complete conceptual change.

A growing amount of research has shown that the use of analogies in science teaching and learning promotes meaningful understanding of complex scientific concepts [11, 13, 24, 44, 45]. The results demonstrated that using analogies both promoted profound understanding of complex scientific concepts and it helped students overcome their misconceptions of these concepts. According to pre and post test results, in pre-test both of two group correct answers rates are very similar (there isn't statistical difference). At the post-test control group's correct answers ratios are increased considerable rates but in control group's increasing is limited. Wong [24] considered that generative analogies dynamic tools that facilitate understanding. Other researchers [11, 19, 46] consider the use of analogies beneficial for conceptual change in science learning. Duit [5] also stated that analogical reasoning can facilitate understanding and problem solving.

CONCLUSION

This paper has briefly surveyed the effectiveness of analogical instruction on students' understandings of electric concepts. The analogical instruction when applied to physics, students' generate will affect their understanding of physics concepts. These efforts all contribute to the broad effort by the physics education research community to enhance instruction through a better understanding of student learning. This study has shown that when analogical instruction is used in a systematic manner, students' understandings of electric concepts and elimination of misconceptions are more enhancing than traditional instruction.

Science teachers can use often analogical instruction in their classroom to enhance students' understandings and eliminate misconceptions. While using analogical instruction, analogies should address the correspondence of its attributes and relationships between the target concepts in order to make the connections more explicitly, science teacher must become familiar with students' difficulties in understandings a scientific concepts in order to design meaningful materials to provide meaningful learning. In short, when analogical instruction is used, it is highly probable that these cause significantly better understandings of scientific conception and elimination of alternative conceptions.

V. REFERENCES

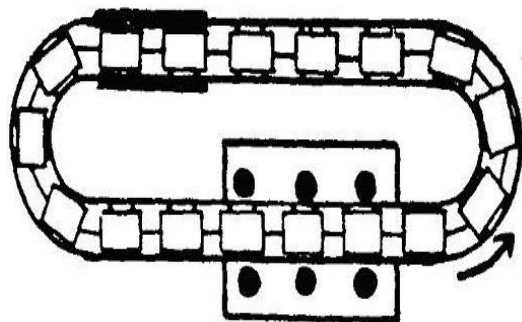
- [1] Glynn, S. M., Explaining Science concepts: A teaching-with-analogical model. In S. Glynn, R. Yeany and B. Britton (Eds.), *The Psychology of Learning Science* (pp. 219-240) (Hillsdale, N. J., Erlbaum, 1991).
- [2] Brown, D. E., and Clement, J., *Overcoming misconceptions via analogical reasoning: Abstract transfer versus explanatory model construction*, *Instructional Science* **18**, 237-261 (1989).
- [3] Dupin, J. J., and Joshua, S., *Analogies and "Modelling analogies" in teaching. Some examples in basic electricity*, *Science Education* **73**, 207-224 (1989).
- [4] Zeitoun, H. H., *Teaching Scientific Analogies: a proposed model*, *Research in Science and Technology Education* **2**, 107-125 (1984).
- [5] Duit, R., *On the role of analogies and metaphors in learning science*, *Science Education* **75**, 649-672 (1991).
- [6] Treagust, D. F., Harrison, A. G., Venville, G. and Dagher, Z., *Using an Analogical Teaching Approach to Engender Conceptual Change*, *International Journal of Science Education* **18**, 213-229 (1996).
- [7] Chiu, M. H. & Lin, J. W., *Using multiple analogies for investigating fourth graders' conceptual change in electricity*, *Chinese Journal of Research in Science Education* **10**, 109-134 (2002).
- [8] Thiele, R. B., and Treagust, D. F., *Analogies in chemistry textbook*, *International Journal of Science Education* **17**, 783-795 (1995).
- [9] Gabel, D. L. & Sherwood, R., *Effect of using analogies on chemistry achievement according to Piagetian levels*, *Science Education* **64**, 709-716 (1980).
- [10] Johnstone, A. H., and Al-Naeme, F. F., *Room for Scientific thought*, *International Journal of Science Education* **13**, 187-192 (1991).
- [11] Harrison, G. A. and Treagust, F. D., *Teaching with Analogies: A case Study in Grade-10 Optics*, *Journal of Research in Science Teaching* **30**, 1291-1307 (1993).
- [12] Curtis, R. V. and Reigeluth, C. M., *The use of analogies in written text*, *Instructional Science* **13**, 99-117 (1984).
- [13] Gentner, D., *Structure mapping: A theoretical framework for analogy*, *Cognitive Science* **7**, 155-170 (1983).
- [14] Harrison, G. A. and Treagust, F. D., *Science Analogies*, *The Science Teacher* **61**, 40-43 (1994).
- [15] Zook, K. B., *Effect of analogical processes on learning and misrepresentation*, *Educational Psychology Review* **3**, 41-72 (1991).
- [16] Keane, M. T., Ledgeway, T. & Duff, S., *Constraints on analogical mapping: A comparison of three models*, *Cognitive Science* **18**, 387-438 (1994).
- [17] Chiu, M. H. and Lin, J. W., *Promoting Fourth Graders' Conceptual Change of Their Understanding of Electric Current via Multiple Analogies*, *Journal of Research In Science Teaching* **42**, 429-464 (2005).
- [18] Holyoak, K. J. & Thagard, P., *Mental leaps: Analogy in creative thought* (The MIT Press. Lawrence Erlbaum, Cambridge, MA, 1995).
- [19] Wong, D. E., *Understanding the generative capacity of analogies as a tool for explanation*, *Journal of Research in Science Teaching* **30**, 1273-1290 (1993).
- [20] Brown, D. E., *Refocusing core intuitions: A concretizing role for analogy in conceptual change*, *Journal of Research in Science Teaching* **30**, 1273-1290 (1993).
- [21] Glynn, S. M., Britton, B. K., Semrud-Clikeman, M., & Muth, K. D., *Analogical reasoning and problem solving in the textbooks*. In J.A. Glöcer, R. R. Ronning, & C. R. Reynolds (Eds.), *Handbook of Creativity: Assessment, Theory, and Research* (pp. 383-389) (Plenum, New York, 1989).
- [22] Black, D. E. & Solomon, J., *Can pupils use taught analogies for electric current?*, *School Science Review* **69**, 249-254 (1987).
- [23] Gick, M. L. & Holyoak, K. J., *Schema induction and analogical transfer*, *Cognitive Psychology* **15**, 1-38 (1983).
- [24] Wong, D. E., *Self-generated analogies as a tool for constructing and evaluating explanations of scientific phenomena*, *Journal of Research in Science Teaching* **30**, 367-380 (1993). www.ctc.puc-rio.br/icee-98/Icee/papers/.
- [25] Dagher, Z. R., *Does the use of analogies contribute to conceptual change?*, *Science Education* **78**, 601-614 (1994).
- [26] Chiu, M. H., *The implications and reflections of studies in conceptual change*, *Chinese Journal of Research in Science Education* **8**, 1-34 (2000).

- [27] Osborne, R., *Children's ideas about electric current*, New Zealand Science Teacher **29**, 12–19 (1981).
- [28] Tiberghien, A., Critical review of research concerning the meaning of electric circuits for students aged 8 to 20 years. In *Research on Physics Education*, Proceedings of the First International Workshop, June 23–July 13 (1983), La Londe les Maures, (Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 1984), pp.109–123.
- [29] Osborne, R. & Freyberg, P., *Learning in science: The implications of children's science*, (Heinemann, Auckland, 1985).
- [30] Maichle, U., Representation of knowledge in basic electricity and its use for problem solving. In W. Jung, J. Pfundt, & C. von Rhoneck (Eds.), *Proceedings of the International Workshop on Problems concerning students' representation of physics and chemistry knowledge* (pp. 174–193), September 14–16 (Pedagogische Hochschule, Ludwigsburg, 1981).
- [31] Shepardson, D. P. & Moje, D. B., *The nature of fourth graders' understandings of electric circuits*, Science Education **78**, 489–514 (1994).
- [32] Magnusson, S. J., Boyle, R. A. & Templin, M., *Dynamic science assessment: A new approach for investigating conceptual change*, Journal of the Learning Science **6**, 91–142 (1997).
- [33] Maxwell, J. C., *Abstract of Paper 'On Faraday's Lines of Force'*, in *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, ed. W. D. Niven (Cambridge University Press, Cambridge, 1890; Dover, New York, 1952), pp. 367-369.
- [34] Maxwell, J. C., *Elementary Treatise on Electricity* (Clarendon Press, Oxford, England, 1881).
- [35] Bartlett, D., *Analogies between electricity and gravity*, Metrologia **41**, S115-S124 (2004).
- [36] Taylor, J. R. & Zafiratos, C. D., *Modern Physics for Scientists and Engineers*, (Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1991).
- [37] Roland, N., *A hydrodynamic analogy to energy losses in capacitors*, Phys. Educ. **41**, 217-218 (2006).
- [38] Sağırlı, S., *The effect of using analogy on the succeed in science instruction*, Master thesis, Marmara University, Graduate School of Natural and Applied Science, İstanbul, (2002).
- [39] Vosniadou, S., *Capturing and modeling the process of conceptual change* [special issue], Learning and Instruction **4**, 45–69 (1994).
- [40] Thiele, R. B. and Treagust, D. F., *An interpretive examination of high school chemistry teachers' analogical explanations*, Journal of Research in Science Teaching **31**, 227-242 (1994).
- [41] Glynn, S., Russel, A. and Noah, D., *Teaching Science Concepts to Children: The Role of Analogies*, (1997). <http://www.coe.uga.edu/edpsvch:3>.
- [42] Treagust, D. F., Duit, R., Joslin, P., Lindauer, I., *Science teachers' use of analogies: observations from classroom practice*, International Journal of Science Education **14**, 413-422 (1992).
- [43] Chinn, C. A. & Brewer, W. F., *The role of anomalous data in knowledge acquisition: A theoretical framework and implications for science instruction*, Review of Educational Research **63**, 1-49 (1993).
- [44] Friedel, A. W., Gabel, D. L. and Samuel, J., *Using understanding?*, School Science and Mathematics **90**, 674-682 (1990).
- [45] Glynn, S., Law, M., Gibson, N. and Hawkins, C., *Teaching Science with Analogies: A Research for Teachers and Text Book Authors*, (1996) <http://currv.edschool.virginia.edu/go/clic/nrrc/scin.html>.
- [46] Thiele, R. B., Venville, G. and Treagust, D. F., *A comparative analysis of analogies in secondary biology and chemistry textbook used in Australian schools*, Research in Science Education **25**, 221-230 (1995).
- [47] Clement, J., Brown, D., Camp, C., Kudukey, J., Minstrell, J., Schultz, K., Steinberg, M., Veneman, V., *Overcoming students' misconceptions in physics: The role of anchoring intuitions and analogical validity*, in J.D. Novak, Proceedings of the second international seminar on misconceptions and educational strategies in science and mathematics, Vol. 3 (Cornell University Press, Ithaca, NY, 1987).
- [48] Treagust, D. F., Harrison, A. G., and Venville, G. J., *Teaching Science Effectively With Analogies: An Approach for Preservice and Inservice Teacher Education*, Journal of Science Teacher Education **9**, 85-101 (1998).
- [49] Treagust, D. F., *The evolution of an approach for using analogies in teaching and learning science*, Research in Science Education **23**, 293-301 (1993).

1

APPENDIX: THE ANALOGIES USED IN THIS STUDY

1. Train Analogy



Train	Electricity
cars	-- electricity
cars movement	-- electric current
cars flow	-- current intensity
obstacles	-- resistance
closed railway circuits	-- electric circuits
pushing workers	-- power supply
muscular fatigue	-- battery wearing down

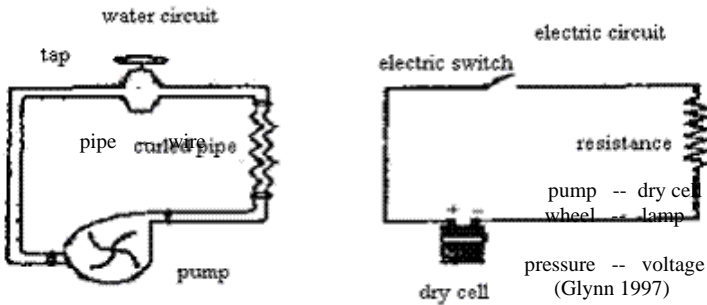
(Dupin and Johsua 1989)

2. An analogy is founded between basic electric circuit and aquarium

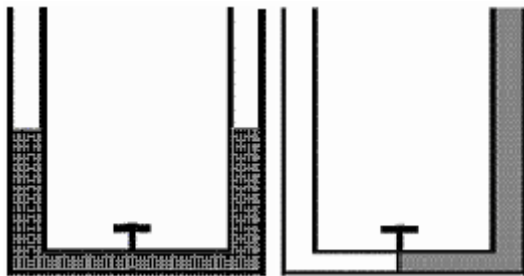
Analog	Target
water	-- electricity
water flow	-- electric current
water pipes	-- conductor wire
water pump	-- Battery
pressure	-- Voltage
water filter	-- weak conductor
slow down water	-- resistance

(Glynn *et al.* 1996)

3. An analogy is founded between water circuit and electric circuit



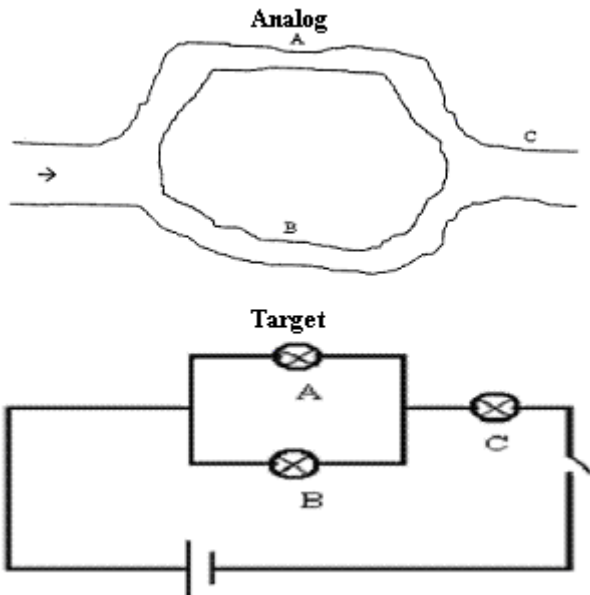
Analog	Target
water	-- electricity
water flow	-- electric current
curled pipe	-- resistance
tap	-- electric switch



Analog	Target
U – pipe	-- cell
water	-- electricity
Water level difference	-- Potential difference
water flow	-- electric current
glass pipe	-- conductor wire
at the same level water in pipe	-- same potential difference between two pole of the cell

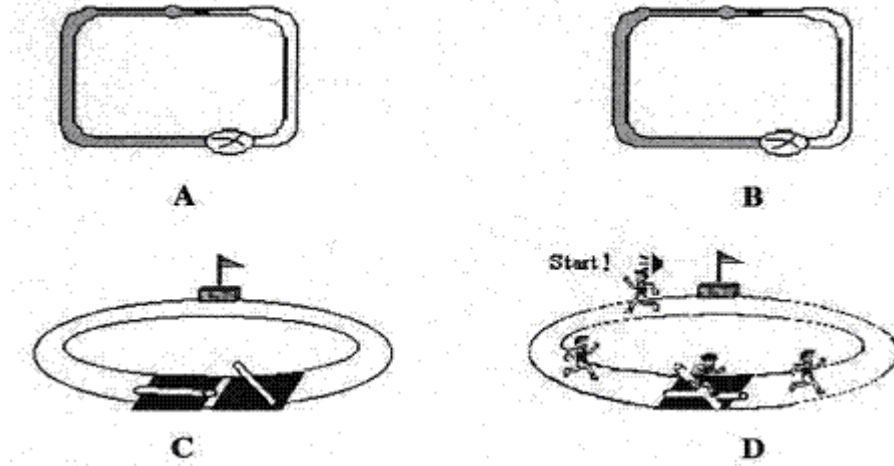
(Sağırılı 2002)

5. An analogy founded between brightness of the bulbs and water flowing in the river.



In this analogy, the current shared two wires is imitated water in a river separated two branch. Here the electric current is imitated flowing water in the river. At the above electric circuit, the bulbs are identical. The brightness of the bulbs depend the current on the bulbs. The analogy founded between current portion on the lambs and the flowing water portion of the A, B, C points in the river.
(Sağırılı 2002)

6. Water flow and block running analogies



(Chiu and Lin 2005)

Students' Difficulties in Understanding the Concepts of Magnetic Field Strength, Magnetic Flux Density and Magnetization



Zafer TANEL and Mustafa EROL

Buca Education Faculty, Department of Physics Education, Dokuz Eylul University, 35150, Izmir, TURKEY.

E-mail: zafer.tanel@deu.edu.tr

(Received 13 August 2008; accepted 20 September 2008)

Abstract

The concepts of magnetic field strength, magnetic flux density and magnetization are important fundamental concepts in magnetism. However, these concepts are often confused by students due mostly to different notations and interpretations. This confusion inhibits learning by students about magnetic properties of magnets and of paramagnetic, ferromagnetic and diamagnetic materials. It is therefore very crucial to determine some students' difficulties on these specific concepts. Hence, we prepared seven multiple-choice conceptual questions in accordance with our specific goals and administered to one hundred and sixty-nine undergraduate students (40 first year, 34 second year, 43 third year, 28 fourth year and 24 fifth year) attending the Physics Education Department of Buca Education Faculty at Dokuz Eylul University. Also we interviewed with 11 fifth grade students about their answers. Results of our study show that students have important understanding problems and confusions about related concepts. Otherwise it is stated that this situation causes learning deficiency of magnetic properties of matters.

Keywords: Magnetic field strength, Magnetic flux density, Magnetization, Understanding magnetism concepts.

Resumen

Los conceptos de campo magnético, inducción magnética y magnetización son importantes conceptos fundamentales en el magnetismo. Sin embargo, a menudo estos conceptos se confunden por los estudiantes debido principalmente a las diferentes notaciones y a la interpretación. Esta confusión impide el aprendizaje de los estudiantes acerca de las propiedades magnéticas de imanes y de materiales paramagnéticos, ferromagnéticos y diamagnéticos. Por lo tanto, es crucial determinar algunas de las dificultades de los estudiantes en estos conceptos específicos. Por lo tanto, hemos preparado siete preguntas conceptuales de elección múltiple, de conformidad con nuestros objetivos específicos y administrados a ciento sesenta y nueve estudiantes (40 de primer año, 34 de segundo año, 43 de tercer año, 28 de cuarto año y 24 de quinto año) que asisten al Departamento de Educación en Física de la Facultad de Educación en la universidad Buca Dokuz Eylül. También se entrevistó a 11 estudiantes de quinto grado acerca de sus respuestas. Los resultados de nuestro estudio muestran que los estudiantes tienen problemas importantes de comprensión y confusiones sobre conceptos relacionados. De otra manera se afirma que esta situación provoca deficiencia de aprendizaje de propiedades magnéticas de la materia.

Palabras clave: Campo magnético, la densidad de flujo magnético, magnetización, Comprensión de conceptos de magnetismo.

PACS: 01.40.Fk, 01.40.gb, 01.40.Ha, 01.40.Di

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

Magnetism topics are considered to be quite difficult to learn by students [1]. The concepts, such as magnetic field strength (\mathbf{H}), magnetic flux density (\mathbf{B}) and magnetization (\mathbf{M}), are considered to be essential within the fundamental concepts of magnetism topics in general physics at tertiary level. Hence, it is quite important that these concepts about magnetism have to be learned on the basis of the commonly accepted scientific knowledge. But, although the physical meanings of these are well understood, an agreed interpretation has never been found

and controversy about these has obtained for more than a century [2]. The main reason of this problem is that there is a disagreement about which one of these concepts is the primary field and which one is the derived field. There are three fundamental ideas of interpretation of \mathbf{B} and \mathbf{H} ; one of them is William Thomson's which gives \mathbf{B} and \mathbf{H} equal status as field intensities acting on different elements of the medium, second one is Faraday's and Maxwell's which defines \mathbf{H} as the primary magnetic field that causes the field \mathbf{B} in magnetizable matter [2] and the last one is Lorentz's which interprets \mathbf{B} as the average of microfields and primary magnetic field and \mathbf{H} as derived field [2, 3]. In general, the physicists choice last one [3, 4,

5] and engineers prefer second one [3, 4, 6, 7] while teaching electromagnetism. The disagreement about interpretation of these concepts has also been reflected in the main text books [8].

According to engineers' choice the equation concerning these concepts is defined as

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}), \quad (1)$$

where \mathbf{B} is the magnetic flux density inside the material, \mathbf{M} is the magnetization induced by the applied external magnetic field strength \mathbf{H} and μ_0 denotes the magnetic permeability of vacuum [8]. Direct relation between \mathbf{B} and \mathbf{H} is also given by equation

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (2)$$

where μ is the magnetic permeability of medium.

According to physicists' choice the equation concerning these concepts is defined by equations [3]

$$\mathbf{H} = \mu_0^{-1} \mathbf{B} - \mathbf{M}, \quad (3)$$

or [2]

$$\mathbf{H} = \mathbf{B} - 4\pi \mathbf{M}. \quad (4)$$

Direct relation between \mathbf{H} and \mathbf{B} is also given by equation [3]

$$\mathbf{H} = \mu^{-1} \mathbf{B}. \quad (5)$$

In addition to this controversy, other reason of students' deficiencies is that there is a clear predominance of the magnetic induction \mathbf{B} over the magnetic field strength \mathbf{H} in majority of courses and textbooks. So, magnetic field strength \mathbf{H} is almost absent in electromagnetism course [9].

Hence, we believe that, these confusions may easily mislead students causing severe internalizing problems. In this research, we aim to determine student difficulties especially about these three fundamental concepts and related topics such as magnetic properties of magnets and diamagnetic, paramagnetic and ferromagnetic materials.

II. METHOD

In order to determine the present situation, we employed seven conceptual multiple-choice questions as a quantitative measuring instrument (see Appendix). These questions are prepared based on the previous bibliographic review and the opinions of experienced physics professors in our department. One hundred and sixty-nine undergraduate students (40 first year, 34 second year, 43 third year, 28 fourth year and 24 fifth year) attending the Physics Education Department of Buca Education Faculty

at Dokuz Eylül University answered the questions. First and second grade of these students completed general physics course, third and fourth grade students fulfilled general physics and theory of electromagnetism courses and fifth grade students finished solid state physics course beside these courses before answered these questions.

We also interviewed with eleven students about their answers. Generally we asked them about what they think while answering questions. These students are selected from fifth grade students according to their general success from low to high. The selection reason of these students is think of they can explain their answers more scientifically because of finishing all related courses.

III. RESULTS and DISCUSSION

In this section, answers of the students were analyzed and some important outcomes of the investigation are briefly reported.

TABLE I. Answering Percentages for the Question 1.

Choice	Frequency	Percentage
None	1	0,6
A	17	10,1
B	38	22,5
C*	89	52,7
D	24	14,2
Total	169	100,0

*Correct Answer

The aim of the question 1 was to determine students' difficulties on understanding the factors affecting magnetic properties of a magnet.

The majority of the students (89) in fact know the magnetic properties of a magnet depend up on the number of atoms having net magnetic moments in the same direction. However, 17 students think that the bigger the magnet, the stronger the attracting force must be. The number of magnetic dipoles in the same direction for each magnet was not given in the question. For this reason, there is no certainty about which magnet has more net magnetic moment per unit volume. Therefore, these students without considering the magnetization think that bigger magnet always attracts stronger than the smaller one. As Stephans [10] pointed out, one of the students' misconceptions about magnetism is that strength of a magnet determined by its size. So, we see that these students still remain their misconceptions about magnets. A number of students (38) believe that the effects of the magnets on the iron marble do not depend on their physical shapes of their poles. But we know that, distribution of the magnetic field lines is strongly related to the shape of the magnetic poles. Consequently, the shapes of the poles affect the density of field lines and so magnitude of the magnetic flux density can be changed with the shapes of the poles were the marbles exist. This shows us, these students have deficiency about physical meaning of magnetic flux density. Also, 24 students think

that both magnets attract with the identical forces. We can say that, these students do not take into account which magnet has more net magnetic moment per unit volume.

Eight students that we interviewed answered this question correctly and their explanations were consistent with scientific knowledge. Two (Yelda and Hidayet) of the students was answered as "D". When we asked about their preference;

Yelda said, "Attraction force does not depend size of the magnets and magnetization of magnets does not depend kind of the material that magnets were made. So both attraction forces are equal"

Hidayet said: "Distances of the marbles to the magnets are equal. The numbers of the field lines at same distances (on marbles) are equal in both situations. So attracting forces must be equal too. Attracting force does not depend sizes of the magnets. Also, I have not well knowledge about formation of magnetic field of a magnet."

One (Serkan) of the students answered this question as "B". Serkan explained his answer as "Shape of the poles of magnets does not affect the attracting forces on marbles."

The outcomes of this question clearly indicate that, many students have some difficulty on understanding the factors on which magnetic properties of a magnet depend.

TABLE II. Answering Percentages for the Question 2.

Choice	Frequency	Percentage
None	31	18,3
A	51	30,2
B *	24	14,2
C	11	6,5
D	2	1,2
E	6	3,6
F	2	1,2
G	21	12,4
H	21	12,4
Total	169	100,0
*Correct Answer		

The direction of magnetization vector (**M**), in a strong and constant external magnetic field was asked in the question 2 for a diamagnetic material. Only limited number of students (24) seem to have the correct answer, B. The majority of the students can not decide the direction of the magnetization vector in a diamagnetic material when an external magnetic field is applied.

TABLE III. Answering Percentages for the Question 3.

Choice	Frequency	Percentage
None	34	20,1
A*	52	30,8
B	20	11,8
C	10	5,9
D	7	4,1
E	7	4,1
F	7	4,1
G	15	8,9
H	17	10,1
Total	169	100,0
*Correct Answer		

In the question 3, we investigated the direction of the magnetization vector in a paramagnetic material which lies in a strong and constant external magnetic field. As we see from the table III, only 52 students have the correct answer, A, to this question. Therefore, in accordance with the previous case, we can say that majority of the students could not decide about the direction of the magnetization vector in a paramagnetic material when an external magnetic field is applied.

TABLE IV. Answering Percentages for the Question 4

Choice	Frequency	Percentage
None	41	24,3
A*	55	32,5
B	22	13,0
C	6	3,6
D	3	1,8
E	9	5,3
F	5	3,0
G	18	10,7
H	10	5,9
Total	169	100,0
*Correct Answer		

The direction of the magnetization vector, this time in a ferromagnetic material and in a homogeneous external magnetic field, was questioned in the item 4. Only 55 students give the correct answer, A. Most of the students are not able to decide about the direction of the magnetization vector in a ferromagnetic material.

Six of the interviewed students gave the correct answer for question 2, eight of them answered correctly question 3 and for question 4 there are 10 students who have true answers. These three questions were evaluated together during the interview. Explanations of students who have difficulties about these questions are so;

Batuhan said: "Concept of magnetization reminds me magnetic properties of materials. I do not have an idea anymore about this concept. So I could not answer these questions. I know theoretical means of paramagnetic, diamagnetic and ferromagnetic. I classify these materials according to their relative permeabilities. If $\mu_r \gg 1$ then material is ferromagnetic, if $\mu_r \approx 1$ then material is paramagnetic and if $\mu_r < 1$ then material is diamagnetic. But I do not know how magnetization occurs in these materials when they are in an external magnetic field"

Harun said: "I always confuse properties of these materials. I think diamagnetic material is affected by external field at the very least within these materials. But magnetization occurs in the same direction with external magnetic field for all these materials."

Hidayet said: "The magnetization always tends to encourage the external field in these materials. At least in diamagnetic materials, thereafter paramagnetic materials and at most in ferromagnetic materials."

Nur said: "Diamagnetic and paramagnetic materials do not have permanent magnetization. So magnetization vector tends opposite to the external field in these. Only ferromagnetic materials have permanent magnetization"

and magnetization vector tends to same direction with applied field.”

Serkan said: “If we put in order these according to their magnetic properties, we can say that the best magnetics are ferromagnetic materials, thereafter paramagnetic materials and the worst magnetics are diamagnetic materials. Magnetization occurs in the same direction with external field in all these materials and magnitude of this is in order as I mentioned above”.

Combining the questions 2, 3 and 4 shows us that, the majority of the students do not know how an external magnetic field and matter interact. Hence, they have some fundamental difficulties in explaining the magnetic properties of diamagnetic, paramagnetic and ferromagnetic materials.

TABLE V. Answering Percentages for the Question 5.

Choice	Frequency	Percentage
None	6	3,5
A	59	34,9
B*	90	53,3
C	14	8,3
Total	169	100,0
*Correct Answer		

In question 5, we aimed to determine the level of the students’ knowledge on the effects of an external field to the reorientation of the magnetic dipoles in a ferromagnetic material. According to the given answers, 59 students think that the iron rod could be magnetized if we touch it to the magnet for a short time. In this case, the point A of the rod behaves as the N pole of the magnet and the point B behaves as the S pole of the magnet. However, after the rod was removed from the magnet and the other pole of the magnet was drawn nearer to the rod, these students think that both poles of the magnet and rod are the same and they repel each other. Also, eight of the interviewed students explained their answers according to this idea. For example:

Harun said: “When we touch the magnet to the iron rod, iron rod becomes a magnet and it has the same polar properties with touched magnet. Because it is a ferromagnetic material. So A point becomes N pole and B point becomes S pole. In second situation same poles repel each other.”

Also, in addition to Harun's like explanations, three of the students (Duygu, Özgür and İsmail) indicated that magnetization occurs with physical contact. So, when magnet is drawn nearer to the rod in second situation, magnetization of the iron rod does not change. Because, magnet did not touch to the rod.

The results show that, these students do not take into account that the magnetic dipoles were inclined to the opposite direction in iron rod due to the new external magnetic field at second situation. We can now draw a conclusion that, students could not learn or remember the magnetic properties of a ferromagnetic material and the characteristics of the hysteresis curve.

Surprisingly, our interview exposed that, two of the students (Aysun and Yelda) who seem gave correct answer used a wrong way while answering. For example:

Aysun said: “If we think that, N pole of the magnet charged (+) and S pole (-). When we touch the magnet to the rod, A point becomes (-). So in the second situation, magnet attracts the iron rod. Because opposite charges attract each other.”

This result shows that some of the students use electrical model to explain the magnetic phenomena as indicated in related literature [11, 12]. According to us, the cause of this problem is that students have important deficiencies on explaining how a magnet creates its magnetic field.

TABLE VI. Answering Percentages for the Question 6.

Choice	Frequency	Percentage
None	19	11,2
A	15	8,9
B	37	21,9
C	25	14,8
D*	57	33,7
E	16	9,5
Total	169	100,0
*Correct Answer		

In question 6, we propose to measure student understandings about the relationship between the concepts of magnetic field strength, magnetic flux density and magnetization. It is fairly well known that, iron is a ferromagnetic and gold is a diamagnetic material. These properties are strongly linked with the magnetic permeability of the materials. When the iron sphere is placed in an external magnetic field, the magnetic dipoles tend to orient themselves parallel to the applied magnetic field strength (\mathbf{H}). In this situation, a net magnetization (\mathbf{M}) occurs which is parallel to the external field. So the number of the field lines increase at the point “1” in the figure. This means the magnitude of the magnetic flux density (\mathbf{B}) at the point 1 increases too. When the gold sphere is placed in an external magnetic field, atomic dipoles tend to orient themselves opposite to the applied field depending on the magnetic field strength (\mathbf{H}). In this situation, a net magnetization (\mathbf{M}) occurs which is opposite to the external field. The number of field lines this time goes down at the point “2”. One can say that the magnitude of the magnetic flux density (\mathbf{B}) also decreases. There is a vacuum at the point “3”, so there is no change at the number of the field lines at that point.

When we look at the given answers, we can see that students could not think about the magnetic properties of matter while answering the question. For example, 15 students explain that the materials in the external field do not affect the field lines and magnitude of the magnetic flux density is equal at the points of 1, 2 and 3. One of the interviewed students (Harun) explained his answer so:

Harun said: “Materials in-between the poles of magnets do not affect the magnetic field. Because distances of poles are equal.”

Also, 37 students believe that all materials affect the external field because they prevent the field lines crossing the material.

Aysun said: "I think that magnitude of the magnetic flux density reaches its highest value at the point 3 because there is no matter between poles. Matters prevent the field lines."

We think that these students may believe real existence of field lines as defined in Guisasola et als' the study [12] and think of magnetic field as a flow of something that was denoted by Saglam and Millar [13]. Because according to them, matters prevent the flowing of field lines.

25 students express that gold is a better conductor than the iron, so it allows the field lines penetrating the material better than iron. Two of the interviewed students (Duygu and Serkan) have this idea. For example;

Serkan said: "Gold is better conductor than iron. So it conducts the magnetic field lines better than iron."

Thus, again we can say that these students confuse electrical and magnetic properties of matters.

16 students believe that, both the gold and iron are metals, so exactly same effects occur on the field lines for both of these cases. These students may think that magnetic field has same affect on all metals. As Stephans [10] indicated that, one of the students' misconceptions about magnetism is idea of magnets attract all metals. We see that these students still remain their misconceptions.

According to these outcomes, students have some difficulties about magnetic properties of materials and interaction of matter-magnetic field. Also they could not understand the relationship between the concepts of magnetic field strength, magnetic flux density and magnetization. In addition, they seem to be confusing the electrical permeability and the magnetic permeability of materials.

TABLE VII. Answering Percentages for the Question 7.

Choice	Frequency	Percentage
None	23	13,6
A	24	14,2
B	44	26,0
C	54	32,0
D*	24	14,2
Total	169	100,0
*Correct Answer		

At question 7, we want to underline students' understanding about the relationship between the concepts of magnetic field strength, magnetic flux density and magnetization. It is clear that when we insert the iron core inside the coil L , the magnetization in the iron core increases the magnitude of the magnetic flux density and compass needle turns towards the point "2". Only 24 students give the correct answer to this question. Other 24 students think that the iron core does not affect the magnitude of the magnetic flux density, because the value of the current on the coil is constant.

Aysun said: "Direction of the compass needle does not change. Because value of the currents on the both coil are same and they create equal magnetic fields."

The students here can not assume that the reorientation of the magnetic moments inside the iron core actually causes an increase in the magnetic field strength outside the material.

According to 44 students, the magnetization in the iron core occurs opposite to the external magnetic field strength which is produced by the current in the coil. Hence, the value of the magnetic flux density decreases and the compass needle turns towards the point "1".

Also 54 students claim that when the iron core is placed in the coil, the magnitude of the magnetic field strength produced by the current also increases. Five of interviewed students (Nur, Serkan, Yelda, Özgür and İsmail) have this idea. We see that these students confuse Faraday's induction law and magnetic induction (magnetic flux density). As an example;

Özgür said: "When we put the iron core inside the coil, it creates induction current and this current increases the magnitude of magnetic field"

But as we all know, the current has a constant value and never changes in this situation.

Also four interviewed students denoted that they do not know the difference between magnetic field strength and magnetic flux density.

Therefore, it is quite clear that students are very much confused with the concepts of magnetic field strength (\mathbf{H}) and magnetic flux density (\mathbf{B}). And they could not decide the affect of magnetization on magnetic flux density.

IV. CONCLUSIONS

If we summarize the outcomes of this work; it is clear that, students have some certain difficulties on the following points.

According to results of question1, students have important deficiency about explaining of magnetic properties of magnets. They can not decide how a magnet creates its magnetic field and what conditions affect this. As we know that there are two sources of magnetic field, one is that magnetic field created by magnets and second is that magnetic field created by electric currents. On the other hand, second one is predominant in electromagnetism courses generally. We suggest that at the beginning of the magnetism course, creation of magnetic field of magnets should be introduced. Because most of the students have experiences with magnets in their life. We think this will draw attention of students. So, firstly, a simple atomic model of magnets should be introduced. This will allow students to predict the magnetic dipole moment of a bar magnet [14]. Magnetic dipole moment that created by atomic currents per unit volume gives the magnetization and net magnetization in magnets generate magnetic field of magnets as shown in the figure 1.

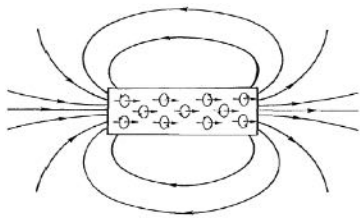


FIGURE 1. Micro-currents Circulating Create Elemental Magnets [11, p. 371].

This model will help students to understand how magnetic field of magnets occurs, may prevent students' electrical modeling about magnets and also introduce the concept of magnetization, \mathbf{M} . This content also will help students to understand magnetic properties of matters.

Results of questions 1, 2 and 3 show that students have deficient knowledge about paramagnetic, diamagnetic and ferromagnetic materials. And they confuse the properties of these materials. We think that, if the model, mentioned above for magnets, is used for these materials this should solve the students' problems. After the introduction of magnets and its properties, magnetic properties of matters should be given. Because, existences and behaviors of the magnetic dipole moments identify the properties of these materials. We also see that when students use comparing permeabilities of these materials (μ) with permeability of vacuum (μ_0) as $\mu \gg \mu_0$, $\mu < \mu_0$, etc. or relative permeabilities of these (μ_r) with the number of 1 as $\mu_r \gg 1$, $\mu_r < 1$, etc. to classify these materials, they may make mistake. They think that magnetization in the material occurs in the same direction with external field when the material is placed in an external magnetic field in all of these materials. Because there is no negativity in above comparisons and there seem to be graduation. We think that this situation causes confusion. So we suggest using magnetic susceptibilities (χ_m) of materials rather than permeabilities. Because, χ_m of diamagnetic materials have negative value and paramagnetic and ferromagnetic materials have positive value. Thus equation that gives relation between \mathbf{H} and \mathbf{M}

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}, \tag{6}$$

shows that magnetization occurs in opposite direction with external field in diamagnetic materials and in the same direction with external field in paramagnetic and ferromagnetic materials. This would solve students' confusion problems.

Also, using the χ_m in the equation that gives the relationship between \mathbf{B} and \mathbf{H} like

$$\mathbf{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \mathbf{H}, \tag{7}$$

can solve the students' problems in question 6. If χ_m is negative, magnitude of magnetic flux density in the

material will be lesser than magnitude of external magnetic field for diamagnetic materials. This means that magnetization inside the material tends to deflect the external field. If χ_m is positive magnitude of magnetic flux density in the material will be more than magnitude of external magnetic field for paramagnetic and ferromagnetic materials. It means that magnetization inside the material tends to encourage the external field. So, after this clear difference between diamagnetic materials and paramagnetic/ferromagnetic materials students only have to keep in their minds that paramagnetic materials does not have permanent magnetizable properties and ferromagnetic materials have permanent magnetizable properties.

But we see that definition of "permanent magnetizable" could be understood wrongly by students as in question 5. Students do not take into account that magnetization of magnetized ferromagnetic material can be changed or disrupted by external effects (new external magnetic field, hard stroke, temperature etc.). In this situation importance of hysteresis loop for ferromagnetic materials appears. Teaching the properties of ferromagnetic materials on hysteresis loop as detailed can solve this problem. Also designing some easy experiments can be more didactic. We realized our fifth question with a simple experiment and students that we interviewed and who gave the answer of magnet repels the iron rod were very surprised. Because, magnet attracted the rod. Then we explained the reason of this. Also we showed that a magnetized iron rod attracts the pin. After this demonstration we hit the rod hardly to the table and bring near the pin again. Students saw that rod did not attract the pin after this. Thus students were aware of magnetization of a ferromagnetic material can be changed.

In addition to all these we suggest to use magnetic field strength \mathbf{H} as primary (external) magnetic field, not the magnetic flux density \mathbf{B} while teaching magnetostatics as pointed out in Herrmann's [9] study. Because, we think that physical meanings of these concepts can be learned easily by this way. According to equation (1), magnetization \mathbf{M} inside the material which tends to encourage the external field \mathbf{H} , provides concentrating of the field lines in the material for paramagnetics and ferromagnetics. So, Magnetic flux density \mathbf{B} inside the material increases. And magnetization \mathbf{M} inside the material which tends to deflect the external field \mathbf{H} , provides scattering of the field lines in the material for diamagnetics. So, Magnetic flux density \mathbf{B} inside the material decreases. We think that this kind of explanation helps to understanding of the meanings of these concepts and decreases students' difficulties as seen in questions 6 and 7.

We know that relationship between \mathbf{B} and \mathbf{H} for vacuum is given by equation

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \tag{8}$$

This equation suggests that the information content about the field provided by \mathbf{H} in a vacuum is always exactly the same as that provided by \mathbf{B} [2]. Hence, we think that use of \mathbf{B} as a primary field when discussing problems of other magnetism topics (magnetic fields of current carrying cables and coils, magnetic forces, magnetic induction etc.) will not cause a conceptual confusion for students. Because, generally we operate in vacuum when dealing with these topics.

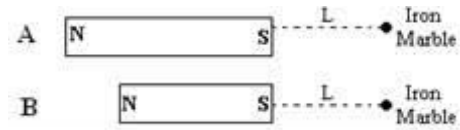
Thus, we hope that we can prevent the students' conceptual confusions about these concepts and provide better learning.

REFERENCES

- [1] Loftus, M., *Students ideas about electromagnetism*, School Science Review **77**, 93-94 (1996).
- [2] Roche, J. J., *B and H the intensity vectors of magnetism: a new approach to resolving a century-old controversy*, American Journal of Physics **68**, 438-449 (2000).
- [3] Cloete, H. J., *Is B or H the fundamental magnetic field*, IEEE Africon 4th **1**, 354-361 (1996).
- [4] Field, R., *What the B!***!H***! is wrong with electromagnetics teaching?*, Physics Education **32**, 264-270 (1997).
- [5] Feynman, R. P., Leighton, R. B. & Sands, M., *The Feynman Lectures on Physics, vol 2* (Addison-Wesley Publishing, California, 1977), p. 36.
- [6] Kraus, J. D., Beamesderfer, L. & Bradley, J. W. (Eds.), *Electromagnetics* (McGraw-Hill Inc., Singapore, 1991), p 335.
- [7] Guru, B. & Hiziroğlu, H., *Electromagnetic Field Theory Fundamentals* (Cambridge University Press, Cambridge, 2004), p 207.
- [8] Erol, M., Çallica, H., Aygün, M., Çalışkan, S., Kalem, R. & Kavcar, N., *Some common misconceptions in fundamental magnetism and electricity*, Bulgarian Journal of Physics **27**, 23-26 (2000).
- [9] Herrmann, F., *Teaching the magnetostatic field: Problems to avoid*, American Journal of Physics **59**, 447-452 (1991).
- [10] Stephan, J., *Targeting Students' Science Misconceptions* (Idea Factory Inc., Riverview, FL, 1994)
- [11] Borges, A. T., & Gilbert, J. K., *Models of magnetism*, International Journal of Science Education **20**, 361-378 (1998).
- [12] Guisasaola, J., Almudi, J. M., & Zubimendi, J. L., *Difficulties in Learning the Introductory Magnetic Field Theory in the First Years of University*, Science Education **88**, 443-464 (2004).
- [13] Saglam, M. & Millar, R., *Upper High Scholl Students' Understanding of Electromagnetism*, International Journal of Science Education **28**, 543-566 (2006).
- [14] Chabay, R. & Sherwood, B., *Restructuring the introductory electricity and magnetism course*, American Journal of Physics **74**, 329-336 (2006).

APPENDIX : Questions

Question 1



Two iron marbles having identical properties are placed at a distance of "L" from the bar magnets A and B having the same pole shapes as shown in the figure. Which of the following is certainly correct for the magnitudes of the attracting forces between the magnets and the marbles?

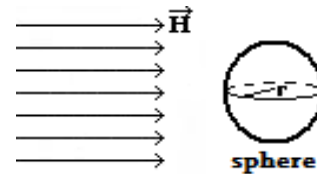
A) The magnet A always attracts stronger than the magnet B because it is physically bigger than the magnet B.

B) The magnitude of attracting force of the magnets does not depend on the shape of the poles.

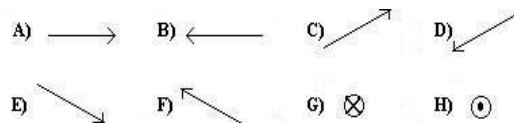
C) The magnet having more net magnetic moments in the same direction attracts more strongly than the other.

D) Both magnets attract with identical forces because magnitudes of the magnetic field strength are equal at the points where the marbles exist.

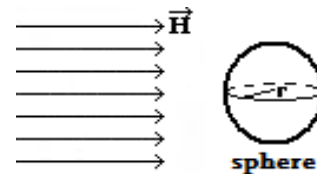
Question 2



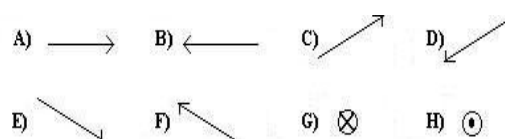
If a sphere, having a unit volume and made of a diamagnetic material, is placed into a strong and constant external magnetic field \mathbf{H} that has a direction as shown in the figure, which of the following shows the direction of the magnetization vector (\mathbf{M}) inside the sphere?



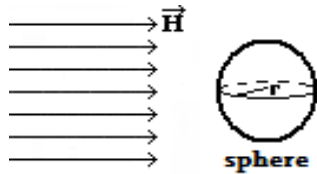
Question 3



If a sphere, having a unit volume and made of a paramagnetic material, is placed into a strong and constant external magnetic field \mathbf{H} that has a direction as shown in the figure, which of the following shows the direction of the magnetization vector (\mathbf{M}) inside the sphere?



Question 4



If a sphere, having a unit volume and made of a ferromagnetic material, is placed into a constant external magnetic field \mathbf{H} that has a direction as shown in the figure, which of the following shows the direction of the magnetization vector (\mathbf{M}) inside the sphere?

- A) \longrightarrow B) \longleftarrow C) \nearrow D) \searrow
 E) \swarrow F) \nwarrow G) \otimes H) \odot

Question 5

Point A of an iron rod is touched to the S pole of a magnet as shown in the figure (a). The rod is then disconnected from the magnet and the other pole of the magnet is drawn nearer to the rod as shown in the figure (b). According to this information, which of the following is certainly true for the effect of the magnet on the rod in the figure (b)?

- A) Magnet repels the iron rod.
 B) Magnet attracts the iron rod.
 C) No force exerts on the iron rod.

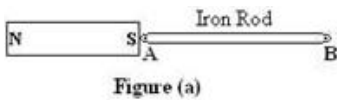


Figure (a)

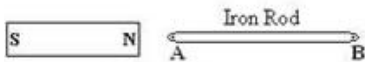
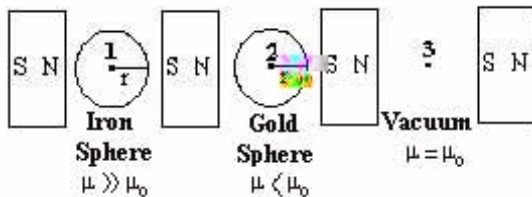


Figure (b)

Question 6



A system consisting of four identical magnets and two different spheres is set as shown in the figure. Which of the following is correct for the magnitude of the magnetic flux densities at the points of 1, 2 and 3? (Here, μ is the magnetic permeability of the spheres and μ_0 is the magnetic permeability of the free-space. Suppose that magnetic field strength of the magnets are efficient to affect the magnetic properties of gold and iron.)

A) Magnitudes of the magnetic flux densities are equal at all three points because the magnets are identical.

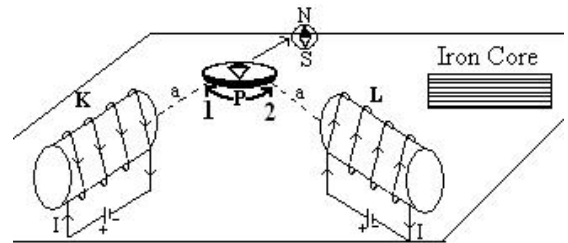
B) Magnitude of magnetic flux density reaches its highest value at the point 3 because there is no medium which would affect the magnetic flux density in any way.

C) Magnitude of magnetic flux density reaches its highest value at the point 2 because gold is a better conductor than iron and it allows the field lines to penetrate better than iron.

D) Magnitude of magnetic flux density has its highest value at the point 1 because magnetization inside the iron sphere increases the magnitude of the magnetic flux density in the region including the point 1.

E) Magnetic flux densities have the same values at the points 1 and 2, and also they are higher than the one at point 3. Because, gold and iron are metals and same effects occur on the field lines for each case.

Question 7



Two identical coils carrying the same constant current are placed on a table as shown in the figure. A compass needle is placed at the same distances from the coils. To start with, the S pole of the compass needle points to P. If we put an iron core inside the coil L, which of the following is certainly correct for the new direction of the compass needle?

- A) Direction of the needle does not change because of the value of the current on the coil L is constant. Therefore, magnitude of the magnetic flux density remains at the same value.
 B) The needle of the compass turns towards the direction of 1, because there is an induced magnetic field inside the iron core that opposes to the magnetic field of the coil L. So magnitude of the magnetic flux density decreases at the point where the compass is placed.
 C) The needle of the compass turns towards the direction of 2, because when we put the iron core inside the coil L, the current dependant magnitude of the magnetic field strength increases.
 D) The needle of the compass turns towards the direction of 2, because the magnetization in the iron core increases the value of the magnetic flux density at the point where the compass exists.

Motion of an electric dipole in a static electromagnetic field



Carl E. Mungan¹, Andrew Lasinski²

¹Physics Department, U.S. Naval Academy, Annapolis, Maryland, 21402-5002, USA.

²6876 Estoril Road, Mississauga, Ontario, L5N 1N1, Canada.

E-mail: mungan@usna.edu

(Received 3 July 2008; accepted 13 August 2008)

Abstract

Expressions for the force and torque on a moving electric dipole in a magnetostatic field are combined with those due to an electrostatic field. By sending oriented molecular dipoles into a region of crossed magnetic and electric fields, the molecules are selectively rotated based on the direction and magnitude of their velocities. In principle this field configuration could be used to create a molecular isolator that only lets molecules through in one direction.

Keywords: Electric dipole moment, electromagnetic force and torque, molecular orientation.

Resumen

Combinamos expresiones para la fuerza y la torca en un dipolo eléctrico en movimiento en un campo magnetostático con las ocasionadas por un campo electrostático. Enviando dipolos moleculares orientados en la región de cruce de los campos magnético y eléctrico, las moléculas son rotadas selectivamente en la dirección y magnitud de sus velocidades. En principio esta configuración de campo podría ser usada para crear un aislador molecular que sólo permite moléculas en una dirección.

Palabras clave: Momento dipolar eléctrico, fuerza electromagnética y torca, orientación molecular.

PACS: 41.20.-q, 33.15.Kr

ISSN 1870-9095

1 I. INTRODUCTION

2
3 A classical electric dipole $\vec{p} \equiv q\vec{L}$ consists of a positive
4 charge distribution $+q$ whose centroid is displaced by \vec{L}
5 relative to the centroid of a negative charge distribution $-q$.
6 (Quantum effects such as Stark mixing can induce dipole
7 moments in molecules which alter this simple picture [1].)
8 For example, in a gaseous NaCl molecule, the much greater
9 electronegativity of the chlorine atom as compared to that of
10 the sodium atom causes Cl to steal an electron away from
11 Na, resulting in an ionic bond between Cl^- and Na^+ . One
12 can thereby estimate [2] the magnitude of its dipole moment
13 to be the elementary charge e multiplied by the bondlength
14 L , giving $p \approx 4 \times 10^{-29} \text{ C}\cdot\text{m} = 12 \text{ D}$. Introductory physics
15 textbooks show that the torque on an electric dipole \vec{p} in an
16 electric field \vec{E} is $\vec{\tau}_{pE} = \vec{p} \times \vec{E}$. In addition, the motion of
17 point charges in electric and magnetic fields is discussed.
18 Similar ideas are used in the present article to discuss the
19 motion of an electric dipole in static magnetic and electric
20 fields.

21
22

23 II. FORCES AND TORQUES

24
25 Label the point midway between the centers of positive and
26 negative charge of the dipole \vec{p} as O. (This point may or
27 may not coincide with the center of mass of the object.)
28 Decompose the motion of the dipole at any instant into a
29 translation of point O with linear velocity \vec{v} and a rotation
30 of the dipole about point O with angular velocity $\vec{\omega}$. Now
31 suppose the dipole enters a region of uniform magnetic field
32 \vec{B} . The magnetic forces on the two charge centers will be

$$\vec{F}_+ = q(\vec{v} + \vec{\omega} \times \vec{L}/2) \times \vec{B} \quad \text{and} \quad (1)$$

$$\vec{F}_- = -q(\vec{v} - \vec{\omega} \times \vec{L}/2) \times \vec{B}.$$

33
34 Consequently the net force on the dipole becomes the triple
35 vector product

$$\vec{F}_{pB} = (\vec{\omega} \times \vec{p}) \times \vec{B}, \quad (2)$$

36
37 while the torque about O is

$$\vec{\tau}_{pB} = \vec{p} \times (\vec{v} \times \vec{B}). \quad (3)$$

1 In the frame of reference of point O, the magnetic field is
 2 relativistically transformed into an electric field $\vec{E}' = \vec{v} \times \vec{B}$
 3 and thus $\vec{\tau}_{pB} = \vec{\tau}_{pE'}$ which seeks to rotate \vec{p} into the
 4 direction of \vec{E}' .

5 Suppose the dipole starts out with zero angular velocity
 6 but its translational velocity is perpendicular to the applied
 7 magnetic field so that the torque in Eq. (3) is maximized. To
 8 be specific, choose \vec{v} to define the $+x$ direction and \vec{B} the
 9 $+y$ direction. Now the torque is largest if \vec{p} lies in the xy
 10 plane. In that case $\vec{\tau}_{pB}$ will also lie in the xy plane and will
 11 be perpendicular to \vec{p} . As a result, the dipole will begin to
 12 librate (rock back and forth) end over end; that is, it will
 13 oscillate (indefinitely in the absence of drag) like a pendulum
 14 with the apex of its circular arc in the $+z$ direction.
 15 Associated with these rotational oscillations will be a
 16 periodically varying force \vec{F}_{pB} , alternately decelerating and
 17 accelerating the translations of the dipole because \vec{F}_{pB} is
 18 parallel to \vec{v} . In turn that force affects the torque by varying
 19 \vec{v} in Eq. (3), although the feedback will be weak if the mass
 20 of the dipole and/or its moment of inertia about O is large.

21 Incidentally, note that we can use a vector identity to
 22 rewrite Eq. (3) as

$$23 \quad \vec{\tau}_{pB} = (\vec{p} \times \vec{v}) \times \vec{B} + (\vec{B} \times \vec{p}) \times \vec{v}. \quad (4)$$

24 If the dipole moment is initially parallel to the magnetic
 25 field, then even after it begins to tumble, \vec{p} will always lie in
 26 the yz plane. Therefore $\vec{B} \times \vec{p}$ will be parallel to the x axis,
 27 and the last term in Eq. (4) will be zero. We can then
 28 interpret $\vec{p} \times \vec{v}$ as a magnetic dipole moment $\vec{\mu}$ in the $-z$
 29 direction. Charge $+q$ initially located at $y = L/2$ and
 30 traveling in the $+x$ direction is equivalent to a current I
 31 circulating clockwise as seen looking down along the z axis.
 32 Likewise charge $-q$ initially located at $y = -L/2$ and
 33 traveling in the $+x$ direction corresponds to the same
 34 clockwise current I . We thus have a current loop,
 35 corresponding to a magnetic dipole. Equation (4) can now be
 36 interpreted as $\vec{\tau}_{pB} = \vec{\tau}_{\mu B}$ where $\vec{\tau}_{\mu B} = \vec{\mu} \times \vec{B}$ is the torque
 37 on a magnetic dipole.

38 Next suppose that the region also contains a uniform
 39 electric field \vec{E} . The electric forces on the two charges
 40 constitute a couple, so that \vec{F}_{pE} is zero and $\vec{\tau}_{pE} = \vec{p} \times \vec{E}$. As
 41 a result, the overall electromagnetic force and torque on the
 42 electric dipole are

$$43 \quad \vec{F}_p = (\vec{\omega} \times \vec{p}) \times \vec{B} \quad (5)$$

44 and

$$45 \quad \vec{\tau}_p = \vec{p} \times (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (6)$$

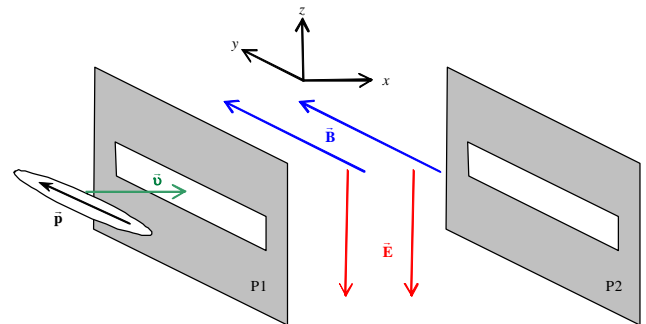
46 respectively. Equation (6) can be interpreted as the cross-
 47 product of \vec{L} with the Lorentz force. Now suppose we
 48 choose to cross the electric field with both the magnetic field

49 and translational velocity, $\vec{E} = \vec{B} \times \vec{v}$ (so that it is equal to
 50 $-\vec{E}'$ and points in the $-z$ direction). In that case, $\vec{\tau}_p$ is zero
 51 and the dipole will no longer begin to librate. This situation
 52 is the rotational analog of a “translational velocity selector”
 53 whereby a point charge entering a region of crossed electric
 54 and magnetic fields experiences zero net force.

57 III. MOLECULAR APPLICATION

58 As an application, one can imagine a device analogous to a
 59 Faraday optical isolator, as sketched in Fig. 1. Consider long,
 60 cigar-shaped molecules with one end negatively charged and
 61 the other end positively charged so that there is an electric
 62 dipole moment directed along their length (such as linear
 63 HCN trimers with $p = 11$ D [3, 4]). Suppose that a beam of
 64 them is incident on a horizontal molecular polarizer P1 that
 65 only transmits molecules oriented parallel to the y direction.
 66 (It might be possible to construct such a polarizer by milling
 67 nano-sized slits through an impermeable membrane [5].) The
 68 molecules enter a region with a magnetic field in the $+y$
 69 direction and an electric field in the $-z$ direction of
 70 appropriate magnitudes. The molecules therefore experience
 71 no torque and pass through a second horizontal molecular
 72 polarizer P2 and leave the field region. On the other hand, if
 73 we reverse the direction of \vec{v} and send molecules backward
 74 through P2, then there will be a torque on them (specifically
 75 in the $-x$ direction if \vec{p} is initially in the $+y$ direction). By
 76 suitable choice of the spacing between the two polarizers, we
 77 can arrange for the dipoles to be rotated by exactly 90° when
 78 they reach P1 and therefore be rejected by it.
 79

80



81
82

83 **FIGURE 1.** Sketch of a molecular isolator. Two horizontal
 84 molecular polarizers P1 and P2 sandwich a region of crossed
 85 magnetic and electric fields directed along the $+y$ and $-z$ axes,
 86 respectively. A long molecule with an electric dipole moment
 87 oriented along its axis is shown entering the device with a
 88 translational velocity in the $+x$ direction.
 89

90 Note that the resulting collision of the molecules with P1
 91 should be designed to be inelastic, with the rejected
 92 molecules falling vertically into some collection chamber

1 below the field region.¹ If the molecules instead reflected
2 elastically off P1, their rotational inertia would cause them to
3 continue to rotate as they traveled back toward P2. But since
4 they experience no torque on that return trip, they would
5 rotate by more than 90° and overshoot the acceptance slit in
6 P2 (by an angle of $180^\circ / \sqrt{2} - 90^\circ \approx 37^\circ$). If the molecules
7 reflected elastically off P2 also, they would then be returned
8 to P1 once again and this time be transmitted by it. In the
9 absence of losses, it is impossible to get a net flow of
10 molecules from the entrance to the exit side of the isolator.
11 Otherwise one would have a Maxwell's demon which, when
12 connected to two chambers of molecules, would maintain a
13 steady-state pressure imbalance between them. The optical
14 analog would be a nonabsorbing valve that permits the flow
15 of radiation in only one direction, creating a permanent
16 temperature imbalance between two connected chambers, in
17 violation of the second law of thermodynamics [11].
18
19

20 ACKNOWLEDGEMENTS

21
22 Carl Mungan thanks Larry Tankersley for useful discussions.
23
24

25 REFERENCES

- 26
27 [1] Budker, D., Kimball, D. F., and DeMille, D. P., *Atomic*
28 *Physics: An Exploration Through Problems and Solutions*
29 (Oxford University Press, Oxford, 2004), Sec. 7.6.
30 [2]<<http://www.science.uwaterloo.ca/~cchieh/cact/applychem/waterphys.html>> Visited August 26, 2008
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48

- 49 [3] Kong, W., *Studies of electronic properties of medium and*
50 *large molecules oriented in a strong uniform electric field,*
51 *Int. J. Mod. Phys. B* **15**, 3471–3502 (2001).
52 [4] Block, P. A., Bohac, E. J., and Miller, R. E.,
53 *Spectroscopy of pendular states: The use of molecular*
54 *complexes in achieving orientation* *Phys. Rev. Lett.* **68**,
55 1303–1306 (1992).
56 [5] Frabboni, S., Gazzadi, G. C., and Pozzi, G., *Young's*
57 *double-slit interference experiment with electrons* *Am. J.*
58 *Phys.* **75**, 1053–1055 (2007).
59 [6] Loesch, H. J., *Orientation and alignment in reactive*
60 *beam collisions: Recent progress* *Annu. Rev. Phys. Chem.*
61 **46**, 555–594 (1995).
62 [7] Henderson, G. and Logsdon, B., *Stark effects on rigid-*
63 *rotor wavefunctions: A quantum description of dipolar*
64 *rotors trapped in electric fields as pendulum oscillators* *J.*
65 *Chem. Educ.* **72**, 1021–1024 (1995).
66 [8] Friedrich, B. and Herschbach, D. R., *Spatial orientation*
67 *of molecules in strong electric fields and evidence for*
68 *pendular states* *Nature* **353**, 412–414 (1991).
69 [9] Aquilanti, V., Bartolomei, M., Pirani, F., Cappelletti, D.,
70 Vecchiocattivi, F., Shimizu, Y., and Kasai, T., *Orienting and*
71 *aligning molecules for stereochemistry and photodynamics*
72 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **7**, 291–300 (2005).
73 [10] Slenczka, A., *Detection of "cold" spectra from a room-*
74 *temperature ensemble: Magnetic rotation spectroscopy with*
75 *simple interpretation in terms of molecular pendular states* *J.*
76 *Phys. Chem. A* **101**, 7657–7663 (1997).
77 [11]<<http://usna.edu/Users/physics/mungan/Scholarship/FaradayIsolators.pdf>> Visited August 26, 2008
78

¹Other practical considerations are that the molecules need to be:
low density to avoid collisions [6], rotationally cooled to below 1 K
[7, 8] to minimize thermal reorientations, and traveling at high
speed (above 1 km/s [9]) to keep the magnetic field strength
reasonable (say 0.5 T [10]).

True/untrue explanations in Physics: the Bohr's atom model



E. Marín

*Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada
Instituto Politécnico Nacional
Legaria 694, Col. Irrigación, C.P. 11500, México D.F., México*

Email: emarin63@yahoo.es , emarinm@ipn.mx

(Received 15 May 2008; accepted 14 July 2008)

Abstract

In this note, and inspired by an article appeared recently in this journal, we discuss an example related to the theory of the Bohr's atom, who illustrates the fact that erroneous expositions in the learning of Physics exist, considering that this concept includes the use of well internationally recognized and commonly used educational text books.

Keywords: Physics Education, History of Science, Text Books.

Resumen

En esta nota, e inspirados en un artículo aparecido recientemente en esta revista, se discute un ejemplo relacionado con la teoría del átomo de Bohr, que ilustra el hecho de que existen planteamientos erróneos en el aprendizaje de la Física, considerando que este concepto incluye el uso de libros de texto reconocidos internacionalmente y comúnmente utilizados en la práctica docente.

Palabras clave: Educación en Física, Historia de la Ciencia, Libros de Texto.

PACS: 01.30.M, 01.40.-d, 01.65.+g

ISSN 1870-9095

In a recent published paper in this Journal, Wörner [1] presented some examples of erroneous common facts that often appear in physics learning. In one of them (quoted as F in the mentioned article) the author shows that when Franck and Hertz performed their well known experiment about the ionization of atoms they did not know Bohr's theory, as it is often assumed because the most physics text books present this experiment as a consequent confirmation of the quantum hypothesis proposed by Bohr. We will show in this brief article why the Bohr model of the atom, in the way that it is described in the most used text books [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], is an example of another untrue explanation.

As it is well known Bohr postulated that the classical radiation theory does not hold for atomic systems. He overcomes the Rutherford's model problem of an unstable atom that continuously losses energy, by applying Plank's idea of quantized energy levels to orbiting atom electrons. In the above mentioned books the authors state that in order to calculate the electrons energy in their orbits in a one electron (better say, Hydrogen) atom, Bohr have made some basic assumptions that have been resumed in three postulates, namely:

i- The electron can moves only in certain and stable circular orbits about the nucleus (proton) where does not emit energy in the form of radiation.

ii- Radiation is emitted by the atom when the electron

“jumps” from a more energetic initial orbit (energy state) to a lower orbit, or it is absorbed when an electron transition from a lower to a higher energy state takes place.

iii- The allowed orbits are those for which the electron's orbital angular momentum, L , about the nucleus is an integral multiple of $h/2\pi$, where h is the Plank's constant, *i.e.* $L_n = mv_n r_n = n h/2\pi$, where m is the electron mass, v_n its velocity in the n -orbit of radius r_n and n an integer number ($n = 0, 1, 2, \dots$)

One can easy see that while the first two assumptions can be justifying using the above mentioned Bohr's previous knowledge of ancient atom models, including the planetary Rutherford's model, and of Plank's work on the laws of Black Body radiation (both date from the first years of the past century), the third assumption, although it can be interpreted on the basis of the wave-particle duality postulate of Louis De Broglie¹, does not have a preceding historical foundation at the moment at which Bohr developed his model, which sometimes makes difficult its acceptance: Note that the work of Bohr was developed

¹ Louis De Broglie proposed towards 1924 the relation $\lambda=h/mv$ for the wavelength of a wave associated to a particle of mass m moving with speed v . If the wave associated to the particle must “enter” one circular orbit of radio r , then the length of the orbit must agree with a multiple of an integer number of wavelengths, that is, $2\pi r=n\lambda_n=n h/mv_n$ from which the condition of angular momentum quantization is straightforward obtained.

around the 1913 whereas De Broglie published his ideas approximately 10 years later. Bohr himself used the quantization of the angular moment as an *ad hoc* condition to reproduce the formula of Balmer in the first part of his famous trilogy [9]. In both following parts he tried to look for a justification for the same condition. His third derivation, considered the deepest of all [10], begins stipulating the asymptotic coincidence, for great values of n , between the classic frequency of revolution of the electron in the orbit and the frequency of the radiation emitted in the “quantum jump” of the electron between orbits, which is known as the Principle of Correspondence.

Using this principle, the first two postulates enunciated above, and Rydberg’s formula describing the energy of the observed (measured) discrete spectral lines², Bohr’s was capable to deduce the equations that allow the calculation of the radius of the orbits, the velocity and energy of the electrons in each state, as well as the angular momentum quantization rule given in the third’s postulate mentioned before, as has been described elsewhere in detail [11, 12]. In a view words, the true explanation relies on the fact that this rule is really a consequence of Bohr’s assumptions for the description of the atoms and of the regularities observed in their emission spectra. It was not used by Bohr as a premise to obtain the characteristic parameters describing the one electron atom. Bohr, motivated to find an acceptable explanation for experimental evidences such as Rydberg’s Formula, started from the first two assumptions mentioned above, related to the existence of stationary energy levels, and from the Correspondence Principle, to reach conclusions who marked the begin of a new epoch related to the comprehension of nature: The Quantum Era.

As stated by Wörner [1], informal learning, a concept that unfortunately sometimes involve the use of well recognized and used text books, is a useful way of learning, but it is not exempt on risks. Sometimes it can be the cause of misinterpretations of historical facts, as in the example described here. Therefore, it is important to let our students know that these situations exist, even in “bestseller” text books, and we, teachers, must guide and stimulate them to consult original papers and authoritative sources of information. For this purpose we must begin to adopt this practice for ourselves.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partially supported by SIP project 20080032 and COFAA-IPN.

REFERENCES

- [1] Wörner, C. H., *Some Physics teaching whispered fallacies*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **2**, 18 (2008).
- [2] Eisberg, R. and Resnick, R., *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles* (John Wiley and Sons, New York, 1985).
- [3] Krane, K., *Modern Physics* (John Wiley and Sons: New York, 1983).
- [4] Haliday, D., Resnick, R. y Walker, J., *Fundamentals of Physics: Extended* (John Wiley and Sons, New York, 2001).
- [5] Rohlff, J. W., *Modern Physics from α to Z^0* , (John Wiley and Sons, NY, 1994).
- [6] Beiser, A., *Conceptos de Física Moderna* (Editorial Científico Técnica, La Habana, 1975).
- [7] Stierstadt, K., *Physik der Materie* (VCH, Weinheim, 1989).
- [8] Alonso, M. y Finn, E. J., *Fundamental University Physics, III, Quantum and Statistical Physics* (Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1968).
- [9] We refers us to the famous trilogy written by N. Bohr and published in 1913 “On the Constitution of Atoms and Molecules”, Parts I, II y III, in *Phil. Mag.* **26**, No. 151, pp. 1-25; No. 153, pp. 476-501 and No. 155, pp. 857-875, respectively.
- [10] Heilbron, J. L., *Bohr's first theories of the atom*, Physics Today, 8-36 (October 1985)
- [11] Haken, H. y Wolf, H. C., *The Physics of Atoms and Quanta: Introduction to Experiments and Theory*, (Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2000).
- [12] Marín, E., *Acerca del modelo atómico de Bohr*, Revista Cubana de Física **22**, 125-135, (2005)

² In 1885 Balmer had found that the wavelengths, λ , of the visible spectral lines can be expressed by means of the formula $1/\lambda=R_H(1/2^2-1/n^2)$, where n is an integer number and $R_H=109677.5810 \text{ cm}^{-1}$ is the Rydberg’s constant, called so in honour to which generalized in 1889 the above expression to the whole spectrum writing it in the form $1/\lambda=R_H(1/n'^2-1/n^2)$, with $n'<n$. It is known as Rydberg’s Formula for the Spectral Series of the Hydrogen Atom. For $n'=2$ it leads to the Series of Balmer. If $n'=1$ the series is denominated of Lyman, and it is in the ultraviolet region. The numbers $n'=3$ and $n'=4$ correspond to the Series of Paschen and of Brackett respectively, both in the infrared.

Standing Human - an Inverted Pendulum



Kui Fu Chen

P.B. 74#, East Campus, College of Science, China Agricultural University, Beijing, 100083, P.R.China.

E-mail: chenkuifu@gmail.com

(Received 15 August; accepted 18 September 2008)

Abstract

A standing posture looks like an inverted pendulum, and its stabilization mechanism has been catching scientists' attention for ages. In this note, the posture stability is delineated at the lowest level-mechanical model. The foot sole is simplified as a twisted spring to stable the posture. The critical spring coefficient is derived.

Keywords: Inverted pendulum; Posture, Stability.

Resumen

Una postura de pie se ve como un péndulo invertido, y su mecanismo de estabilización ha llamado la atención de científicos por años. En esta nota, la estabilidad de la postura está determinada en el nivel más bajo de modelo mecánico. La planta del pie es simplificada como un resorte torcido para una postura estable. Derivamos el coeficiente crítico del resorte

Palabras clave: Péndulo invertido, Postura, Estabilidad.

PACS: 87.85.G-d, 01.40.-d

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

A standing human looks like an inverted pendulum with the gravity center well above the ground [1]. The mechanism to keep the standing posture has intrigued scientists from several fields for a long time [2]. The standing posture stability has much significance in clinics. Stevens had reported that the direct medical cost incurred with falling of patients or aged people was up to 19 billion dollars in 2000 in the USA [3]. The following factors can influence the human standing posture directly or indirectly, Parkinson's Disease [4], diabetes mellitus [5], Ménière's disease [6], stroke [7], injured spinal cord [8], large dose of pyridoxine [9], etc. Therefore, research on the stance posture becomes an important branch of neuroscience, and its functioning units include muscles, skeletons, and peripheral sensors to the central neural system [10, 11, 12]. The state of art has entered into the gene level [13]. Its mechanism also has important value in selecting and training astronauts [14], sports athletes [15], and robotic design [16]. In addition, it aids to understand how the human eventually evolve to a stance posture [17].

In this note, we give a possible explanation at the simplest mechanical level using the inverted pendulum model, which provides an enticing dynamics example. The outline of this note is as follows, the physical model is shown in Sec II; the mathematical model is discussed in Sec III; and finally the conclusions are reported in Sec. IV.

II. PHYSICAL MODEL

At the mechanical level, a standing human can be simplified as a standing rigid body with a mass m , the mass center C , the mass center height above the ground l_c , and the rotational inertia J_C with respect to the mass center C (FIGURE 1).

The stabilization of an inverted pendulum can be achieved by exerting the pivot with high-frequency vertical oscillations [18-20]. Clearly, such mechanisms cannot be applied to a standing human.

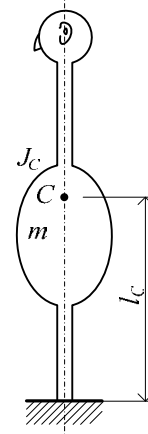


FIGURE 1. The model of a standing human.

The feet of a standing human have plate-like soles, rather than simple pivots. These plate-like soles are essential to stabilizing a standing posture. As an extreme counterexample (FIGURE 2) is the cruel three thousand years practice of foot wrapping of females in China until beginning of the 20th Century that made a woman totter while walking.



FIGURE 2. Wrapped feet with matched shoes.

At the mechanical level, a normal plate-like sole can be simplified as a coiled spring (coefficient k), as shown in FIGURE 3. The coiled spring plays a key role in maintaining stability, as does the plate-like sole when the human tilts.

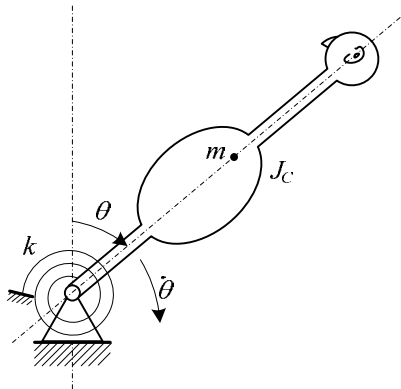


FIGURE 3. Inverted pendulum model with a coiled spring.

III. DERIVATION

We will investigate the model in FIGURE 3 by way of the energy method. Assume the coiled spring has an original length corresponding to an initial angle θ_0 . The human when aligned vertically is given the status of zero potential energy. When the model tilts by the angle θ , the potential contains two terms: that of the spring resisting the movement (V_k) and that of gravity accelerating the rotation (V_h). They are

$$V_k = \frac{k}{2}[(\theta - \theta_0)^2 - (\theta_0 - \theta_0)^2], \quad V_h = mgl_c(\cos \theta - 1). \quad (1)$$

The total potential is

$$V = \frac{k}{2}[(\theta - \theta_0)^2 - \theta_0^2] + mgl_c(\cos \theta - 1). \quad (2)$$

The kinetic energy of a tilting human is

$$T = \frac{1}{2}(ml_c^2 + J_c)\dot{\theta}^2. \quad (3)$$

In light of energy conservation, $d(T+V)/dt = 0$, we have

$$\frac{dt}{d} \left\{ \frac{k}{2}[(\theta - \theta_0)^2 - \theta_0^2] + mgl_c(\cos \theta - 1) + \frac{1}{2}(ml_c^2 + J_c)\dot{\theta}^2 \right\} = 0. \quad (4)$$

It can be derived that

$$k(\theta - \theta_0)\dot{\theta} - mgl_c \sin \theta \dot{\theta} + (ml_c^2 + J_c)\ddot{\theta} = 0. \quad (5)$$

Eliminating $\dot{\theta}$ leads to

$$(ml_c^2 + J_c)\ddot{\theta} + F(\theta) = 0, \quad (6)$$

where the force $F(\theta)$

$$F(\theta) = k(\theta - \theta_0) - mgl_c \sin \theta. \quad (7)$$

The angle θ_b corresponding to the balance center is as in

$$F(\theta_b) = 0 = k(\theta_b - \theta_0) - mgl_c \sin \theta_b. \quad (8)$$

That is

$$\theta_b - \frac{mgl_c}{k} \sin \theta_b - \theta_0 = 0. \quad (9)$$

Usually a small θ_b , corresponding to vertical alignment approximately, is concerned. In this case, $|\theta_b| \geq |\theta_0|$ can be derived from Eq. (9). This is because the human body weight pulls the initial balance angle θ_0 down to a new position θ_b .

We are most interested in the condition $\theta_b = 0$, meaning that the balance status is the normal vertical alignment as a stance. Clearly, this requires $\theta_0 = 0$ according to Eq. (9). This indicates that the initial length of the coiled spring should be aligned vertically at first. However, this is not enough, because the balance center should be stable.

We introduce a new variable $\varphi = \theta - \theta_b$. Substituting $\theta = \varphi + \theta_b$ back to Eq. (7) leads to

$$(ml_c^2 + J_c)\ddot{\varphi} + F(\theta_b + \varphi) = 0. \quad (10)$$

For stability analysis, φ is assumed to be small, thus $F(\varphi + \theta_b)$ is expanded as the Taylor series around $\varphi = 0$. That is

$$F(\theta_b + \varphi) = F(\theta_b) + (k - mgl_c \cos \theta_b)\varphi + \frac{F''(\theta_b)}{2}\varphi^2 + \frac{F'''(\theta_b)}{6}\varphi^3 + \dots \quad (11)$$

On the right-hand side, the first term is zero because of Eq. (8). The term higher with orders than φ^2 can be ignored since φ is small. Accordingly,

$$(ml_c^2 + J_c)\ddot{\varphi} + (k - mgl_c \cos \theta_b)\varphi = 0. \quad (12)$$

Hence, a stable θ_b requires that

$$k > mgl_c \cos \theta_b. \quad (13)$$

Specifically, for the most concerned case $\theta_b = 0$ (vertical alignment), we have

$$k > mgl_c. \quad (14)$$

Eq. (14) indicates that in order to have a stable stance, the torque generated by the twist spring must be greater than that produced by the gravity.

$\theta_b = 180$ means the foot was hung over, the equivalent stiffness in Eq. (12) is always positive. That is to say, this is always a stable posture.

Of course, a significant higher k makes the standing posture stable, but it also may cost more biological energy, in addition to losing movement flexibility. If the twist spring has the critical value $k = mgl_c$, the potential in Eq. (2) reduces

$$V = mgl_c (\cos \theta - 1 + \theta^2 / 2) > 0 \text{ for a small } \theta. \quad (15)$$

Consequently $\theta_b = 0$ is still a stable balance center. In this case, it is the nonlinear term of the gravity potential that stabilizes the stance.

IV. CONCLUSIONS

The standing posture was discussed based on the simplest mechanical level using the model of an inverted pendulum with coiled spring, and the critical spring coefficient to keep a stable posture was derived. It was shown that the coiled spring (equivalent to the sole's function) must be adapted (might be driven by the evolutionary force) to be aligned vertically at first to keep a vertical posture efficiently. It was also shown that for critical spring

coefficient, it is the nonlinear term of the gravity potential that stabilizes the stance.

REFERENCES

- [1] Loram, I. D. and Lakie, M., *Human balancing of an inverted pendulum: position control by small, ballistic-like, throw and catch movements*, Journal of Physiology-London **540**, 1111-1124 (2002).
- [2] Macpherson, J. M. and Horak, F. B., *Chapter 39: Posture*, in: Principles of Neural Science, Ed. by Kandel E.R., etc., McGraw Hill (2007).
- [3] Stevens, J. A., *The costs of fatal and non-fatal falls among older adults*, Injury Prevention **12**, 290-295 (2006).
- [4] Karasek, M., *Melatonin, human aging, and age-related diseases*, Experimental Gerontology **39**, 1723-1729 (2004).
- [5] Ahmmed, A. U. and Mackenzie, I. J., *Posture changes in diabetes mellitus*, Journal of Laryngology and Otology **117**, 358-364 (2003).
- [6] Neuhauser, H. K., *Epidemiology of vertigo*, Current Opinion Neurology **20**, 40-46 (2007).
- [7] Rothwell, P. M., Coull, A. J. and Giles, M. F., *Change in stroke incidence, mortality, case-fatality, severity, and risk factors in Oxfordshire, UK from 1981 to 2004 (Oxford Vascular Study)*, Lancet **363**, 1925-1933 (2004).
- [8] Schwab, M. E., *Repairing the injured spinal cord*, Science **295**, 1029-1031 (2002).
- [9] Perry, T. A., Weerasuriya, A. and Mouton, P. R., *Pyridoxine-induced toxicity in rats: a stereological quantification of the sensory neuropathy*, Experimental Neurology **190**, 133-144 (2004).
- [10] Masani, K., Vette, A. H. and Popovic, M. R., *Controlling balance during quiet standing: Proportional and derivative controller generates preceding motor command to body sway position observed in experiments*, Gait & Posture **23**, 164-172 (2006).
- [11] Allum, J. H. J., Bloem, B. R. and Carpenter, M. G., *Proprioceptive control of posture: a review of new concepts*, Gait & Posture **8**, 214-242 (1998).
- [12] Ting, L. H. and McKay, J. L., *Neuromechanics of muscle synergies for posture and movement*, Current Opinion in Neurobiology **17**, 622-628 (2007).
- [13] Lalonde, R. and Strazielle, C., *Brain regions and genes affecting postural control*, Progress in Neurobiology **81**, 45-60 (2007).
- [14] Lackner, J. R. and DiZio, P., *Vestibular, proprioceptive, and haptic contributions to spatial orientation*, Annual Review of Psychology **56**, 115-147 (2005).
- [15] Davlin, C. D., *Dynamic balance in high level athletes*, Perceptual and Motor Skills **98**, 1171-1176 (2004).
- [16] Azevedo, C., P. Poinet, and Espiau, B., *Artificial locomotion control: from human to robots*, Robotics and Autonomous Systems **47**, 203-223 (2004).
- [17] Dunbar, D. C., Horak, F. B. and Macpherson, J. M., *Neural control of quadrupedal and bipedal stance-implications for the evolution of erect posture*, American Journal of Physical Anthropology **69**, 93-105 (1986).

- [18] Arinstein, A. and Gitterman, M., *Inverted spring pendulum driven by a periodic force: Linear versus nonlinear analysis*, European Journal of Physics **29**,385-392 (2008).
- [19] Mata, G. J. and Pestana, E., *Effective Hamiltonian and dynamic stability of the inverted pendulum*, European Journal of Physics **25**,717-721 (2004).

- [20] Butikov, E. I., *On the Dynamic Stabilization of an Inverted Pendulum*, American Journal of Physics **69**,755-768 (2001).

Explain the latent heat and specific heat of water, ammonia, and methanol with degrees of freedom



Lianxi Ma¹ and Feng Li²

¹ Blinn College, Bryan, TX 77805, USA.

² Tangshan 10th High School, Tangshan, Hebei, 063021, P.R. China.

E-mail: Lianxi.ma@blinn.edu

(Received 13 August 2008; accepted 9 September 2008)

Abstract

The internal energies of 0°C water and ice are considered from the perspective of degree of freedom and latent heat of fusion of water is calculated, which is in good agreement with the published value. With the same consideration, the latent heats of fusion of ammonia and methanol are calculated and the results are in reasonable agreement with the published values. This simple strategy can give specific heats of water, liquid ammonia, and methanol, which are in good agreement with known data.

Keywords: Degree of freedom, latent heat, specific heat, water, ice.

Resumen

Se calculan las energías internas del agua y del hielo a 0°C consideradas desde la perspectiva de los grados de libertad y el calor latente de fusión del agua, las cuales están en buena concordancia con los valores publicados. Con la misma consideración, se calculan los calores latentes de fusión del amoníaco y del metanol y los resultados están en acuerdo razonable con los valores publicados. Esta sencilla estrategia puede dar los calores específicos del agua, del amoníaco líquido, y del metanol, los cuales se encuentran en buena concordancia con los datos conocidos.

Palabras clave: Grados de libertad, calor latente, calor específico, agua, hielo.

PACS: 01.40.Fk, 01.40.gb, 01.40.gf

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

There are 15 known crystalline solid phases of water and all of them are called ice. But here the ice in our context is the one when water is cooled down to 0°C at 1 atmosphere. It is well known that at 0°C and 1 atmosphere, the density of water is 0.9998 g/cm³ and the density of ice is 0.9162 g/cm³ [1]. There is a question: For 0°C water and ice, which has a higher internal energy? Because they have same temperature, their molecules should have same kinetic energies. Therefore it seems that we need to compare their potential energies among molecules. There might be 2 answers: 1) Water has higher internal energy. This is because the latent heat of fusion of water is $L_f = 33.5 \times 10^4$ J/kg [2], which means that 1 kg of ice at 0°C needs 33.5×10^4 J of heat to change to 0°C water (we can ignore the work done by the expansion of volume which is about 9 J). 2) Ice has higher internal energy. This is because ice's density is lower so the distance between molecules is larger, resulting in larger potential energy. Of course the latter argument doesn't agree to our common sense. But how do we explain this paradox?

We believe that the main difference of internal energy between 0 °C water and ice comes from the alteration of degree of freedom of molecules. Let us estimate the latent heat energy of water according to equipartition theorem. For an ice molecule, it can only vibrate so it has only 3 degrees of freedom; while for a water molecule, it can also move in

space (translational motion) and rotate so it has 6 more degrees of freedom. Therefore, 1 mole of 0°C water should have $3RT$ of more energy than 0°C ice. For 1 kg of water, then, this energy difference is:

$$\frac{1}{18 \times 10^{-3}} (3 \times 8.31 \times 273) = 37.8 \times 10^4 \text{ J/kg.}$$

Which is in good agreement with the published latent heat $L_f = 33.5 \times 10^4$ J/kg. The difference: 4.3×10^4 J/kg, can be attributed to the potential energy change among molecules.

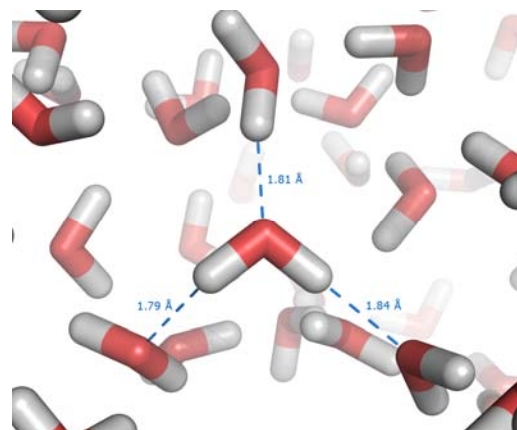


FIGURE 1. Schematic view of water molecules. The dashed blue lines from the molecule in the center of the picture represent hydrogen bonds.

Actually, when water is frozen to ice, the hydrogen bonds are formed among water molecules, which line up water molecules less efficiently – larger spaces among molecules. The water molecules and their hydrogen bonds are shown in Fig. 1. In this sense, we may say that interaction among water molecules has changed from random electrostatic intermolecular attraction to a much stronger fixed dipole – dipole van der Waals interaction.

Based on this assumption, the water's specific heat should be $9R$ which is composed of $3R$ from vibration of atoms in a water molecule; $3R$ from vibration of water molecules; and $3R$ from rotation and translation. That is, $9R = 74.79 \text{ J/(mol K)}$, which is close to the published data of 75.35 J/(mol K) [2].

We can apply the same strategy to Ammonia and Methanol that have similar molecular structure as water. For Ammonia, its published latent heat of fusion $L_f = 5.643 \text{ kJ/mol}$, and the freezing point is 195 K [3]. So its latent heat of fusion is $3RT = 3 \cdot 8.31 \cdot 195 = 4.87 \text{ kJ/mol}$. The error is about 15% compared to its published value.

If we apply $9R$ to calculate ammonia's liquid specific heat that is, again, 74.79 J/(mol K) which is in good agreement with the published data of 76.84 kJ/(mol K) .

For Methanol, its published latent heat of fusion is $L_f = 3.215 \text{ kJ/mol}$ at 176 K . And so its latent heat of fusion is $3RT = 4.388 \text{ kJ/mol}$. Compared to its published data, the error is about 31%.

Comparing $9R$ with liquid Methanol's published specific heat of 81.08 J/(mol K) [4], 74.79 J/(mol K) is in good agreement with it.

In summary, we believe that the degree of freedom change plays an important role in the phase change and the majority of the heat needed for the fusion goes to the excitation of more degrees of freedom.

REFERENCES

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Ice>, *Characteristics*, looked up on 6/07/08.
- [2] Walker, J., *Physics*, 3rd edition, Chap. 17, (Benjamin-Cummings Publishing Company, USA, 2007).
- [3] http://www.engineeringtoolbox.com/ammonia-d_971.html; looked up on 6/07/08 and private communication with Dr. P. T. Eubank, Department of Chemical Engineering, Texas A&M university, College Station, TX 77843 – 3122.
- [4] http://www.biodiesel.org/pdf_files/Methanol_Handling_Guide.pdf; looked up on 6/07/08. Also, private communication with Dr. P. T. Eubank.

Water Evaporation: Apparent Anomaly and its Resolution



D. C. Agrawal¹ and V. J. Menon²

¹Department of Farm Engineering, ²Department of Physics, Banaras Hindu University
Varanasi – 221 005, India

E-mail: dca_bhu@yahoo.com

(Received 3 July 2008; Accepted 10 August 2008)

Abstract

The kinetic theory expression for the rate of evaporation of water gives a rather large numerical value in comparison to what is observed in the laboratory or globally. This paradox is resolved by recalling that evaporation and condensation processes must be considered simultaneously.

Keywords: Kinetic theory, evaporation and condensation water processes, physics education.

Resumen

La expresión de la teoría cinética para la tasa de evaporación del agua da un gran valor numérico para lo que se observa en el laboratorio o en el mundo. Esta paradoja se resuelve recordando que los procesos de evaporación y condensación deben ser considerados al mismo tiempo.

Palabras clave: Teoría cinética, procesos de evaporación del agua, educación en física.

PACS: 05.70. Fh, 05.90. +m

ISSN 1870-9095

While teaching thermodynamics to undergraduates the following interesting observation was made by us. First consider a beaker with closed lid containing a liquid in dynamic equilibrium with its saturated vapor. The net rate of change of mass of the liquid

$$R \equiv (J_e - J_c) A = 0, \quad (1)$$

where A is the surface area, J_e the gross mass evaporation rate and J_c the gross mass condensation rate expressed in $\text{g}/\text{cm}^2/\text{s}$. Application of Maxwellian kinetic theory to the vapour phase then leads to the following well known formula [1,2] for the gross evaporation rate

$$J_e = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{1}{2}} p, \quad (2)$$

where m is the mass of a molecule, T the absolute temperature, p the equilibrium vapor pressure and k the Boltzmann constant. At the face value numerical application of Eq. (2) leads to anomalously large evaporation rate in the case of water and its logical resolution is also called for. This fact is illustrated below by two explicit examples.

Example 1

Take water in an open beaker kept in a hot dry room so that humidity has little apparent role to play. Numerically, using [3]:

$$m = 3.0 \times 10^{-23} \text{ g}, \quad T = 300 \text{ K}, \quad p = 3.67 \times 10^4 \text{ dyne}/\text{cm}^2, \\ k = 1.38 \times 10^{-16} \text{ erg}/\text{K}, \quad (3)$$

we find from Eq. (2) that

$$J_e = 0.4 \text{ g}/\text{cm}^2/\text{s} \quad (4)$$

The above theoretical value is obviously couple of orders of magnitude larger than what is observed in practice. This paradox is explained by remembering that a thin boundary layer of air above the liquid surface would very quickly become populated by water molecules. These water molecules would perform a random walk, *i.e.*, would travel in zigzag fashion encountering random collisions with air molecules and, at times, returning back to the liquid and thereby condensing. The thickness of the said boundary layer is a few mean free paths and the condensation process is assisted by the fact that the temperatures as well as mass of the water molecules are comparable to those of the air molecules. Hence, the net rate of evaporation is governed by the non-zero difference $J_e - J_c$ rather than by J_e itself. The fact that the air in the room is on the average

dry is irrelevant; what is relevant is the immediate environment of the evaporating water.

Example 2

Consider geophysical data on the net volume of water [4] evaporated by the sun over the globe viz. 95000 cubic miles per year. Multiplying it by water's density, dividing by the surface area of the earth and time duration we find the geophysical rate

$$J_e^{geo} \sim 2.6 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2/\text{s}, \quad (5)$$

which is several orders of magnitude smaller than Eq. (4). This paradox is resolved by remembering that the terrestrial sources of water viz. oceans, lakes, rivers, etc. have above them a zone of air saturated to some extent with water vapor so that evaporation and condensation processes go on simultaneously.

It is hoped that the above numerical values of gross/net evaporation rates together with the physical explanations offered will be of great interest to the students as well as teachers of thermodynamics. Before ending the readers may be reminded that in the case of gas-filled tungsten filament lamps the net evaporation of tungsten atoms from the glowing filament is considerably retarded [5] by the presence of a gas sheath called Langmuir sheath.

REFERENCES

- [1] Bohren, C. F. and Albrecht, B. A., *Atmospheric Thermodynamics* (Oxford University Press, Oxford, 1998, p. 187).
- [2] Langmuir, I., *Phenomena, Atoms and Molecules* (Philosophical Library, New York, 1950, p. 296).
- [3] Agrawal, D. C. and Menon, V. J., *Surface tension and evaporation of water: An empirical relation for water*, Phys. Rev. **A46**, 2166-2169 (1992).
- [4] Ackermann, W. C., Colman E A and Ogrosky H O, Where we get our water published in *The Year Book of Agriculture* (US Department of Agriculture, Washington, 1955, p. 41).
- [5] Elenbaas, W., *Light Sources* (Philips Technical Library, Macmillan, 1972, p. 31).

Teaching Nonlinear Dynamics and Chaos for Beginners



Jesús M. Seoane, Samuel Zambrano and Miguel A. F. Sanjuán

Departamento de Física, Universidad Rey Juan Carlos, Tulipán s/n. 28933 Móstoles, Madrid, Spain.

E-mail: jesus.seoane@urjc.es

(Received 23 June 2008, accepted 30 July 2008)

Abstract

We describe a course in Nonlinear Dynamics for undergraduate students of the first years of Chemical Engineering, Environmental Sciences and Computer Sciences. An extensive use of computational tools, the internet and laboratory experiments are key ingredients of the course. Even though their previous background in physics and mathematics might be limited, our experience shows that an appropriate selection of the contents with the use of some conceptual introductory ideas and multimedia techniques are an excellent way to introduce Nonlinear Dynamics and Chaos for beginners. The active participation of the students and the extraordinary interest arisen in them has been surprising.

Keywords: Physics Education, Nonlinear Dynamics and Chaos.

Resumen

Describimos un curso de Dinámica No Lineal para estudiantes de los primeros cursos de las titulaciones de Ingeniería Química, Ciencias Ambientales e Informática. El uso extensivo de herramientas computacionales, internet y prácticas de laboratorio son los ingredientes clave de este curso. Aún siendo sus conocimientos previos en física y matemáticas limitados, nuestra experiencia muestra que una selección adecuada de los contenidos junto con algunos conceptos introductorios y técnicas multimedia son una forma excelente para introducir la Dinámica No Lineal y Teoría del Caos para principiantes. La activa participación de los estudiantes y el extraordinario interés alcanzado en ellos han sido sorprendentes.

Palabras clave: Enseñanza de la Física, Dinámica No Lineal y Caos.

PACS: 05.45.Ac, 05.45.Df, 05.45.Pq

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

Nonlinear Dynamics and Chaos has been developed in the past years as a new emergent field in Physics with an interdisciplinary character. Introductory courses on this field are quite usual for graduate courses in sciences, but finding them as part of the education for undergraduate students in sciences and engineering is far more difficult, with the exception of Mathematics and Physics degrees. Our aim in this paper is to describe a course on Nonlinear Dynamics for undergraduate students with very different backgrounds that has been offered as an elective subject with growing success during the last 10 years in all science and engineering degrees at our university. What makes our course singular is that the students that have attended it have very different profiles, but most of them are students in Chemical Engineering, Environmental Sciences and Computer Sciences. Our experience has shown us that Nonlinear Dynamics is found as a very interesting subject by this heterogeneous collection of students, due to the global vision of the dynamical phenomena offered. On the other hand, we have learned that it is possible to make an introductory course on an specific field of physics, such as

Nonlinear Dynamics, in such a way that it can be found interesting for students outside the degrees of Mathematics and Physics, which do not necessarily have a strong background on them either.

The main goal of this course is to introduce and describe the chaotic phenomena in physical systems by only using a minimum background in physics and mathematics. We try to show a general overview of nonlinear dynamical systems and their applications in science and technology. Numerical simulations have been a basic point in the development of Nonlinear Dynamics, and they continue to be a very important tool for beginners in this field, as long as they allow to understand dynamical phenomena without having a deep mathematical knowledge of the involved mechanisms. Thus, throughout this course the use of JAVA applets simulations and other software tools such as DYNAMICS [1] and CHAOS FOR JAVA [2] play a key role. Another interesting and important part of this course is the nonlinear physics laboratory, where the students are able to visualize nonlinear and chaotic phenomena in real experiments in the laboratory. During the last years we have made use of some of the ideas explained in Refs. [3, 4], where different

laboratory experiments in Nonlinear Physics are shown. All this allows us to introduce the main concepts of Nonlinear Dynamics in a visual way without needing a detailed exposition of the mathematical aspects of the theory.

The structure of this paper is organized as follows. In Sec. II we introduce the main contents of this course. Section III shows the goals of this course and the methodology carried out in it. Conclusions are presented in Sec. IV.

II. CONTENTS

To decide the contents of an introductory course on a wide field of physics such as Nonlinear Dynamics is not an easy task. An important first decision that needs to be made before planning the structure of the course comes from the fact that in Nonlinear Dynamics, both continuous time and discrete time dynamical systems play a key role. There might be reasons for deciding to introduce first one or another. However, our experience tells us that introducing first the discrete time dynamical systems is a good choice. Our students usually do not have a background on differential equations, and with discrete time dynamical systems the concepts of temporal evolution and orbits are easy to understand. On the other hand, the first basic concepts on Nonlinear Dynamics, like the concept of *chaos*, can be easily introduced by using simple paradigmatic discrete dynamical systems such as the logistic map.

The selection of the contents should always be a result of the previous decision on the goals. Two fundamental aspects are needed to be considered to design a teaching plan: the methodology and the organization of the contents. In the planning and the design of the course we cannot forget either the duration of the course nor the background and previous knowledge of the students to whom the course is addressed. Considering the main goal of our course, which is to give an introductory course of Nonlinear Dynamics with stress to applications to different fields, we have divided our course in just 10 chapters that deal with a big part of Nonlinear Dynamics, which is shown now. After that, we make a brief description of each of its parts:

1. Introduction to Nonlinear Dynamics and Chaos
2. Discrete Dynamical Systems: 1D Maps
3. Two Dimensional Maps
4. Concepts in Dynamical Systems Theory
5. Elementary Bifurcation Theory
6. Chaotic Dynamical Systems
7. Lyapunov Exponents
8. Fractals and Fractal Dimension
9. Hamiltonian Chaos
10. Introduction to Nonlinear Time Series Analysis

1. Introduction to Nonlinear Dynamics and Chaos: In this chapter we make an introduction and course description, as long as a historical overview of the subject.

The first elementary notions of the concept of a dynamical system is given with the help of a simple physical system: the pendulum. Fractals are also presented here. During this first chapter we underline that this is an emergent and interdisciplinary field of physics, and it allows to obtain a *dynamical view* of the world. *Bibliography:* Chapter 1 of [5].

2. Discrete Dynamical Systems. One-dimensional maps: Here we introduce some of the elementary notions of Nonlinear Dynamics, such as the notion of dynamical system, bifurcation and chaotic behavior, by making use of simple discrete dynamical systems. First, a linear discrete system whose dynamics can be easily understood is given. After this, via the logistic map, it is shown that the presence of nonlinearities can make the dynamics more complicated. We stress the influence of parameters on the global dynamics with the help of this map. Moreover, we explain some geometrical methods to obtain useful information about the system, such as cobweb maps [5]. *Bibliography:* Chapter 5 of [6], chapter 10 of [5] and chapter 1 of [7].

3. Two-dimensional maps: Once the students are familiar with one-dimensional maps, it is the moment to introduce two-dimensional discrete dynamical systems. This allows to introduce notions that cannot be explained with one-dimensional maps, for example the classification of fixed points as *centers*, *sinks*, *sources* and *saddles*. This is first done by introducing simple two-dimensional linear maps, after which this notion is easily extended to nonlinear maps and illustrated with simulations of DYNAMICS [1]. With the concept of stable and unstable manifolds we proceed analogously: first we introduce the concept with the help of linear maps, and by using the DYNAMICS software we show how they look like for some paradigmatic nonlinear system, such as the Hénon map, both in simple situations and complicated ones, with homoclinic intersections. After this, in order to make more clear the connection between the two-dimensional maps and physical systems, we explain the bouncing ball model, whose dynamics is described by a two-dimensional map and that presents a wide variety of behaviors. *Bibliography:* Chapter 2 of [8], chapter 5 of [6] and chapter 1 of [7].

4. Concepts in Dynamical Systems Theory: With the background earned by analyzing different dynamical phenomena and different concepts with maps, we can now introduce some simple examples of continuous-time dynamical systems. First, one-dimensional continuous time systems, such as the logistic equation, are introduced. The simple dynamics of this kind of systems is analyzed in certain detail, emphasizing the geometrical point of view (that allows to understand the system's dynamics without solving the differential equation). After this, we give an example of a higher dimensional continuous-time dynamical system: a mass spring system, which allows us to give a definition of phase space for this system. The

Lotka-Volterra model is introduced as a nonphysical model that is a dynamical system with applications in different areas, for example, in Ecology, Economy, dynamics of web sites in internet, etc. Some basic notions on how to solve differential equations numerically are also given. *Bibliography:* Chapters 2 and 4 of [5] and chapters 4 and 5 of [7].

5. Elementary bifurcation theory: Our objective here is to give a clear concept of bifurcation and give some examples of this phenomenon. The notion of bifurcation has already been introduced when a description of one-dimensional maps and of Feigenbaum bifurcation diagram was done in the first part of the course. Thus, by now the students have an intuitive notion of how a variation of a parameter can change in a qualitative way the dynamics of the system. In this part, we do a more quantitative approach to this phenomenon making use of the dynamical systems that can be analyzed more easily: one-dimensional flows. The geometrical tools developed in the last chapter for these systems allows classifying some of the most important bifurcations, which are linked with some examples from physics and using numerical simulations (see Ref. [9]) that allow to visualize in a very graphic way the different types of bifurcations. Through simulations students can appreciate how the phase space is transformed as one of the parameters is varied, and some typical phenomena such as the appearance and destruction of fixed points or the period-doubling bifurcation (see Fig. 1) can be easily visualized and fully understood. *Bibliography:* Chapter 3 of [5] and chapter 3 of [6].

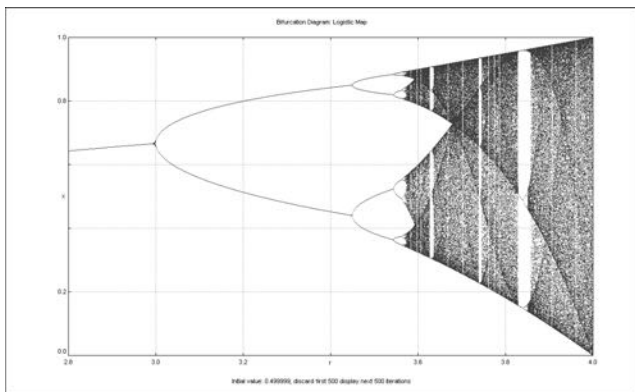


FIGURE 1. Figure showing a typical period-doubling bifurcation in the logistic map (Figure obtained from [2]).

6. Chaotic Dynamical Systems: In this chapter we give some basic notions of chaotic behavior for maps and flows. We introduce some simple maps and flows that display chaotic behavior. A special attention is paid on the Hénon map as a paradigmatic example of a two-dimensional chaotic map possessing a chaotic attractor. Examples of chaotic flows are also introduced. For two-dimensional flows some nonlinear driven chaotic oscillators are analyzed, and finally some three-dimensional flows such as the Lorenz model are

considered. The analysis of the chaotic dynamics of all these systems are performed through numerical simulations with the computer, and different techniques of visualization of their dynamical behavior are used such as the study of the return maps and the basins of attraction, the transformations on the attractors that take place when the parameters of the system are varied, the evolution in time of the dynamical variables, the study of the Poincaré map, the dynamics on the phase space, etc. *Bibliography:* Chapters 5 and 9 of [8] and chapters 9 and 12 of [5].

7. Lyapunov Exponents: Once the students have a qualitative notion of chaos, we can now give a more quantitative notion of chaos. The notion of sensitive dependence on the initial conditions has been stated as one of the fingerprints of chaotic motion through some simple numerical examples in the previous chapter. One of the simplest quantitative methods to know if a dynamical system is chaotic or not is the calculation of Lyapunov exponents. In this chapter it is explained how this quantity is closely related to the sensitive dependence on the initial conditions of chaotic systems and how can it be computed. Examples of calculation of the Lyapunov exponents are shown through the help of numerical simulations. It is especially important to show diagrams where the largest Lyapunov Exponent is shown against some parameter of the system, as it can be useful to illustrate in a very simple way the transition between periodic and chaotic motion that may take place in a dynamical system as a parameter is varied. Some beautiful applets illustrating these phenomena can be found in Ref. [2]. *Bibliography:* Chapters 5 and 9 of [8] and chapter 9 of [6].

8. Fractals and Fractal Dimension: The main goal of this chapter is to introduce the notion of fractal set and its connection with dynamical systems. Note that some simple examples of fractals, such as the Cantor set, have already appeared in a natural way in previous chapters, for example when the Feigenbaum's bifurcation diagram was exposed and the escape dynamics of the slope three tent map was discussed. Here, a systematic exposition of some simple fractal sets is done, such as the Cantor set (see Fig. 2), the Von Koch curve and the Sierpinski triangle, showing the algorithms used to build them. After this, the notion of fractal dimension is also introduced. Furthermore, fractal dimensions of some simple fractals are computed. A special attention is paid to the study of connections between fractals and dynamical systems, and some examples in physics where fractals structures arise are also given. Furthermore, the consequences of the appearance of such fractals structures on the predictability of the future state of a dynamical system are discussed, for example when fractal basin boundaries do appear. *Bibliography:* Chapter 9 of [6], chapter 4 of [8], chapter 11 of [5].



FIGURE 2. Figure of the algorithm to build the Cantor set.

9. Hamiltonian Chaos: In this chapter we provide the elements for understanding chaotic conservative systems. Through a digression about the concept of friction or energy dissipation in a physical system, the dynamical systems are classified as dissipative and conservative systems. The pendulum model is very easy to use in this context and it shows clearly that the systems that preserve the energy do not possess attractors (hallmark of dissipative systems). Examples of different conservative dynamical systems in physics are discussed and through them a new kind of chaotic motion is introduced: hamiltonian chaos. Some simple examples as the four Christmas balls model [10] are given, where also fractal structures can be visualized. Nonlinear periodically driven oscillators in absence of dissipation are also of great help when one wants to visualize Hamiltonian chaos. From the point of view of discrete dynamical systems, hamiltonian discrete systems are introduced, where area is preserved and Liouville's theorem applies, and the main concepts of the transition to hamiltonian chaos is illustrated by using the Chirikov's standard map, a paradigmatic system of this type. Our computational approach is similar to the approach described in Ref. [11]. *Bibliography:* Chapter 8 of [6] and chapter 8 of [12].

10. Introduction to Nonlinear Time Series Analysis: The contents of this course ends by introducing the elementary notions of nonlinear time series and some of their applications. Here, the basic notions of time series analysis are introduced, as well as the methods to detect stationarity and nonlinearity. The method to detect chaos in time series and to reconstruct the attractors via the embedding technique is briefly described. All this is illustrated by means of examples of different time series that appear in very different fields of science, from physics to medicine. Software packages for time series analysis might be used to explore the different aspects of time series analysis as shown in Ref. [13]. *Bibliography:* Chapter 6 of [7].

III. OBJECTIVES, METHODOLOGY AND EDUCATIONAL ORGANIZATION

As we have already explained in the Introduction, the main objectives of this course are described in the following way. First, we introduce the basic notions on Nonlinear Dynamics and Chaos in order to provide to the students a suitable background to study the subject and to understand the different topics which are dealt during the course. These concepts are clarified by using several applications they have in science and technology. Furthermore, examples of the use in scientific computation and in

applied sciences are shown. Finally some experiments are shown, in order to visualize different chaotic phenomena. All these elements give the students a good background and overview of the subject of Nonlinear Dynamics and Chaos.

The methodology is oriented in the use of different computational tools and software: Chaos for Java applets [2], Interactive Differential Equations [9] and software DYNAMICS [1], among others.

We complete the computational experiments with real experiments or demonstrations as the chaotic pendulum, double pendulum, Belousov-Zhabotinskii reaction, etc. A picture of the double pendulum laboratory experiment can be found in Fig. 3.

Tutorial lectures describing basic concepts are given during one semester as we explain as follows.

These tutorial lectures consist in sixty hours in a semester. Three hours per week for theoretical lessons in the classroom and one hour per week in the computer laboratory. It is also necessary to find some room for the experiments in the Nonlinear Physics Laboratory.

The prerequisites are minimal. Typically the knowledge of mathematics of a second year undergraduate student. Knowledge of a programming language is not compulsory, although it is an advantage. The main prerequisite is to be familiar with computers and with internet for regular users.

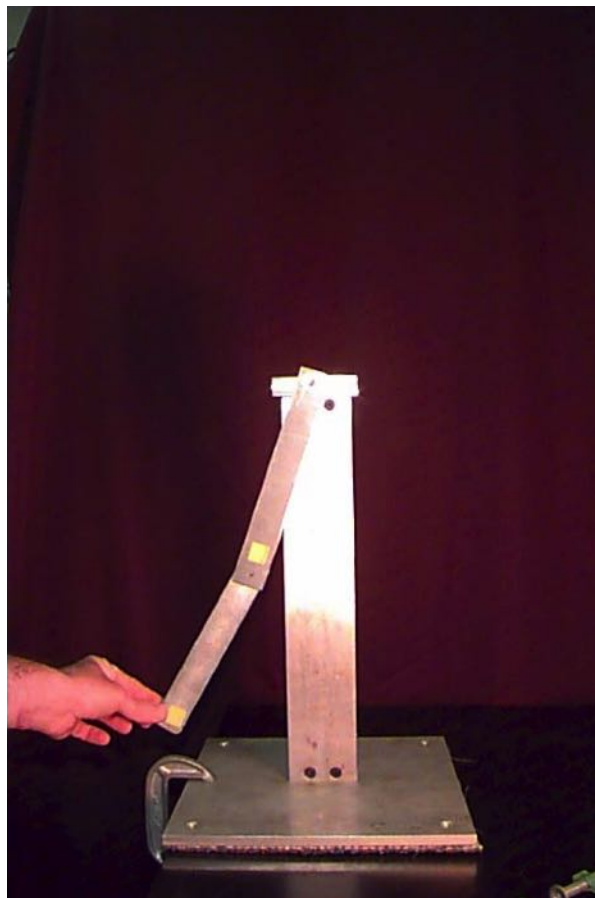


FIGURE 3. Picture showing the double pendulum laboratory experiment (Figure obtained from [14]).

A. Methodology

The specific methodology applied for this course is based in the general criteria explained in this section and in the following summary:

- Exposition of the most important concepts through numerical simulations by computer. This takes place in the classroom or in the computer laboratory.
- Exposition in the classroom of theoretical foundations by using multimedia tools.
- Practical of virtual laboratory on Nonlinear Dynamics using simulations of JAVA applets (see Fig. 4).
- Practical in the Nonlinear Physics laboratory.
- Training with the software DYNAMICS, a specific program for dynamical systems, or other packages at disposal from Internet.
- Periodic homework for the students about the concepts explained in the classroom.
- The student has to write a supervised paper, which is explained in the following subsection.

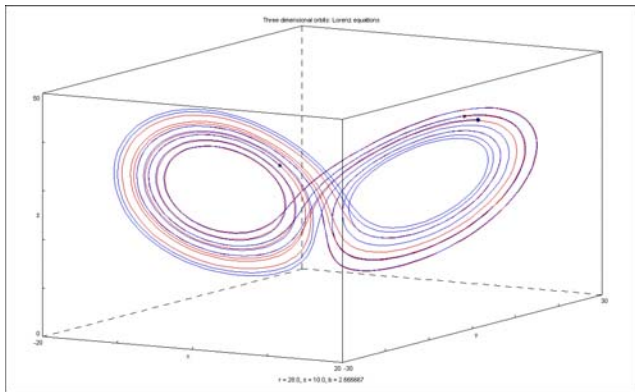


FIGURE 4. Visualization of the Lorenz attractor using Java applets (Figure obtained from [2]).

A.1 Methods of Evaluation

The method of evaluation that we have used is basically founded in the continuous participation of the student in the process of learning. The complete procedure is as follows:

The students have to do some Homework that represents 15 % of the final grade. It mainly consists in answering a list of ten basic questions after a chapter is explained. They also have to prepare a supervised paper which represents 25%. The supervised paper is a very interesting idea with outstanding results which we comment in Subsect. III B 3. The final exam is 60% of the final grade. This is a comprehensive exam with ten questions, each one corresponding to a different chapter and where the basic ideas are asked. An optional work, Laboratory experiment, is offered to improve the final

Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 2, No. 3, Sept. 2008

grade. This Laboratory Experiment has traditionally been to build the four Wada balls, that is, an experiment in which the topological Wada property is shown by means of a simple optical system [10]. A nice picture of this experiment is found in Fig. 5.

B. Educational organization

To teach Nonlinear Dynamics is necessary to do simulations using computer and showing the students the properties of nonlinear and chaotic phenomena. On the other hand, some of the theoretical lessons are given in the computer lab, where the student explores new concepts already explained in the classroom, helping the students in the process of learning.

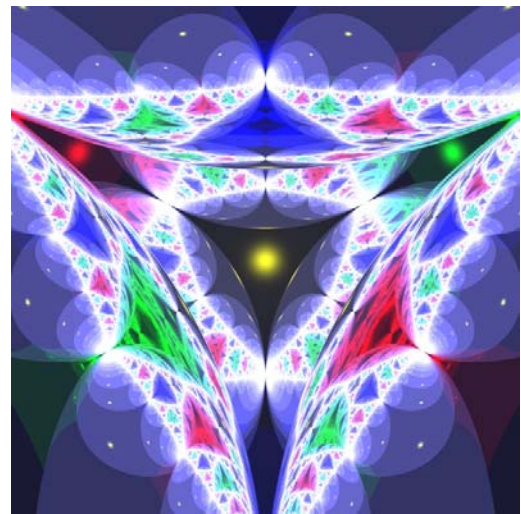


FIGURE 5. Picture of the simple optical system showing the Wada property (Figure obtained from [15]).

B.1 Practical lessons

When teaching any topic in physics, in this specific case Nonlinear Dynamics, a very important core of this teaching are the practical lessons. The concept of practical lessons is broad and covers from the use of computer lab, a virtual Physics lab for Nonlinear Dynamics, Nonlinear Physics lab, to the resolution of practical exercises and demonstrations. A very interesting and useful idea for teaching Nonlinear Dynamics is to propose conceptual questions, simple periodical exercises, that students will solve by themselves to guarantee their knowledge and to stimulate their curiosity and creativity. Our experience has been great, and we have checked that the results have been surprising.

B.2 Seminars

A useful tool from a methodological point of view are the seminars with the students. In these seminars they can

expose the difficulties that they may have found when facing the theory by themselves, and it also allows the teacher to expose in a more detailed way those aspects of the subject that they may have not fully understood, allowing them to follow the future theoretical lessons more fluently.

These seminars are very useful to promote the capability of critical analysis and creation of the student, and they are also a perfect occasion to make the students comment, in a more relaxed way, about the difficulties in their learning of the subject.

B. 3 Supervised paper

In this activity the student has the possibility of writing a supervised paper in Nonlinear Dynamics, about an issue that is related with the contents of the subject that can be chosen by the students according to their interest. The rules to be followed for the realization of the paper are not particularly strict, but there is one crucial rule that must be respected: the paper must be at most 3 pages long. Considering that there are a lot of information at their disposal, such as internet and all the books present at the library, the difficult task they have to face is to synthesize all the information in some fundamental ideas. Most part of the students show an amazing enthusiasm in performing this task. Moreover, the quality of many of these works was excellent, which makes us think that for some of the students this kind of activities offer them an opportunity to make a quality work that they usually cannot make in other disciplines.

The supervised paper could deal with very different subjects, according to the student's interest. If they choose a typical dynamical system for the supervised paper the most successful choices are Lorenz system, Hénon map, standard map, chaotic pendulum, Lotka-Volterra system, Hodgkin-Huxley system, the slope three tent map, logistic map, Belousov-Zhabotinskii reaction, Chua circuit and the Duffing oscillator. Among the different applications of this field the students prefer Chaos in Chemical Engineering, Chaos in Ecology, Cryptography and Chaos, controlling chaos, applications of Nonlinear Dynamics to Computer Sciences, Electronics and Communications Technologies and applications in Engineering and Technology. Moreover, the students are also interested in a varied theoretical and classical topics as The Newton method and fractals, Mandelbrot set, Smale horseshoe, Fractal basins, Lyapunov exponents, Hamiltonian chaos, algorithm to construct fractals, Cantor set, Chaos and randomness, among others.

IV. CONCLUSIONS

It is noteworthy to comment on the results of the course. Perhaps one of the more outstanding and satisfactory results is to verify that at the end of the course almost all the students have become very familiar with many

concepts in Nonlinear Dynamics and Chaos, taking into account that at the very beginning their knowledge was virtually none. Concerning the homework, it is also interesting to note that the response of the students has been excellent. Even though there is the risk of cheating, students have shown how to behave, and it is always a great stimulus to the progressive understanding of the contents of the course. It is remarkable the success of the supervised paper. It helps students to synthesize and to have a clear mind of one specific topic within the contents of the course.

We believe that the experience described in this paper is of an extraordinary interest. As a matter of fact, we are convinced that our experience can be transferred to many universities and the results obtained can be important in approaching the students to a new way of thinking and allowing them to see how through Nonlinear Dynamics many natural phenomena are interconnected. Students with no previous knowledge of Nonlinear Dynamics and with a rather elementary background in Physics and Mathematics are able to enjoy learning many interesting phenomena with the help of multimedia tools, computer simulations and traditional lectures. The degree of satisfaction of the students and teachers is worth trying it. Finally, we expect that the ideas outlined from our experience in this course might be useful as a way to introduce to a broad range of students of Universities from different countries to this subject, seldom mentioned in any major degree.

ACKNOWLEDGEMENTS

We acknowledged very interesting discussions with the participants of the Gordon Research Conference 2004 on Classical Mechanics and Nonlinear Dynamics. We wish to acknowledge as well all the students that we have taught from whom we have learned so much about how to teach this subject. We acknowledge financial support from the Spanish Ministry of Education and Science under project number FIS2006-08525.

REFERENCES

- [1] Nusse, H. E., and Yorke, J. A., *Dynamics: Numerical Explorations* (Springer, New York, 1997).
- [2] Chaos For Java project
<http://wwwmaths.anu.edu.au/~briand/chaos/software.html>
- [3] Jones, B. K., and Trefan, G., *The Duffing oscillator: A precise electronic analog chaos demonstrator for the undergraduate laboratory*, Am. J. Phys. **69**, 464-469 (2001).
- [4] Sungar, N., Sharpe, J. P., Moelter, M. J., Fleishon, N., Morrison, K., McDill, J., and Schoonover, R., *A laboratory-based nonlinear dynamics for science and engineering students*. Am. J. Phys. **69**, 591-597 (2001).
- [5] Strogatz, S. H., *Nonlinear Dynamics and Chaos. With Applications to Physics, Chemistry and Engineering* (Addison-Wesley, Cambridge, MA, 1994).

- [6] Hilborn, R. C., *Chaos and Nonlinear Dynamics. An Introduction for Scientists and Engineers* (Oxford University Press, Oxford, 2000)
- [7] Kaplan, D., and Glass, L., *Understanding Nonlinear Dynamics* (Springer-Verlag, New York, 1997)
- [8] Alligood, K. T., Sauer, T. D., and Yorke, J. A., *Chaos. An Introduction to Dynamical Systems* (Springer-Verlag, New York, 1997)
- [9] Interactive differential equations <http://www.aw-bc.com/ide/idefiles/navigation/main.html>
- [10] Sweet, S., Ott, E., and Yorke, J. A., *Complex topology in chaotic scattering: a laboratory observation*, *Nature* **399**, 315 (1999).
- [11] Timberlake, T., *A computational approach to teaching conservative chaos*, *Am. J. Phys.* **72**, 1002-1007 (2004).
- [12] Sprott, J. C., *Chaos and Time-Series Analysis* (Oxford University Press, Oxford, 2003)
- [13] Kodba, S., Perc, M., and Marhl, M., *Detecting chaos from a time series*, *Eur. J. Phys.* **26**, 205-215 (2005).
- [14] <http://www.physics.brown.edu/physics/demopages/Demo/waves/demo/cha.jpg>.
- [15] <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/fractals/wada/>

About the Project Education at the Secondary School at Czech Republic



Zdenek Kluiber¹, Hana Pokorna²

¹ Department for Physics and Computer Science, Pedagogical Faculty, University of Hradec Kralove & EKOGYMNNAZIUM, Prague, Czech Republic.

² EKOGYMNNAZIUM, Prague, Czech Republic.

E-mail: zdenek.kluiber@email.cz, ekogym@bohem-net.cz

(Received 15 June 2008; Accepted 17 July 2008)

Abstract

In this paper we present some experiences from the Project Education at the Secondary School in Czech Republic at the present.

Keywords: project education, secondary school, Czech Republic.

Resumen

En este artículo mostramos algunas experiencias presentes del Proyecto de Educación en la Escuela Secundaria en la República Checa.

Keywords: project education, secondary school, Czech Republic.

PACS: 01.40.E-, 01.40.ek, 01.40.Fk

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

To catch up secondary school pupils' real interest in physics is one of those generally more difficult tasks of their teachers in present-days. Modern conceptions of physics education emphasise that it is essential to understand "where" pupils are and what they can manage, what they can do and what they really do, which aspects are the most essential ones for their learning [1]. A pupil should feel that he is able to understand physics. The themes should be preferred which secondary school pupils are interested in, which they see around, by which they are enclosed—and pupils really want to understand them.

The discussion with pupils about a suitable problem is an unambiguously useful way to developing the pupils' interest in physics. The good question motivates pupil's natural curiosity, a physical model is presented as an answer to the question, activities govern pupil's skills. Pupils' critical thinking is the centre of their education and preparation for the university studies. And from pupils these themes are much gained!

The basis of natural sciences is important for general scholarship and it is necessary for scientists and technicians. The physics education must capture the corresponding reflection of the advancement of physics as well.

The good scholarship in physics is gained via understanding the allotted amount of subject matter and physical laws especially—applying onto contemporary problems. "The gist of natural sciences for everyone in the 21st century" demands understanding fundamental ideas of natural sciences and their explanation. Point is that we must

avoid rigorous academic systematisation but go upon the very everyday phenomena. That is why the goals of the physics knowledge at the secondary school are: motivation—why the things are as such as we observe them, activities—to suggest utilisation for a physical concept and eventually its illustration in some situation, thing or phenomenon, polling—to understand everyday things; problems—how the physical knowledge can help pupils understand the world around, how the physical knowledge can be used in routine everyday activities, how the physical knowledge can help us understand things—which our senses cannot afflict—more deeply.

For example "Physics in Photography as integrated physics course" can occupy pupils by its factual conception: by means of small projects pupils can reach the understanding specific themes—optics, heat, kinematics, electromagnetic wave, eye, colour etc. Then the group discussion about created photographs takes place, of course.

The common denominator of many suggestions dedicated to reforms of physics education at the secondary school is to accent the fact that pupils will be more interested in physics when they will solve problems "from the world around", from those things which enclose them. Of course, the pupils' project work is emphasised, that kind of work which is so successfully being developed in the USA, Japan and Canada.

II. FORM OF THE PROJECT EDUCATION

The form of project education in the intentions of modern physics education concepts in connection to the development of pupils' interest in physics has been applied within the scope of homework from physics at the EKOGYMNÁZIUM.

The first step of this way was teacher's discussion with his pupils about the conception of the scientific work of a pupil and secondary school graduate, and his relationship to solving problems. Not only of the teachers' experiences were presented but the pupils' ones as well.

The natural opening of such discussion was: let us advance by process which has got significantly high effectiveness and which is also in its own way attractive, motivating and prepares for the university study. There still governs: pupil will learn the most by his own work!

Pupils were relatively intimately informed about the conception of project education in our country and abroad, especially at the universities. Pupils were interested namely in which universities in the Czech Republic apply the project education, what the project education stands for at particular school specifically, what it requires from students. Next they were informed about conceptions of secondary school education and their implementations in the world. Pupils are interested not only in which school they attend but also who and how teaches them, how high will their final secondary school level be. And their parents are adequately interested in this information as well. Then the so many proclaimed cooperation between the teacher, pupil and his parents can take part.

Every month there is a theme for a writing work introduced to pupils, i.e. ten particular projects in a school year. Pupils document their relationship to the task's theme by the quality of the elaboration. There is principle that "they elaborate the task for themselves, not for the teacher"! The dimension of the task is recommended, not commanded—that is why pupils elaborate it in range of about up to ten pages of A4 paper. The problem naturally lies in the selection of home projects. There is a series of parameters involved: actuality, everyday phenomenon, rounding things and processes, problems discussed in society, scientific interest of pupils, contemporary physics problems, connection of physics and technology, relationships between natural sciences etc.

The selection of the themes of the home projects is naturally the challenge. There are several parameters in stake: actuality, everyday phenomenon, surrounding things and processes, problems discussed in society, scientific interest of pupils, problems of contemporary physics, relationship between physics and technology, relationships between natural sciences etc. That is why the home works' themes like biodiesel, solar power plant in Ústěk, ebb, flow and surf, physics and archaeology, hurricane, health capability for flying, physics and telecommunications, Airbus A380, clouds, chaos, physics and musical instruments, Chernobyl power plant accident, alternative sources of energy, tomography, physics and fire, Chinese astronautics, physics and railway, physics and textile, space technologies, history of Boeing, tsunami, physics and food

industry, the structural unit of human's skeleton—a bone, winter tyre, physics and building design, ultra light aeroplane, space shuttle, Y. A. Gagarin's flight, sauna, ball lightning etc. were set.

It is pleasant, that the most of pupils in principle assumed such form of homework as their "work activity". They look for data for quality solving of a project or for elaboration of homework's theme, respectively, at selected institutions including Academy of Sciences, universities, from reputable specialists, from the internet, literature, journals, newspapers, they discuss with the others etc.

It is usual that the project work's theme is very imminent to pupils or they are so interested in it so they give a big amount of time for solving it. These pupils gain possibility of presenting their result to the other schoolmates, vide pupil—amateur pilot preparing himself for study at the CTU Faculty of Mechanical Engineering.

III. PHYSICS COMPETITIONS AND THE PROJECT EDUCATION

The purpose of project education or of its form, respectively, is significantly fulfilled when global solving of a problem overgrows into a quality work in the Secondary School Scientific Activity in physics [2]. Here the teacher's creative approach, providing the work's consultant but especially the pupil's "never-dying interest" and necessary support of the school representatives necessarily takes part. The factual examples verifying this fact are two first prizes for the school's pupils from the Prague final of the Secondary School Scientific Activity in physics from 2007 and 2008: L. Pichrt's "Physics and Building Design" and M. Minič's "Problems of Thermonuclear Fusion". The consultants were Assoc. Prof. Eng. P. Konvalinka, Ph.D., from the CTU FME and employees of the Embassy of the Peoples' Republic of China in Prague.

IV. CONCLUSIONS

All the homeworks are evaluated, the best outcomes are told to pupils or a class, respectively. Of course, the teacher makes some global conclusion about the problems studied. Thirty texts of the solved problems give pupils, who apply for the appropriate university study, not only some basis of their project university study but also a certain benefit for understanding selected scientific problem included into the pieces of fundamental knowledge.

REFERENCES

- [1] Redish, E. F., *Teaching Physics with the Physics Suite*, (John Wiley and Sons, Inc., USA, 2003, p. 291)
- [2] Kluiber, Z., *Secondary School Special Activity in the Field of Physics*, Physics Competition **4**, (2000).

Space Programme for Pupils and Teachers



Zdenek Kluiber

Pedagogical Faculty of University Hradec Kralove, Hradec Kralove & Faculty of Biomedical Engineering, Czech Technical University, Kladno, Czech Republic – Marie Drosslerova, Medical Faculty of Masaryk University, Brno, Czech Republic.

E-mail: zdenek.kluiber@email.cz

(Received 23 August 2008; Accepted 17 September 2008)

Abstract

In this article the information about teacher's and pupil's participation in the International Space Camp in USA and pupil's participation in the European Space Camp in Norway is brought. Both events offer its participants a detailed introduction to main areas of preparation for future astronauts and spacecraft construction.

Keywords: space camp, space shuttle, rocket, astronaut's training.

Resumen

En este artículo presentamos información acerca de la participación de profesores y alumnos en el Campo Espacial Internacional en EE.UU. y también la participación de alumnos en el Campo Espacial Europea en Noruega. Ambos eventos ofrecen a sus participantes una detallada introducción a las principales áreas de preparación de los futuros astronautas y la construcción de naves espaciales.

Palabras clave: Campamento espacial, lanzamiento espacial, cohetes, entrenamiento de astronautas.

PACS: 01.40.E-, 01.40.ek, 01.40.Fk

ISSN 1870-9095

I. INTERNATIONAL SPACE CAMP FOR PUPILS AND TEACHERS

U. S. Space & Rocket Center, Huntsville, Alabama was founded in 1970. In 1982 the tradition of the "International Space Camps" (ISC) was set here; an intensive education of American and foreign teachers - especially secondary school teachers - for their preparation to teaching historical but also current knowledge from astronautics, astrophysics and narrow binding of all linked subjects and scientific disciplines. Together with foreign participants American best teachers from all the USA states are here. Generally these people meet here together: foreign delegations - 1 teacher, 2 pupils under 18 years old (success in a selective competition is required for the participation) - from about 30 countries, 50 teachers from the USA, about 15 pupils from the USA who are under 18 years old.

In July 2007 in anniversary 25th ISC there were 22 foreign delegations: Australia, Belgium, Canada, China, Costa Rica, the Czech Republic, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Korea, the Netherlands, New Zealand, Norway, Portugal, Russia, Singapore, Switzerland and Turkey.

The delegation of the Czech Republic consisted of: Assoc. Prof. RNDr. Z. Kluiber, PhD. & PhD. pupils: M. Drosslerova (Mendel Grammar School, Opava) and Tomas Pejchal (Grammar school, Zdar nad Sazavou).

Five teachers' and five pupils' international teams were made and these passed special programmes.

The whole eight days special programme - financed by NASA and Coca-Cola foundation - began in the presence of NASA and U. S. Space & Rocket Center high representatives with a cultural-social presentation of foreign delegations and American teachers and pupils.

II. EDUCATION PROGRAMME FOR TEACHERS

The contents of the "Education Programme for Teachers" - especially for the KIBO team (Japan word for hope) - which consisted of teachers from the USA, Russia, Austria, Greece and the Czech Republic:

1. Creation of the team, activities, U. S. Space & Rocket Center structure.
2. Particular positions for the space shuttle mission - activity, tasks, displacement.
3. Motion picture - American astronauts' air training.
4. Mrs. Grace Corrigan's speech - mother of astronaut Christa McAuliffe, information about the publication "A Journal for Christa" [1]. Christa McAuliffe is nowadays intended to be in some sense a national heroine. Her mother - speaking in NASA suit - is a link element for the future, in these intentions she spoke to teachers and towards their influence on pupils.
5. Conception of the space shuttle mission - preparation, implementation, function.

6. Discovery space shuttle mission training - familiarisation with work sites, tasks.
7. Mars research - detailed information, University of Arizona, perspectives.
8. Discovery space shuttle mission simulation - space station research worker role - physical and chemical experiments: properties of polymers, absorption of liquids, surface properties of metals.
9. Space shuttle flights history, visitation of the U. S. Space & Rocket Center museum - Mercury, Gemini, Apollo, Mir, Eagle, space shuttle, International Space Station (ISS).
10. Meeting NASA top managers' and specialists' families.
11. Meeting Dr. Wernher von Braun's team members - remembrance of president J. F. Kennedy.
12. Space research in the Solar system - preparation for Pluto research.
13. Cosmic module water surface landing training - fall of a module into the sea, leaving a module.
14. Cosmic geology - planets' positions.
15. Meeting "The Real Space Cowboys" [2] author Ed Buckbee, historical information about first 7 American astronauts - team Mercury: Scott Carpenter, Gordon Cooper, John Glenn (originally untouchable person for further space flight - finally flew for the second time in STS-95, Discovery, 1998), Gus Grissom, Wally Schirra, Alan Shepard, Deke Slayton.
16. Information about Apollo research project.
17. Endeavour space shuttle mission training, STS-118, Note: on 7th August 2007 there was Barbara Morgan in the Endeavour space shuttle crew; Christa McAuliffe's substitute who was asked by NASA for further cooperation. A pedagogical block was a part of scientific programme of the mission.
18. Mathematical activities - combination tasks, operationality.
19. Astronaut Story Musgrave's speech.
20. USA future space research - details about ORION and ARES - visions.
21. Living and work in space - laboratories, accommodation, catering, sanitary facilities, work activities.
22. Endeavour space shuttle mission simulation - trying to manage some analogy of experiments made by Barbara Morgan.
23. Connection of design and function of facilities - thermal shielding, experiments.
24. Astronauts' physical training - simulations: 3D flip-flap, walk on an "elastic rope".
25. Common phase of preparation for ARES - construction, parameters and their values, concretization.

A panel lecture was a very suggestive event - a discussion of six specialists who arrived to the USA together with Dr. W. von Braun as 107 member group from Germany after WWII, who were in his team. Their greatest success was the SATURN V rocket and the common space shuttle too. They were born in the 20th century, they are about 95 years old: Konrad

Dannenberger, Axel Roth, Georgie Hopsan, Ernst Stuhlinger, Alex A. McCool and Walter W. Jakobi.

Ed Buckbee's lecture - or his book's presentation [2] respectively - was eminently profitable. It was a set of first-hand personal experiences. And W. von Braun was the man who established him to be the 1st director of the U. S. Space & Rocket Center in 1970.

Some certain finale of personal meetings was a lecture of Dr. Story Musgrave. The man who flew six times in a space shuttle - the only astronaut who has ever flown in all American space shuttles, he graduated 6 universities, has written 25 scientific works and he represents one of the most important legends of American space programme.

The daily schedule was quite demanding: specialised programme started at 8 a.m. and finished at about 10 p.m. The KIBO team's work was conducted by two holiday instructors - secondary school teachers of mathematics, physics and English.

III. EDUCATION PROGRAMME FOR PUPILS

Pupils from the Czech Republic were very well prepared for participation in the ISC - they had both language and scientific knowledge. In their preparation they focused especially on set of knowledge - American and world astronautics, general overview of space research, English language and improvement of improvisation and fast response. Pupils passed through a very demanding programme in teams - a simplified analogy of the teachers' programme. They tried on feelings at 4G - Space Shot. The most prominent lecturers of pupils were G. von Tiesenhausen, W. von Braun's team's member and co-builder of the SATURN V rocket, astronaut S. Musgrave and astronaut M. Mullane. During their programme they tried on training on the moon walk simulator, uncontrolled rotation, microgravity in eight metres deep water reservoir, drive "on the Moon" or visit to the space museum.

Even for pupils the programme's climax was a space shuttle mission, ISS mission or mission in the control centre respectively.

IV. SPACE EXHIBITS

During last ten years series of important changes happened in the U. S. Space & Rocket Center area: 1. Ten years ago the SATURN V rocket in horizontal position was really impressive exhibit—now the SATURN V rocket is in outstanding vertical position and it is a real dominating feature of whole space centre, naturally with memorable PATHFINDER spacecraft. 2. An attractive "Space Shot" has been relocated near to main experimental and official building. 3. Simulation work sites have been substantially extended - partly the space shuttle, partly the ISS; a lot of real instruments and devices from a space shuttle were installed, simulations "expressively correspond" to work of real American astronauts. 4. Two new huge vestibules for exhibits and experimental activities are under

construction. 5. Educational centre operates in newly built very large building - auditorium, educational hall, storages, library, work room for lecturers, EC centre, scientific laboratories, seminar rooms, lecture hall. 6. Newly utilized information panels have been installed near the exhibits shown. 7. The "Solar system" educational footpath has been established. 8. "Human on the Moon" NASA mobile exposition has been constructed. 9. New equipment of training areas has been installed - training climbing cliff, space shuttle flight simulators. 10. The museum section has been enriched by a simulator of driving vehicle on Mars's surface. 11. Number of shops and goods offered has increased. 12. The centre's programme includes more programmes for public - e.g. FAMILY - parents with children, holidays courses etc.

V. MODERN EDUCATIONAL ASPECTS

Lectures and seminars brought very valuable background materials for new conception of astronomy and physics education. In this context we may say that into common key problems of didactics of physics we can include following things:

1. An adequate didactical processing of so-called "clip television information" - pupils receive knowledge in a fast form and they keep them in memory.
2. An adequate conception of teaching electronics and electrical engineering, or related basics of physics respectively, is missing.
3. Traditional educational unit - school lesson - must be transformed into new time schedule - as a consequence of influence of media.

The interesting thing is that in all American astronauts' biographies, which we obtained as study materials, particular foremost passages give us accurate information about secondary school they graduated! Everyone who was in the ISC attached big importance to it!

Booklet dedicated to important astronauts are namely assigned for American secondary school pupils.

America's best teachers of the year obtain as a reward from government precisely the stay in the U.S. Space & Rocket Center in the international "Education Programme for Teachers". In 2007 the USA teacher of the year became Andrea Peterson, Washington. All these best teachers got audition in White House by USA president G. Bush. There is big effort to improve far more the quality of teachers' position and heightening the reputation of teachers' occupation.

VI. PERSPECTIVES OF AMERICAN SPACE RESEARCH

The huge accent lays on preparation, on training. As well as there must be everything properly trained for space shuttle's flight - the preparation takes about 15 months - it is necessary to discuss significant activities with pupils

into detail: analyse the result, display the faults and positives, repeat the process, evaluate.

Perspectives or tasks for American space research are very rich. This means especially the ISS, production of new spacecrafts - to Moon and Mars, coming back on the Moon, creating new solar sources of energy, production of high-quality robots, health securing of the voyage to Moon and Mars and of astronauts' stay there, applying economical usage of research results etc. New space transportation devices - ORION and ARES rockets (new SATURN V) - are supposed to utilize the positive knowledge from the Apollo project and space shuttles - this means solid fuel engines and liquid fuel tank. The first phase counts on about 160 days of voyage towards Mars and about 500 days of stay. So the new space programme introduced by president G. Bush on 14th January 2004 is intensively implemented.

VII. EVALUATION OF INDIVIDUALS AND TEAMS

Work of all teams, teachers and pupils as well was evaluated in detail. Everyone obtained a certificate of absolving this prestigious event, so valued in the USA.

One best participant from every teachers' team was chosen, American who obtained another reward in form of two flight tickets to destination of his own choice from DELTA Air Lines.

VIII. EXPERIENCE FROM EUROPEAN SPACE CAMP

In June 2008 M. Drosslerova in some sequence of the ICS participated in the European Space Camp (ESC) in Norway. About her stay she says:

"ESC is situated in Andøya Rocket Range, which lies 69 degrees north in Norway. Young pupils from all over the world become rocket scientists for one week, meet a lot of interesting people, enjoy social activities and swimming in the midnight sun. Because you represent your country, a selection of participants is really complicated. Candidates should have the main interest in rockets, physics and mathematics. But grades, activities, diplomas and a letter of recommendation play a very significant role too. ESC is supported by organisations as European Space Agency (ESA), National Centre of Space Related Education (NAROM) or Norwegian Space Agency, so participants pay only air tickets to Norway and their stay in ESC is covered by supporting organisations.

ESC 2008 took place from 22nd to 30th June, there were 26 participants from 8 countries (Australia, Czech Republic, England, Germany, New Zealand, Norway, Poland, Sweden). I cooperated with Dr. Zdenek Kluiber and I was selected as a participant. I spent one week in experimental society, I was treated as a rocket scientist led by skilled personnel. The main task of the ESC was to build a rocket and to launch it successfully. For this

Zdenek Kluber

purpose we were divided into 5 groups. The group of Rocket System Design was responsible for all pre-flight tests of the rocket, simulations and special calculations. Pupils, who were in the group of Experimental Instrumentation, constructed a circuit board for sensors of the rocket. The Rocket Payload Assembly group took care of a payload, which was a part of the rocket and contained the instruments including e.g. a transmitter with antennas, because we evaluated data during the flight of the rocket. The group of Rocket Telemetry was charged with responsibility for all the surveillance of the rocket flight, signal and data. I was in the group of Rocket Physics. This group released a scientific balloon, because of weather conditions for our rocket. We analysed data, measured weather conditions and used simple equations, studied atmospheric physics and worked with new knowledge during the countdown, because we were responsible for weather conditions. We launched our rocket called VEGEMITE without any huge problems, the maximum flying high of VEGEMITE was about 9400 meters (30839,90 feet). Of course, we attended a lot of lectures including lectures: Plasma Universe, Rockets and how they work, Rocket Aerodynamics, Rocket Trajectories, ESA - Opportunities for pupils, Atmospheric Physics and Discoveries at the CERN. The most important thing is that we worked in a team, we learned about different cultures. We were a true team without any doubts. Team Space

Camp appreciated us greatly, because we spent an amazing day on Whale Safari. We got useful diplomas and a huge motivation for our future studies. This camp was an unforgettable experience for me”.

CONCLUSION

Participation in “Education Programme for Teachers” in U. S .Space & Rocket Center allows you to obtain set of information and knowledge from astronautics - about its perspectives, teacher’s work, didactics of astronomy and physics, astronautics. And also for pupils the teamwork is really important, and so rules of cooperation, coordination of team members are too. This was proved and significantly deepened by participation in ESC:

REFERENCES:

- [1] Corrigan, G. G., *A Journal for Christa* (University of Nebraska Press, 2000), p. 191.
- [2] Buckbee, E. – Schirra, W., *The Real Space Cowboys* (Apogee Books, Burlington, 2005), p. 168.

Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz?



Breno Arsioli Moura¹, Cibelle Celestino Silva²

¹*Pós-graduação Interunidades em Ensino de Ciências, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, Rua do Matão, Travessa R, nº 187, Ala II, Sala 318, São Paulo, Brasil.*

²*Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador Sancarlense 400, São Carlos, SP, Brasil, 13560-590.*

E-mail: brenoam@if.usp.br, cibelle@ifsc.usp.br

(Recibido el 30 de Junio de 2008; aceptado el 15 de Agosto de 2008)

Resumo

É muito comum encontramos menções às idéias elaboradas por Isaac Newton em materiais voltados ao ensino e divulgação da Física. Alguns desses textos, ao tratarem a óptica newtoniana, apresentam informações sugerindo que ele teria previsto o comportamento dual ao assumir um modelo corpuscular que foi também utilizado para explicar fenômenos ópticos com propriedades periódicas. Estes relatos históricos se apóiam nas discussões de Newton sobre o fenômeno dos anéis coloridos em películas finas e, especialmente, no conceito de “estados de fácil transmissão e fácil reflexão” da luz publicado em seu livro *Óptica* para explicá-lo. O presente artigo traz uma análise histórica pautada no *Óptica* e em outros trabalhos de Newton sobre óptica. O estudo de fontes primárias e secundárias mostra que Newton era completamente avesso a qualquer possibilidade de um modelo ondulatório para a luz e que os “estados” da luz não são uma antecipação da dualidade onda-partícula. Com este trabalho, pretendemos mostrar, entre outras coisas, que devemos evitar analisar contribuições de cientistas do passado com os olhos do presente desconsiderando o contexto no qual tais idéias foram desenvolvidas.

Palavras-chave: História da óptica, Isaac Newton, dualidade onda-partícula.

Abstract

It is not rare to find mentions to Isaac Newton's ideas in sources and material devoted to Physics teaching and dissemination to a broader public. Some of these texts and internet websites suggest that Newton had anticipated light dual behavior in his optical studies. The main evidences for this sort of affirmation rely on the fact he assumed a corpuscular model for light and used it to explain optical phenomena with periodic properties. These historical accounts use Newton's discussion on colored rings in thin films and his concept of “fits of easy reflection and easy transmission” of light published in his book *Opticks*. The present paper brings a historical study based on examination of *Opticks* and other Newton's works on optics. The analysis of primary and secondary sources shows that Newton was refractory to any possibility of an undulatory model for light. Moreover, it indicates that “fits” were not a foresight of wave-particle duality. This paper intends to show, among other things, that we must regard the context in which ideas of past scientists were developed and avoid considering them as anticipations of currently accepted concepts.

Keywords: History of optics, Isaac Newton, wave-particle duality.

PACS: 01.65.+g, 01.50.Zv, 01.30.-y

ISSN 1870-9095

I. INTRODUÇÃO

A discussão das idéias elaboradas por Isaac Newton (1642-1727) é uma prática muito comum em materiais didáticos e de divulgação científica voltados à Física, inclusive em páginas da internet sobre assuntos relacionados à Ciência. A fim de tornar o discurso ágil, ilustrativo e de fácil entendimento para o grande público, são apresentados breves relatos históricos, geralmente ressaltando a genialidade de Newton e a importância de suas realizações para o progresso, validade e estabilidade do conhecimento científico aceito atualmente.

Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 2, No. 3, Sept. 2008

Nesse cenário, muitos desses materiais apresentam informações indicando que Newton teria previsto o comportamento dual da luz em sua óptica. A principal evidência estaria em suas investigações sobre o fenômeno dos anéis coloridos formados por películas finas¹ – conhecidos atualmente por “anéis de Newton” – e no

¹ Atualmente, esse fenômeno é explicado pelo conceito de interferência entre ondas luminosas refletidas nas superfícies do filme. Para mais detalhes, ver [1].

conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão² que Newton elaborou para explicá-lo.

Os estados da luz de Newton são pouco conhecidos pelos físicos, e também pouco estudados detalhadamente por historiadores da ciência. Entretanto, quando são citados, freqüentemente é dito que eles representam a união entre as concepções corpuscular e ondulatória para a luz. Portanto, os estados poderiam ser considerados como uma antecipação da concepção moderna de dualidade onda-partícula da luz. Um livro de divulgação científica trata essa questão da seguinte maneira:

Os livros elementares diziam (dizem) que Newton acreditava na teoria corpuscular da luz; mas parece que a coisa não era tão simples assim; ele achava que a luz era basicamente corpuscular, não ondulatória, mas com propriedades ondulatórias. Ele fez também experiências de difração e interferência, de modo que sabia que a luz tinha propriedades ondulatórias. Dizia que quando um corpúsculo luminoso se aproxima do orifício ou fenda, o corpúsculo pode ter fits [estados da luz], isto é, pode ir numa direção ou noutra. Naquela época, a idéia de probabilidade não estava muito clara ainda; então, ele usou a palavra fits, que já era uma idéia probabilística; quer dizer que a luz era basicamente corpuscular, mas poderia ter também estes efeitos conhecidos de interferência e difração. [2]

Em um livro sobre a óptica do século XVII, voltado, principalmente, a historiadores da ciência e físicos, o argumento sobre os estados é praticamente o mesmo. A discussão inclui uma citação (entre aspas) do físico Louis de Broglie em seu trabalho *Ondes, corpuscles, mécanique ondulatoire* (1945):

A teoria dos estados de Newton foi forçada a ficar no esquecimento depois do impressionante sucesso da teoria ondulatória no século passado [o século XIX]. Desde a invenção da mecânica ondulatória, o interesse nas especulações de Newton sobre as origens dos estados tem se renovado – do ponto de vista histórico. Sua tentativa de combinar concepções corpusculares e ondulatórias tem

² O termo em inglês originalmente utilizado por Newton para designar esta propriedade da luz foi "fits of easy reflection and transmission". Na época, segundo o *Oxford English Dictionary*, o termo "fits" era utilizado freqüentemente na área médica para denominar o ataque repentino, mas transitório, de algum tipo de doença. Newton foi o primeiro a utilizá-lo em óptica. Esse termo foi traduzido para o português como "caminhos", "acessos", "ajustes", entre outras palavras. No entanto, preferimos utilizar o termo "estados", como adotado na edição em português do *Óptica*. Pelo estudo do *Óptica* e dos trabalhos anteriores de Newton sobre o assunto, vemos que a palavra "estados" é a que melhor representa o significado do termo "fits" utilizado por Newton. Isso aparece claramente na proposição 12 do Livro II da versão original em inglês do *Óptica*, na qual ele afirmou que o fato de um raio ser transmitido ou refletido é consequência de que "Every Ray of Light in its passage through any refracting Surface is put into a certain transient Constitution or **State**, which in the progress of the Ray returns at equal Intervals, and dispose the Ray at every return to be easily transmitted through the next refracting Surface, and between the returns to be easily reflected by it" [grifo nosso].

Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz? sido considerada como um "tipo de pressentimento da mecânica ondulatória". [3]

Como terceiro exemplo, na página da internet de uma sociedade espanhola da área de oftalmologia é dito o seguinte sobre os estados:

Según Newton, la condición para la formación de un anillo coloreado en el experimento de Hook es que un espacio de aire entre la lente y la lámina de vidrio corresponde a un fit. Newton asoció una magnitud diferente de fit con cada índice de refracción. Así, un concepto esencial de la teoría ondulatoria entró a formar parte de su sistema. [4]

Em um livro sobre a história das teorias sobre éter e eletricidade, direcionado a um público que procura informações históricas adequadas, mas sintetizadas, o autor lança um comentário sofisticado sobre os estados:

[...] notável antecipação da explicação quântica do século XX: os "estados de fácil transmissão e fácil reflexão" correspondem às probabilidades transitórias da teoria quântica. [5]

Há algumas fontes que apresentam outras interpretações sobre os estados, não considerando explicitamente que eles representaram uma antecipação do comportamento dual da luz. Por exemplo, o autor de um artigo publicado em uma revista da área de ensino de física de ampla circulação no Brasil afirma que os estados – traduzidos por ele como "acessos" – foram elaborados para explicar o comportamento da luz no fenômeno da difração:

Desse modo, afirmava Newton, as regiões claras e escuras da figura de difração estariam ligadas ao acesso ("fits") que os corpúsculos de luz teriam ao passar ou não pela fenda e, uma vez passados por ela, tais corpúsculos poderiam ir ou não para um lado ou para o outro da referida fenda. [6]

Em duas páginas da internet ligadas a universidades brasileiras os estados não são mencionados, entretanto, o pressuposto de que Newton uniu concepções corpusculares e ondulatórias em sua óptica é novamente estabelecido:

*[...] para explicar os **anéis de interferência**, postulou mais tarde a existência de certos **aspectos ondulatórios** da luz [...]. A teoria de Newton é, portanto, **compósita, híbrida entre ondulatória e corpuscular**. [7]*

*A muito custo, publicou o artigo *Opticks* (1704). Nele, Newton tratou da teoria da luz e cor, relatou sobre os anéis de Newton e sobre difração da luz. Para explicar algumas de suas observações, Newton necessitou usar o modelo ondulatório juntamente com o seu modelo corpuscular. [8]*

De diversas formas, esses comentários sobre os estados contribuem para a crença de que eles foram uma antecipação do conceito moderno de dualidade onda-partícula. Mas será que podemos considerar que realmente Newton propôs algo que poderia ser interpretado atualmente como uma previsão desse conceito moderno para a luz? A forma mais segura de responder a essa pergunta é proceder uma análise histórica pautada na obra do próprio Newton.

Para isso, faremos, inicialmente, uma discussão sobre os primeiros estudos de Newton sobre o fenômeno dos

anéis coloridos e suas explicações para tratá-lo. Em seguida, analisaremos detalhadamente os estados da luz – descrito por Newton no Livro II de seu *Óptica*, publicado pela primeira vez em 1704 –, examinando quais são seus fundamentos conceituais.

Veremos que esse conceito newtoniano está longe de ser uma antecipação da dualidade onda-partícula, indicando que essa visão se trata de uma interpretação distorcida da óptica de Newton, que pode (e deve) ser evitada no decorrer da educação científica.

II. “ANÉIS DE NEWTON”: PRECEDENTES

O fenômeno dos anéis em cores em películas finas começou a ser estudado por Newton em meados de 1665 e 1666, cerca de quarenta anos antes da publicação do conceito de estados da luz no *Óptica*, em 1704. Suas primeiras observações e análises sobre esse fenômeno foram motivadas pelas leituras dos trabalhos de dois outros filósofos naturais do período, Robert Boyle (1627-1691) e Robert Hooke (1635-1703).

Na obra *Experiments and considerations touching colours*, publicada em 1664, Boyle analisou superficialmente a formação dos anéis de cores. Seu livro não tratava a óptica em si, mas da relação entre a matéria e suas propriedades ópticas, incluindo a cor. Newton leu e estudou as idéias de Boyle, concordando com algumas partes, por exemplo, o pressuposto de que as cores dos corpos não eram qualidades deles, mas produzidas pela refração e reflexão da luz; e discordando de outras, por exemplo, a idéia de que os raios coloridos eram modificações da luz branca [9, pp. 13-17].

Hooke, por outro lado, apresentou um estudo sistemático sobre a formação dos anéis em seu *Micrographia*, publicado em 1665. Ele realizou diversos experimentos com líquidos de vários tipos pressionados contra duas lâminas de vidro, bolhas e superfícies de metais. Hooke supunha que a luz seria uma sucessão de pulsos propagados pelo éter. Segundo ele, os anéis seriam ocasionados pela mistura de dois pulsos, um refletido na primeira superfície do filme e outro refletido na segunda. Apesar da semelhança aparente com a concepção atual de interferência luminosa, vale ressaltar que Hooke não utilizou qualquer terminologia parecida com a adotada atualmente.

Newton rejeitou todas essas idéias de Hooke. Contudo, o *Micrographia* provavelmente foi considerado por ele uma importante fonte de informações, instigando vários de seus estudos sobre os anéis coloridos e outros assuntos relacionados à luz [9, p. 20].

A partir da leitura e estudo dos trabalhos de Boyle e Hooke, Newton realizou suas primeiras observações sobre os anéis, resultando no ensaio “Sobre as cores” [10], escrito em 1666 e não publicado na época. Nesse trabalho, ele descreveu diversas ocasiões em que o fenômeno ocorria e procurou – sem grande sucesso – calcular a espessura da película de ar responsável pela formação dos anéis. Nesse ensaio, Newton não desenvolveu nenhum

modelo explicativo para esse fenômeno, se restringido a discutir algumas observações.

Em 1675, Newton enviou a *Royal Society* de Londres dois trabalhos contendo estudos mais detalhados sobre os anéis: o “Discurso das observações” [11] e “A hipótese da luz” [12]. No primeiro, ele descreveu e discutiu uma série de observações sobre a formação dos anéis coloridos com maior riqueza de detalhes, em relação ao ensaio de 1666. Ele relatou com mais minúcia, por exemplo, a ordem das cores, o formato dos anéis, os instrumentos utilizados para realizar os experimentos, entre outras coisas. O conteúdo desse trabalho é praticamente o mesmo do *Óptica* – que seria publicado quase trinta anos depois –, exceto por algumas descrições a mais e pela parte correspondente ao conceito de estados da luz [9, p. 117]. No segundo, por sua vez, Newton não somente descreveu observações como também elaborou pela primeira vez uma explicação para o fenômeno, por meio do modelo de vibrações no éter.

Por ser um modelo importante para compreendermos o desenvolvimento histórico do conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão e dos estudos de Newton sobre o fenômeno dos anéis coloridos, procederemos com uma análise detalhada sobre ele na próxima seção.

III. AS VIBRAÇÕES NO ÉTER

No início do “Hipótese”, Newton afirmou que o universo estaria preenchido por um meio etéreo, que preenchia os espaços vazios dos corpos, que ele chamou de poros. Os corpos mais rarefeitos (por exemplo, o ar) teriam mais poros, portanto, mais éter; os mais densos (por exemplo, a água, o vidro e os metais) teriam menos éter em sua composição.

Segundo Newton, ao se chocarem com a luz, as partículas de éter adquiriam movimento vibratório:

Fosse eu presumir uma hipótese, ela seria esta, se proposta em termos mais gerais, de modo a não determinar o que é a luz além de [dizer] que ela é uma ou outra coisa capaz de provocar vibrações no éter [...] [12, p. 31].

A fim de evitar possíveis interpretações equivocadas sobre essa hipótese, Newton afirmou explicitamente que a luz *não* seria nem o éter nem essas vibrações nele provocadas.

[...] presumo que a luz não seja nem esse éter nem seu movimento vibratório, porém algo de natureza diferente, propagado por corpos luminosos. Quem o assim desejar poderá presumi-la como um agregado de várias qualidades peripatéticas. Outros poderão supô-la como uma multidão de corpúsculos inimaginavelmente pequenos e velozes, de tamanhos diversos, brotando dos corpos luminosos a grandes distâncias uns dos outros, mas sem nenhum intervalo perceptível de tempo, e continuamente impulsionados por um princípio de movimento que, no início, acelera-os até que a resistência do meio etéreo iguale a força desse princípio, exatamente da maneira que como os corpos que caem na água são acelerados até que a resistência da água se iguale à força da gravidade [...].

Para evitar discussões e generalizar esta Hipótese, que cada homem escolha sua preferência quanto a isso. Apenas, seja a luz o que for, eu suporia que ela consiste em raios sucessivos, que diferem uns dos outros em circunstâncias contingentes, como a grandeza, a forma ou o vigor [...] [12 p. 39].

Nota-se que, apesar de estabelecer diferenças entre os raios de luz (grandeza, forma ou vigor), Newton não deixou claro que a luz seria um corpúsculo, preferindo tratá-la em termos gerais. Com essa questão esclarecida, ele explicou como as vibrações no éter influenciariam no comportamento da luz nos corpos. Para ele, as vibrações provocadas nas partículas de éter teriam regiões condensadas e rarefeitas, que fariam com que o raio fosse refletido ou transmitido. Sendo assim,

[...] se um raio de luz incidir sobre ela [a vibração] quando estiver muito comprimida, ela será densa e dura demais para permitir que o raio a atravesse, e portanto, irá refleti-lo; mas se os raios que incidem sobre ela noutros momentos, quando ela está expandida pelo intervalo entre duas vibrações, ou não muito comprimida e condensada, atravessam-na e são refratados [...] [12, p. 44].

Há uma periodicidade implícita nas vibrações no éter, ou seja, à medida que elas se propagam pelo meio, ora estão condensadas ora estão expandidas. Utilizando esses dois pressupostos (luz provoca vibrações no meio etéreo; dependendo da intensidade da vibração, o raio será refletido ou transmitido), Newton explicou, por exemplo, a refração e reflexão parciais dos raios de luz, quando de suas incidências na superfície de um corpo transparente, e, principalmente, a formação dos anéis coloridos em filmes finos. Para esse último fenômeno, ele incluiu mais uma suposição: as vibrações das partículas de éter se moviam mais rapidamente que os raios de luz que as provocaram. Segundo ele,

[...] embora a luz seja inimaginavelmente veloz, as vibrações etéreas provocadas por um raio movem-se mais depressa que o próprio raio e, desse modo, ultrapassam-no e o superam, uma após outra [12, p. 48].

Dessa forma, Newton explicou o fenômeno dos anéis da seguinte maneira:

Presumida essa celeridade das vibrações, portanto, se a luz incidir sobre uma película fina ou lâmina de qualquer corpo transparente, as ondas ativadas por sua passagem pela primeira superfície, ultrapassando-a uma após outra, até ela chegar à segunda superfície, farão com que ela seja refletida ou refratada, conforme a parte condensada ou expandida da onda a supere ali [...] Se a lâmina for de espessura tal que a parte condensada da primeira onda ultrapasse o raio na segunda superfície, ele deverá refletir-se; se tiver o dobro dessa espessura, de tal modo que a parte rarefeita seguinte da onda, isto é, o espaço entre ela e a onda seguinte, a supere, ali ele deverá ser transmitido [...] [12, pp. 48-49].

Newton ilustrou como isso seria evidente no caso da incidência de raios monocromáticos sobre uma película de ar entre duas lentes. Quando os raios de luz se chocam com as partículas de éter presentes na película fina – de ar,

Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz? água ou de outra substância –, essas começam a vibrar; e a propagação dessas vibrações é mais rápida que a propagação dos raios de luz ao longo da película. Periodicamente, essas vibrações ficam mais intensas ou mais rarefeitas. Ao atingirem a segunda superfície do filmes, os raios que se deparam com as regiões onde a intensidade da vibração é maior são refletidos, formando um anel da cor do feixe incidente; se atingem regiões onde a intensidade da vibração é menor, eles são transmitidos, formando um anel preto, como mostra a figura 1.

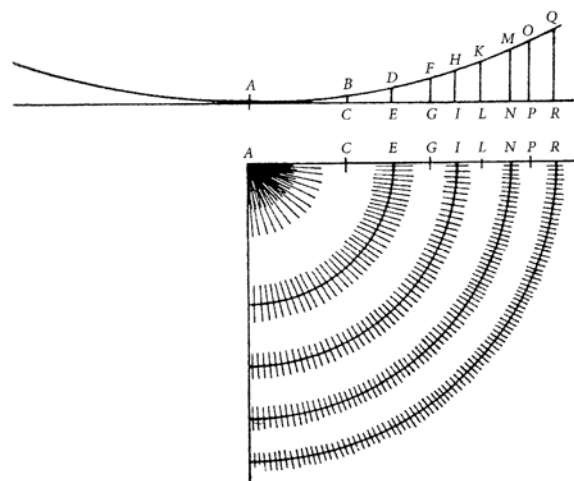


FIGURA 1. Desenho no artigo “A hipótese da luz”, mostrando os anéis pretos e da cor do raio (claros, na figura) formados pela incidência de luz monocromática.

Sendo assim, a ordem do anel (colorido ou preto) estaria relacionada com a periodicidade das vibrações. Dependendo da espessura, essas vibrações podem estar mais intensas ou rarefeitas, refletindo ou transmitindo os raios de luz. Para estender essa explicação para o caso de incidência de luz branca, Newton afirmou que, assim como as vibrações do ar de tamanhos diferentes eram resultado da propagação de tons sonoros diferentes, os raios coloridos causariam vibrações diferentes no ar.

[...] esses raios, sejam eles o que forem, ao diferirem em magnitude, intensidade ou vigor, provocam vibrações de diversas grandezas; os raios maiores, mais fortes ou mais potentes [provocam] as maiores vibrações, e os outros, vibrações mais curtas, conforme seu tamanho, intensidade ou potência; E então [...] afetam o sentido com várias cores, conforme sua grandeza e mistura [...] [12, p. 46].

Dessa forma, em determinadas situações, as vibrações provocadas pela incidência de luz branca, dependendo de sua intensidade na segunda superfície do filme, refletiriam raios de uma cor e transmitiriam raios de outra cor. Isso explicaria os vários anéis coloridos, como mostra a figura 2.



FIGURA 2. Anéis coloridos, formados pela incidência de luz branca sobre um sistema de lentes.

A explicação para a formação dos anéis coloridos em películas finas por meio do modelo de vibrações do éter permite uma compreensão qualitativa do fenômeno. No entanto, esse modelo apresenta alguns problemas. O primeiro deles refere-se ao fenômeno da reflexão total do raio de luz, em sua passagem por um meio mais denso (por exemplo, o vidro) para um meio mais rarefeito (por exemplo, o ar). Se os raios de luz sempre provocam vibrações nas partículas de éter presentes nos corpos, as quais ora os refletem ora os transmitem, não fica claro como essas vibrações agiriam para refletir todos os raios a uma determinada inclinação destes em relação à normal com a superfície refratora. Newton não discutiu essa questão.

Outro ponto problemático está relacionado com os anéis formados em filmes finos de água. No “Discurso das observações” ele relatou o aparecimento dos anéis em películas de água entre lentes, notando que a mesma ordem de anéis que era produzida pelo ar aparecia mais contraída no filme de água. Ou seja, para produzir um anel colorido na água era necessária uma espessura menor, em relação àquela que produzia esse mesmo anel no ar.

Como vimos, Newton relacionou a ordem dos anéis com a periodicidade das vibrações no éter. Sendo assim, para adequar suas observações em filmes de água, ele supôs que as vibrações nesse meio eram mais curtas que no ar, por isso, os mesmos anéis no ar eram formados em uma espessura menor na água:

[...] nas lâminas de corpos transparentes mais densos [que o ar], os anéis são produzidos numa espessura menor que da lâmina (sendo mais curtas as vibrações no éter mais rarefeito do que no mais denso, segundo suponha) [...] [12, p. 54].

Se as vibrações são mais curtas em meios com pouco éter como a água, a velocidade de propagação dos raios de luz deve também ser menor, a fim de se adequar à afirmação de Newton de que as “vibrações etéreas provocadas por um raio se movem mais depressa que o próprio raio”. No entanto, isso contraria sua freqüente e pública defesa de que os raios se movem mais rapidamente em meios mais densos (como a água) que em meios menos densos (como o ar). Newton não comentou sobre esse

problema, provavelmente ciente de que ela deporia contra suas idéias e favoreceria concepções para a luz que supunham uma velocidade menor dos raios em meios mais densos que o ar, como a vibracional elaborada por Hooke [13].

O conteúdo do “Hipótese” e o modelo de vibrações no éter não foram incorporados explicitamente no *Óptica*. A razão disto foi que Newton não admitia publicamente o uso de hipóteses em seus trabalhos, apesar de freqüentemente utilizá-las, tanto como artifícios coadjuvantes como partes fundamentais de suas idéias [14]. No “Escólio Geral” de seu primeiro livro, os *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* ou somente *Principia*, publicado em 1687, ele defendeu explicitamente essa posição:

Não faço hipóteses; [...] O que não for deduzido a partir de fenômenos deve ser chamado de hipótese; e hipóteses, sejam metafísicas ou físicas, sejam de qualidades ocultas ou mecânicas, não têm nenhum lugar na filosofia experimental. Nesta filosofia experimental, proposições são deduzidas a partir dos fenômenos e generalizadas por indução. [15]

Portanto, para explicar o fenômeno dos anéis coloridos em películas finas, Newton elaborou outra idéia: o conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão. Segundo ele, os estados seriam comprovados somente pelos experimentos, não necessitando de hipóteses – como a de vibrações – para fundamentá-los. Entretanto, como indicaremos a seguir, o conceito de estados carregou o caráter especulativo das explicações do artigo “A hipótese da luz”.

IV. OS ESTADOS DA LUZ

O conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão foi descrito e analisado entre as proposições 12 e 20 da parte 3 e em toda parte 4 do Livro II do *Óptica*. Estudos recentes apontam para a importância desse conceito para a óptica newtoniana, ressaltando que Newton pretendia construir com ele uma explicação única para vários fenômenos ópticos [14]. Neste trabalho, não discutiremos essa questão, restringindo nossa análise sobre o que é e como ele apresentou e aplicou esse conceito no fenômeno dos anéis coloridos em filmes finos.

A definição dos estados foi apresentada entre as proposições 12 e 13, sendo a seguinte:

Chamarei de estados de fácil reflexão aos retornos da tendência de qualquer raio para ser refletido; aos de sua tendência para ser transmitido, estados de fácil transmissão; e ao espaço que se sucede entre cada retorno e o retorno seguinte, intervalo de seus estados [16, p. 212].

Os estados seriam propriedades transitórias; o raio de luz que estivesse em um estado de fácil transmissão assim que atingisse a segunda superfície do filme fino seria transmitido, e o raio de luz que estivesse em um estado de fácil reflexão seria refletido. Dependendo da espessura do filme, os raios de luz estariam em um desses estados, podendo ser transmitidos ou refletidos, processo que se

repetiria com o incremento de quantidades proporcionais de espessura.

No caso de incidência de luz monocromática sobre um filme fino de ar, os anéis alternadamente coloridos e pretos seriam explicados facilmente pelo conceito de estados. Em uma determinada espessura, os raios estão em um estado de fácil transmissão, formando um anel preto; em outra, os raios estão em um estado de fácil reflexão, formando um anel colorido. No caso da luz branca, anéis de diversas cores seriam formados tanto por transmissão quanto por reflexão, visto que alguns raios coloridos estavam em um estado de fácil transmissão, e outros em um estado de fácil reflexão, como mostra a figura 3.

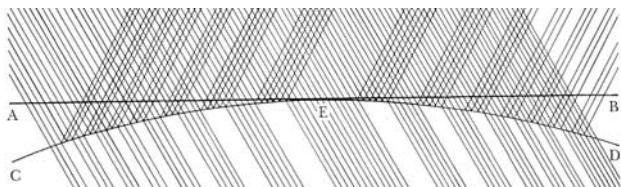


FIGURA 3. Figura do *Óptica*, mostrando o comportamento dos raios de luz de um feixe de luz branca ao incidirem em uma película fina de ar entre duas lentes. Os raios que estivessem num estado de fácil transmissão seriam transmitidos e aqueles que estivessem num estado de fácil reflexão seriam refletidos.

Nota-se que os estados não guardam, em sua definição, qualquer combinação entre concepções corpusculares e ondulatórias para a luz. Newton se restringiu a afirmar somente que eles eram responsáveis pela refração e reflexão alternadas dos raios de luz no fenômeno dos anéis coloridos em películas finas.

Em uma leitura superficial das discussões de Newton sobre os estados da luz, eles são satisfatórios e facilmente aplicáveis para tratar a formação dos anéis coloridos em películas finas, já que leva em conta a periodicidade do fenômeno e explica a alternância de cores dos anéis. No entanto, Newton não deixou clara a natureza e causa dos estados. A análise dessa questão evidencia que esse conceito, além de apresentar alguns problemas de fundamentação teórica, estava muito longe de ser uma antevisão da dualidade onda-partícula.

Sobre a natureza dos estados, Newton se contradisse em alguns trechos do Livro II do *Óptica*. Na proposição 12, anterior à definição do conceito, ele afirmou que as tendências que fariam com que os raios fossem transmitidos ou refletidos – logo em seguida denominadas de estados da luz – não eram propriedades inatas desses raios, mas adquiridas na passagem por um meio refrator:

Todo raio de luz, em sua passagem através de qualquer superfície refratora, assume uma certa constituição ou estado transitório que ao longo da trajetória do raio retorna em intervalos iguais e faz com que em cada retorno o raio tenda a ser facilmente transmitido através da próxima superfície refratora e, entre os retornos, a ser facilmente refletido por ela [16, p. 210, grifo nosso].

Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz?

Entretanto, na proposição 13, Newton contrariou não somente sua afirmação feita na proposição 12, como também foi contraditório na mesma proposição:

Portanto, a luz se acha em estados de fácil reflexão e fácil transmissão antes de incidir sobre os corpos transparentes. E provavelmente ela assume esses estados na sua primeira emissão dos corpos luminosos e continua neles durante toda sua trajetória.

Nesta proposição, suponho que os corpos transparentes são espessos; porque, se a espessura do corpo for muito menor do que o intervalo dos estados de fácil reflexão e transmissão dos raios, o corpo perde seu poder refletor. Pois se os raios, que ao entrarem no corpo assumem estados de fácil transmissão, chegam à superfície mais distante do corpo antes de perder esses estados, eles devem ser transmitidos. E esta é a razão pela qual as bolhas de água perdem seu poder refletor quando se tornam muito finas; e também a razão pela qual todos os corpos opacos, quando divididos em partes muito pequenas, se tornam transparente [16, pp. 212-13, grifo nosso].

Portanto, Newton apresentou declarações obscuras sobre a natureza dos estados da luz, ora afirmando que eles eram propriedades presentes nos raios de luz desde sua primeira emissão dos corpos luminosos ora estabelecendo que eles eram resultado da interação entre a luz e o meio refrator. No caso dessa última suposição, Newton explorou a causa dos estados. Segundo ele, a discussão sobre essa questão não seria importante, visto que a existência dos estados seriam comprovadas pelos experimentos com os anéis coloridos em filmes finos. Mesmo assim, ele elaborou algumas hipóteses para tratá-la.

Na proposição 12, Newton afirmou que as reflexões e refrações alternadas dos raios – devidas aos estados – seriam resultado de vibrações causadas pelo choque da luz com as partículas do meio refrator, uma hipótese praticamente igual à descrita no artigo “A hipótese da luz”.

Que tipo de ação ou tendência é esta, se consiste num movimento vibratório do raio, ou do meio, ou de alguma outra coisa, não o indago aqui. Aqueles que se negam a admitir quaisquer novas descobertas, exceto as que conseguem explicar por uma hipótese, poderão supor que, assim como as pedras ao cair na água conferem a esta um movimento ondulatório, e assim como todos os corpos produzem vibrações no ar por percussão, assim os raios de luz, chocando-se com qualquer superfície refratora ou refletora, produzem vibrações no meio ou substância refratora e refletora e, assim fazendo, agitam as partes sólidas dos corpos refrator ou refletor e [...] que as vibrações assim produzidas se propagam no meio ou substância refratora ou refletora da mesma maneira que as vibrações se propagam no ar para causar o som e se movem mais rápido do que os raios, de modo a ultrapassá-los; e que, quando qualquer raio está naquela parte da vibração que contribui para seu movimento, ele irrompe facilmente através de uma superfície refratora, mas quando está na parte oposta da vibração, que lhe impede o movimento, é facilmente refletido; e, por consequência, que todo raio tende sucessivamente a ser

facilmente refletido ou facilmente transmitido por toda vibração que o ultrapassa. Mas se tal hipótese é verdadeira ou falsa é coisa que não considero aqui [16, pp. 211-12].

Esse trecho deixa claro que Newton não conseguiu se desvencilhar do modelo de vibrações no éter, elaborado no artigo de 1675. Além disso, e principalmente, suas palavras indicam que a transição da idéia de vibrações para os estados foi uma mudança intencional para evitar a discussão de hipóteses, o que fica evidente por sua última frase.

Nas famosas *Questões* do Livro III do *Óptica*, Newton mencionou novamente que a causa dos estados seriam as vibrações em um meio, no entanto, essas agora ocasionadas por poderes de atração da luz.

Para colocar os raios de luz em estados de fácil reflexão e fácil transmissão, basta que eles sejam corpúsculos que por seus poderes de atração, ou por alguma outra força, excitam vibrações naquilo que agem, vibrações estas que, sendo mais rápidas do que os raios, os ultrapassem sucessivamente e os agitem de modo a aumentar e diminuir alternadamente suas velocidades, colocando-os assim nesses estados [16, p. 272].

No entanto, essa causa para os estados baseada em vibrações do meio apresenta o mesmo problema em relação aos experimentos com filmes finos de água. Assim como no artigo de 1675, no Livro II do *Óptica*, Newton relatou algumas observações sobre esse caso particular da formação dos anéis, descrevendo que esses apresentavam-se mais contraídos, em comparação àqueles formados por um filme de ar. Dessa forma, se os estados fossem causados por vibrações no meio, essas não poderiam ultrapassar os raios de luz em meios mais densos que o ar.

Do mesmo modo, os estados não explicam o fenômeno da reflexão total da luz. Supondo que os raios de luz estão sempre ou em um estado de fácil transmissão ou em um estado de fácil reflexão, não haveria nenhuma razão para que todos eles estivessem nesse último estado ao passarem, por exemplo, de um meio mais denso (como o vidro) para um meio menos denso (como o ar). Além disso, o que determina se um raio sofrerá a reflexão total são a diferença de densidade entre os meios e o ângulo de incidência, variáveis que eram conhecidas e foram estudadas por Newton, mas não levadas em conta ao discutir os estados da luz.

Esses pontos obscuros em relação ao conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão indicam, por um lado, que há várias particularidades em relação a ele que não são notadas somente por uma análise superficial do discurso newtoniano. Por outro lado, eles denotam que esse conceito é completamente diferente da concepção moderna de dualidade onda-partícula da luz, que leva em conta diversos parâmetros que não estavam estabelecidos – e nem poderiam – na época de Newton.

Com base nesse estudo histórico, apontaremos na próxima seção quais são os erros presentes nas citações sobre o conceito de estados apresentadas na introdução.

V. PORQUE NEWTON NÃO SUPÔS UM COMPORTAMENTO DUAL PARA A LUZ

No primeiro exemplo da introdução, foi dito que Newton “acreditava na teoria corpuscular da luz; mas parece que a coisa não era tão simples assim; ele achava que a luz era basicamente corpuscular, não ondulatória, mas com propriedades ondulatórias. Ele fez também experiências de difração e interferência, de modo que sabia que a luz tinha propriedades ondulatórias”. Somente nesse trecho, há vários erros históricos e conceituais, que estão presentes, de formas diferentes, nos outros exemplos apresentados. Tais erros podem levar a uma interpretação equivocada não só da óptica newtoniana, como da óptica do século XVII em geral, fomentando a idéia de que Newton teria suposto a dualidade onda-partícula.

O primeiro deles refere-se à interpretação sobre a concepção ondulatória para a luz, e está presente na maioria das citações acima. No século XVII, o conceito de ondas era expressivamente diferente do atual, sendo assim, é necessário cautela ao considerá-lo em discussões de fatos da história da óptica. O historiador da ciência Casper Hakfoort afirma que apenas a teoria introduzida por Leonhard Euler (1707-1783) na metade do século XVIII pode ser classificada de ondulatória, visto que somente a partir dela foram incorporadas as idéias de frequência e periodicidade para tratar as ondas de luz [17]. Tais características não estavam presentes nos estudos sobre a luz no século XVII. Dessa forma, as teorias desse período que são atualmente consideradas ondulatórias se enquadram melhor como teorias vibracionais, pois, essencialmente, levavam em conta somente a idéia de que a luz seria algum tipo de vibração sobre um meio, por exemplo, o éter.

Outro revés está na utilização do termo “interferência”. A utilização dessa palavra para discutir os experimentos de Newton sobre os anéis de cores em películas finas pode levar a uma interpretação anacrônica dos fatos históricos. Dependendo da circunstância na qual for empregada, ela pode suscitar a suposição de que o fenômeno dos “anéis de Newton” já era, no século XVII, considerado um resultado da interferência entre os raios de luz, concepção que adotamos atualmente. No entanto, como vimos, nem Newton e nenhum outro pesquisador do período utilizaram esse conceito.

Entretanto, o ponto mais problemático está na suposição de que o filósofo natural inglês teria admitido que a luz possuiria propriedades ondulatórias ao realizar experimentos de difração e interferência. O terceiro e os dois últimos exemplos apresentados na introdução contêm afirmações semelhantes, especulando sobre uma suposta combinação entre concepções corpusculares e ondulatórias na explicação desses fenômenos. Isso apoiaria a idéia de que os estados seriam uma antecipação do comportamento dual para a luz. Como discutimos logo acima, se isso ocorreu, o conceito de onda corresponderia à idéia de vibração propagada em algum meio. No entanto, a análise histórica apresentada acima indica a incoerência dessa proposição.

Ao analisar o fenômeno dos anéis coloridos em películas finas no artigo “A hipótese da luz”, Newton afirmou que a causa do aparecimento dos anéis era o movimento vibracional do éter, as quais eram provocadas pelo choque da luz com esse meio etéreo. Tais vibrações seriam mais ou menos intensas dependendo da cor do raio de luz, a qual diferia, segundo Newton, em “magnitude, intensidade ou vigor”. Por meio dessa idéia, ele explicou tanto a formação de anéis coloridos pela incidência de luz branca sobre a película quanto a formação de anéis alternadamente escuros e claros pela incidência de luz monocromática.

O comportamento vibracional – e não ondulatório – que ocasionaria o aparecimento dos anéis era uma característica das partículas do meio etéreo, e não dos raios de luz. Portanto, Newton não admitiu que a luz tinha propriedades vibracionais, tampouco ondulatórias, apenas afirmou que ela provocaria o surgimento dessas características no éter. Do mesmo modo, no caso da difração, estudos históricos apontam que ele estava longe de aceitar qualquer propriedade ondulatória para a luz na explicação desse fenômeno, considerando-o como resultado da interação entre a luz e os corpos por meio de forças de curto alcance [18, 19].

No *Óptica*, ao elaborar e argumentar sobre o conceito de estados de fácil transmissão e fácil reflexão, Newton afirmou que uma possível causa para eles seriam as vibrações no meio refrator provocadas pelo choque dos raios de luz com as partículas desse meio. Como apontamos na seção IV, essa hipótese é semelhante às idéias sobre vibrações no éter presentes em “A hipótese da luz” e, conseqüentemente, também não carregam qualquer traço de uma possível combinação de concepções corpusculares e ondulatórias para a luz. Apesar de Newton discutir essa causa para os estados, ele explicitamente afirmou que isso não era importante, pois a existência de estados de fácil transmissão e fácil reflexão seria comprovada pelos experimentos, não necessitando de qualquer argumento de caráter especulativo.

Assim, fica claro que Newton não uniu idéias corpusculares e ondulatórias em nenhum momento da discussão sobre o fenômeno dos anéis coloridos em películas finas no *Óptica* ou em trabalhos anteriores. Ele estabeleceu somente que a luz seria algo capaz de provocar vibrações no éter – que não eram propriamente a luz –, as quais seriam responsáveis pelo aparecimento dos anéis.

O erro nos relatos apresentados no início do artigo sobre a união entre concepções corpusculares e ondulatórias fica ainda mais evidente pela explícita rejeição de Newton à concepção vibracional para a luz, presente em vários de seus trabalhos sobre óptica. Nas famosas *Questões do Óptica*, ele deixou clara essa posição:

Não são errôneas todas as hipóteses segundo as quais a luz consistiria em pressão ou movimento propagados através de um meio fluido? [...] E é igualmente difícil explicar, por essas hipóteses, como os raios podem estar alternadamente em estados de fácil reflexão e fácil transmissão, a não ser, talvez que se pudesse supor que há

Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz? em todo espaço dois meios vibratórios etéreos e que as vibrações de um deles constitui a luz, e as vibrações do outro são mais rápidas, colocando-os nesses estados tão freqüentemente quanto ultrapassam as vibrações do primeiro. Mas é inconcebível como dois éteres podem estar difundidos por todo espaço, um dos quais age sobre o outro e, por conseqüência, sofre uma reação, sem retardar, destruir, dispersar e confundir os movimentos um do outro [16, pp. 265-67].

Portanto, afirmar que Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula para a luz constitui uma interpretação anacrônica da história das ciências, que procura associar o conceito newtoniano de estados de fácil transmissão e fácil reflexão àqueles aceitos atualmente para tratar o comportamento da luz. Tal ação não leva em conta o desenvolvimento histórico e teórico desse conceito e os vários obstáculos enfrentados por Newton ao concebê-lo e descrevê-lo no *Óptica*. Essas interpretações distorcidas e descontextualizadas sobre os estados ficam evidentes na leitura de outras partes das citações apresentadas na introdução.

Em outro trecho do primeiro exemplo, foi dito que na época de Newton “a idéia de probabilidade não estava muito clara ainda; então, ele usou a palavra *fits*, que já era uma idéia probabilística; quer dizer que a luz era basicamente corpuscular, mas poderia ter também estes efeitos conhecidos de interferência e difração”. Entretanto, quando dizemos que algo é provável, significa que pode ou não acontecer, pressuposto que Newton não utilizou ao conceber os estados. Segundo suas descrições, a luz, adquirindo ou sendo submetida aos estados, estaria sempre ou em um estado de fácil transmissão ou em um estado de fácil reflexão ou no intervalo entre eles. Não haveria possibilidade de nada acontecer. Aparentemente, o autor não levou em consideração as hipóteses elaboradas por Newton para discutir a origem e causa dos estados – tampouco seus problemas –, as quais evidenciam que esse conceito não foi elaborado com base em concepções probabilísticas.

No segundo exemplo, foi dito que a tentativa de Newton “de combinar concepções corpusculares e ondulatórias” por meio dos estados da luz “tem sido considerada como um ‘tipo de pressentimento da mecânica ondulatória’”. No quarto exemplo, os estados são considerados correspondentes “às probabilidades transitórias da teoria quântica”. Entretanto, Newton não elaborou – e nem poderia – o conceito de estados baseado nos modelos atuais, fundamentados na mecânica quântica. Na óptica newtoniana não há qualquer traço de elementos conceituais que fazem parte da óptica moderna, por exemplo, a idéia de elétron, próton, fóton, efeito fotoelétrico, radiação de corpo negro, entre outros.

Portanto, os estados de fácil transmissão e fácil reflexão de Newton não foram uma antevisão do conceito moderno de dualidade onda-partícula para a luz. O conteúdo do Livro II do *Óptica* – assim como todas as obras newtonianas – denota que Newton era um homem de seu tempo, imerso nas teorias aceitas no período e engajado na discussão dos vários fenômenos naturais

estudados na época a partir de suas crenças sobre o funcionamento do mundo. A presente análise deixa claro que as eventuais semelhanças entre suas idéias e as atuais são, em grande parte, resultado de um exercício de imaginação baseado em visões distorcidas e anacrônicas da história das ciências.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, pela expansão do acesso ao conhecimento, é fácil obter informação superficial e ilustrativa sobre diversos assuntos relacionados à física em materiais didáticos, em livros e revistas de divulgação científica e em páginas da internet. Entretanto, no caso da discussão de fatos da história das ciências, diversos estudos têm apontado para erros históricos grosseiros presentes nessas fontes [20-23].

Newton não antecipou a dualidade onda-partícula por meio dos estados e nem poderia, como ressaltamos na seção anterior. Anteriormente ao *Óptica*, no artigo “A hipótese da luz”, Newton discutiu a idéia de vibrações no éter, provocadas pelo choque dos raios de luz com as partículas de um meio etéreo que permeava os corpos. Por meio dessa conjectura, ele foi capaz de explicar satisfatoriamente a formação de anéis coloridos em películas finas de ar. No entanto, ao tratar a formação dos anéis em filmes de água, a idéia de vibrações esbarrou em um problema crucial, o qual não foi discutido por Newton.

Quase trinta anos depois, no *Óptica*, Newton substituiu a hipótese de vibrações no éter pelo conceito de estados da luz, que acreditava ser comprovado pelos experimentos. Aplicando-o para explicar o fenômeno dos anéis de cores em películas finas, Newton foi, até certo ponto, bem sucedido. Ao discutir a origem e causa, ele enfrentou problemas parecidos com aqueles presentes na idéia de vibrações no éter do artigo “A hipótese da luz”.

As questões relativas ao desenvolvimento do conceito de estados da luz podem ser levadas principalmente a cursos de formação inicial e continuada de professores de física. Eles podem ser instigados a discutir os métodos, as hipóteses e os erros imersos no discurso newtoniano, ilustrando que a obra de Newton possui diversas nuances que denotam o caráter complexo do processo de construção e estabelecimento do conhecimento científico. Comparando a análise histórica sobre os estados com as descrições distorcidas presentes em muitos materiais voltados à física, podem ser criados debates sobre como ler e utilizar adequadamente estudos históricos, segundo cada contexto educacional.

Acreditamos que o presente trabalho oferece subsídios suficientes para esclarecer e minimizar visões equivocadas sobre o conceito de estados e sobre uma possível antevisão do comportamento dual da luz na óptica de Newton. A partir disso, novas iniciativas para o ensino de física podem ser desenvolvidas, favorecendo um entendimento adequado da natureza da ciência e do processo de construção do conhecimento científico.

VIII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e as sugestões de Thais Cyrino de Mello Forato e Esdras Viggiano.

REFERÊNCIAS

- [1] Young, M., *Óptica e lasers* (Edusp, São Paulo, 1998), pp. 137-39
- [2] Schenberg, M., *Pensando a Física* (Landy Editora, São Paulo, 2001), pp. 60-61.
- [3] Sabra, A. I., *Theories of light from Descartes to Newton* (Cambridge University Press, Cambridge, 1981), pp. 341-42.
- [4] <http://www.oftalmo.com/ergo/ergo1998/02cap02.htm>, acessado em 07 de Maio, 2008.
- [5] Whittaker, E., *A history of the theories of ether and electricity – the classical theories* (Thomas Nelson and Sons Ltd, London, New York, 1951), p. 22, nota 1.
- [6] Bassalo, J. M. F., *A crônica da óptica clássica*. Caderno Catarinense de Ensino de Física **4**, 140-50 (1987).
- [7] <http://plato.if.usp.br/1-2003/fmt0405d/apostila/opticaonda/node4.html>, acessado em 26 de Março, 2008.
- [8] <http://fisica.cdcc.sc.usp.br/Cientistas/IsaacNewton.html>, acessado em 26 de Março, 2008.
- [9] Hall, A. H., *All was light: an introduction to Newton's "Opticks"* (Clarendon Press, Oxford, 1993).
- [10] Newton, I., “Of colours”, in: McGuire, J. E., Tamny, M. *Certain philosophical questions: Newton's Trinity notebook* (Cambridge University Press, Cambridge, 1983).
- [11] Newton, I. [Discourse of observations], in: Cohen, I.B. and Schofield, R. E. (eds.), *Isaac Newton's papers and letters on natural philosophy* (Harvard University Press, Cambridge – MA, 1978), pp. 202-35.
- [12] Newton, I., “A hipótese da luz – uma hipótese explicativa das propriedades da luz sobre as quais discorrem meus diversos artigos”, in: Cohen, I. B. and Westfall, R. (eds.), *Newton: textos, antecedentes, comentários* (EdUerf / Contraponto, Rio de Janeiro, 2002), pp. 30-54.
- [13] Stuewer, R. H., *Was Newton "wave-particle duality" consistent with Newton's observations?*, *Isis* **60**, 392-94 (1969).
- [14] Moura, B. A.; Silva, C. C., A teoria dos estados da luz: considerações sobre alguns papéis das hipóteses na óptica newtoniana. In: Martins, R.A.; Silva, C.C.; Ferreira, J. M. H.; Martins, L. A.C. P., *Filosofia e história da ciência no Cone Sul. Seleção de trabalhos do 5º Encontro*. (Associação de Filosofia e História da Ciência, Campinas, 2008), pp. 91-100.
- [15] Newton, I., *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy; a new translation by I. Bernard Cohen and Anne Whitman* (University of California Press, Berkeley, 1999), p. 943.
- [16] Newton, I., *Óptica* (Edusp, São Paulo, 1996).

- [17] Hakfoort, C., *Optics in the age of Euler – conceptions of the nature of light, 1700-1795*. (Cambridge University Press, Cambridge, 1995), pp. 1-10.
- [18] Stuewer, R., *A critical analysis of Newton's work on diffraction*, *Isis* **61**, 188-205 (1970).
- [19] Hall, A. R., *Beyonde the fringe: diffraction as seen by Grimaldi, Fabri, Hooke and Newton*, *Notes and Records of the Royal Society of London* **44**, 13-23 (1990).
- [20] Martins, R. A., *Como não escrever sobre História da Ciência – um manifesto historiográfico*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **23**, 113-129 (2001).
- Newton antecipou o conceito de dualidade onda-partícula da luz?*
- [21] Martins, R. A., *A maçã de Newton: histórias, lendas e tolices*. In: Silva, C.C. *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*.
- [22] Silva, C. C.; Martins, R. A., *A teoria das cores de Newton: um exemplo do uso de história da ciência em sala de aula*, *Ciência e Educação* **9**, 53-65 (2003).
- [23] Pagliarini, C. R., “Uma análise da história e filosofia da ciência presente em livros didáticos de física para o ensino médio”. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

Os Desafios do Ensino de Física e Ciências na Amazônia ante às TIC's



Josefina Barrera Kalhil^{1,2}, Ana Paula Sá Menezes¹

¹ Universidade do Estado do Amazonas - UEA, Escola Normal Superior, Av. Djalma Batista, 2470, Manaus, AM, Brasil

² Professora do Mestrado Profissional em Ensino de Ciências na Amazônia da UEA.

E-mail: josefinabk@yahoo.com

(Recibido el 26 de Agosto de 2008; aceptado el 17 de Septiembre de 2008)

Resumo

As Tecnologias de Informação e de Comunicação – as TIC's – são essenciais no processo ensino-aprendizagem, mesmo presenciais, já que nossa sociedade foi invadida por toda sorte de equipamentos eletrônicos, como celulares de 3ª geração (3G), TV digital interativa, *i-podes*, PS3, etc. A cada ano, novas tecnologias incrementam o mercado prometendo facilitar nossa vida e, isso, certamente, precisa de um novo questionamento sobre o uso das mesmas nas escolas. Como um dos fenômenos mais espetaculares engendrados devido ao desenvolvimento desta tecnologia, que implica a sociedade nos últimos tempos é, sem dúvida alguma, a aplicação generalizada das TIC's a todos os âmbitos de nossas vidas. A introdução das TIC's está mudando nossa maneira de fazer as coisas, de trabalhar e aprender e, de modo sutil, até nossa forma de pensar. A escola não está isenta dessas mudanças, pelo contrario, deve manter-se na vanguarda na introdução das vantagens oferecidas por esse desenvolvimento. No presente trabalho, realiza-se uma análise dos novos rumos para as escolas, dos docentes e discentes, na informatização numa ênfase aos conceitos de informação e comunicação a partir das TIC's culminando com o sucesso no processo ensino-aprendizagem de Ciências no Amazonas.

Palavras-chaves: Ensino de Física e de Ciências na Amazônia, Tecnologias de Informação e de Comunicação, Processo Ensino-aprendizagem.

Abstract

The Technologies of Information and Communication - the TIC's - are essential in the process teach-learning, actual, since our society were invaded by all electronic equipment luck, as exactly cellular of 3rd generation (3G), interactive digital TV, *i-pods*, PS3, etc. To each year, new technologies develop the market promising to facilitate our life and, this, certainly, needs a new questioning on the use of the same ones in the schools. As one of the produced phenomena most spectacular had to the development of this technology that implies the society in the last times is, without a doubt some, the generalized application of the TIC's to all the scopes of our lives. The introduction of the TIC's is changing our way to make the things, to work and to learn e, in subtle way, until our form to think. The school is not exempt of these changes, opposes for it, and must be remained in the vanguard in the introduction of the advantages offered for this development. In the present paper, an analysis of the new routes for the schools is become fulfilled, of the professors and learning, in computerization in an emphasis to the concepts of information and communication from the TIC's culminating with the success in the process teach-learning of Sciences in Amazon.

Keywords: Education of Sciences and Physics in the Amazonia, Technologies of Information and Communication, Process Teaching-learning.

PACS: 01.40.Ha, 01.40.Ha, 01.40.-d.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUÇÃO

Uma das principais vantagens da atual revolução técnico-científica se encontra no desenvolvimento da tecnologia eletrônica e, advindo disso, a computação e a informática. Um dos fenômenos mais espetaculares do desenvolvimento dessa tecnologia implica no uso e aplicação das TIC's na sociedade multimídia e globalizada em que vivemos. A introdução das TIC's está modificando nosso jeito de ser e, de maneira sutil, nossa maneira de encarar o mundo.

A relação do ser humano com a tecnologia é mais simples do que parece: nós a utilizamos para transformar o que há em nossa volta, adaptando o mundo às nossas necessidades ou mesmo para ampliar nossas capacidades, e isso acaba transformando-nos, a nós mesmos, e a sociedade que fazemos parte.

Vários autores nos últimos anos, dentre eles Adell [1], propõem que a história da humanidade deveria ser dividida em fases ou períodos que sejam caracterizados pela tecnologia dominante de codificação, armazenamento e recuperação da informação. A tese fundamental é que tais tecnologias têm dado lugar a mudanças radicais nos

processos produtivos, nas formas de organização social e na própria cognição humana e que, somente adotando uma perspectiva histórica é possível compreender as transformações que estamos vivenciando.

A primeira destas mudanças radicais ocorreu há milhares de anos, quando surgiu a linguagem como produto da evolução das espécies. A segunda revolução foi produto da criação de símbolos gráficos para registrar a fala e possibilitar a escrita. A terceira revolução se deveu a aparição da imprensa, que significou a possibilidade de produzir e distribuir textos em massa, restaurando, em parte, a interatividade da fala, perdida no texto manuscrito. Ainda que, no final das contas, o código seja o mesmo na escrita manual que na impressa, a possibilidade de reproduzir textos em grandes quantidades tem sido uma influência decisiva no conjunto de transformações políticas, econômicas e sociais que tem configurado a modernidade e o mundo até hoje. A quarta revolução, que estamos vivenciando, é a dos meios e recursos eletrônicos e digitais, com um novo código mais abstrato e artificial – pois precisamos de aparatos para produzi-lo e decifrá-lo – de representação da informação cujas conseqüências já começamos a experimentar.

Situa-se a origem dessa nova fase numa data concreta: 24 de Maio de 1844, quando Samuel Morse enviou a primeira mensagem por telégrafo. Pela primeira vez – excetuando-se alguns intentos de telégrafos semaforicos –, a informação viajava mais rápido que seu portador. Até esse momento, permanecera presa aos objetos sobre os quais se codificava. Agora, viajava à velocidade da luz, infinitamente mais rápido que os trens ao lado das vias por onde se estendiam os fios dos postes telegráficos.

Naquele tempo, Charles Babbage, um engenheiro inglês, trabalhava em sua máquina analítica, um monstro mecânico, pois a tecnologia eletro-eletrônica ainda não se desenvolvera o suficiente para que se pudesse pensar em como utilizá-la. Porém, o caminho para o primeiro computador digital estava traçado. Nesse processo de digitalização do saber, temos assistido a uma fase preliminar na qual a eletrônica tem propiciado um rápido desenvolvimento das aplicações analógicas – telefone, rádio, TV, fax, etc. –, que na atualidade estão migrando rapidamente para a digitalização e adquirindo capacidades interativas entre emissor e receptor no processo de manipulação da informação, um exemplo recente são os celulares 3G. Satélites de comunicação e redes terrestres de alta capacidade permitem enviar e receber informações em qualquer ponto da Terra. Este é o mundo em que vive e se desenvolve a sociedade atual, o mundo para o qual devemos formar a nossa juventude em nossas escolas. Eis o grande desafio.

II. OS CONCEITOS ADVINDOS COM AS TIC's

Ferdinand de Saussure [2] chamava de signo à combinação do conceito e da imagem acústica do mesmo, ou seja, signo é a combinação de dois elementos: significado e significante. Para tal, o significado é aquele que representamos mentalmente ao captar o significante.

De maneira geral, podemos definir comunicação como o ato de relação entre dois ou mais sujeitos, mediante a qual se evoca um significado em comum.

A informação é um conceito de mecanismos que permitem ao indivíduo retornar os dados de seu ambiente e estruturá-los de uma determinada maneira, de modo que lhe sirvam como guia de suas ações. Não é o mesmo que comunicação, embora se suponha que sim.

Para a nossa sociedade multimídia e globalizada, a comunicação e a informação são os aspectos de sua totalidade. A sociedade não pode ser tal qual é sem a comunicação e não pode se transformar e evoluir sem a informação. Em nossos dias, as TIC's têm uma importância fundamental no que se refere às relações entre a comunicação, a informação e a coesão de nossa sociedade.

A UNESCO [3] define Tecnologias de Informação – TI's – como o “o conjunto de disciplinas científicas, tecnológicas, de engenharia e de técnicas de gestão utilizadas no manejo e processamento da informação, suas aplicações, os computadores e sua interação com homens e máquinas e os conteúdos associados de caráter social, econômico e cultural”. Portanto, nesse contexto, entenderemos por TI's o conjunto de processos e produtos derivados das novas ferramentas (hardware e software), suportes da informação e canais de comunicação relacionados com o armazenamento, processamento e transmissão digitalizados da informação. As TI's podem ser codificadas, decodificadas e reproduzidas indefinidamente e sob a forma de diferentes mídias [4]. Já as Tecnologias de Comunicação – as TC's – dizem respeito à transmissão de dados mediante dispositivos [4].

III. O PARADIGMA DAS TIC's

Os computadores nos oferecem uma grande quantidade de possibilidades. Quando interconectados incrementam sua funcionalidade em vários graus de magnitude. Ao formar redes, os PC's não somente servem para processar a informação armazenada nos suportes eletrônicos (disco rígido, CD-R, etc.) em qualquer formato digital, servem também como ferramenta para acessar recursos e serviços prestados por computadores remotos e como sistema de publicação e difusão da informação. O paradigma das redes informáticas é a *internet*. Uma única rede que interconecta milhões de pessoas, instituições, empresas, centros educacionais de todo o mundo em poucos segundos. Ela é imprescindível. Está modificando a forma de atuar dos estudantes, professores e pesquisadores, principalmente na hora de buscar e obter informações ou mesmo no processo de formação através de cursos oferecidos na modalidade EAD (Ensino a Distância).

Os jovens estudantes têm grande facilidade para usar as TIC's e demonstram, de maneira geral, um grande interesse por essa prática. Porém, apesar de nossos jovens amazonenses terem acesso ao *MSN*, ao *Orkut*, de conhecer todas as atribuições de um celular, muitos não sabem calcular um percentual numa máquina de calcular comum. Por esta razão é fundamental incorporar as TIC's no

contexto escolar em tarefas que proporcionem ao estudante situações novas de aprendizagem, assim como aos professores como estratégia de auto-aprendizagem e formação continuada. Para isso, precisamos, antes de equipar nossas escolas com Laboratórios de Informática, capacitar nossos professores para usar esses equipamentos.

Todavia, pouco se fala que, muito mais viável que ensinar o professor a usar as TIC's, é usar as TIC's para ensinar o que o professor muitas vezes não sabe. Ao se propor esse desafio, estar-se-ia proporcionando a esse professor – muitas vezes detentor de seu conhecimento em sala de aula –, aquele velho sentimento de voltar a ser aluno outra vez, com dúvidas, anseio, medo de errar, de ser ridicularizado pelo restante dos colegas, mas também com aquela indizível vontade de aprender, aquele sabor que só quem tem sede irrefreável pelo simples fato de *conhecer*, reconhece. O ganho nessa experiência será maior ainda se “o educador, ao vivenciar a experiência de utilizar o computador, poderá compreender como esta ferramenta atua no processo de aprendizagem” [4].

Jamais o homem teve à sua volta tal volume de informação em tão curto espaço de tempo. Todos esses avanços tecnológicos têm lugar dentro de um determinado marco socioeconômico. A revolução tecnológica nos meios, canais e suportes de informação e de comunicação que estão sendo produzidos diariamente engloba um conjunto mais amplo de mudanças na estrutura produtiva de nossa sociedade. Um termo define essas transformações: a sociedade multimídia e globalizada. E a escola não pode se permitir fugir a essa realidade.

IV. A EDUCAÇÃO NA SOCIEDADE MULTIMÍDIA E GLOBALIZADA

O sistema educativo [5] é uma das instituições sociais por excelência e se encontra imerso em um processo de mudança, marcadas por um conjunto de transformações sociais propiciadas pela inovação tecnológica e, sobretudo, pelo desenvolvimento das TIC's. E isso se reflete numa nova adaptação das relações tecnologia-sociedade determinando as relações tecnologia-educação. Essa adaptação supõe mudanças nos modelos educativos, mudanças na formação dos professores e nos cenários onde ocorre o processo ensino-aprendizagem. Precisamos criar novas situações de aprendizagem para despertar em nossos estudantes um interesse maior pela escola.

Do mesmo modo que a sociedade industrializada trouxe grandes transformações no conjunto dos processos educativos, a chegada de uma nova sociedade requer novas mudanças e novos paradigmas. Centramos nossa análise no ambiente de ensino-aprendizagem, na organização do espaço educativo e do tempo, não porque somente aqui se produzam as verdadeiras mudanças, a vanguarda, mas porque há uma manifestação mais aberta e uma atuação mais viável.

Esse novo desafio requer uma nova postura, tanto dos professores como dos estudantes. A perspectiva tradicional do processo ensino-aprendizagem, particularmente na disciplina de Física, tendo o professor como detentor do

saber e seus estudantes como receptores passivos deve ceder seu lugar a papéis bastante diferentes. A missão do professor nesse novo processo é o de facilitador, mediador, criador de hábitos na busca, seleção e tratamento da informação. O estudante, por sua vez, deve adotar uma postura mais ativa em sua formação, sendo co-autor de sua aprendizagem.

As TIC's abrem possibilidades metodológicas e didáticas inesperadas. Entretanto, ao se falar no uso das TIC's pelo professor em sala de aula precisamos também falar nas dificuldades e aversão do mesmo à essas tecnologias. Todos nós temos conhecimento de que muitas escolas em nosso estado, o Amazonas, possuem Laboratórios de Informática bem equipados, mas que não são utilizados por falta de um técnico ou mesmo de um professor que use essa ferramenta em suas aulas. Muitos professores se desculparam dizendo que quem deveria usar esses laboratórios seriam os professores de Física, pois Física e Tecnologia caminham juntas de mãos dadas. Mas, o que se observa é que esses laboratórios, em sua maioria, não são utilizados como deveriam.

V. AS TIC's: NOVOS MATERIAIS DE ENSINO-APRENDIZAGEM

Entender Física, para muitos estudantes de Ensino Médio, é difícil e complicado, devido aos inúmeros conceitos, princípios, leis e equações, que, muitas vezes, o aprendiz os memoriza mecanicamente ao invés de entendê-los. Especialmente no ensino de Física, as TIC's permitem que fenômenos físicos, nitidamente dinâmicos, sejam apresentados de forma dinâmica para os estudantes através de animações e vídeos gravados de experiências realizadas [6], no uso de simuladores, ou de representações de gráficos.

A digitalização e os novos suportes eletrônicos estão cedendo lugar a novas formas de armazenar e apresentar a informação [7]. Os tutoriais multimídias, os ambientes virtuais de aprendizagem – AVA –, a internet, são as novas formas de apresentar e acessar o conhecimento que superam, em determinados contextos, as formas tradicionais de explicação oral, apontamentos ou mesmo apenas se resumir à leitura do livro didático. Não é necessário explicar as vantagens da integração de texto, imagem, som ou da navegação permitida pelos hipertextos. Um exemplo disso são nossas bibliotecas universitárias: de simples depósitos de livros e revistas com salas de leitura anexas, passam a nos oferecer múltiplas fontes de informação eletrônica, como teses e dissertações.

Mas, não basta apenas usar os recursos das TIC's. A seleção e organização desses recursos precisam de uma estratégia pedagógica e do conhecimento do professor no que diz respeito ao que fica ou não vívido na memória de seu estudante, o que realmente é significativo para ele. Levar em consideração os conhecimentos prévios dos alunos na seleção dos recursos tecnológicos requer, também, compreensão sobre a memória de curta duração e outra, de longa duração [4].

O emprego adequado das TIC's combinado a estímulos, principalmente visão e audição, aumenta a retenção da mensagem enviada pelo professor ao estudante. Muitas vezes encontramos dentre nossos estudantes em sala de aula, aqueles que não se contentam apenas em ouvir o professor, eles precisam copiar (visão) a fala do mestre. A mensagem quando recebida via combinação entre estímulos visual e auditivo é maior que quando separados (visual – 75%; auditivo – 13%), e quando envolve os cinco sentidos o aumento na retenção de dados e informações é de 35% [8].

VI. AS TIC's E O ENSINO DE CIÊNCIAS

Nos PCN (Parâmetros Curriculares Nacionais), em seu segundo volume, voltado para o Ensino de Ciências e Matemática, a tecnologia merece atenção, especialmente em Física, pois aparece como parte integrante da área de Ciências da Natureza [9]. Infelizmente, nos livros didáticos da referida disciplina, esse tema é pouco abordado. Em contrapartida, esse seria um bom enfoque para motivar os nossos jovens a estudar Física, já que a maioria deles tem acesso a celulares, *internet*, *ipods*, PS2, etc. Aliado a isso, o próprio uso do recurso da hipermídia como ferramenta auxiliar, facilitaria o entendimento da tecnologia não como ciência aplicada, como se tem visto até aqui.

Simulador significa “*aparelho em que se reproduzem situações reais, usado para treinamento ou lazer*” [10]. Simuladores Computacionais vão além das simples animações. Eles englobam uma vasta classe de tecnologias, do vídeo à realidade virtual, que podem ser classificadas em certas categorias gerais baseadas fundamentalmente no grau de interatividade entre o aprendiz e o computador [11].

No Ensino de Física, há um campo vasto para o uso desses simuladores computacionais visto a gama de fenômenos físicos serem além da percepção humana. São fenômenos que variam desde muito lentos a extremamente rápidos. São partículas extremamente pequenas, como as tratadas na nanotecnologia, aos complexos buracos-negros no espaço. Tudo isso se torna adequado para essas simulações computacionais [12].

As aulas de Física devem progredir conforme os avanços das ciências, realizando constantemente revisões e ajustes em suas concepções. O professor precisa modificar sua prática para que se vença o fracasso no ensino de Física no estado do Amazonas.

Para resolvermos os problemas dentro de sala de aula, precisamos propor tarefas complexas e desafios que incitem os educandos a mobilizar seus conhecimentos e completá-los. Precisamos nos organizar para situações didáticas e de atividades que tenham sentido para os estudantes. Não podemos nos contentar com aprendizagens mecânicas, precisamos gerar espaços onde se possibilite uma aprendizagem significativa, pois para que a ciência objetiva seja plenamente educadora, é preciso que seu ensino seja socialmente ativo.

Sabemos que não é somente o uso das TIC's que motivará o sucesso no processo ensino-aprendizagem, *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 2, No. 3, Sept. 2008*

visto que o presente artigo não trata de uma receita de bolo, mas de algo mais complexo, que envolvem emoções, sentimentos, enfim, relações humanas. É preciso que o professor de Física conheça o objeto de estudo, a epistemologia de sua disciplina para mudar suas estratégias pedagógicas na busca do sucesso e da motivação no ensino de Física na Educação Básica Amazonense.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente trabalho nos permitiu realizar uma análise das perspectivas da introdução das TIC's em nossas escolas amazonenses, nas quais já se evidencia algumas mudanças nas concepções do desenvolvimento das atividades didático-pedagógicas por parte de professores e estudantes no processo ensino-aprendizagem de Ciências.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UEA pelo apoio dado a realização dessa pesquisa. A segunda autora agradece à FAPEAM pelo apoio e financiamento de seus estudos no Curso de Mestrado Profissional em Ensino de Ciências na Amazônia.

REFERÊNCIAS

- [1] Adell, J., *Tendencias en educación en la sociedad de las tecnologías de la información*. EDUTEC. Revista Electrónica de Tecnología Educativa, nº 7 (1997).
- [2] Saussure, F. de <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Especial:Citar&page=Ferdinand_de_Saussure&id=11897281> Consultado em 25 de Julho de 2007.
- [3] Salinas, J., *Campus electrónicos y redes de aprendizaje*. In Salinas, J. et al (Coord), *Redes de comunicación, redes de aprendizaje*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de las Islas Baleares, Palma de Mallorca, 91-100 (1996).
- [4] Silva, R. S. da e Silva, L. R. de A., *Gestão Escolar e Tecnologias* (UEA Edições, Manaus, 2008).
- [5] Duderstadt, J., *The Future of the University in an Age of Knowledge*. Journal of Asynchronous Learning Networks (1997)<<http://www.aln.org/alnweb/journal/issue2/duderstadt.htm>> Consultado em 20 de Julho de 2007.
- [6] Wolff, J. F. de S., *O Ensino da Teoria da Relatividade Especial no Nível Médio: uma abordagem histórica e conceitual*. (UFRGS, Porto Alegre, 2005).
- [7] Salinas, J., *Nuevos ambientes de aprendizaje para una sociedad de la información*. Revista Pensamiento Educativo 20. Pontificia Universidad Católica de Chile, 81-104 (1997).
- [8] Canabrava, T. e Vieira, O. de F. A., *Treinamento e Desenvolvimento para Empresas que Aprendem*. (SENAC, Brasília, 2006).

[9] Brasil, Ministério da Educação (MEC), Secretaria da Educação Média e Tecnológica (Semtec). *PCN Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias* (MEC/SEMTEC, Brasília, 2002).

[10] Cegalla, D. P. *Dicionário Escolar da Língua Portuguesa* (Companhia Editora Nacional, São Paulo, 2005).

[11] Medeiros, A. e Medeiros, C. F., *Possibilidades e Limitações das Simulações Computacionais no Ensino da*

Física, Coleção Explorando o Ensino V.7, 46-57. (Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, Brasília, 2006).

[12] Menezes, A. P. S. e Kahlil, J. B., *Um Recurso Facilitador no Processo Ensino-Aprendizagem de Física*. In: *V Congresso Internacional de Didáctica de Las Ciencias e X Taller Internacional sobre La Enseñanza de La Física* (*Anais*. Ministerio de Educación de La República de Cuba, La Habana – Cuba, 2008).

Resolución de problemas, comprensión, modelización y desempeño: un caso con estudiantes de ingeniería*



Zulma Gangoso¹, María Elena Truyol¹, Isabel Brincones², Alberto Gattoni¹

¹Facultad de Matemática, Astronomía y Física, Universidad Nacional de Córdoba, Medina Allende y Haya de la Torre s/n, Ciudad Universitaria, CP 5000, Córdoba, Argentina.

²Departamento de Física, Universidad de Alcalá, Edificio de Ciencias, Campus Universitario, Ctra. Madrid-Barcelona, Km.33,600, Madrid, España.

(*)Aspectos sustanciales de este trabajo fueron presentados en una ponencia en el V Congreso Internacional de Didáctica de las Ciencias y X Taller Internacional de Enseñanza de la Física, La Habana, Cuba, Marzo 2008.

E-mail: zulma@famaf.unc.edu.ar

(Recibido el 27 de Junio de 2008; aceptado el 19 de Agosto de 2008)

Resumen

El presente trabajo se enmarca dentro de un proyecto orientado a refinar un modelo teórico de comprensión de problemas en física. El desarrollo tiene en cuenta el progresivo proceso de abstracción y formalización necesario para alcanzar la solución de un problema de los que habitualmente se presentan en la instrucción. Sobre esa base se ha diseñado un instrumento para analizar registros escritos [1, 2]. En este caso se utiliza el modelo teórico y el instrumento desarrollado para estudiar el proceso de resolución de un problema solicitado a 70 alumnos en un examen de primer curso de una carrera de Ingeniería de una universidad española. Se encuentra que los sujetos generan representaciones de la situación planteada que tienen diferente nivel de abstracción y que cada una de ellas correlaciona significativamente con la representación de mayor nivel de abstracción correspondiente. La calificación dada por los correctores de los problemas en situación de examen correlaciona con la construcción de representación de mayor nivel de abstracción.

Palabras clave: modelado, comprensión, resolución de problemas, desempeño.

Abstract

The present work is part of a larger project aimed at refining a theoretical model for physics problems comprehension. This model takes into account the increasing abstraction and formalization necessary to achieve a solution in typical end-of-chapter problems. An instrument has been designed on this basis to analyze written records [1, 2]. In this work, this instrument is used, together with the theoretical model, to study the solving process of one problem, as carried out by 70 students during an exam of an Engineering career in a Spanish University. Results show that students generate representations of the situation posed which have varying degrees of abstraction, and that each of these constructions significantly correlates with the corresponding representation of high degree of abstraction. The mark given by the teaching staff grading the tests also significantly correlates with the representation of a higher degree of abstraction.

Keywords: modeling, comprensión, problem solving, performance.

PACS: 01.40.-d, 01.4.Fk, 01.40.Ha.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La actividad de resolución de problemas en las clases de ciencias tiene casi tanta importancia como vaguedad en la definición. Los profesores le adjudican gran valor pero las razones por lo que lo hacen son de muy variada naturaleza. Tiene cierta lógica que así sea teniéndose en cuenta que durante mucho tiempo, resolver problemas ha resultado prácticamente indistinguible del propio pensamiento [3]. La amplitud y falta de precisión, sumada a la dificultad de describir el proceso, se ha manifestado en la diversidad de

enfoques teóricos y metodológicos de los estudios realizados hasta la mitad del Siglo XX. En muchos casos no resultan comparables ni la noción de problema, ni qué significa resolver un problema. De allí lógicamente se deriva un amplio conjunto de contextos, criterios e instrumentos utilizados para medir desempeño y, de ese modo, las posibilidades de orientar la instrucción han resultado siempre limitadas y de escaso impacto.

A partir de las décadas 70-80, concurren varios factores para que se produzcan cambios cualitativos que permiten echar luz sobre la definición de los problemas y las

metodologías empleadas. Se hace posible categorizar investigaciones en torno a algunas variables o factores explicativos de desempeño. Si bien la clasificación es tentativa, resulta posible agrupar las investigaciones según consideren características de: la situación planteada como problema; de la persona que resuelve; del proceso puesto en juego y del entorno de resolución. [4].

Paralelamente, mejores posibilidades en el procesamiento de información y el desarrollo de simulaciones, aportan resultados experimentales dentro de una “nueva psicología cognitiva” que permite estudiar y diferenciar con bastante claridad características de sujetos, resolviendo problemas en variados campos disciplinares, que la literatura denomina “expertos” de otros que llama “novatos”.

Estos avances, sin embargo, dejan una laguna entre el conocimiento “experto” y el “novato”. Uno de los problemas es que el novato generalmente viene caracterizado “por lo que *no* hace”. De ese modo no aportan para comprender por qué algunos estudiantes parecen aprender mientras resuelven problemas y otros no. Tampoco pueden dar cuenta de cuáles son los criterios que los sujetos usan para no aplicar conocimiento relevante que luego demuestran que sí tienen [5].

Atendiendo a esto, y con el objeto de proponer orientaciones didácticas fundamentadas, se entiende necesario contar con algún modelo de comprensión de problemas sustentado en la estructura de la disciplina, en los avances en psicología cognitiva y en la estructura epistemológica del conocimiento físico [4].

Resulta así fundamental profundizar estudios que aborden la relación dialógica que se produce entre la tarea -presentada a través de un enunciado propuesto como problema- y el sujeto que debe resolver, todo ello en el contexto de situaciones instruccionales.

El presente trabajo informa sobre un estudio que articula una fase de construcción teórica en la que se refina un modelo cognitivo para la comprensión de problemas de física con una etapa de desarrollo y aplicación del instrumento para analizar registros escritos

II. ANTECEDENTES Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La preocupación acerca de cómo los humanos resuelven problemas tiene una larga tradición y puede adscribirse a diversos campos de conocimientos. La complejidad de la tarea ha necesitado de desarrollos interdisciplinares de modo que recién en los últimos cuarenta años se han producido algunos avances significativos.

Durante las décadas 70-80, se producen desarrollos que permiten distinguir con claridad el conocimiento y habilidades puestas en juego por sujetos en etapa de instrucción llamados “novatos” -en la literatura- respecto al de sujetos con dominio en un área específica de conocimiento denominados “expertos”. El *Learning Research and Development Center of University of Pittsburgh*, reporta en “Publications on the Nature of Skill

and Expertise” más de 100 estudios desarrollados entre 1985 y 1998.

La mayor parte de los trabajos mencionados está orientada al desarrollo de sistemas expertos, de modo que la instrucción y la educación formal son contextos raramente tratados. Se pretende describir con precisión creciente las diferencias entre un novato y un experto sin interesar cómo un novato se convierte en experto, lo que significa que el aprendizaje no es directamente objeto de estudio. Cualquier intento por transferir o adaptar estos resultados a las aulas debe tener en cuenta esta limitación.

En razón de ello, se hace necesario caracterizar las tareas que en las clases de física se consideran problemas y que son objeto de estudio en esta presentación. Los problemas utilizados en las aulas, en general, son bien definidos, tienen alguna solución, pueden ofrecer caminos alternativos para alcanzarla y son preparados por expertos. Las situaciones físicas son presentadas a los alumnos mediante representaciones externas, generalmente en formato de un texto, que se denomina “enunciado del problema”. El texto puede incluir lenguaje natural, símbolos, gráficos y figuras de diferente nivel de abstracción. El enunciado combina una historia verosímil (contexto), con objetos y eventos apropiados (características superficiales) que embeben conceptos específicos e incluyen alguna demanda que puede ser resuelta utilizando leyes o principios [6, 7].

Sobre este tipo de problemas los estudios muestran que un aspecto relevante del comportamiento de un experto en física consiste en que éste intenta comprender la situación, elabora una discusión y realiza predicciones cualitativas y, sobre esa base, construye una representación formal del problema [8]. Esta representación formal, subsume los objetos y eventos descriptos en la situación en conceptos, leyes y principios, dando lugar a modelos físicos abstractos que, finalmente, se escriben en lenguaje matemático. Hoy se comprende que la competencia para resolver problemas de física radica por tanto, en la habilidad para representar las situaciones del mundo en términos de modelos.

Gerace *et al.* [6] describen con claridad las habilidades metacognitivas puestas de manifiesto por los expertos y es que “son capaces de pensar en el problema, mientras resuelven el problema”. Los estudiantes, sin embargo a menudo, empiezan a resolver problemas “buceando” en expresiones numéricas o algebraicas, manipulando ecuaciones tratando de “llenar huecos” hasta encontrar la respuesta. Sólo ocasionalmente utilizan su conocimiento conceptual para comprender la situación y menos aún para analizarla. Esta carencia, hace difícil que puedan planear caminos de acción ni dar significado físico a la solución que obtienen. Al llegar al resultado, rara vez controlan su razonabilidad ya que la situación, para ellos, ha quedado sin sentido en las primeras etapas.

Nathan *et al.* [9] proponen un *modelo de comprensión de problema* basado en la teoría de procesamiento de discurso de van Dijk y Kintsch [10, 11, 12, 13]. La teoría se propone para los denominados *algebra-word-problem* o problemas de cálculo en cursos básicos de universidad. Esta propuesta, se enfoca sobre la representación mental

que se genera en el estudiante durante la lectura comprensiva del enunciado a la que denominan “Modelo de la Situación”. Este modelo evoluciona hacia un “Modelo de Problema” en el que se incorporan las ecuaciones en lenguaje matemático. La propuesta de Nathan, si bien interesante, resulta de difícil aplicación cuando los enunciados no corresponden a problemas simples de cálculo. En los problemas habituales de los cursos básicos de universidad, las “reglas” para establecer correspondencias son reguladas por las leyes de la física y son parte del conocimiento específico al que la persona que resuelve debe acceder [14].

Empieza a vislumbrarse que la comprensión y solución de un problema, cuando es exitosa y conduce a aprendizaje, incorpora ineludiblemente un proceso de modelado en el que intervienen aspectos cognitivos y metacognitivos que es necesario tener en cuenta.

Dufresne, *et al.* [15] desarrollan un modelo cognitivo para la estructura de conocimiento. En él se reconocen conocimientos dinámicos que son puestos en juego durante la solución de problemas de física. Conciben *Conocimiento Conceptual*, *Conocimiento Procedural* y *Operativo*, *Conocimiento de Estado Situaciones*, todos ellos jerárquicamente organizados y relacionados entre sí. En un nivel superior conciben al *Conocimiento Estratégico*, puesto de manifiesto como la habilidad para saber *qué, en qué casos y cómo* recuperar los conocimientos anteriores.

El Modelo de “Comprensión para la Resolución de Problemas en Física” que da fundamento a este trabajo, propuesto por Gangoso inicialmente en 2005 [7], tiene como soporte psicológico el modelo de Comprensión de Kintsch [12] y Modelo de estructura de Conocimiento de Dufresne *et al.* [15] y como soporte ontológico y epistemológico la clasificación propuesta por Chi [16]. Para abarcar los problemas instruccionales de física, este Modelo de Comprensión adapta la propuesta de Kintsch conservando la representación *Modelo de la Situación* (MS) pero disociando la representación “Modelo de Problema” propuesto [9, 10] en dos representaciones diferentes: el *Modelo Físico Conceptual* (MFC) y el *Modelo Físico Formalizado* (MFF).

En resumen, el modelo de comprensión de problemas instruccionales de física propuesto postula la existencia de tres niveles de representación con diferente naturaleza ontológica y diferente nivel de abstracción, desde los objetos y hechos del mundo (categorías concretas, no abstractas), hasta las entidades matemáticas, pasando por los conceptos, magnitudes, principios y leyes físicas (categorías abstractas).

El modelo propuesto tiene en cuenta la complejidad y dinámica del proceso. El *Modelo de la Situación* que mayor probabilidad tiene de evolucionar hacia el *Modelo Físico Formalizado* será aquel que integre los objetos y eventos que son esenciales para describir la evolución del sistema físico presentado en el enunciado. Así el *Modelo Físico Conceptual* se concibe como una representación - del tipo del *Modelo de la Situación* pero de naturaleza ontológica diferente- que puede subsumir los objetos en conceptos y los eventos en las leyes físicas

correspondientes. Se incorporan también procedimientos: condiciones de validez, posibilidad de generalización, etc. De esta manera, el *Modelo Físico Conceptual* que tiene más posibilidades de evolucionar al *Modelo Físico Formalizado* es aquel que ha podido incorporar de manera sustancial estos elementos de forma de dar cuenta de la evolución del sistema. Los cambios de representación se reflejan en cambios de lenguaje y el modelo de estructura de conocimiento propuesto auxilia la comprensión de cada cambio. El *Modelo Físico Formalizado* -representación expresada en lenguaje matemático- está en condiciones de incorporar los datos necesarios para realizar cálculos y obtener resultados con significado físico.

Las habilidades para construir las diferentes representaciones de un problema no son capacidades innatas en los sujetos y no forman parte del conocimiento vulgar, por lo tanto si no son puestas en juego o exigidas en una tarea instruccional, no tienen por qué desarrollarse.

III. EL INSTRUMENTO

La diversidad de fundamentos teóricos y contextos diferentes ha dado lugar a un amplio conjunto de instrumentos utilizados para generar registros y datos de desempeño. Aceptando que se trata de fenómenos cognitivos no accesibles a la observación directa, y que buena parte de ellos se desarrollan en la memoria de trabajo, se limitan las posibilidades de elección de dichos instrumentos. Los protocolos verbales concurrentes de pensamiento en voz alta aparecen como el instrumento más idóneo para recoger este tipo de información pero, el tiempo de procesamiento que implican estos registros, limita el número de casos a los que se pueden aplicar. En grupos experimentales numerosos, los registros de lápiz y papel de soluciones pueden ser utilizados siempre que se acepte suponer que los registros escritos de un alumno dan cuenta de aspectos relevantes del proceso de solución y se corresponden con las distintas representaciones construidas a lo largo de dicho proceso.

Con estos recaudos, en el marco de un estudio previo [1, 2] se desarrolló un instrumento que permite analizar resoluciones escritas de problemas, en base a algunos indicadores que resultan significativos y dan cuenta de las habilidades cognitivas que los estudiantes ponen en juego en el proceso de resolución de problemas en física (Ver Tabla I). Mediante la utilización de este instrumento se obtienen datos sobre: presencia de reconocimiento de objetos y eventos, presencia del conocimiento conceptual involucrado, condiciones de aplicación de las leyes o principios físicos implicados y presencia de ecuaciones con significado físico que representen la situación descrita en el enunciado del problema.

De lo planteado hasta el momento, la relación dialógica entre el texto enunciado y el lector podría, en términos generales, describirse como sigue: El texto enunciado del problema presenta las características superficiales con las que el lector, utilizando su conocimiento del mundo construye el *Modelo de la Situación*. Luego, en proceso de

abstracción usando su conocimiento específico, subsume objetos y eventos en conceptos y leyes para generar el *Modelo Físico Conceptual*. Cuando los eventos, explicados por leyes físicas, se expresan matemáticamente en forma de ecuaciones se ha generado el *Modelo Físico Formalizado*, sobre el cual se pueden realizar cálculos. Entonces resulta plausible considerar que las dimensiones *Objetos* y *Eventos* proporcionan información referente al *Modelo de la Situación* construido. *Conceptos*, *Ecuaciones con sentido físico* y *Condiciones de aplicación* se consideran indicadores para el *Modelo Físico Conceptual* y que *Ecuaciones con sentido situacional* provee información sobre el *Modelo Físico Formalizado*.

TABLA I. Dimensiones de análisis del instrumento propuesto.

<i>Variable</i>	<i>Definición operacional</i>
<i>Objetos</i>	Presencia de evidencia de los objetos, relevantes para la situación, involucrados en el enunciado del problema.
<i>Eventos</i>	Presencia de evidencia o discusión de la evolución en el estado de los objetos.
<i>Predicciones cualitativas</i>	Presencia de evidencia o discusión de una hipótesis inicial sobre el posible resultado del problema o resultados intermedios que puedan ser utilizados en la resolución.
<i>Cambios de representación</i>	Presencia de evidencia de representación de aspectos relevantes del problema en un formato distinto al presentado en el enunciado.
<i>Conceptos</i>	Presencia de conceptos físicos relevantes para la descripción de la situación.
<i>Ecuaciones con sentido físico</i>	Presencia de relaciones correctas entre las distintas leyes y principios involucrados.
<i>Condiciones de aplicación</i>	Análisis y control sobre la validez (o restricciones) de la aplicación de las distintas leyes o principios.
<i>Ecuaciones con sentido situacional</i>	Presencia de la representación de la situación planteada en términos formalmente correctos.
<i>Cálculos</i>	Realización de cálculos válidos y correctos.
<i>Análisis de resultados</i>	Presencia de elementos de discusión sobre la validez de los resultados obtenidos, contrastación con la situación predicha originalmente.

La variable *Predicciones cualitativas*, si bien aspecto distintivo del comportamiento experto y exitoso, no será tenida en cuenta en este estudio dada la limitación de los registros escritos. En general, aún los expertos, hacen esta operación “mentalmente” y cuando la verbalizan no suelen dejar registro escrito de ella. Otro tanto sucede con el *Cambio de representación*, entendido como el proceso de abstracción para pasar de un nivel a otro del que puede no quedar registro escrito. Lo que queda es el resultado del

proceso expresado en forma de conceptos, leyes o principios.

Con objeto de estudiar algunas posibles correlaciones entre los diferentes niveles de representación, se construyen índices ponderados que pretenden establecer algún orden -no intervalo- entre las representaciones generadas. En ese sentido se dice que un *Modelo de la Situación* es “más completo” que otro cuando incorpora mayor cantidad objetos y eventos de aquellos que resultan relevantes a la situación planteada. El mismo criterio se sostiene para los otros niveles de representación.

IV. ESTUDIO EMPÍRICO

Los registros analizados con el instrumento construido constituyen una muestra accidental constituida por 70 exámenes finales escritos correspondientes al primer turno de la asignatura “Fundamentos Físicos de la Informática” en Enero del 2007. En el presente trabajo se analiza uno de los problemas del examen (Ver Anexo).

Se construye una planilla a partir de dos resoluciones expertas del problema, y se determinan los elementos pertenecientes a cada una de las dimensiones propuestas en la Tabla I, a saber: objetos involucrados, eventos que se desarrollan, posibles cambios de representación, conceptos que subsumen los objetos, las interacciones entre estos conceptos (leyes o principios que explican la situación), condiciones de aplicación de estas leyes y principios y las distintas ecuaciones que representan la situación descrita en el enunciado (Ver Anexo). Una vez lograda la planilla consensuada, se considera que esa tiene los elementos para construir los modelos “más completos”. Determinados los elementos correspondientes a cada dimensión, se identifica en los protocolos escritos su presencia o ausencia, señalándola como (1) o (0) respectivamente.

La fiabilidad de estos procesos de medida empleados en los protocolos escritos fue verificada utilizando dos correctores actuando en una muestra aleatoria de 10 exámenes, alcanzando un índice de concordancia Kappa $\kappa = 0,79$ con $s(\kappa) = 0,03$. El valor de cada dimensión se obtiene mediante la suma de la medición obtenida para cada uno de los elementos pertenecientes a la misma. Como el número de elementos de cada dimensión es variable, en función de la dimensión que se trate y del correspondiente enunciado, se unifican los valores obtenidos en la suma llevándolos a una escala ordinal de tres valores (Ver Tabla II).

A partir de estas dimensiones analizadas se construyen los índices que darán cuenta de las representaciones construidas por los estudiantes durante el proceso de resolución del problema y que se constituyen en las variables de este estudio (Ver Tabla III).

TABLA II. Ejemplo de construcción de los valores de las dimensiones analizadas.

	Plantilla	Alumno i	Alumno ii	Alumno iii	Alumno iv
Número de elementos presentes en la resolución	3	3	2	1	0
Valoración		2: presencia	1: a veces	1: a veces	0: ausencia

Como se muestra en la Tabla III, la construcción de estos índices se lleva a cabo a partir de los valores de las dimensiones que teóricamente dan cuenta de algún aspecto de la representación correspondiente. Dado que cada modelo contiene distinto número de dimensiones, se suman los valores de cada una de estas dimensiones interviniendo con igual peso y el resultado de esa suma es llevado a una escala ordinal de cuatro valores.

En cuanto al desempeño de los alumnos, la variable utilizada que da cuenta de ello es la nota que los correctores del examen asignaron a la resolución del problema considerado. Estas notas fueron convertidas a una escala ordinal de cuatro valores atendiendo al criterio presentado en Tabla IV.

TABLA III. Criterios de construcción de índices.

Variable	Dimensiones (sumadas con igual peso)	Escala ordinal utilizada
MS Elementos del modelo de la situación	<ul style="list-style-type: none"> Objetos Eventos 	0 : No representa 1 : Representación insuficiente 2 : Representación parcial 3 : Si representa
MFC Elementos del modelo físico conceptual	<ul style="list-style-type: none"> Conceptos Ecuaciones con sentido físico Condiciones de aplicación 	
MFF Elementos del modelo físico formalizado	<ul style="list-style-type: none"> Ecuaciones con sentido situacional 	

TABLA IV. Criterios de construcción – Variable Nota.

Variable	Escala ordinal utilizada	Categoría frente a la cátedra
NOTA asignada a la resolución del problema	0 : [0;2] 1 : [3;4] 2 : [5;7] 3 : [8;10]	no aprobado no aprobado aprobado aprobado

V. RESULTADOS

En un primer análisis se trabajan las variables definidas a un nivel de estadística descriptiva. La Tabla 5 muestra la distribución porcentual de las mismas.

Es posible observar en la Tabla 5 que los porcentajes de construcciones completas de las distintas representaciones resulta 31,4% para el *Modelo de la Situación* (MS), el 35,7% para el *Modelo Físico Conceptual* (MFC) y del 20% para el *Modelo Físico Formalizado* (MFF). Si se considera la suma

de las representaciones parciales con las completas, los porcentajes ascienden considerablemente resultando 90% para *Modelo de la Situación*, 91,4% para *Modelo Físico Conceptual* y 70 % para el *Modelo Físico Formalizado*. Debe tenerse en cuenta sin embargo, que las representaciones parcialmente completas pueden no ser comparables entre sí, ya que los elementos presentes o ausentes pueden no tener la misma relevancia para dar cuenta de la situación. No se encuentran resoluciones que no evidencien algún nivel de construcción del MS y del MFC aunque más no sea en un nivel insuficiente.

Un segundo análisis a realizar a nivel de estadística descriptiva consiste en separar la muestra de acuerdo a la variable *Nota* según aprobados y no aprobados. Como se expresó, el equipo corrector es externo a esta investigación, por lo cual los criterios de asignación de puntajes a las resoluciones podrían no coincidir con la valoración de un proceso de modelado. Los resultados se presentan en la Tabla 6.

En cuanto a las resoluciones aprobadas resulta, de las dos primeras filas de la Tabla 6, que no hay estudiantes que aprueben el examen sin hacer representaciones o haciéndola insuficiente. Hay un 3,6% que tiene algún indicio de MFF insuficiente, posiblemente correspondiente a alumnos que escogen del libro alguna ecuación relacionada. En cambio, en la tabla de no aprobados, en la segunda fila se cuentan los alumnos que hacen representaciones insuficientes con proporciones 16,7%, 14,3% y 38,1%. Interesa observar esta última cifra que probablemente corresponde a alumnos que escriben “fórmulas” incompletas sin haber realizado representaciones previas.

Observando las últimas filas de cada grupo, alumnos que hacen representaciones completas, se observa importante diferencia entre aprobados y no aprobados. Especialmente apreciables en las construcciones *Modelo Físico Conceptual* y *Modelo Físico Formalizado*, 78,6% y 7,1% para el primero y 50% y 0 para el *Modelo Físico Formalizado*. Hay un 25 % (78,6 -53,6) de alumnos que han aprobado y construyen la representación conceptual sin pasar por una situacional. Esta diferencia puede deberse a que el texto enunciado del problema dirige directamente a la conceptualización y ese grupo de alumnos considera no necesaria la representación de objetos y eventos.

TABLA V. Distribución porcentual de las variables.

	Variable		
	Distribución en porcentajes		
	MS	MFC	MFF
No representa	0	0	5,7
Representación insuficiente	10,0	8,6	24,3
Representación parcial	58,6	55,7	50,0
Si representa	31,4	35,7	20,0

TABLA VI. Distribución porcentual de las variables por nota.

		MS	MFC	MFF
Aprobados	No representa	0	0	0
	Rep. insuficiente	0	0	3,6
	Rep. parcial	46,4	21,4	46,4
	Si representa	53,6	78,6	50
No aprobados	No representa	0	0	9,5
	Rep. insuficiente	16,7	14,3	38,1
	Rep. parcial	66,6	78,6	52,4
	Si representa	16,7	7,1	0

VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para facilitar el análisis de resultados se estudia la existencia o no de correlación entre las variables definidas para este artículo. En el presente trabajo el coeficiente de correlación elegido es el Tau-b, mediante la utilización del paquete estadístico SPSS, que no solo calcula el valor de la correlación sino que también realiza la prueba de significación (a un nivel de 0,01).

Los valores de las correlaciones obtenidas son presentados en la Tabla VII, en donde las correlaciones significativas son marcadas específicamente. De esta tabla, interesa señalar algunas correlaciones: MS – MFC, MFC – MFF, MFF – Nota, MFC – Nota (Ver Tabla VII).

TABLA VII. Matriz de correlación – Tau-b de Kendall. CC: coef. de correlación; sig: error; N = 70; (**) correlación significativa a 0,01 (2 colas).

		MS	MFC	MFF	Nota
MS	CC	1,000	,391(**)	,362(**)	,317(**)
	sig	.	,001	,001	,003
MFC	CC	,391(**)	1,000	,663(**)	,693(**)
	sig	,001	.	,000	,000
MFF	CC	,362(**)	,663(**)	1,000	,597(**)
	sig	,001	,000	.	,000
Nota	CC	,317(**)	,693(**)	,597(**)	1,000
	sig	,003	,000	,000	.

Una de las posibles alternativas para la obtención de mayor detalle en relación a la fortaleza de las correlaciones es el análisis de las tablas de contingencia. En ellas es posible analizar de qué manera se encuentran distribuidos los distintos casos en relación a las dos variables consideradas, por medio de sus frecuencias conjuntas.

En la Tabla VIII se muestra la relación entre MS y MFC. La primera fila indica que no hay ningún caso en que se construya MFC sin haber construido algún nivel de representación del MS. Sin embargo, hay sujetos que construyen un MFC sin haber construido un MS completo.

Este hecho fue ya interpretado en el análisis de la Tabla V. Por otro lado, hay 7 sujetos que a pesar de construir un MS completo no pueden construir un MFC completo lo que daría indicios de alumnos que pueden interpretar la situación en término de objetos del mundo pero no tienen a disposición conocimiento específico para hacerlo en términos físicos.

En la Tabla IX se muestra MFC vs MFF. Los elementos por encima de la diagonal mayor nos indican que solamente un individuo pudo construir un MFF completo a partir de un MFC parcialmente completo. No hay ningún caso en que se construya MFF en algún nivel, sin construir en algún nivel el MFC. Por su parte, los elementos por debajo de la diagonal mayor muestran que hay sujetos que a pesar de construir MFC completos no llegan a construir un adecuado MFF. Ninguno de los que construyeron un MFC completo construye MFF insuficientes. Se interpreta que la construcción de un MFC más completo facilita -no garantiza- la construcción del MFF adecuado.

TABLA VIII. Tabla de contingencia – Modelo de la Situación vs Modelo Físico Conceptual.

		MFC				Total
		NR	RI	RP	SR	
MS	NR	0	0	0	0	0
	RI	0	0	6	1	7
	RP	0	6	26	9	41
	SR	0	0	7	15	22
Total		0	6	39	25	70

TABLA IX. Tabla de contingencia – Modelo Físico Conceptual vs Modelo Físico Formalizado

		MFF				Total
		NR	RI	RP	SR	
MFC	NR	0	0	0	0	0
	RI	2	4	1	0	6
	RP	2	13	23	1	39
	SR	0	0	12	13	25
Total		4	17	35	14	70

En cuanto a las variables MFF y Nota, puede observarse en la Tabla X que todos aquellos que tienen MFF completo, aprueban. También se lee que hay 22 sujetos (15 + 7) que generan una representación parcial del MFF y no aprueban, mientras que otros 13 si aprueban. Debe notarse que la categoría representación parcial es una suma simple de número de elementos presentes sin valorar su relevancia en relación a la situación física.

TABLA X. Tabla de contingencia – Modelo Físico Formalizado vs Nota.

		Nota				Total
		0	1	2	3	
MFF	NR	3	1	0	0	4
	RI	13	3	1	0	17
	RP	15	7	8	5	35
	ST	0	0	2	12	14
Total		31	11	11	17	70

En la Tabla XI, los elementos por encima de la diagonal mayor indican que solo un sujeto que obtuvo alta calificación tiene un MFC parcialmente completo. Por su parte, los elementos por debajo de la diagonal mayor indican que existen casos en que a pesar de construir MFC parciales o completos han obtenido baja calificación.

En principio los resultados presentados en las Tablas X y XI estarían indicando que los correctores aprueban exámenes a condición de MFF completo. Por otro lado, muestran la limitación de la categoría “representación parcial” ya que estaría agrupando dentro de ella representaciones de calidad diferente. Desde el punto de vista físico queda claro que no todas las “fallas” conceptuales tengan el mismo peso para explicar un evento.

TABLA XI. Tabla de contingencia – Modelo Físico Conceptual vs Nota.

		Nota				Total
		0	1	2	3	
MFC	NR	0	0	0	0	0
	RI	2	4	1	0	6
	RP	2	13	23	1	39
	ST	0	0	12	13	25
Total		4	17	35	14	70

VII. CONCLUSIONES

Los resultados confirman los enunciados teóricos en relación a que las representaciones que más posibilidad tienen de evolucionar a una representación de mayor nivel de abstracción son aquellas que contienen de una manera integrada la mayor cantidad de elementos relevantes. Para esta afirmación se tiene en cuenta los resultados que muestran que todas representaciones “completas”, categorizadas con “Si representa”, evolucionan hacia una representación parcial o completa del nivel inmediatamente superior (ver Tablas VIII y IX). No es posible extender categóricamente esta afirmación, cuando se parte desde una “Representación parcial” ya que por construcción se ha hecho un conteo simple de los elementos presentes sin atender su relevancia en la situación. En todo caso, estos resultados muestran un aspecto a mejorar en el criterio de asignación de categorías. Probablemente, en la plantilla de corrección sea necesario destacar elementos más o menos relevantes para cada una de las representaciones. Aún aceptando las limitaciones del indicador, resulta que el 91% de las representaciones *Modelo de la Situación* (total o parcial) evolucionan a *Modelo Físico Conceptual* (total o parcial). Asimismo, el 70% de las representaciones *Modelo Físico Conceptual* (total o parcial) evolucionan hacia *Modelo Físico Formalizado* (total o parcial). Del mismo modo, los sujetos cuya representación *Modelo Físico Conceptual* es nula o insuficiente no logran construir ni siquiera un *Modelo Físico Formalizado* incompleto.

Para el caso en que se separa la muestra de acuerdo a la variable *Nota* según aprobados y no aprobados, es posible observar que los comportamientos de uno y otro grupo son

considerablemente diferentes, fundamentalmente en la posibilidad de formalización que se requiere para la construcción del *Modelo Físico Formalizado*. En relación al *Modelo de la Situación* no hay alumnos aprobados que no han construido, por lo menos, una representación parcial.

En definitiva se puede considerar la validez de las hipótesis establecidas, teniendo en cuenta que la experiencia ha sido realizada en situación de aula real con las limitaciones señaladas (exámenes reales propuestos por el equipo responsable de la asignatura, corrección de exámenes por correctores que viene utilizando metodologías tradicionales, asistencia a clases no obligatoria). Otro factor influyente en estudios de este caso es el historial de los alumnos y actitudes orientadas más a “pasar” que a aprender. Todo ello constituye el contexto de esta experiencia y modula, sin dudas, los resultados obtenidos.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo es resultado de un proyecto parcialmente financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas CONICET (PIP 5778), la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (FONCyT, código 04-05430) y por la Secretaria de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

REFERENCIAS

- [1] Truyol, M. E., *Resolución de Problemas en Física Básica: algunos factores explicativos de desempeño*. Trabajo Especial de Licenciatura en Física. Facultad de Matemática, Astronomía y Física. Universidad Nacional de Córdoba. T.E.F TRUr – Inventario n° 18198 – Biblioteca FaMAF, 2006.
- [2] Gangoso, Z., Truyol, M. E., *Resolución de problemas, representaciones y registros escritos: un caso en Física Básica*. En preparación, 2008.
- [3] Mayer, R., *Pensamiento, Resolución de Problemas y Cognición*. (Trad. Graciela Baravalle. Serie Cognición y Desarrollo Humano, 1983).
- [4] Gangoso, Z., *Resolución de Problemas en Física y aprendizaje significativo*. Tesis doctoral, FaMAF, Universidad Nacional de Córdoba, 1997.
- [5] Tuminaro, J., Redish, E., *Elements of a cognitive model of physics problem solving: Epistemic games*, Physical Review Special Topics - Physics Education Research **3**, (2007).
URL: <http://link.aps.org/abstract/PRSTPER/v3/e020101/>
- [6] Gerace, W., Dufresne, R., Leonard, B., *A framework for the storage of knowledge an its implication for problem solving*, University of Massachussets Physics Education Research Group. Technical Report PERG-1997, pp. 1-19, 1997.
- [7] Gangoso, Z., *Modelado del proceso de resolución de Problemas en Física y consecuencias instruccionales*,

Informe Técnico de Avance. Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica ANPCyT, 2005.

[8] Chi, M., Feltovich, P. J., Glaser, R., *Categorization and representation of physics problems by novices and experts*, Cognitive Science **5**, 121-152 (1981).

[9] Nathan, M., Kintsch, W., Young, E., *A theory of Algebra-Word-Problem comprehension and its implication for the design or learning environments*, Cognition and Instruction **9**, 329-389 (1992).

[10] Kintsch, W. and Greeno, J. G., *Understanding and solving word arithmetic problems*, Psychological Review **92**, 109-129 (1985).

[11] Kintsch, W., *The use of discourse processing: A construction integration model*, Psychological Review **95**, 163-182 (1988).

[12] Kintsch, W., *Comprehension: a paradigm for cognition*, (Cambridge University press, UK, 1998).

[13] Van Dijk, T.; Kintsch, W., *Strategies of discourse comprehension*. En "A theory of Algebra-Word-Problem comprehension and its implication for the design or learning environments". Nathan, M.; Kintsch, W.; Young, E., 1992.

[14] Buteler, L., Gangoso, Z., *La representación externa en la resolución de un problema de Física: una cuestión de fondo o una cuestión de forma?* Revista Cognitiva **15**, 51-66 (2003).

[15] Dufresne, R. Leonard W., Gerace W. J., *A qualitative model for the storage of domain-specific knowledge and its implications for problem-solving*, 2001. Consulta online diciembre 2007.

URL: <http://umperg.physics.umass.edu/topics/model/>

[16] Chi, M., *Conceptual change within and across ontological categories: examples from learning and discovery in science*. En Giere, R., *Cognitive models of science: Minnesota studies in the philosophy of Science*. (University of Minnesota Press, USA, 1992)

ANEXOS

A. Problema analizado

Un condensador de capacidad $C_1=10\mu\text{F}$ esta cargado, siendo $5 \times 10^3\text{V}$ la diferencia de potencial entre placas. Se conecta cada una de sus placas a la de otro condensador descargado de capacidad $C_2=5\mu\text{F}$. Calcular:

- La carga total del sistema.
- La carga de cada condensador.
- La diferencia de potencial entre las placas de cada condensador.
- La energía inicial y final del sistema.

B. Planilla de corrección: Elementos pertenecientes a cada una de las dimensiones

• *Objetos*: presencia de evidencia de objetos involucrados en el enunciado del problema.

- Condensadores
- Cargas
- Extras

• *Eventos*: presencia de evidencia o discusión de la evolución en el estado de los objetos.

- Conexión entre placas
- Redistribución de la carga / Carga del segundo condensador
- Variación de la diferencia de potencial

• *Conceptos*: presencia de conceptos físicos relevantes para la descripción de la situación.

- Diferencia de potencial
- Capacidad
- Capacitancia del sistema
- Energía electrostática de un capacitor
- Extras

• *Ecuaciones con sentido físico*: presencia de relaciones correctas entre las distintas leyes y principios involucrados.

$$\circ C = \frac{Q}{V}$$

○ Condensador en paralelo $C = C_1 + C_2$ ○
condensadores en serie $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$

$$\circ E = \frac{1}{2}QV \quad \circ E = \frac{1}{2}CV^2$$

• *Ecuaciones con sentido situacional*: presencia de la representación de la situación planteada en términos formalmente correctos.

$$\circ \text{Carga inicial del sistema } Q_{\text{inicial}} = Q_{1\text{inicial}}$$

$$\circ \text{Conservación de carga } Q_{\text{inicial}} = Q_{\text{final}}$$

$$\circ \text{Redistribución de cargas } Q_{\text{final}} = Q_{1\text{final}} + Q_{2\text{final}}$$

$$\circ V_{\text{inicial}} \neq V_{\text{final}}$$

$$\circ V_{\text{final}} = V_{1\text{final}} = V_{2\text{final}}$$

○ Sistema de condensadores conectados en paralelo

$$C_T = C_1 + C_2$$

$$\circ E_{\text{inicial}} \neq E_{\text{final}}$$

○ Energía del sistema $E_T = E_1 + E_2$ (tanto en el estado inicial como final)

Explicación con experimentos sencillos y al alcance de todos de la primera ley de Newton (la ley de la inercia), así como la diferencia entre inercia e inercialidad



J.Vila¹, C.J. Sierra²

¹Departamento de Física Aplicada 1, Universidad del País Vasco, España.

²Escuela Secundaria "Los Peñascales", Madrid, España.

E-mail: jesusvila@hotmail.com

(Recibido el 19 de Junio de 2008; aceptado el 6 de Agosto de 2008)

Resumen

En este trabajo se proponen la realización de diferentes experimentos demostrativos, mediante los cuales logramos la base para explicar la esencia de la primera ley de Newton, la diferencia entre inercia e inercialidad, para terminar con la introducción del concepto masa. Estos experimentos son sencillos y que cualquiera puede acceder a ellos, es decir, experimentos de bajo costo económico pero con enorme valor desde un punto de vista pedagógico.

Palabras clave: Ley de la Inercia, diferencia entre inercia e inercialidad, experimentos de alto valor pedagógico.

Abstract

In this particular work the realisation of different demonstratives researches are propose, through them we can stand the base for the explanation of the essence of the first law of Newton, the difference between inertia and inertness, to finish with the introduction of mass concept. This experiments are very simple and any one may have access to the, in other words, this experiments are real cheap economical speaking, but of a very great value from pedagogical point of view.

Keywords: Law of inertia, difference between inertia and inertness, experiments of a very great value from pedagogical point of view.

PACS: 01.30.L-, 01.40.Fk, 01.40.gb, 01.40.gf, 01.50.My

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de la Dinámica de la partícula se basa se basa en los tres principios fundamentales enunciados por Newton: 1º Principio de la inercia. 2º principio de acción de fuerzas. 3º Principio de la acción y de la reacción.[1, 2]. Los principios filosóficos-físicos contenidos en ellas han sido siempre objeto de análisis y discusión por los físicos más eminentes ya que en rigor no son principios que puedan comprobarse directamente por medio de experiencias realizadas en el laboratorio, sino solamente a través de las consecuencias que de ellos se derivan [2].

La esencia de la Ley de la inercia se puede encontrar en prácticamente todos los textos de Física [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Sin embargo, la diferencia entre inercia e inercialidad no se encuentra en muchos textos [9, 10], lo que crea ciertos problemas de comprensión a los estudiantes, sobretodo cuando se introduce la definición de masa.

La 1ª Ley de Newton acerca del movimiento mecánico o la denominada Ley de Inercia expresa [9]: "El estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme de un cuerpo se

mantiene mientras sobre él no actúan otros cuerpos o la influencia de éstos se compensan".

En esta definición se consideran dos situaciones. En primer lugar el caso en que el cuerpo no interactúe con otro y, en segundo lugar, cuando al interactuar, las acciones que se ejercen sobre el mismo se compensan. El análisis de ambas situaciones tiene un gran valor para comprender que el estado natural de los cuerpos es el movimiento y que éste es una propiedad intrínseca de los mismos. Para que un cuerpo se mueva con velocidad constante no se necesita ninguna fuerza motriz interna, por consiguiente el estado natural de los cuerpos es el movimiento, es decir, la causa de la variación del estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme de un cuerpo no puede encontrarse en el propio cuerpo sino en un agente externo. La experiencia que los alumnos tienen de su vida cotidiana entra en aparente contradicción con la esencia de la primera ley. El hecho de que los cuerpos conservan el estado de reposo si sobre ellos no actúan otros cuerpos o si sus acciones se encuentran compensadas entre sí, no crea duda en los alumnos. Lo más difícil para ellos es entender que los cuerpos conservan su velocidad constante en estas condiciones.

Desde el punto de vista metodológico, la dificultad existente en el estudio de la Ley de la Inercia está relacionada con la imposibilidad de crear las condiciones ideales en las cuales esta ley se cumple “exactamente”. Es necesario que los alumnos comprendan que ni un sólo experimento puede confirmar la ley de inercia con una exactitud absoluta. Los experimentos sólo confirman que mientras menor sea la interacción, tanto menos cambiará la velocidad del cuerpo. Si continuamos este tipo de razonamiento (sobre la base de la abstracción o idealización) pudiéramos concluir que si sobre el cuerpo no actúan otros cuerpos, él conservará su estado de movimiento.

Por inercia se entiende el fenómeno de la conservación de la velocidad del movimiento de un cuerpo cuando las acciones exteriores se compensan mutuamente. Todos los cuerpos poseen inercia en igual grado [10]. No se puede decir que un cuerpo posea la propiedad de la inercia en un grado mayor que otro. Por inercialidad se entiende la capacidad que tienen diferentes cuerpos de adquirir diferentes aceleraciones bajo una misma acción exterior o acciones exteriores iguales. Para diferentes cuerpos esta propiedad se manifiesta en diferente grado.

II. EXPERIMENTOS RELACIONADOS CON LA LEY DE LA INERCIA

Inicialmente se pueden proponer dos experimentos propuestos por Galileo [4, 9]:

A. Experimento 1: Péndulo de Galileo

Mantener un péndulo frente a la pizarra del aula de Física de modo que podamos incluirlo en escena oportunamente y retirarlo cuando no esté en uso, colgándolo en una hembrilla. El péndulo oscilando posee poderes incluso hipnóticos y permite referir paralelamente a las oscilaciones, relatos con la atención asegurada. Si trazamos una línea horizontal a lo largo de toda la pizarra y dejamos caer desde un extremo la esfera pendular, el grupo seguirá la pista de la esfera y advertirá su llegada a la misma altura en el lado simétrico. Si interrumpimos la oscilación con el dedo interpuesto ante el hilo a diferentes alturas, los estudiantes seguirán ahora la oscilación y advertirán en cada caso la llegada a la misma altura inicial, independientemente de la trayectoria de la esfera y llegando entonces a la conclusión de que “el camino por el que cae el cuerpo no varía la velocidad, la velocidad depende sólo de la altura desde donde el cuerpo ha caído”.



FIGURA 1. Péndulo de Galileo. Se muestra que la esfera siempre llega a la misma altura en el lado simétrico, independientemente de dónde coloquemos el obstáculo.

B. Experimento 2: Plano inclinado de Galileo

Se deja caer un cuerpo desde una altura h , adquiriendo una velocidad que al pasar por el plano horizontal, le permite llegar a la misma altura en el otro lado del plano inclinado. Al disminuir α , sigue subiendo hasta igual altura, pero recorre un mayor espacio en un mayor tiempo. Si el plano se pone totalmente horizontal y el rozamiento es casi nulo, el cuerpo se movería indefinidamente con la velocidad que lleva en el plano inclinado. Es decir: “cualquier cuerpo puesto en movimiento sobre un plano horizontal sin rozamiento, continúa moviéndose indefinidamente con velocidad constante (Ley de Inercia).

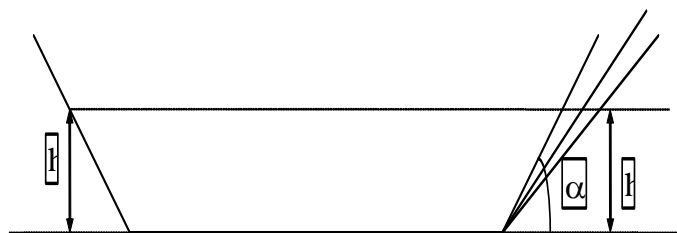


FIGURA 2. Plano inclinado de Galileo. Cuando α vale cero, entonces el cuerpo adquiere velocidad constante indefinidamente.

A continuación podemos pasar a un relato: un estudiante en una pista semicilíndrica para patinetas, practica su deporte favorito...oscila una y otra vez.... Si de pronto una de las partes semicilíndricas de la pista la vamos aplanando...hasta hacerla horizontal... despreciamos todo rozamiento (cuerpo -aire, ruedas – suelo). Puede encontrarse una conclusión casi mágica relacionada con los estados inerciales.

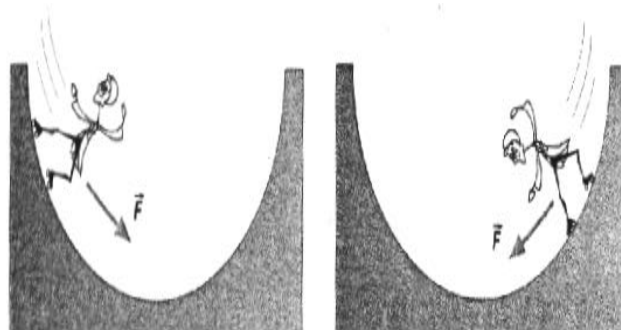


FIGURA 3. Estudiante patinando en una pista semicilíndrica.

C. Experimento 3: Inercia I [11, 12]

Se deja caer un carrito y se va quitando arena. Al principio el carrito se detiene, posteriormente pasa por encima de la arena pero con dificultad y, cuando quitamos toda la arena, se mueve con la velocidad que llega al plano horizontal.

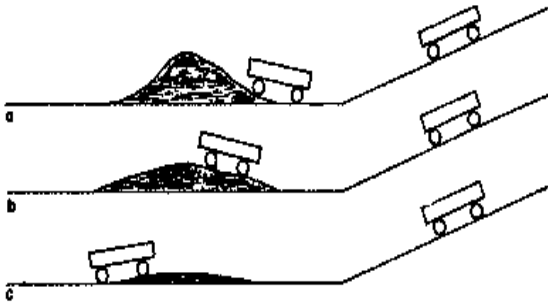


FIGURA 4. Carrito bajando por un plano inclinado y encontrándose cada vez menos rozamiento en su camino por el plano horizontal.

D. Experimento 4: Inercia II [11, 12]

Colocar el taco de madera sobre el carrito y variar bruscamente su estado mecánico. En el primer caso realizar la variación brusca con el carrito en reposo y luego, con el carrito en movimiento. En el segundo caso, hacer la variación mientras el carrito se mueve por una superficie horizontal con el taco de madera encima y hacerlo chocar con el taco de metal. Puede apreciarse en todos los casos que el taco de madera manifiesta la tendencia a mantener su estado inercial, ya sea de reposo o de velocidad constante. Es importante insistir en las situaciones del carrito en movimiento.

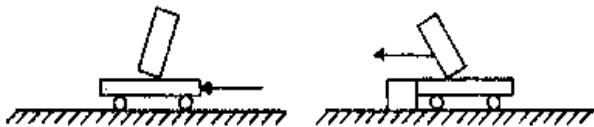


FIGURA 5. Taco de madera sobre el carrito y variaciones en la velocidad del carrito, observándose la tendencia a mantener el estado inercial del taco.

E. Experimento 5: Inercia III [10, 12]

Colocar un carrito pequeño (o una esfera cualquiera) sobre otro un poco mayor. Si se le imprime un impulso al carro mayor, éste se desplazará mientras el carro más pequeño conservará su posición con respecto al suelo, o sea, su estado de reposo.

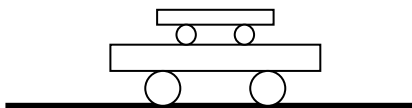


FIGURA 6. Experimentos realizados con un carrito sobre otro mayor.

Si hacemos primero que ambos se muevan con movimiento rectilíneo uniforme y después detenemos el carro mayor,

mantiene su estado de movimiento con respecto a la mesa, o sea, sin experimentar aceleración hasta que sea afectado por la acción de otros cuerpos (un objeto que lo detenga o el rozamiento).

Normalmente surge la interrogante de si en todos los sistemas de referencia es válida la primera ley de Newton. Con este sencillo experimento podemos indicar al alumno que esta ley no se cumple respecto a cualquier sistema de referencia, solo con observar qué sucede cuando de carrito mayor frena o acelera, llegando a la conclusión de que en los sistemas de referencia que se mueven con aceleración la primera ley de Newton no se cumple.

III. INERCIA E INERCIALIDAD

Es importante que el profesor establezca la diferencia entre inercia como fenómeno físico y la inercialidad como propiedad de los cuerpos. La inercia, en igual medida, está presente en todos los cuerpos, tanto en una molécula, como en una gigantesca piedra, se cumple con igual exactitud la ley de la inercia, es decir, se conserva constante la velocidad, si las acciones de otros cuerpos sobre ellas se compensa. Con respecto a la inercialidad de los cuerpos se habla en otro sentido: si durante la interacción dos cuerpos adquieren diferentes aceleraciones, esto significa que para un mismo intervalo de tiempo que dura la interacción, los cuerpos varían de forma diferente sus velocidades. Por consiguiente, los cuerpos pueden diferenciarse por su inercialidad y hablaremos de la inercialidad como una propiedad intrínseca de los cuerpos.

La esencia de esta propiedad consiste en el hecho de que no existe un cuerpo que pueda variar de manera instantánea su velocidad; para esto se requiere siempre un tiempo determinado. Se pueden proponer los experimentos siguientes:

A. Experimento 6: Inercialidad 1

Colgar una carga pesada de un hilo que puede resistir un peso un poco mayor que el de la carga. Atar otro hilo igual debajo de la carga [13].

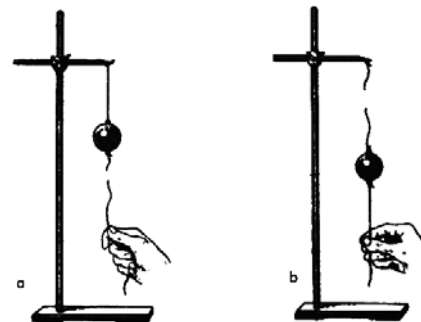


FIGURA 7. En la figura a se demuestra que si se tira bruscamente del hilo se rompe el hilo inferior. En la figura b se demuestra que si se tira suavemente se rompe el hilo superior.

Si tiramos con brusquedad del hilo inferior, se romperá éste; pero si tiramos suavemente el mismo, aumentando paulatinamente el esfuerzo, se romperá el hilo superior de la carga. Para que se rompa el hilo superior, debe sufrir una distensión complementaria, es decir, la carga debe ponerse en movimiento. Si realizamos un tirón brusco, la mano actúa sobre la carga durante un tiempo muy breve y no tiene tiempo de ponerse en movimiento la carga, por eso se rompe el hilo inferior.

B. Experimento 7: Inercialidad 2

Poner una tira de madera sobre una mesa de manera que sobresalga 1/5 de su longitud. Cubrir con un papel u hoja de periódico de manera que no queden bolsas de aire [14, 15].

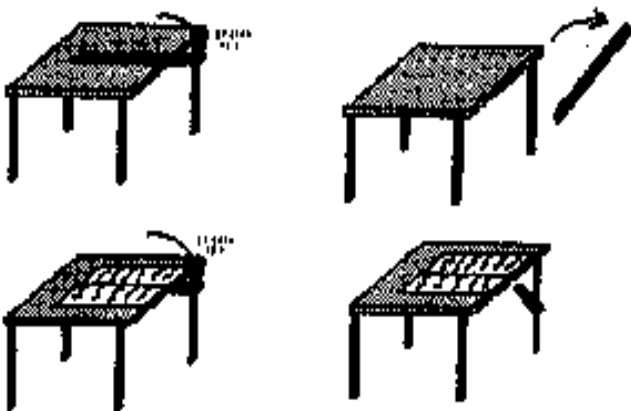


FIGURA 8. En las figuras de arriba se muestra que cuando no hay periódico y se golpea, la tira de madera se cae al suelo. En la figura de abajo a la izquierda se muestra que cuando se golpea suavemente, se levanta el periódico y la tira de madera. En la figura de abajo a la derecha se muestra que cuando se golpea brusquemente se rompe la tira de madera y el periódico prácticamente no se entera.

Cuando se golpea el extremo de la regla que sobresale despacio, tiene tiempo de entrar aire desde fuera y se levanta el periódico y el periódico; mientras que si pegamos un golpe brusco en el extremo de la tira que sobresale, el aire no tiene tiempo de entrar debajo del periódico y se rompe la tira de madera sin apenas moverse el periódico.

C. Experimento 8: Inercialidad 3

Poner una botella sobre la mesa y colocar un cartón encima de la boca de modo que sustente una esfera que pueda entrar por la boca de la botella [14].

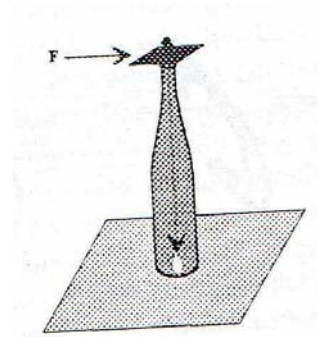


FIGURA 9. Esferita atrapada en una botella. Al retirar brusquemente el cartón la esfera se introduce dentro de la botella.

Si retiramos brusquemente el cartón golpeándolo, la esfera no tiene tiempo de recibir del cartón expulsado una velocidad apreciable; mientras tanto, el cartón, que recibe un golpe directamente, tiene tiempo de deslizarse. La esfera, al quedarse sin apoyo, cae verticalmente dentro de la botella por la atracción gravitatoria.

D. Experimento 9: Inercialidad 4

Colocar una botella verticalmente sobre la mesa [14]. Encima de la boca de la botella colocar un papel o una cartulina y sobre éste, otra botella invertida (boca con boca).

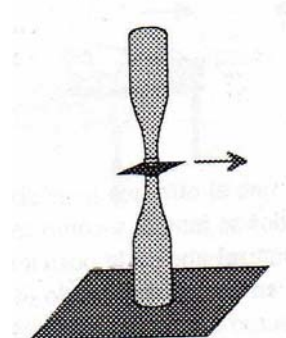


FIGURA 10. Botellas equilibradas. Al retirar brusquemente la cartulina queda una botella sobre la otra.

Si retiramos rápidamente el papel, no se desplazará el centro de gravedad de la botella de arriba y su prolongación no se saldrá de la superficie de apoyo, que es la boca de la botella de abajo, y el sistema seguirá en equilibrio aunque inestable. Se requiere una cierta habilidad para conseguir realizar el experimento con rapidez y seguridad.

E. Experimento 10: Inercialidad 5

Dejar descansar una tira de madera sobre dos anillas de papel convenientemente separadas, que cuelguen de cuchillas [10, 14].

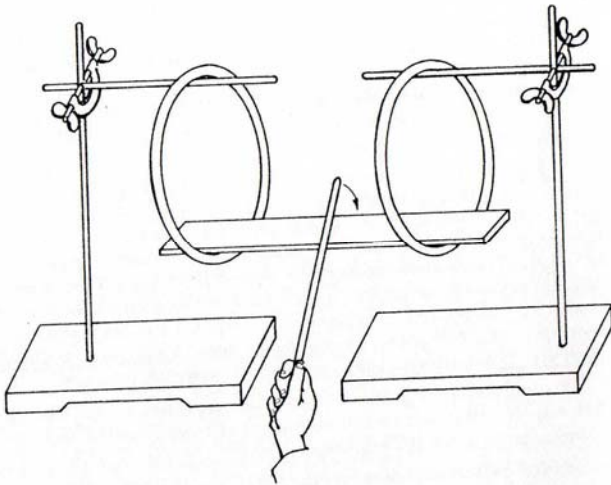


FIGURA 11. ¿Anillas de papel más fuertes que la madera?

Si golpeamos bruscamente la tira de madera por el centro, el golpe es tan rápido y la acción tan poco duradera que ni las anillas de papel ni los extremos de la tira tienen tiempo de experimentar desplazamiento alguno. Se mueve únicamente la parte de la tira de madera que está justo debajo de donde se produce el golpe.

IV. CONCEPTO MASA

Conviene entonces definir el concepto masa, como la magnitud que expresa esa propiedad que definimos como inercialidad. Por último, es conveniente indicar al alumno varios rasgos del concepto de masa que los alumnos deben conocer y asimilar:

- La masa es la medida de la inercialidad de los cuerpos; y, la inercialidad se manifiesta en que para variar la velocidad de un cuerpo en un determinado valor, es necesario que interactúe con otro cuerpo durante un cierto intervalo de tiempo
- Medida de la cantidad de materia que contiene.
- Es una magnitud escalar.
- Posee la propiedad aditiva.
- Es una invariante respecto a sistemas de referencia inerciales.
- En el S.I. se mide en kg.
- Existen dos métodos para medirla; por medio de la interacción entre cuerpos y por medio de la balanza.

Estos rasgos deben ser descubiertos por los estudiantes paulatinamente, a lo largo del desarrollo de los experimentos, discusiones y problemas.

V. CONCLUSIONES

El método seguido en este trabajo es una buena oportunidad metodológica para diferenciar conceptos generales.

En este trabajo se indican y efectúan varios experimentos que se pueden realizar fácilmente, y mostramos como se investigan y se descubren la primera ley de Newton y la diferencia entre inercia e inercialidad.

Con los experimentos planteados podemos acercarnos a las ideas de forma aproximada; pero, a la vez, se consigue inducir determinadas ideas teóricas de una manera sencilla y clara. Además, realizar estos experimentos proporciona al estudiante toda clase de satisfacciones y conocimientos profundos y duraderos.

REFERENCIAS

- [1] Burbano, S., Burbano, E., Gracia, C., *Física General* (Mira Editores, Zaragoza, 1993).
- [2] Alonso, M., *Física. Curso Elemental* (Cultural Centroamericana S. A., Guatemala, 1967).
- [3] Lagemann, R. T., *Ciencia Física: Orígenes y Principios* (Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana, México, 1968).
- [4] Sepúlveda A., *Historia de la Física* (Fondo Editorial Cooperativo, Medellín, 1996).
- [5] Young, H. D., *Fundamentos de Mecánica y Calor* (Ediciones del Castillo S.A., Madrid, 1966).
- [6] Frish, S., Timoreva, A., *Curso de Física General. Tomo I* (Editorial Mir, Rusia, 1977).
- [7] Agudo, T. Cuesta, M., Davalillo, A. Vila, J., *Física aplicada a la navegación: Mecánica y Fluidos* (Servicio de Publicaciones E.T.S. de Ingenieros Industriales y de Ingenieros de Telecomunicación, Bilbao, 1995).
- [8] Vila, J., Cuesta, M., Agudo, T., Davalillo, A., Kolb, A., *Física: Teoría, Problemas, Cuestiones, Prácticas* (Edicumbre, Quito, 1998)
- [9] Ducongé, J., García, L., Sierra, C. J., García-Barbón, J. H., *Metodología de la enseñanza de la Física en el Preuniversitario* (Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1990).
- [10] Sierra, C. J., Fiallo, J., García, J., *Enseñanza de la Mecánica en la FOC* (Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1979).
- [11] Sierra, C. J., Fiallo, J., de la Torre, E., *Física SOC. Actividades prácticas* (Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1985).
- [12] Vila, J., Sierra, C. J., Cuesta, M., Agudo, T., *Prácticas de laboratorio. Física I. 4º Cours.* (Edicumbre, Quito, 1997)
- [13] Piorishkin, A. V., Krauklis, V. V., *Física I* (Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba, 1978).
- [14] Cuesta, M. J., Vila, J. Sierra, C. J., Agudo, T., *Experimentos impactantes. Mecánica y Fluidos* (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Santander, 1996).
- [15] Perelmán, Ya. I., *Problemas y experimentos recreativos* (Editorial Mir, Moscú, 1983).

Los Experimentos Discrepantes en el aprendizaje activo de la Física



Luis H. Barbosa^{1,2}

¹Dpto de Ciencias Naturales, Universidad Central, Cra 5 No. 21-38, Bogotá, Colombia.

²Web page: <http://lhbfsica.googlepages.com>

E-mail: lhbfsica@yahoo.es, lhbfsica@gmail.com

(Recibido el 24 de abril de 2008; aceptado el 20 de junio de 2008)

Resumen

Los Experimentos Discrepantes (ExD) son montajes que al accionarlos generan una fenomenología contraintuitiva que puede ser utilizada favorablemente para un aprendizaje activo de la física. El propósito de este trabajo es ilustrar algunas reflexiones sobre los escenarios que pueden implementar estos montajes, así como sus fortalezas y debilidades. He notado que los ExD permiten un escenario fértil donde el estudiante puede jugar a observar, a desarrollar su creatividad y a mejorar su intuición física. Lo entrena en actividades propias de la investigación en ciencias como conjeturar, argumentar, abstraer, modelar y socializar conocimiento en forma verbal y escrita. Se detallan algunas situaciones y prototipos utilizados como estrategia de aprendizaje de la física, a nivel de Licenciatura y de Ingeniería.

Palabras clave: Física educativa, experimentos discrepantes, demostraciones experimentales, física recreativa.

Abstract

The Discrepant Experiments (ExD) they are assemblies that generate a phenomenology contrary to the common sense that can be used favorably for an active learning of the physics. The purpose of this work is to illustrate some reflections on the scenarios that can implement these assemblies, also its strengths and weaknesses. I have noticed that the ExD allows a fertile scenario where the student can play to observe, to develop of her creativity and to make better of her physical intuition. It trains him in activities characteristic of the investigation in sciences like to conjecture, to argue, to abstract, to model and to socialize knowledge in verbal and written form. I detail some situations and prototypes used as strategy of learning of the physics, at level of Licentiate and of Engineering

Keywords: Discrepant events, discrepant experiments, science inquiry, experimental demonstration.

PACS: 01.40.-d, 01.40.Fk, 01.50.My, 01.50.Pa, 01.50.Wg, 01.50-i, 01.40.gb

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Cuando un maestro de Física se plantea el reto de originar un espacio agradable para el aprendizaje de las ciencias en alguna institución de educación media o superior en nuestro país, se enfrenta a una problemática con distintos matices: Primero, su formación ha sido dentro de un contexto de enseñanza tradicional, por tanto, lo primero que plantea el maestro, es un escenario pasivo, con tablero, marcador, incluso sin muchas palabras ni ideas, y mas bien, con muchos desarrollos y demostraciones matemáticas. Segundo, los intereses del estudiante, y su madurez conceptual, están lejos de soportar un escenario con una simbología exótica y sin sentido para comprender esa maraña. Es decir, según Cartaña y Comas la enseñanza de las ciencias es descontextualizada [1]. En muchas aulas el predominio del modelo tradicional y su dificultad para promover el aprendizaje significativo tiene su fundamento en ciertas suposiciones inadecuadas del maestro al solo precisar las deficiencias de los estudiantes que enfrentan el aprendizaje de las ciencias [2].

Adicional a lo anterior, algunas de las situaciones que en ocasiones se le plantean al estudiante chocan con sus presaberes. Por ejemplo, resulta difícil para el estudiante conciliar la idea de que una esfera con trayectoria semiparabólica emplea el mismo tiempo en caer al piso que otra que se deja caer simultáneamente desde la misma altura. De otra manera, muchas de estas situaciones físicas resultan discrepantes para el estudiante; sin embargo, el factor, mente del sujeto que aprende [3], no juega un rol importante en el modelo de enseñanza tradicional.

De acuerdo a experimentos de Hake [4] y Redish [5], el aprendizaje activo [6] es mas efectivo que el modelo tradicional y yo he encontrado que los experimentos discrepantes (ExD) [7] corresponden a una estrategia de aprendizaje activo que genera un escenario fértil, y de motivación [25] para el aprendizaje de temas de la Física.

En lo que sigue se caracterizan los ExD, se ilustra su poder pedagógico mediante la teoría de la disonancia cognitiva, se plantea su uso como estrategia complementaria de aprendizaje describiendo una

experiencia y las habilidades que puede potenciar su dinámica.

II. DESCRIPCIÓN DE UN EXPERIMENTO DISCREPANTE (ExD)

Un ExD es un montaje que al accionarlo manifiesta un fenómeno impactante o contraintuitivo para el estudiante. El fenómeno puede corresponder a un suceso que ocurre cuando el observador está esperando otro. De otra manera se puede decir que un ExD exhibe una fenomenología sorprendente, inesperada, paradójica y que ofende la intuición de quien lo observa. Por ejemplo, la esfera en el soplador sale por la boca B del tubo [7], el trompo se voltea [8, 9], el deslizador (b) de la figura 1, sin ruedas, se mueve cuando se empuja. Si el evento es impactante también genera desequilibrio y por tanto atrapa al estudiante. El desequilibrio ya no es entre el suceso y lo esperado sino porque el estudiante no tiene presaberes inmediatos que le permitan entender el fenómeno. Por ejemplo, el disco se mueve cuando se raspa el palo de la hélice [10]. En particular, muchos juguetes [11] cuando se accionan evidencian una fenomenología asombrosa que cautiva al estudiante.

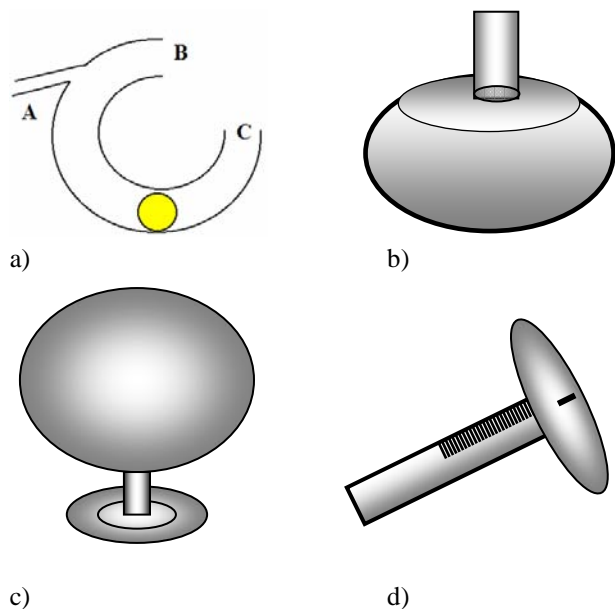


FIGURA 1. Se muestran cuatro montajes del tipo experimentos discrepantes: a) El soplador mágico, b) El Tippe Top, c) El deslizador, d) El molinillo o hélice mágica. El deslizador es un globo desocupando aire a través de un tubo conectado a un CD.

III. DISONANCIA COGNITIVA DE LOS ExD

La razón fundamental para que un experimento discrepante genere motivación estriba en que el fenómeno que vislumbra es contrario a lo que la lógica de la persona espera. A este respecto se puede afirmar que el evento presentado genera disonancia cognitiva para quien lo observa. Como afirma Festinger [12], una persona presenta disonancia cognitiva, cuando percibe dos informaciones

Los Experimentos Discrepantes en el aprendizaje activo de la Física

contrarias de un mismo estímulo o mantiene al mismo tiempo dos pensamientos que están en conflicto. Es decir, presenta incompatibilidad de dos cogniciones simultáneas.

Festinger [12] plantea que al producirse esa incongruencia o disonancia de manera muy apreciable, la persona se ve automáticamente motivada para esforzarse en generar ideas y creencias nuevas que permitan reducir la tensión hasta conseguir que el conjunto de sus ideas y actitudes encajen entre sí, logrando una cierta coherencia interna.

El modo en que se produce la reducción de la disonancia puede involucrar distintos caminos [12]. Por ejemplo, un cambio de actitud o de ideas ante la realidad. Por supuesto, como el fenómeno del montaje no se puede cambiar, físicamente, el único camino que queda, para reducir el desequilibrio, es cambiar de ideas. Aquí es donde el maestro de Física, no debe apresurarse a dar una respuesta sino que al unísono con sus estudiantes debe procurar jugar, degustar el fenómeno, hacer preguntas y sobre todo manifestar al estudiante que se inicia una empresa ardua para develar el *cómo* y el *por qué* del fenómeno. A este respecto me gusta acuñar aquella adecuada plática entre el maestro y el discípulo cuando este último objeta a su maestro: *¡Gran sabio!, Tu siempre nos cuentas parábolas pero nunca nos das el significado; y el maestro contestó, ¡Pequeño saltamontes!, ¿te gustaría que te diera una manzana ya masticada?*. Ante esta parábola, los estudiantes cambian su actitud y empiezan a trabajar.

Como la tarea es reducir la disonancia, resulta apropiado asignar unas tareas para el éxito de esa gran empresa. Es importante sugerir alguna metodología de trabajo para observar, anotar detalles, plantear preguntas, generar conjeturas, utilizar algún modelo conceptual y cadenas de razonamiento para describir el fenómeno; acordar momentos para presentar avances del entendimiento del evento, búsqueda de información, etc.

IV. UTILIDAD DE LOS ExD

Hemos utilizado los ExD en distintas situaciones del aprendizaje de la física como una herramienta para generar motivación y asombro en estudiantes de licenciatura, ingeniería y educación media. En cada caso se ha logrado una postura activa del estudiante y un aprendizaje de la Física con más sentido. De acuerdo a Etkina [24] se pueden identificar por lo menos tres tipos de experimentos en la enseñanza de la Física: experimento observacional, experimento probatorio de conceptos, y experimento de aplicación de conceptos. En los tres subyace el aspecto cualitativo y cuantitativo. A este respecto recomiendo ver la tabla de Etkina [24] donde sintetiza distintos tipos de experimentos en física educativa concomitantemente a: su objetivo pedagógico, el momento de uso, sugerencias para el profesor, preguntas para el estudiante y donde pueden ser utilizados.

A continuación describimos algunas situaciones de experiencia con los ExD y esperamos que sirvan como

modelo para ser implementadas en el aprendizaje activo de la Física:

1. *Para plantear una clase:* Hemos planteado la cinemática desde un tubo con una burbuja dentro; midiendo posiciones en el tiempo, para luego calcular rapidez de la burbuja a diferentes inclinaciones del tubo. La discrepancia de este montaje se presenta cuando el estudiante comprueba que en una gráfica de velocidad en función del ángulo, la máxima velocidad se presenta entre 45 y 50 grados y no en 90 grados como el esperaba. En la tabla 1 se sintetiza información sobre algunos montajes con su respectiva temática.

Existe alguna literatura que evoca un intento por el aprendizaje de las ciencias mediante juguetes. Por ejemplo, Schlichting en [11, 14], hace una reflexión sobre la posibilidad del aprendizaje de la mecánica mediante juguetes.

TABLA I. Algunos montajes de experimentos discrepantes empleados para estudiar ciertas temática de la Física.

Montaje	Temática
• El soplador [7]	• Ecuación de Bernoulli, mov. semi-parabólico.
• Burbuja en tubo [35]	• Cinemática unidimensional
• Compuerta mágica [34]	• Ecuación de Young-Laplace
• Deslizador [35]	• Leyes de Newton
• Plano Inclinado con dos trayectorias distintas [35]	• Energía Mecánica
• Tippe Top [34, 8, 9]	• Cinemat. y dinámica rotacional.
• Esfero retráctil con cinturón [35]	• Centro de gravedad
• Chimenea mágica [35]	• Termodinámica
• Cuna de Newton [35]	• Colisiones
• Molinillo mágico [34]	• Oscilaciones
• Generador V. G. [13]	• Electrostática
• Electroimán [34]	• Magnetostática

2. *Como proyecto de investigación al final de una clase, semana o periodo académico:* En ingeniería, en primeros semestres de formación en la Universidad Central de Bogotá, se han dejado por cerca de cuatro años, un material escrito que involucra la realización de un montaje discrepante al final de cada corte (5 semanas). Los estudiantes observan y analizan la fenomenología cuyas conclusiones socializan mediante un informe y un debate. Lo que se observa es un fértil trabajo de grupo [25, 28] y una evolución paulatina en la argumentación y descripción del por qué y en del cómo del fenómeno del montaje que construyen.

3. *Para plantear una discusión o conversatorio académico acerca de un concepto o teoría determinada de la ciencia:* Cuando los estudiantes ya poseen cierta formación, a veces es muy útil poner a prueba sus conocimientos. Entre 2001 y 2004, en las tardes, luego del almuerzo, proponíamos observar la fenomenología de algún experimento impactante o discrepante con estudiantes de más de tres semestres de la Licenciatura en Física de la Universidad Pedagógica de Bogotá. En ocasiones los estudiantes formaban discusiones interesantes donde ponían en juego sus competencias. Casi siempre las discusiones se

extendían a encuentros subsiguientes para intentar describir y determinar la fenomenología de los montajes. Esto generaba reto, búsqueda de información y primordialmente una cultura de encuentros de discusión científica.

4. *Para generar un escenario de juego y argumentación:* Este es el escenario que inquietaba a Feynman [19, 29] como agradable; el que permitió a Mlodinow [15] escribir el arco iris de Feynman y expresar: “una parte importante del proceso creativo es el juego. Es difícil de mantener cuando te haces mayor. Te haces menos jugueteón. Pero no debería ser así, por supuesto”. Este escenario de aprendizaje agradable y feliz es adecuado y pertinente a nivel de enseñanza media donde no es fácil cautivar al estudiante y un poco más difícil, capturar su interés para trabajar temáticas de la física. Como dice Varela y Martínez [16], “la experiencia nos ha indicado que la utilización de los juguetes, con la finalidad de enseñar Física, es un excelente procedimiento didáctico, pues despierta la curiosidad, fomenta la creatividad y favorece la participación del alumno, que desea elaborar respuestas que expliquen los fenómenos que está observando”.

5. *Para originar modelos conceptuales:* Como expresa Moreira [17], aprehendemos el mundo a partir de las representaciones que construimos en nuestras mentes. Nosotros observamos que luego de tener un ambiente donde se tiene una fenomenología asombrosa y que incita a la búsqueda y a la explicación, se necesita urgentemente empezar a ordenar la información en términos de algún concepto. Por ejemplo, en el caso del molinillo mágico, han surgido conceptos como ondas mecánicas, vibración, movimientos periódicos perpendiculares, propagación de ondas en materiales. A menudo los grupos emplean alguna imagen para modelar la descripción física del ¿cómo? y del ¿por qué? del fenómeno. Han aparecido imágenes como golpeteo y vibración, ondas mecánicas, el modelo del colchón, osciladores acoplados, etc.; como dice Etkina [24], los estudiantes inventan conceptos. En ocasiones la búsqueda que emprenden los estudiantes los lleva a hacer uso de lo que encuentran en la literatura, pero distinto a consumir un concepto sin sentido, en este caso, el modelo encontrado, es una herramienta que sirve para explicar.

6. *Para plantear un método de estudio en ciencias ya sea análogo o distinto al método científico:* En particular, en nuestros talleres sugerimos un método que se puede resumir en cuatro etapas: (i) Familiarización con el montaje: A veces se construye, siempre se juega, se degusta el fenómeno, se observa. En otras, se manda construir (tippe top, soplador, etc) y se hacen cambios para que funcione. (ii) Obtención de información: Se formulan interrogantes, conjeturas, se identifica la discrepancia, se describe el hecho, se identifica lo relevante e irrelevante. (iii) Abstracción y descripción: Mediante modelos conceptuales se describe el fenómeno, se identifican posibles variables que podrían medirse, se aíslan aspectos del fenómeno y se mide, se estudia la relación entre variables medidas, se abstrae, se modela y se verifica. (iv) Socialización de la actividad: Se expone, se debate, se presentan las hipótesis, resultados, etc.

7. *Pueden plantear experimentos controlados que permita medir como se hace en un experimento tradicional con guías:* en el caso del trompo, algunos estudiantes ingeniaron mecanismos para hacer rotar el trompo sin la mano. En el caso del molinillo mágico, los estudiantes adecuaron un vibrador que produjera un golpeteo al palo ranurado y así controlar la frecuencia, en el caso del soplador, los estudiantes adecuaron un aparato a la boca del tubo A que soplara, en vez de ellos. En el caso de los dos globos, de distinto volumen interconectados por una válvula que controla el flujo de aire, se hicieron montajes para inyectar el aire con un aparato y no con la boca del estudiante, etc. En general se necesita probar tanto modelos como conjeturas, por ende, se necesita medir, buscar regularidades y analizar.

8. *Sirven para generar un escenario de aprendizaje por investigación:* Uno de los tantos problemas de la metodología tradicional es que debido al afán por cumplir con un plan curricular, no hay tiempo para escenarios donde se genere gusto y actitud, por el asombro, por la observación, por la pregunta, por la conjetura, por el análisis, etc. Como manifiesta Bruner [20], y reitera Barrera [22], es necesario, pues crear estrategias de aprendizaje autónomas que permitan alcanzar el objetivo de “aprender a aprender”. Particularmente, los ExD generan un escenario propicio para que el estudiante se entrene en acciones propias de la investigación [28] como observación, conjeturación, abstracción, predicción, modelación, etc.

9. *Pueden potenciar el trabajo en grupo de los estudiantes:* En realidad, insistimos a los estudiantes a que accionen, charlen, anoten lo que los sorprenda, sus interrogantes, sus dificultades, sus conjeturas, etc. Al conformar grupos de trabajo, observamos que el estudiante debe esforzarse a emitir sus razonamientos y a expresar ideas coherentes para sus compañeros que escuchan. Se observa que esto los hace crecer en su discurso. Como expresa Redish [30] y luego Benegas [31], el aprendizaje es más efectivo a través de las interacciones sociales, de otra manera, la interacción entre pares actúa como una herramienta de enorme valor pedagógico. Por eso la constante es invitarlos a que se dejen absorber por el fenómeno, a que giren alrededor del mismo. A la postre se consigue que efectivamente los estudiantes giren en torno al fenómeno, y fundamentalmente, se logra que se concentren en el problema de la descripción y de las causas del fenómeno. Se observa que explicar, describir e innovar se convierte en una obsesión, en un reto, en una pasión.

10. *Pueden potenciar el razonamiento físico y lógico:* Les permite ver diferencias entre el razonamiento matemático y el razonamiento físico. En el caso de razonamiento matemático es fácil tener implicaciones del tipo P implica Q, mientras que en caso físico, este tipo de implicaciones, requieren abstraer lo relevante para describir. En realidad se muestra que en física se tienen varias regularidades (P) y con cierta aproximación entonces si se tiene Q. En este caso el profesor debe ayudar a sus estudiantes a diferenciar entre evidencias observacionales e inferencias [24]. Esto nos ha permitido analizar la evolución paulatina de cadenas de razonamientos en estudiantes, como dice

Wernicke, la evolución del mapa de variantes e invariantes [20].

11. *Fortalece el pensamiento divergente y la creatividad:* Uno como maestro desea que al final de un curso los estudiantes puedan generar ideas creativas. Como dice Casillas [32], la creatividad es necesaria en todas las actividades educativas, porque permite el desarrollo de aspectos cognoscitivos y afectivos importantes para el desempeño productivo. El escenario que plantea un ExD es apropiado para el desarrollo del pensamiento lateral, pues extrae del estudiante esos caminos alternativos que no están acostumbrados a usar. Según De Bono [23] el pensamiento lateral no es un método de resolución de problemas sino una colección de técnicas de pensamiento divergente como: desafío, alternativa, provocación, movimiento, fraccionamiento, etc. Por ejemplo, en el soplador, la salida de la esfera a través de la boca B del tubo puede retar al estudiante a obtener la velocidad de la esfera utilizando Bernoulli [7] o mediante consideraciones de movimiento semiparabólico.

12. *Permiten un aprendizaje significativo:* De acuerdo a Moreira [26], una buena enseñanza debe ser constructivista, promover el cambio conceptual y facilitar el aprendizaje significativo. El escenario que plantea un ExD origina una necesidad búsqueda [27] de conceptos para explicar el fenómeno discrepante. Esa necesidad no solo reduce la disonancia sino que da sentido a los conceptos que explicaran el fenómeno discrepante. Se observa entonces, un aprendizaje de conceptos con sentido para establecer una cadena de razonamientos en la descripción del fenómeno donde el motor fundamental es la disonancia y la motivación [25].

V. EXPERIENCIA CON LOS ExD

Alternando exposiciones cortas, conferencias, simulaciones y talleres de acompañamiento se aplicó ExD por cerca de 5 años en aproximadamente 2500 estudiantes de ingeniería, licenciatura y colegio. En la mayoría de los casos se trabajaron 3 montajes de ExD por semestre. Se ensayaron distintas formas de presentar cada montaje. En ocasiones presenté el montaje con mucha emotividad como recomienda Liem [28] haciendo preguntas y accionando cada vez; en otras, describí el montaje haciendo uso del tablero, escondiendo el fenómeno que debía ocurrir y sugiriendo construir el montaje para un momento determinado posterior. En otros momentos, presenté el montaje y realicé una encuesta diagnóstica acerca de lo que debía esperar el estudiante, y sin precisar el fenómeno que debía ocurrir, dejaba como tarea averiguarlo para un momento posterior. Hubo momentos en los que se dejó un taller donde se explicitaba la forma de construir el montaje, la forma de accionarlo y el fenómeno que debía ocurrir. En la tabla II se pueden resumir las distintas etapas de la dinámica de trabajo ocurrida.

La etapa de construcción requiere paciencia del estudiante hasta que el montaje evidencie el fenómeno que el prototipo del profesor muestra. Aunque un experto construya el tippe top, no siempre se voltea. El estudiante

luego descubre que colocando o quitando masa al trompo, este cambia su centro de gravedad del centro geométrico, y ahora si, se voltea.

TABLA II. Fases de dinámica de trabajo con ExD.

Actividad	Descripción
• Presentación montaje	• Taller, exposición corta, aparato, etc.
• Construcción de ExD	• Lo construyen, se manda hacer, etc
• Afinamiento de ExD	• Se arregla hasta que funcione
• Degustar el ExD	• Accionar, jugar, observar, conjeturar
• Accionar y observar	• Detalles, regularidades, irrelevancias.
• Primer avance	• Describir el fenómeno (por grupos)
• Búsqueda-teoría	• Pensar, relevancias, Ieros modelos
• Segundo avance	• Debate, objeciones, argumentos...
• Exp. prueba-mejoras	• Puesta a prueba-conjeturas, modelos
• Consenso	• Prueba-error, modelación
• Final	• Exposición, escrito

En ocasiones el fenómeno sale inmediatamente y el estudiante comienza con la etapa de accionar, degustar, observar, anotar detalles, conjeturar. En otras, el montaje esta bien construido, pero por algún detalle que falta, no funciona. Por ejemplo, el molinillo mágico no funciona si el eje del disco es del mismo diámetro que el alfiler. Por supuesto, yo agrando el agujero sin que se den cuenta y en muchas ocasiones el estudiante posteriormente percibe el detalle.

En la etapa de descripción del fenómeno hago énfasis en la importancia de la base de conocimiento ya acumulada, sin olvidar que se pueden inventar imágenes y modelos basados en las ideas de Hertz [33], “elaboramos imágenes aparentes ó símbolos de los objetos exteriores tal que: las consecuencias lógicas de la imagen son a su vez imágenes de las consecuencias naturales de los objetos representados. Las imágenes como los modelos presentan ciertas ventajas: Podemos desarrollar rápidamente las consecuencias que el mundo exterior nos sacará a la luz más que lentamente ó como resultado de nuestra intervención. Podemos adelantarnos a nuestros hechos y tomar nuestras decisiones actuales de acuerdo con nuestro conocimiento alcanzado”. Para Hertz estas deben ser las características de una imagen:

- Debe cumplir la condición fundamental, es decir, las consecuencias lógicas de la imagen son a su vez imágenes de las consecuencias naturales de los objetos representados.
- Debe ser legítima, es decir que no hayan ni términos ni definiciones contradictorias a las leyes de nuestro pensamiento.
- Debe ser adecuada, es decir, coherente con las cosas externas.
- Debe ser precisa, es decir, de dos imágenes dadas, será más precisa aquella que refleje más aspectos esenciales.
- Debe ser manejable, es decir, de dos imágenes dadas, será más manejable aquella que incluya menos notas superfluas.

En cualquier etapa descrita en la tabla II, la actividad del estudiante se activa, por mucho, respecto a la clase tradicional. La mayoría de los estudiantes precisan

detalles, preguntas, conjeturas, experimentos mentales, modelos desde sus presaberes, etc. Ahora ellos, ya no repiten los contenidos de la física por una calificación sino por la necesidad de encontrar coherencia y consonancia en la descripción del fenómeno. Esto es una ganancia muy importante, porque entonces aprender una determinada ley o concepto, es una herramienta para que el estudiante sea un actor de su mundo, donde él interioriza y puede aportar; donde definitivamente él se hace responsable de su propio aprendizaje.

Además de estar atento a guiar el proceso, de objetar, de sugerir, de escuchar, etc.; muy revelador fue seguirles la ruta a los estudiantes participantes en este enfoque de aprendizaje activo. De acuerdo a varios indicadores sobre número de preguntas, argumentación, observación, modelación, etc.; el accionamiento mas destacado para los cerca de 2500 estudiantes, se representa en la figura 2. No se emplea grupo control. El referente de comparación se hizo midiendo indicadores de motivación, cantidad de preguntas, argumentación, etc., en distintos momentos, con los mismos grupos, utilizado el método tradicional versus clases expositivas cortas con inserción de ExD. Con el método tradicional se registran datos muy bajos de desempeño del estudiante. En contraste, con experimentos discrepantes se registran datos de alta motivación, interrogación, argumentación, atención de observación, búsqueda de información y aprendizaje cooperativo. Sin embargo, solamente 500 de los 2500 logran matematizar y aislar el fenómeno estudiado.

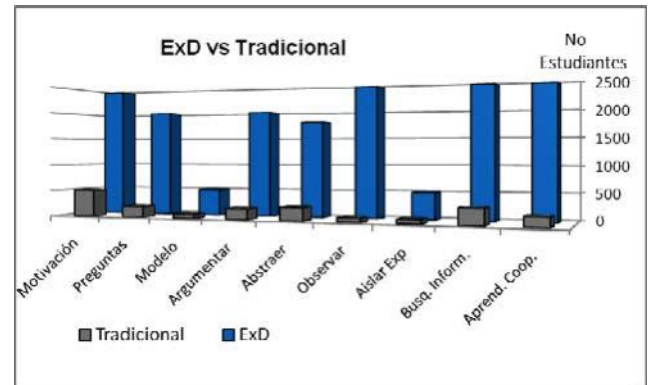


FIGURA 2. Se muestran las capacidades intelectivas ejercitadas o el nivel de comprensión de los experimentos discrepantes estudiados: Durante cerca de 5 años se trabajó con 2500 estudiantes aproximadamente. Las barras del histograma indican el nivel de motivación, de capacidad de preguntas, de capacidad de modelar, de capacidad de argumentar, etc. La barra final sobre aprendizaje cooperativo indica las nociones y conceptos adquiridas por los estudiantes por interacción entre ellos.

Debo precisar que cuando hubo más tiempo de encuentros e interacción, los estudiantes lograron mayor profundización. Del mismo modo, solo algunos estudiantes de ingeniería, y en mayor grado de licenciatura en física (200 participantes), lograron modelar el fenómeno cuando el objetivo central era ese. Como en algunos casos el experimento sirvió como un abre bocas para iniciar alguna temática de la física, no se observa entonces que el

estudiante haya llegado por su cuenta al modelo del fenómeno. Además algunas de esas interacciones fueron con estudiantes (300) de colegio de nivel de décimo y once grado, y otros (200) con estudiantes de educación básica secundaria en expociencia de Bogotá; los restantes fueron en primeros semestres de Ingeniería.

Esta estrategia fue aplicada complementariamente al método tradicional de enseñanza. En la mayoría de estas universidades hay un plan curricular que cumplir y la gran mayoría de maestros mantienen el método tradicional. A pesar de un cambio en el sistema de evaluación (actualmente por competencias) [36, 37, 38], solo en los últimos tres años se ha visto una preocupación de los maestros por un mejor escenario de aprendizaje. Actualmente en nuestra universidad algunos profesores alternamos distintas estrategias de aprendizaje, pero definitivamente, por mucho, los experimentos discrepantes son de gran valor pedagógico para potenciar el aprendizaje de la física en los estudiantes. Los ExD, son ahora exigidos por nuestros estudiantes y siempre esperan en cada curso estudiar alrededor de estos montajes. Ahora estamos ejecutando un proyecto que busca mirar cuál es el efecto de incorporar escenarios con experimentos discrepantes en el desarrollo de capacidades intelectivas de estudiantes de Colegio y Universidad y buscamos el apoyo de Ministerio de Educación Nacional. Hemos planteado unas jornadas sabatinas con estudiantes de colegio en nuestra universidad y esperamos resultados hacia el siguiente año.

VI. CONCLUSIONES

Los Experimentos Discrepantes son montajes que pueden ser utilizados favorablemente para generar un escenario fértil y efectivo de aprendizaje de temas de la física. Un aprendizaje mediado por este tipo de montajes es fértil porque genera una postura activa del estudiante, origina necesidad de búsqueda tanto para el profesor como para el estudiante. Se observa un continuo ejercicio de capacidades intelectivas como observar, interrogar, conjeturar, analizar, abstraer y modelar.

Es interesante caracterizar en este proceso distintas etapas o momentos de aprendizaje del estudiante, donde el estudiante, no solo aprende sino que aporta y por tanto es el actor principal.

Es relevante aplicar una metodología mediada con algunos objetivos que debe precisar el profesor para no quedarse únicamente en juego. Del mismo modo, es importante seleccionar el montaje apropiado para cada tema de la física de acuerdo al fenómeno que mejor evidencie.

Lo débil de la estrategia estriba en la cantidad de tiempo que se necesita si solo se utiliza esta metodología. No obstante de ser favorable para el aprendizaje del estudiante, puede ser riesgoso para la autoridad del profesor, por tanto se presenta cierta resistencia por parte de los maestros al cambio.

Debo agregar el enorme valor que este tipo de montajes ha generado en profesores de nuestra universidad hacia la deducción del modelo teórico en cada caso. Esto nos ha

llevado a mantener una investigación activa de la disciplina, pues los modelos de estos montajes no se encuentran tan fácilmente en la literatura y se requiere, entonces, proponer, probar, calcular, experimentar y debatir. Por ejemplo, en este momento nos encontramos afinando un nuevo enfoque para explicar por qué dos globos con aire de distinto volumen e interconectados por una válvula, cuando se abre, pasa el aire del globo de menor volumen al de mayor volumen. Esto ha sido estudiado pero desde enfoques puramente termodinámicos.

Esperamos construir una reconocida base de conocimiento alrededor de esta estrategia de aprendizaje para socializar posteriormente algunos modelamientos de montajes que hemos logrado.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Central de Bogotá y a la Directora del Dpto. de Ciencias Naturales, Leonor Hernández por el ingente apoyo para la ejecución de este enfoque alternativo a las clases tradicionales. Del mismo modo, agradezco a la Facultad de Ingeniería por el apoyo brindado al Proyecto de Experimentos Discrepantes en la enseñanza de las Ciencias Naturales, y por el premio de reconocimiento como mejor profesor del Dpto. de Ciencias Naturales en 2007.

REFERENCIAS

- [1] Cartaña, J.; Comás, M. C., *Algunas consideraciones alrededor de la concepción constructivista de las ciencias experimentales*, en *La Didáctica de las Ciencias Experimentales a Debate*, (Universidad de Murcia, Murcia, 1994).
- [2] Calatayud, M. L.; Gil, D.; Gimeno, J. V., *Cuestionando el pensamiento docente espontáneo del profesorado universitario*. *Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado* **14**, 71-81 (1992).
- [3] Sánchez, G.; Valcárcel, M. V., *Diseño de unidades didácticas en el área de ciencias experimentales*. *Enseñanza de las Ciencias* **11**, 33-44 (1993).
- [4] Hake, R., *Interactive engagement vs traditional methods: a six-thousand student survey of mechanics test data for introductory physics*, *Am. J. Phys.* **66**, 64-74 (1998).
- [5] Redish, E. F., Saul, J. M., y Steinberg, R. N., *On the effectiveness of active-engagement microcomputer-based laboratories*, *Am. J. Phys.* **65**, 45-54 (1997).
- [6] Bonwell, C. y Eison, J., http://boron.srri.umass.edu/courses/unc-s05/readings/Bonwell-Eison_1991.pdf consultado el 3 de abril de 2008.
- [7] Barbosa, L. H., *Un movimiento discrepante en el estudio de una ley de la física de fluidos: La ecuación de Bernoulli*, *Revista Colombiana de Física* **35**, 95-98 (2003).
- [8] Bou-Rabee N. M., Marsden J. E. y Romero L. A., Siam J., *Applied dynamical systems-Society for Industrial and Applied Mathematics* **3**, 352-377 (2004).
- [9] Cohen, R. J., *The Tippe Top Revisited*, *Am. J. Phys.* **45**, 12-17 (1977).

- [10] Leonard, R. W., *An interesting demonstration of the combination of two linear harmonic vibrations to produce a single elliptical vibration*, Am. J. Phys. **5**, 175-176 (1937).
- [11] García, V. L., *La Física de los juguetes*, Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias **1**, 17-30 (2004).
- [12] Festinger, L., *A theory of cognitive dissonance* (Stanford University Press., Stanford, CA, 1957).
- [13] http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/sacaleE_M2/Triboelectricidad/vanderGraff/GVG_Nuestro.htm, Consultado el 25 de marzo de 2006.
- [14] Schlichting, H. J., http://www.uni-muenster.de/imperia-md-content-fachbereich_physik-didaktik_physik-publikationen-mechanictoy.pdf, Consultado el 25 de marzo de 2008.
- [15] Mlodinow, L., *Feynman's Rainbow*, (Arrangement with Warner Books, New York, 2003).
- [16] Varela, M. P. y Martínez, J. L., *Jugando a divulgar la Física con juguetes*, Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias **2**, 234-240 (2005).
- [17] Moreira, M. A., *Modelos mentales y modelos conceptuales en la enseñanza y aprendizaje de las ciencias*, Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências **2**, 37-57 (2002).
- [18] Feynman, Richard. P., *El placer de descubrir*. (Editorial Crítica, España, 2000).
- [19] Bruner, J., *La importancia de la educación*, (Paidós Educador, España, 1987).
- [20] Wernicke, C. G., *Aprender a pensar, enseñar a pensar*. Suplemento Eduterapia, No 8, Buenos Aires. Reproducido en Innovación y Ciencia **XI**, 56-60, Colombia, (2003).
- [21] Barrera, K. J., *La enseñanza de la Física a través de habilidades investigativas: una experiencia*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **1**, 39-43 (2007).
- [22] Fuller, R., Karplus, R. & Lawson, A. E., *Can physics develop reasoning?*, Physics Today **30**, 23-28 (1977).
- [23] De Bono, E., *El pensamiento creativo: el poder del pensamiento lateral para la creación de nuevas ideas*, (Paidós, México, 1994).
- [24] Etkina, E., Van H. A., Brookes, D. T., Mills, D., *Role of experiments in physics instruction – a approach*, Phys. Teach. **40**, 351-355 (2002).
- [25] Johnson, D. W. y Johnson, R. T., *Motivational processes in cooperative, competitive and individualistic learning situations*, Research on Motivation in Education, Vol. 2, (Academic Press, Nueva York, 1985).
- [26] Moreira, M. A., *Aprendizaje significativo: un concepto subyacente*. Actas Encuentro Internacional sobre el aprendizaje significativo, (Burgos, España. pp. 19-44, 1999).
- [27] Riveros, R. H., *Experimentos Impactantes*, (Edit. Trillas, México, 2000).
- [28] Liem, Tik L., *Invitations to Science Inquiry*, (Science Inquiry Enterprises, California, 1991).
- [29] Feynman, Richard. P., *What Is Science*, The Physics Teacher **7**, 313-320 (1969).
- [30] Redish, E., *Millikan Award Lectura Building a Science of Teaching Physics*, Am. J. Phys. **67**, 562-573 (1999).
- [31] Benegas, J., *Tutoriales para Física Introductoria: Una experiencia exitosa de Aprendizaje Activo de la Física*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **1**, 32-38 (2007).
- [32] Casillas, M. A., *El fenómeno sobresaliente. Guadalajara*. Revista UdeG, Dossier La atención a los niños sobresalientes, No 5, junio-julio. (1996).
- [33] Heissenberg, W., *La imagen de la naturaleza*, (Edit. Muy Interesante, Barcelona, 1975).
- [34] Walker, J., *Física recreativa: La feria ambulante de la física*, (Noriega Editores, México, 2000).
- [35] Barbosa, L. H., <http://lhbfsica.googlepages.com/>, Consultado el 25 de marzo de 2008.
- [36] http://www.oei.es/evaluacioneducativa/Colombia_en_PISA_2006.pdf. Consultado el 4 de agosto de 2008.
- [37] <http://www.oei.es/evaluacioneducativa/InformePISA2006-FINALingles.pdf>. pp. 370. Consultado el 4 de agosto de 2008.
- [38] Alvarez, R. P., *Formación Superior basada en competencias, interdisciplinariedad y trabajo autónomo del estudiante*, Revista Iberoamericana de Educación. <http://www.rieoei.org/deloslectores/648Posada.PDF>. Consultado el 4 de agosto de 2008.

Acerca de la enseñanza-aprendizaje de los conceptos de Fuerza y Trabajo



Antonio Lara-Barragán Gómez^{1,2}

¹*Departamento de Física, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, A Revolución 1500, Sector Reforma, Guadalajara, Jal. México.*

²*Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad Panamericana campus Guadalajara, Circunvalación Poniente no. 49, Cd. Granja, Zapopan, Jal México.*

E-mail: alara@up.edu.mx

(Recibido el 24 de Junio de 2008; aceptado el 13 de Agosto de 2008)

Resumen

Se presenta una forma de acercarse a la enseñanza de los conceptos de fuerza y de trabajo para un curso introductorio de física basado en álgebra. Se hace un breve recuento de resultados obtenidos por otros investigadores en cuanto a su conceptualización. Uno de los aspectos tratados es la manera en que se usa el lenguaje, la cual puede ser definitiva para un adecuado aprendizaje de los conceptos, especialmente el de fuerza. Se describe la manera en que se aplica la metodología de enseñanza y los análisis cuantitativo y cualitativo de los resultados obtenidos en un curso regular de física para estudiantes de ingeniería y ciencias de primer ingreso al nivel superior.

Palabras clave: Fuerza, trabajo, enseñanza, aprendizaje, física.

Abstract

An approach to the teaching of force and work for an introductory, algebra-based course, and a brief review of results from others authors are presented. One main aspect is how language is used and how it is important for an adequate learning, specially the concept of force. The teaching methodology was tested in an introductory course for freshmen majoring in science and engineering and the results of research on learning the concepts are analyzed.

Keywords: Force, work, teaching, learning, physics.

PACS: 01.30.Ib, 01.40.gf, 01.50.Zv.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de varios lustros, muchos proyectos de investigación sobre la enseñanza y el aprendizaje de los conceptos de fuerza y trabajo han arrojado diversos resultados en estudiantes de primer ingreso al nivel superior. Específicamente sobre el concepto de fuerza, de las fuentes consultadas se resume en que muchos estudiantes piensan [1, 2, 3, 4, 5, 6]:

- Que solo los seres vivos pueden aplicar fuerzas. Por ejemplo, en el contexto gravitacional, les es difícil *entender* que una mesa aplica una fuerza hacia arriba a un objeto, o que cuando se golpea una pared, ésta aplica una fuerza a la mano.
- En general, que las fuerzas, tal como se entienden en física, son solamente alguna forma de *influencia* sobre el movimiento de un objeto; por ejemplo, la fricción es algo que hace que los objetos en movimiento se detengan.
- Que es una verdad incontrovertible lo que se ha denominado una *teoría del ímpetu del movimiento*. Por ejemplo, alrededor de un 75% piensan que un

objeto lanzado hacia arriba tiene una “fuerza de lanzamiento” o “fuerza de la mano” que lo mantiene en movimiento vertical hacia arriba aún *después* de estar en contacto con la mano que si no hay fuerzas aplicadas a un objeto, éste se encuentra en reposo o llega al reposo inmediatamente.

- Que, en general, la fuerza es proporcional a la rapidez de un objeto.
- Que la tercera ley de Newton es un enunciado meramente retórico, ya que está en franca oposición con el sentido común.

Por otra parte nuestra propia experiencia en el aula universitaria muestra que cuando se toca el tema de fuerzas –en el contexto de las leyes de Newton–, han de considerarse tres aspectos con los cuales dirigir la didáctica. Tales aspectos por un lado resumen los hallazgos enunciados en el párrafo anterior y, por otro, determinan la comprensión y el consiguiente aprendizaje del concepto [7]: (a) ¿Qué es una fuerza? (b) ¿cuál es la relación entre las fuerzas y el movimiento?, y (c) ¿qué sucede, en términos de fuerzas, cuando dos cuerpos interaccionan?

Un punto de acuerdo común entre los autores mencionados arriba –y, estamos seguros, entre los físicos de la comunidad científica–, es que el concepto de fuerza es fundamental para la estructura conceptual de la mecánica en el primer acercamiento dado por los cursos introductorios de física. A su vez, una formulación conceptual congruente de fuerza conducirá, de manera natural, a un desarrollo adecuado del concepto de trabajo.

En este documento se propone un procedimiento para la enseñanza de los conceptos de fuerza y de trabajo utilizado con éxito en las aulas de dos universidades de la zona metropolitana de Guadalajara, México. La manera en que organizamos el documento es la siguiente. En una primera sección se describe con cierto detalle la metodología utilizada en el presente estudio. En una segunda sección se explora el concepto de fuerza y su didáctica, y se proporcionan respuestas a las tres preguntas planteadas anteriormente. En la tercera sección se describe el concepto de trabajo y su didáctica y, enseguida, se presentan los resultados de la aplicación de la metodología.

II. METODOLOGÍA

Las hipótesis de trabajo son: a) la conceptualización que ordinariamente se utiliza, aún en libros de texto reconocidos, no es apropiada [8, 9]; y b) se puede desarrollar una técnica acorde con una concepción consistente con la física misma, capaz de mejorar los aprendizajes de los conceptos mencionados.

El estudio se realiza en dos universidades de la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México, con estudiantes de nuevo ingreso a carreras de ingeniería y ciencias. La propuesta de enseñanza y su contenido se refiere a un curso introductorio que no incluye cálculo, por lo que el nivel de profundidad en el concepto de trabajo no llega al uso de integrales de línea, ni tratamiento de cuerpo rígido. Los cuerpos que se consideran entran dentro del modelo de partícula.

Siguiendo a Cohen y Manion [10], el problema planteado da lugar a una metodología quasi experimental, en la que, en primer término, se eligen grupos experimentales y de control, para los que se sigue el esquema $O_i - X - O_f$, donde O_i representa la observación inicial (pretest), X la aplicación de la propuesta de enseñanza aprendizaje a la que se refiere este trabajo y O_f la observación final (postest). Tal esquema se aplica a los grupos experimentales y a los grupos de control en los que no se aplica la propuesta. Lo que se denomina observación consiste en un examen de diagnóstico, el cual consta de dos partes. La primera es una prueba conocida como *Force Concept Inventory*, muy utilizada en investigación de desarrollos conceptuales [3] que tiene 29 preguntas de opción múltiple, con las que se explora completamente el concepto de fuerza, y la segunda parte consiste en un examen de seis problemas numérico conceptuales y un análisis de caso que, en su conjunto, exploran las posibilidades de aplicación del concepto de trabajo. La naturaleza de la primera parte del examen de diagnóstico no permite un cálculo directo simple de la media en las respuestas correctas, por lo que se utiliza la

distribución binomial [11]. La aplicación de las fórmulas se realiza de la siguiente manera:

Para la media se tiene $\mu = np$, mientras que para la desviación estándar se tiene $\sigma = \sqrt{npq}$, donde p es la probabilidad favorable (o éxito), q la probabilidad desfavorable (o fracaso), tal que $q = 1-p$, y n el número de pruebas repetidas. En este caso, n representa el número total de reactivos del examen, esto es, $n=29$. La probabilidad p , se calcula dividiendo el número total de respuestas correctas – la que a su vez no es más que la suma de todas las respuestas correctas para un grupo dado- entre el número total de preguntas contestadas por ese grupo, que se calcula multiplicando n por el número de estudiantes.

Se trabaja con dos grupos experimentales y dos grupos de control, todos de estudiantes de primer ingreso a carreras de ingeniería. El total de estudiantes en los grupos experimentales fue de 49, mientras que los estudiantes en los grupos de control fueron 52.

Por otro lado, dentro de los estudios que se han realizado para evaluar los resultados de exámenes de diagnóstico análogos al que aquí se ha aplicado, existe el llamado factor de Hake, el cual representa una medida de la *ganancia posible* (mejora, adelanto). Richard Hake, de la Universidad de Indiana estudió los resultados de un examen de diagnóstico de características similares a las del examen aquí utilizado, aplicado de la misma manera que en el caso presente, pero a más de 6 500 estudiantes de 62 cursos dirigidos a estudiantes de nuevo ingreso a la universidad [12]. Hake encontró que los cursos en los que se utiliza algún método interactivo -basado en un programa educativo reformado con base en lo que se denomina Investigación Educativa en Física o, de sus siglas en inglés, PER (Physics Education Research)- obtuvieron muy altas ganancias posibles en comparación con cursos tradicionales. Encontró también que en diferentes instituciones con diferentes resultados en exámenes de opción múltiple estandarizados (que van desde el 25% al 75%), los cursos de Física con estructuras similares, alcanzan proporciones similares de ganancia posible. Entonces, el factor de Hake es un buen indicador del mérito académico de un método de enseñanza.

Los resultados generales en la Universidad de Indiana muestran que los grupos con enseñanza tradicional tienen un factor de Hake de 0.16 en el postest, mientras que los basados en cursos con métodos de enseñanza basados en PER, muestran factores de Hake que oscilan entre 0.35 y de 0.41, dependiendo de los métodos utilizados. El factor de Hake es:

$$h = \frac{\text{postest}(\%) - \text{pretest}(\%)}{100\% - \text{pretest}(\%)} \quad (1)$$

Para evaluar el modelo didáctico con el concepto de trabajo, se realiza un estudio semejante. Sin embargo, dado que tal examen no es de las mismas características que el examen para fuerzas, no se calcula el factor de Hake, sino que solamente se comparan los resultados de pretest con los de postest. En la sección IV se presentan los resultados obtenidos con ambos exámenes.

III. LA ENSEÑANZA DEL CONCEPTO DE FUERZA

La forma de acercarse al concepto de fuerza comienza con la caracterización de lo que se entiende por *Física* y su congruencia con todo el desarrollo del curso. La definición que utilizamos en nuestro curso es: *física es la ciencia que estudia todos los aspectos mensurables de la naturaleza*. Por consiguiente, se hace hincapié en que la física es, en esencia y por esencia, una ciencia experimental, de manera que las demostraciones (experimentos de cátedra) y el laboratorio forman una parte imprescindible en la enseñanza.

Caracterizar a las fuerzas es un proceso de refinamientos sucesivos durante algunas sesiones de clase hasta dar con una definición completa y consistente para el nivel en que se trabaja. Para este caso, la primera pregunta a contestar, esto es, la pregunta disparadora con que se inicia el tema es: ¿Qué es una fuerza? El primer acercamiento se hace por medio de una demostración. Se empuja y se jala un objeto, y por medio de un diálogo socrático [13], se lleva a que los alumnos infieran que *una fuerza es todo acto de jalar o empujar*. Esto conduce al caso aparentemente contradictorio de un objeto en reposo sobre una mesa. Es de hacer notar que para que el objeto no caiga, la mesa debe *empujarlo* hacia arriba, lo que puede comprobarse por experimentación directa al sostener en la mano cualquier objeto; la experimentación con uno mismo es de gran utilidad. Con esto, puede inferirse, además, que la aplicación de una fuerza no siempre produce un movimiento.

El segundo refinamiento se da con la segunda ley de Newton, para la que un acercamiento nuevamente fenomenológico conduce a la idea intuitiva de masa como medida de la inercia –suponemos que el tema de primera ley de Newton y el concepto de inercia se han tratado previamente–. La forma en que se ha procedido, es apelar a un experimento pensado: tenemos dos objetos del mismo material de diferentes tamaños, por lo que tienen diferentes masas, ambos en reposo. ¿Cuál de los dos es más fácil de mover? Ahora, pensemos que ambos se encuentran en movimiento con la misma rapidez; ¿cuál de los dos es más fácil de detener? De aquí se infiere que las fuerzas producen aceleraciones (o deceleraciones, según sea el caso). Es claro que en este caso se ha llegado al concepto de masa inercial. La propuesta contiene además una restricción: no se menciona este concepto ni el de masa gravitacional, pues no se ha visto la necesidad de introducir más conceptos, debido a que nuestra experiencia muestra que estos conceptos causan confusión a los y las estudiantes. Además, el curso que seguimos es introductorio; en el siguiente semestre el plan de estudios señala una materia específica de Mecánica, en la cual se profundiza sobre este tema.

En el curso del desarrollo del concepto ha de enfatizarse que el contenido de la segunda ley de Newton es el de una relación causa-efecto y no una definición de fuerza como masa por aceleración o, peor, una definición de aceleración. Se ha tenido la experiencia de que la mejor manera de evitar esto es definir, primero, el momento ($p = mv$) o cantidad de

Acerca de la enseñanza-aprendizaje de los conceptos de Fuerza y Trabajo movimiento, para enunciar la segunda ley en términos del cambio de momento:

$$F = \frac{\Delta p}{t} \quad (2)$$

y, posteriormente, deducir de ella la conocida relación $F = ma$, para la cual se enfatiza igualmente su carácter de relación causa-efecto y su concepto operativo. Es claro que debe hacerse notar, por medio de ejemplos y ejercicios, que la fuerza a que se refieren las ecuaciones anteriores es una fuerza neta o tal, es decir es la suma de todas las fuerzas aplicadas al cuerpo de interés, que es el cuerpo que se estudia. Este acercamiento rompe con la concepción tradicional de enseñar primero cinemática y después dinámica. La aceleración aparece como un concepto que es consecuencia natural de la formulación de la segunda ley de Newton en términos del momento. Así, queda claro que *aceleración* no es más que el nombre que le damos al hecho de la variación de la velocidad por unidad de tiempo y no la causa de esta variación. Toda esta discusión responde la segunda pregunta planteada en la introducción.

Finalmente, el siguiente refinamiento del concepto de fuerza se obtiene de la tercera ley de Newton, con lo que se contesta la tercera pregunta de la introducción. La tercera ley de Newton se conoce, generalmente, como la ley de la acción y la reacción y es fácil constatar que prácticamente todo estudiante que ingresa a la universidad conoce el enunciado. Sin embargo, son muy pocos los que entienden su significado y su contenido conceptual, de manera que para lograr que los estudiantes lleguen a comprender el significado de la ley, se necesitan las cuatro definiciones previas que presentamos a continuación [14]: el *objeto*, que es el cuerpo a que se le aplica la fuerza; el *agente*, que es el cuerpo que aplica la fuerza; la *acción*, que es la fuerza que el agente le aplica al objeto y la *reacción*, que es a fuerza que el objeto le aplica al agente. Estas definiciones se presentan como postulados *antes* de analizar el enunciado de la ley. Es importante enfatizar el hecho de que acción y reacción son *nombres* que se les da a las fuerzas descritas por la tercera.

Otro aspecto que ha de hacerse notar es que la tercera ley describe las interacciones entre dos cuerpos, ya que se presenta, implícitamente, en términos de cómo un cuerpo interactúa con otro. De aquí que la tercera ley proporciona el refinamiento final a la definición de fuerza. La manera de proceder ha de conducir a los y las estudiantes a que infieran lo siguiente: a) las fuerzas son el producto o resultado de una interacción; b) las fuerzas siempre aparecen en pares, denominados pares acción-reacción (en el contexto newtoniano); c) la acción y la reacción son fuerzas aplicadas *a cuerpos diferentes*.

Cabe aclarar que en esta propuesta las tres leyes de Newton se estudian una detrás de otra sin hacer mención de la cinemática. Desde el punto de vista de lo que entendemos por coherencia conceptual, la cinemática parece ser una serie de postulados que no permiten un acercamiento fenomenológico al desarrollo de la mecánica. Hasta donde sabemos, la mecánica fue construyéndose sobre la dinámica, basta con leer cualquier libro sobre historia de la física y revisar los *Principia* de Newton. Pensamos que la cinemática es un producto emergente que no tiene una real razón de ser, salvo el modelo pedagógico que la hizo nacer.

Las discusiones anteriores llevan a lo que denominaremos *concepción de transición*, de las fuerzas. Tal denominación se debe a que es una manera de entender el concepto que va de un nivel elemental, muchas veces equivocado, producto de la educación media y media superior, a un nivel avanzado correspondiente a los estudios superiores de una carrera profesional en física o en ingenierías. La concepción de transición tiene los siguientes aspectos que son válidos en el contexto de la física newtoniana:

- a) Toda fuerza se describe por, y cumple con, las tres leyes de Newton sin excepción.
- b) Las fuerzas no tienen existencia en sí mismas, sino son siempre resultado de una interacción.
- c) La interacción consiste en todo acto de jalar o empujar que un agente realiza sobre un objeto y que, bajo ciertas circunstancias, producen un cambio en el momento, de la misma magnitud, tanto en el agente como en el objeto; en otras palabras, se produce una aceleración (o deceleración) en el agente y en el objeto proporcional a la masa de cada uno de ellos.

Con esta caracterización, la enseñanza del concepto de fuerza debe considerar un lenguaje apropiado. Frases como: “una fuerza actúa sobre un cuerpo...” han de evitarse, utilizando en su lugar: “*se aplica* una fuerza sobre un cuerpo...”. Ha de recordarse constantemente que las fuerzas no actúan, sino que se aplican, concepción que facilita la comprensión de fenómenos mecánicos, ya que su análisis solamente requiere identificar las interacciones y los cuerpos que interaccionan. A continuación transcribimos, en forma resumida, una clase típica en la que los estudiantes infieren la causa del movimiento circular.

En la exploración inicial de los conceptos previos el profesor pregunta por la causa de que, por ejemplo, una piedra atada a una cuerda puede mantenerse en movimiento circular en un plano horizontal por encima de la cabeza. Una respuesta recurrente incluye la presencia de una “fuerza centrífuga” que es la reacción a una fuerza centrípeta. Cuando se les cuestiona sobre estos conceptos, o se les pide que los expliquen, otra respuesta común es “porque así me lo enseñaron en la preparatoria”. Después de esto, el profesor les hace recordar las características que definen las fuerzas con base en las leyes de Newton y que lo primero es establecer un sistema de referencia. La forma elegida es con el origen en el centro del círculo formado por el movimiento. En seguida, se enfatiza que el cuerpo de interés para el análisis es la piedra y que se están buscando únicamente las fuerzas aplicadas a tal cuerpo. Acto seguido, el profesor les pregunta por las interacciones; después de algunas discusiones, los estudiantes infieren que existen dos interacciones: cuerda-mano y cuerda-piedra, por lo se concluye que la segunda de ellas es la interacción que interesa. A invitación del profesor, se identifica ahora a la cuerda como el agente y a la piedra como el objeto, de donde la acción es la fuerza que la cuerda aplica a la piedra y la reacción es la fuerza que la piedra aplica a la cuerda. Finalmente, la conclusión es que solamente hay una fuerza aplicada a la piedra, cuya dirección es sobre la cuerda hacia el centro, razón por la que se denomina *centrípeta*. Algunos

estudiantes no están convencidos, e insisten en la presencia de una “fuerza centrífuga” *aplicada a la piedra*. Se les cuestiona por la interacción que da lugar a tal fuerza, y después de algunas discusiones, llega a convencerse de que, en el contexto newtoniano, con respecto al sistema de referencia inercial elegido, no puede existir tal fuerza *aplicada a la piedra*. La reacción a la fuerza centrípeta es, en efecto, una fuerza centrífuga, pero *está aplicada a la cuerda*. El punto sutil de la tercera ley de Newton es que la acción y la reacción están aplicadas a cuerpos diferentes.

IV. LA ENSEÑANZA DEL CONCEPTO DE TRABAJO

El trabajo se define en términos algebraicos, usualmente en los siguientes términos: “el trabajo W , efectuado por una fuerza constante F que mueve un cuerpo por un desplazamiento s en dirección de la fuerza, es el producto de la magnitud de ésta y del desplazamiento.” [15, 16]. Más adelante la definición se generaliza al producto punto o producto escalar entre la fuerza y el desplazamiento. Tal forma de definir el trabajo, tiene dos problemas: no presenta un carácter físico fenomenológico, y es inconsistente con la caracterización anterior de fuerzas.

En primer lugar, los estudiantes han de comprender que las matemáticas son el lenguaje de la física y que las expresiones algebraicas siguen a la conceptualización intuitiva, observacional o experimental y, en segundo lugar, si las fuerzas no tienen existencia en sí mismas, tampoco pueden realizar algo que se llama trabajo; de hecho no pueden efectuar acto alguno, sólo pueden ser aplicadas por algún agente [8, 17, 18].

Una manera efectiva de lograr un mejor entendimiento de este concepto es comenzar con el mismo lenguaje utilizado para la tercera ley de Newton: Un agente le aplica una fuerza a un objeto y, como consecuencia, el objeto se mueve para recorrer una distancia. En el caso del trabajo, la condición a satisfacer es considerar el movimiento del objeto *mientras se le aplica la fuerza*. Esto es consecuencia del estudio anterior. Entonces, se postula una definición general, de la cual, en sesiones posteriores se pueden obtener resultados generales como los teoremas de trabajo y energía. Nuevamente, por el uso del diálogo socrático se puede llevar a que los estudiantes lleguen a una definición de trabajo en los siguientes términos: *Decimos* que el agente realiza trabajo sobre un objeto, cuando éste se mueve en dirección de la fuerza y recorre una cierta distancia *mientras se le aplica la fuerza*.

Debe hacerse hincapié, antes de seguir adelante, que la definición anterior es solo válida con el modelo de partícula y con las leyes de Newton. Por otra parte, tal definición conduce de manera natural al concepto de trabajo termodinámico, e implica toda una serie de conceptos anteriores, los cuales son reforzados y aplicados directamente. Ahora, se puede decir que, para medir (o calcular) el trabajo realizado *por el agente*, sobre *el objeto*, debe utilizarse una expresión algebraica que contenga a la fuerza total o una componente de ella en la misma dirección del movimiento. Para llegar a ella se realiza un experimento

de cátedra en el que se puede jalar un carrito con una cuerda para sentir la diferencia al jalar a diferentes ángulos. Ha de enfatizarse la diferencia entre dirección y sentido. Para el caso de iniciar un movimiento a partir del reposo el intervalo de valores posible es $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ haciéndose ver el significado de los valores intermedios. La expresión a que debe llegarse directamente es:

$$W = (F \cos \theta)s = Fs \cos \theta \quad (3)$$

Lo siguiente es analizar la definición y su expresión algebraica de la siguiente manera. Del experimento es evidente que el ángulo es el comprendido entre la fuerza y la *dirección del movimiento*. Esto puede probarse teóricamente y se destacan tres casos importantes: a) $\theta = 0^\circ$, b) $\theta = 90^\circ$ y c) $\theta = 180^\circ$. El primer caso recupera la expresión algebraica $W = Fs$, que es un concepto que ya existe en la memoria de el/la estudiante y no requiere mayores discusiones. Sin embargo, los dos siguientes casos son difíciles para ellos y ellas. El tercer caso implica que $W = -Fs$, el agente realiza un trabajo *negativo* sobre el objeto. Esta conclusión es confusa, ya que ¿cómo es posible realizar un trabajo negativo? La comprensión cabal de este concepto sólo puede lograrse cuando se ha discutido y entendido el concepto de energía [19, 20]. La recomendación aquí es dejar este caso hasta entrar a la discusión del concepto de energía y el trabajo como un proceso de transferencia de energía. No es recomendable utilizar ideas como que es, por ejemplo el aire el agente que realiza el trabajo por medio de la resistencia, puesto que, de acuerdo con la definición construida, tanto la fricción como la resistencia no realizan trabajo, lo cual es un hecho reconocido y un error frecuente encontrado en libros de texto [8].

El caso $\theta = 90^\circ$ implica que el trabajo realizado por el agente es cero. Este caso puede ser tan confuso como el anterior, pero puede ejemplificarse tanto con el carrito del experimento anterior, como con el experimento de la piedra atada a una cuerda en movimiento circular donde es posible entender cómo es que un agente que aplica una fuerza centrípeta no realiza trabajo.

Un aspecto importante del método es, como en el caso anterior de la fuerza, el uso del lenguaje. Generalmente por costumbre los y las estudiantes tienden a utilizar con ligereza los términos técnicos. Frase como “una fuerza realiza trabajo”, “se realiza trabajo para mover una ...”, o semejantes, han de corregirse continuamente para cambiarlas por “un agente (o un cuerpo) realiza trabajo sobre un agente...” El hecho de que dos cuerpos interaccionan nunca debe obviarse. En el contexto de las leyes de Newton ese tipo de interacciones conforman la base fundamental sobre la que descansa tanto el concepto de fuerza, como el de trabajo.

IV. RESULTADOS

Como se describió en la sección de metodología, se aplica el examen de diagnóstico a los grupos de control y a los grupos experimentales al inicio y al final del ciclo escolar

Acerca de la enseñanza-aprendizaje de los conceptos de Fuerza y Trabajo correspondiente (un semestre). Los resultados de la primera parte del examen así obtenidos se encuentran resumidos en la tabla I. Los factores de Hake para estos resultados son:

Grupos experimentales: 0.39
Grupos de control: 0.14

Puede observarse que en los grupos experimentales hubo un aumento del 82.8% en el promedio de respuestas correctas, mientras que en los grupos de control se observa un aumento del 37%. Aunque para los grupos experimentales es un buen aumento, todavía no alcanza niveles completamente satisfactorios, ya que en términos de acreditación grupal, obtienen una calificación de 58.6, que en una escala estándar de 0 a 100, continúa siendo reprobatoria.

En cuanto al factor de Hake, se observa que el valor obtenido para los grupos experimentales cae dentro del intervalo reportado en la literatura como un valor satisfactorio. El modelo de enseñanza es, entonces, adecuado dentro de parámetros estandarizados aceptados.

En cuanto a la segunda parte del examen de diagnóstico referente al concepto de trabajo, se observa que en los problemas numérico conceptuales los grupos experimentales mejoraron notablemente su desempeño en cuanto a la forma de plantear y proponer la solución del problema; es decir, mostraron una mejor capacidad de análisis de la situación, con lo que en algunos casos pudieron emitir hipótesis que los guiaron en la aplicación de conceptos y ecuaciones. En estos aspectos, los estudiantes de los grupos de control continuaron con su aplicación mecánica y rutinaria de fórmulas; no se observa, en general, un avance significativo en la forma de abordar y resolver problemas. Por ejemplo, en uno de los problemas de la segunda parte del examen, se pide calcular el trabajo realizado por el agente que aplica una fuerza centrípeta sobre un objeto, mientras éste describe una circunferencia de radio R y da una vuelta completa en 1 s. La respuesta es cero, sin necesidad de realizar cálculos; sin embargo cerca del 65% de los estudiantes de control realizó el cálculo con la ecuación $W = Fd$, utilizando el perímetro (la longitud de la circunferencia) para la distancia d en el postest.

TABLA I. Resultados de pretest y postest para los grupos experimentales y los grupos de control.

	Grupos experimentales		Grupos de control	
	Media	Desv. Std.	Media	Desv. Std.
Pretest	9.3	2.5	8.3	2.4
Postest	17.0	2.7	11.4	2.6

VI. CONCLUSIONES

Uno de los problemas clave en la enseñanza de las ciencias es la manera en que los cursos pueden utilizarse para que los y las estudiantes desarrollen habilidades de pensamiento y hábitos intelectuales básicos. Para un país como el nuestro,

lograr esto ha de convertirse en una prioridad impostergable, dados los pobres resultados obtenidos en el examen internacional del PISA de la OCDE [21].

En este trabajo se ha presentado una metodología de concepción cuyos resultados son acordes a los estándares encontrados en la literatura. Los resultados de su aplicación en estudiantes de primer ingreso al nivel superior son satisfactorios, también de acuerdo con el instrumento de medición representado por el factor de Hake, además de que cualitativamente, se observa que el método presenta ventajas sobre la enseñanza tradicional de los conceptos a que nos referimos en el presente estudio.

El método, tanto como la concepción, puede aplicarse directamente a cursos de nivel secundario y bachillerato, ya que se ha diseñado para cursos en los que no se utiliza cálculo. Se cree que podría mejorar notablemente el desempeño académico de los y las estudiantes y evitaría el frecuente choque conceptual en el ingreso a la universidad.

REFERENCIAS

[1] Clement, J., *Students' preconceptions in introductory mechanics*, American Journal of Physics **50**, 66-71 (1982).
[2] Halloun, I. A. and Hestenes, D., *The initial knowledge state of college physics students*, American Journal of Physics **53**, 1043-1055 (1985).
[3] Hestenes, D., Wells, M. and Swackhamer, G., *Force Concept Inventory*, The Physics Teacher **30**, 141-158 (1992); Hestenes, D. and Wells, M., *A mechanics baseline test*, The Physics Teacher **30**, 159-166 (1992).
[4] Knight, R., *The Vector Knowledge of Beginning Physics Students*, The Physics Teacher **33**, 74-80 (1995).
[5] Knight, R., *Five Easy Lessons. Strategies for Successful Physics Teaching*. (Addison Wesley, San Francisco, USA. 2004)
[6] Jewett, J. W., *Energy and the confused student I: Work*, The Physics Teacher **46**, 38-43 (2008).

[7] Lara Barragán Gómez, A., Cerpa Cortés G. y Núñez Trejo, H., *Estudio analítico del rendimiento escolar en estudiantes de nuevo ingreso al nivel superior*, Reporte Interno, Departamento de Física, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara (2007).
[8] Bauman, R. P., *Physics that textbook writers usually get wrong: I. Work*, The Physics Teacher **30**, 264-269 (1992).
[9] Jordan, R. G., *Work reworked*, The Physics Teacher **40**, 526-527 (2002).
[10] Cohen, L. y Manion, L., *Métodos de investigación educativa*. (La muralla, Madrid, 1990)
[11] Walpole, R. E., Myers, R. H. y Myers, S. L., *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. (John Wiley and Sons, San Francisco, 1998)
[12] Redish, E. F. and Steinberg, R. N., *Teaching Physics: figuring out what works*, Physics Today **52**, 24-30 (1999).
[13] Julian, G.M., *Socratic dialog-with how many?*, The Physics Teacher **33**, 338-339 (1995).
[14] Touger, J.S., *When words fail us*, The Physics Teacher **29**, 90 ss (1991).
[15] Resnick, R., Halliday, D. y Krane, K. S., *Física, Volumen 1*. (Compañía Editorial Continental, México, p. 230, 2005).
[16] Hewitt, P. G., *Física Conceptual*. (Pearson Educación, 10a Ed., México, p. 111, 2007).
[17] Mallinckrodt, A. J. and Leff, H., *All about work*, American Journal of Physics **60**, 356-365 (1992).
[18] Sherwood, B. A., *Pseudowork and real work*, American Journal of Physics **51**, 597-602 (1983).
[19] Lawson, R. and McDermott, L. C., *Student understanding of the work-energy and impulse-momentum theorems*, American Journal of Physics **55**, 811-817 (1987).
[20] Mungan, C. E., *A primer on work-energy relationships for introductory physics*, The Physics Teacher **43**, 10-16 (2005).
[21] OECD (2007). *PISA 2006: Science competencies for tomorrow's world*. <www.oecd.org> Consultado el 20 de diciembre de 2007.



Conductividad térmica de una barra de cobre. Estudio experimental del transitorio

José A. Ibáñez, Francisco J. Abellán, Ramón P. Valerdi y José A. García Gamuz
Departamento de Física. Universidad de Murcia. Campus de Espinardo. 30071 Murcia.

E-mail: jaibanez@um.es

(Recibido el 4 de Julio de 2008, aceptado el 27 de Agosto de 2008)

Resumen

La propagación del calor a lo largo de una barra metálica debe tener en cuenta el proceso de conducción a lo largo de la misma, así como los procesos de pérdidas caloríficas por convección y radiación que tienen lugar a través de su superficie lateral. Se presenta un procedimiento de índole experimental, para determinar la conductividad térmica (k), así como las pérdidas laterales (h), en una barra metálica de sección circular, mediante el seguimiento del transitorio que se desencadena cuando se calienta uno de sus extremos. La aplicación de un método en diferencias finitas permite el manejo sencillo de la información obtenida y conduce a resultados en buen acuerdo con los que aparecen en la literatura.

Palabras clave: Conductividad térmica, diferencias finitas.

Abstract

In the propagation of the heat through a metallic bar, the process of conduction must be considered through itself, as well as the processes of heat loss due to convection and radiation, which take place through its lateral surface. An experimental procedure is shown, to determine the thermal conductivity (k), and the lateral losses coefficient (h) in a circular cross-section metallic bar, by means of the study of the transitory state arising when one of its ends is heated. This study is carried out applying a method of finite differences, that allows us the simple management of the information obtained, leading us to similar results to those cited in the literature.

Keywords: Thermal conductivity, finite differences.

PACS: 01.50.Kw, 01.50.Lc, 01.50.Pa, 01.50.My

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

El problema de la conducción del calor en sólidos ha sido ampliamente estudiado, estando disponibles soluciones para el mismo, bajo diversas condiciones de contorno, formas y dimensiones. En éste artículo fijamos nuestra atención sobre un sistema unidimensional (barra de cobre aislada lateralmente) y para él resolvemos numéricamente la ecuación diferencial en derivadas parciales que gobierna el campo térmico en la barra, a lo largo del transitorio que se genera tras poner en contacto uno de sus extremos con un foco de calor. Otros autores, han abordado el problema de forma más elemental [1], mediante el empleo de un procedimiento iterativo que evita el manejo de la ecuación diferencial del campo.

En los laboratorios de prácticas de Termodinámica, es frecuente el estudio de fenómenos de transporte de calor en diferentes sistemas, concretamente en barras metálicas con y sin aislamiento lateral. En el primer caso, se suele suponer el carácter perfecto del aislante prescindiendo por completo de las pérdidas laterales. Nuestro trabajo está orientado a alumnos de un primer curso de Termodinámica en los estudios de la Licenciatura de Física y de las

Ingenierías Industrial y Química y en él se presenta un procedimiento experimental que tiene en cuenta tales pérdidas laterales y permite su evaluación junto con la determinación de la conductividad térmica, sobre la base de un modelo sencillo que aproxima el estudio del transitorio que se genera al calentar uno de los extremos de la barra, mediante aproximaciones con diferencias finitas.

En el apartado II desarrollamos un breve modelo teórico que conduce a la ecuación diferencial que gobierna el campo térmico en una barra de sección circular. En el apartado III se muestra el dispositivo experimental empleado, mientras que en el apartado IV se da cuenta del manejo de las medidas realizadas recurriendo a aproximaciones en diferencias finitas para las derivadas involucradas, mostrando también tablas y gráficos para la temperatura que corresponden al estudio del transitorio. Por último, el apartado V recoge los resultados obtenidos para la conductividad y el coeficiente de pérdidas laterales.

II. MODELO TEORICO

En el estudio de la propagación del calor en una barra metálica se debe tener en cuenta el proceso de

conducción a lo largo de la misma, así como los procesos de pérdidas caloríficas por convección y radiación que tienen lugar a través de su superficie lateral. A tal efecto se considerará un elemento infinitesimal de barra, con volumen dV y espesor dx , siendo su sección constante S , como se muestra en la Figura 1.

La cantidad de calor absorbido por el elemento considerado en un intervalo de tiempo dx , será igual a la diferencia de valores entre el calor que recibe por conducción a través de su sección recta S en x y la que cede a través de su sección recta S en $x+dx$, que de acuerdo con la fórmula de Fourier [1].

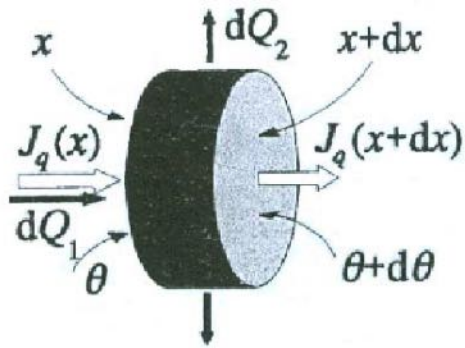


FIGURA 1. Conducción a través de un elemento de barra.

$$\bar{J}_q^* = \frac{dQ}{dt} = -kS \text{grad} \theta, \quad (1)$$

siendo \bar{J}_q^* la corriente calorífica en la dirección longitudinal de la barra en la posición x de la misma, de donde se sigue

$$dQ_1 = -\pi r^2 k \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_x - \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x+dx} \right] dt, \quad (2)$$

donde k es la conductividad térmica y siendo θ la temperatura en el punto genérico de la barra, de abscisa x (tomando el eje OX a lo largo de la barra y con el origen en el extremo más caliente de la misma) y donde r representa el radio de la misma.

La ecuación (2) mediante desarrollo por la fórmula de Taylor se puede expresar como

$$dQ_1 = \pi r^2 k \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right)_x dx dt. \quad (3)$$

El elemento de volumen considerado experimentará unas pérdidas caloríficas a través de su superficie lateral, por convección y radiación, descritas por la ley empírica de Newton, que para una temperatura del ambiente, θ_a , a la que se encuentra la barra, establece que la cantidad de calor que fluye hacia el exterior a través de las paredes laterales del elemento de volumen dV considerado en un intervalo de tiempo dt , es

$$dQ_2 = -h(\theta - \theta_a) 2\pi r dx dt, \quad (4)$$

siendo h un parámetro que solo depende de la geometría del cuerpo y que recibe el nombre de coeficiente de pérdidas laterales.

La suma $dQ_1 + dQ_2$ representa la energía calorífica neta que recibe el elemento de volumen dV , de modo que si el incremento de temperatura que experimenta el mismo durante un tiempo dt es $d\theta$, se puede escribir

$$dQ_1 + dQ_2 = c\rho\pi r^2 dx d\theta, \quad (5)$$

donde se ha tenido en cuenta que $dV = \pi r^2 dx$, siendo c y ρ el calor específico y la densidad de la barra, respectivamente.

Sustituyendo las ecuaciones (3) y (4) en la ecuación (5) se obtiene [2, 3]

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{c\rho}{k} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{2h}{kr} (\theta - \theta_a), \quad (6)$$

ecuación diferencial en derivadas parciales, cuya resolución conduce al campo térmico $\theta = \theta(x, t)$ en una barra de sección circular, con radio r . La ecuación anterior se puede escribir en la forma:

$$Y = KX + H \left\{ \begin{array}{l} Y = T''/T, \text{ con } T'' = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ X = \dot{T}/T, \text{ con } \dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} \end{array} \right\} T = \theta - \theta_a, \quad (7)$$

donde $K = \rho c/k$, y $H = 2h/rk$, con ρ densidad del material de la barra y c calor específico del mismo. El ajuste de los valores de Y frente a los de X , permitirá el cálculo de K y H , y por tanto de k y h .

III. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

En una barra de cobre de 48 cm de longitud, con una sección recta circular de 2 cm de diámetro, se sitúan sensores térmicos tipo semiconductor, cada 6 cm, lo que permite el seguimiento del transitorio que se origina, cuando se calienta uno de los extremos, merced a la acción de una resistencia eléctrica albergada en él, en tanto que el otro extremo penetra en un baño de agua, aislado térmicamente. La lectura de las diferentes temperaturas se visualiza en un dispositivo de medida, con salida digital, que permite la captación y registro de datos, mediante un programa informático, con el que se puede fijar el intervalo de tiempo deseado para el almacenamiento de las medidas (Figura 2). De esta forma, se consigue una recopilación de datos del tipo mostrado en la Tabla I, donde T_{ij} representa la diferencia entre la temperatura en la posición x_j de la barra en el instante t_i , y a la temperatura ambiente θ_a .



FIGURA 2. Montaje experimental en el que puede verse la resistencia calefactora extraída de la barra y colocada sobre el extremo izquierdo de la misma y el vaso Dewar en el que entra el extremo derecho de ésta.

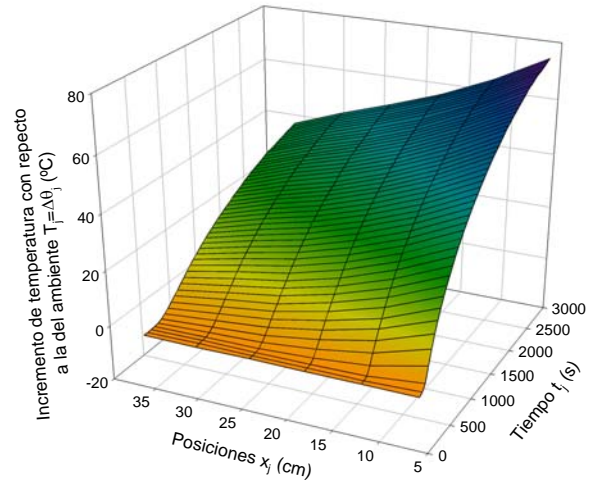


FIGURA 3. Evolución espacio-temporal de la temperatura en una barra de cobre, con aislamiento lateral.

IV. MANEJO DE LAS MEDIDAS

La gráfica de la Figura 3, muestra la evolución espacio-temporal de la temperatura en la barra, cuando ésta se aísla lateralmente con *armaflex* y se hace un seguimiento del transitorio durante 3000 s, con las lecturas registradas cada minuto, recogiéndose en la Tabla I del minuto 15 en adelante.

Para el manejo de la ecuación (7), recurriremos a aproximar las derivadas implicadas, mediante incrementos finitos, y así para cada instante t_j en la posición x_i

$$\left\{ \begin{aligned} T''_{ji} &= \frac{T(x_i + 2\Delta x, t_j) - 2T(x_i + \Delta x, t_j) + T(x_i, t_j)}{(\Delta x)^2}; Y_{ji} = \frac{T''_{ji}}{T_{ji}} \\ \dot{T}_{ji} &= \frac{T(x_i, t_j + \Delta t) - T(x_i, t_j)}{\Delta t}; X_{ji} = \frac{\dot{T}_{ji}}{T_{ji}} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

lo que permite construir la Tabla II. El carácter relativo respecto de T_{ij} , de Y_{ij} y X_{ij} , hace que para valores pequeños de T_{ij} , los valores de estas magnitudes se dispersen mucho, lo que se evita prescindiendo de los datos correspondientes a los 15 primeros minutos del experimento (en nuestro caso).

TABLA I. Tabla tipo para la recogida de datos T_{ij} , donde x_j es la distancia entre el punto de registro i -ésimo y el extremo caliente de la barra ($\Delta x = x_{i+1} - x_i = 6 \text{ cm}$).

Tiempo (s) ↓	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	← Posición (cm)	Temp baño (°C)
t_i	T_{i1}	T_{i2}	T_{i3}	T_{i4}	T_{i5}	T_{i6}	$T_{\theta} = \theta(x_i, t_i) - \theta_a$ (°C)	θ (H ₂ O)
registros para Tabla I (bis)							registros para Tabla VII	

TABLA I (bis). Valores numéricos de los incrementos térmicos en relación al ambiente en cada uno de los puntos de registro, a partir del minuto 15 desde el inicio. Temperatura ambiente: 21,4 °C y tiempo entre medidas: 60 s.

Tiempo (t_j) (s)	T_{i1}	T_{i2}	T_{i3}	T_{i4}	T_{i5}	T_{i6}
887,0000	41,4000	32,6000	25,7000	20,5000	17,0000	13,0000
946,0000	43,1000	34,2000	27,4000	22,0000	18,3000	14,1000
1005,0000	44,8000	35,9000	29,0000	23,4000	19,6000	15,3000
1064,0000	46,4000	37,5000	30,5000	24,8000	20,9000	16,4000
1123,0000	48,0000	39,0000	32,0000	26,2000	22,1000	17,5000
1182,0000	49,4000	40,3000	33,2000	27,5000	23,3000	18,5000
1241,0000	50,9000	41,7000	34,6000	28,8000	24,5000	19,4000
1300,0000	52,2000	43,1000	35,8000	29,9000	25,6000	20,4000
1359,0000	53,6000	44,4000	37,0000	31,1000	26,6000	21,4000
1418,0000	54,9000	45,6000	38,2000	32,1000	27,6000	22,1000
1477,0000	56,1000	46,8000	39,4000	33,2000	28,6000	23,0000
1536,0000	57,3000	47,8000	40,2000	34,2000	29,5000	23,8000

1595,0000	58,3000	48,8000	41,2000	35,1000	30,2000	24,5000
1654,0000	59,3000	49,9000	42,2000	35,9000	31,1000	25,5000
1713,0000	60,4000	50,9000	43,0000	36,7000	32,0000	26,2000
1772,0000	61,4000	51,8000	44,3000	37,9000	32,9000	26,9000
1832,0000	62,6000	53,0000	44,9000	38,9000	33,8000	27,6000
1891,0000	63,4000	54,0000	45,9000	39,6000	34,6000	28,4000
1950,0000	64,3000	54,8000	46,8000	40,4000	35,4000	29,1000
2009,0000	65,1000	55,6000	47,5000	41,3000	36,1000	29,7000
2068,0000	65,9000	56,3000	48,4000	42,0000	36,7000	30,3000
2127,0000	66,7000	57,2000	49,1000	42,7000	37,4000	30,9000
2186,0000	67,4000	57,8000	49,7000	43,4000	37,7000	31,4000
2245,0000	68,2000	58,3000	50,4000	43,9000	38,4000	32,0000
2304,0000	68,9000	59,1000	50,9000	44,4000	39,1000	32,6000
2363,0000	69,8000	60,0000	51,7000	45,2000	39,8000	33,3000
2422,0000	70,5000	60,6000	52,2000	45,7000	40,2000	33,5000
2481,0000	70,8000	60,9000	52,7000	46,4000	40,7000	33,8000
2540,0000	71,5000	61,5000	53,8000	47,2000	41,3000	34,3000
2600,0000	72,1000	62,1000	54,4000	47,7000	41,9000	34,8000
2659,0000	72,5000	62,6000	54,8000	48,1000	42,3000	35,2000
2718,0000	72,7000	63,1000	55,2000	48,5000	42,7000	35,6000
2777,0000	73,2000	63,3000	55,9000	49,0000	43,1000	36,1000
2836,0000	73,6000	63,8000	56,3000	49,5000	43,4000	36,4000
2895,0000	74,2000	64,2000	56,5000	49,7000	43,7000	36,8000
2954,0000	74,6000	64,7000	56,6000	50,1000	44,1000	37,3000

TABLA II. Valores relevantes de los parámetros Y_{ji} y X_{ji} para el cálculo de los valores de H y K con intervalo $\Delta x=6$ cm.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
t_i	Y_{i1}	Y_{i2}	Y_{i3}	Y_{i4}		
	X_{i1}	X_{i2}	X_{i3}	X_{i4}	X_{i5}	X_{i6}

TABLA II (bis). Valores numéricos de los parámetros Y_{ji} y X_{ji} correspondientes a cinco minutos de calentamiento, a partir del minuto 15.

$t(s)$	cm^{-2}				s^{-1}			
	$(T_1^*/T_1) \times 10^3$	$(T_2^*/T_2) \times 10^3$	$(T_3^*/T_3) \times 10^3$	$(T_4^*/T_4) \times 10^3$	$(\dot{T}_1/T_1) \times 10^3$	$(\dot{T}_2/T_2) \times 10^3$	$(\dot{T}_3/T_3) \times 10^3$	$(\dot{T}_4/T_4) \times 10^3$
887,0	1,2748e-3	1,4485e-3	1,8374e-3	-1,5244e-3	6,9598e-4	8,3186e-4	1,1212e-3	1,2402e-3
946,0	1,3534e-3	1,1371e-3	1,7234e-3	-1,4205e-3	6,6853e-4	8,4250e-4	9,8973e-4	1,0786e-3
1005,0	1,2401e-3	1,0059e-3	1,7241e-3	-1,3355e-3	6,0533e-4	7,5539e-4	8,7668e-4	1,0141e-3
1064,0	1,1375e-3	9,6296e-4	1,6393e-3	-1,5121e-3	5,8445e-4	6,7797e-4	8,3356e-4	9,5681e-4
1123,0	1,1574e-3	8,5470e-4	1,4757e-3	-1,1927e-3	4,9435e-4	5,6497e-4	6,3559e-4	8,4099e-4
1182,0	1,1246e-3	9,6498e-4	1,2550e-3	-1,3636e-3	5,1465e-4	5,8880e-4	7,1472e-4	8,0123e-4

La evolución temporal de las temperaturas en puntos equidistantes de la barra de cobre se refleja en la Figura 4 que corresponde a los cortes paralelos a la superficie dada en la Figura 3 en planos paralelos al plano coordenado (T_j, t_i) para las diferentes posiciones x_i ($i=1,\dots,6$) y para el vaso Dewar. La Figura 5 recoge la evolución temporal de

la temperatura a lo largo de la barra, a intervalos de 10 minutos entre 0 y 50 minutos y corresponde a los cortes de la superficie de la Figura 2 con planos paralelos al plano coordenado (T_j, x_j) , para los instantes indicados, cuyos valores aparecen recogidos en la Tabla III.

TABLA III. Evolución temporal de los incrementos de temperatura a lo largo de una barra de cobre.

Posiciones x_j (cm)	Incrementos de temp. T (°C), (tiempo (min))					
	$T(0)$	$T(10)$	$T(20)$	$T(30)$	$T(40)$	$T(50)$
6,0	-0,9	30,6	49,4	61,4	70,5	74,6
12,0	-0,8	22,5	40,3	51,8	60,6	64,7
18,0	-0,8	16,4	33,2	44,3	52,2	56,6
24,0	-0,6	11,9	27,5	37,9	45,7	50,1
30,0	-0,8	9,1	23,3	32,9	40,2	44,1
36,0	-0,6	6,2	18,5	26,9	33,5	37,3

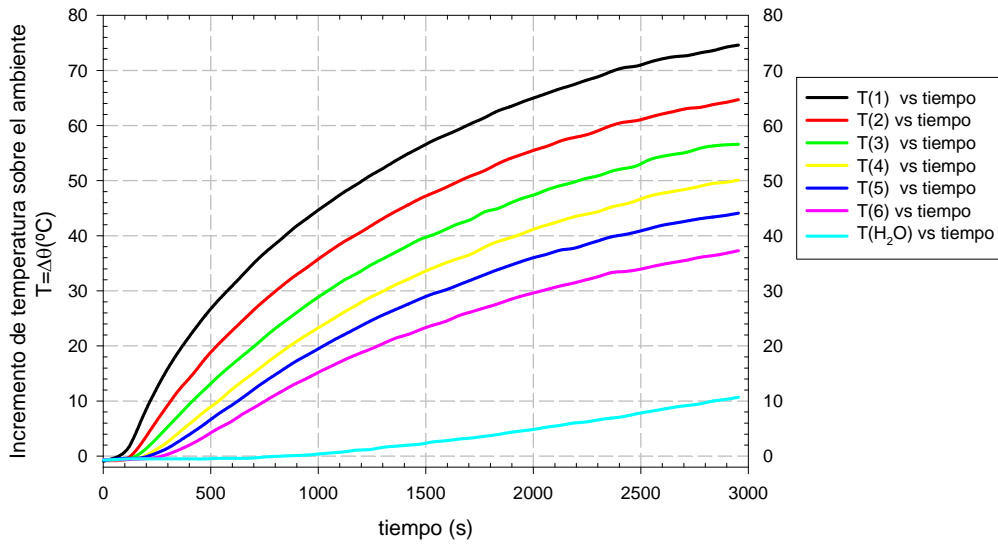


FIGURA 4. Evolución temporal de las temperaturas en puntos equidistantes de una barra de cobre, con aislamiento lateral.

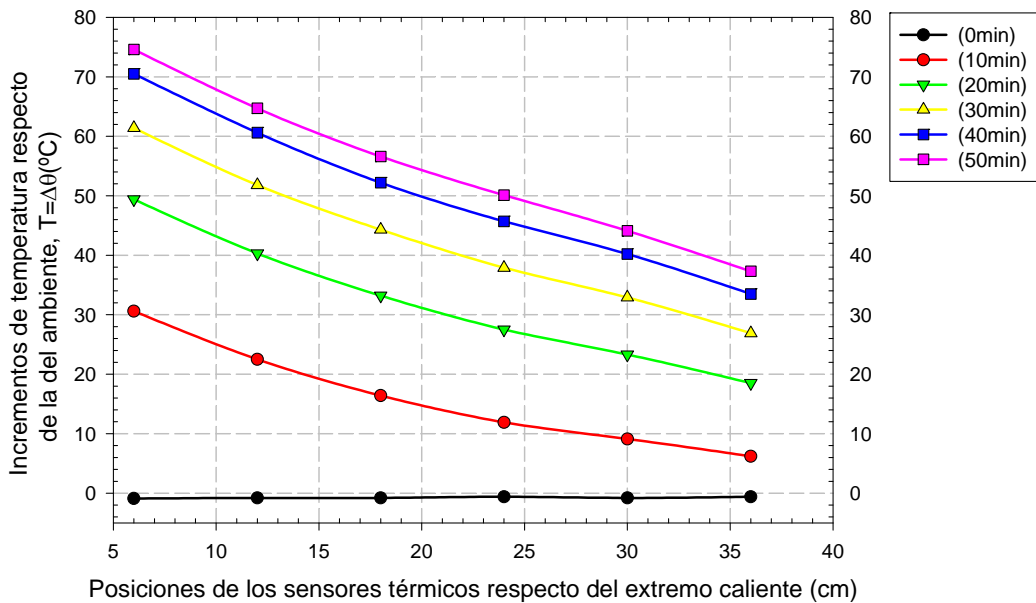


FIGURA 5. Evolución temporal de los incrementos de temperatura a lo largo de una barra de cobre, con aislamiento lateral.

Por otra parte, como los errores de \dot{T}_{ij} y T_{ij}'' son inversamente proporcionales, respectivamente, a Δt y a $(\Delta x)^2$, interesa fijar adecuadamente el valor de estos parámetros. Por este motivo resulta conveniente fijar un intervalo temporal de registro no demasiado pequeño y que en nuestro caso ha sido de 1 min. En cuanto a Δx , el

intervalo de 6 cm fijado “a priori” introduce demasiado error, por lo que se optó por duplicarlo, de modo que los datos a manejar, son los recogidos en las Tablas IV, IV (bis), V y V (bis).

TABLA IV. Valores relevantes de los parámetros Y_{ji} y X_{ji} para el cálculo de los valores de H y K con intervalo $\Delta x=12$ cm (posiciones impares).

	x_1		x_3		x_5	
t_i	Y_{i1}	X_{i1}		X_{i3}		X_{i5}

TABLA IV (bis). Valores numéricos de los parámetros Y_{ji} y X_{ji} para el cálculo de los valores de H y K con intervalo $\Delta x=12$ cm, a partir del minuto 15 (posiciones impares).

$t(s)$	$(T_1^-/T_1) \times 10^3 \text{ (cm}^{-2}\text{)}$	$(\dot{T}_1/T_1) \times 10^3 \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$(\dot{T}_3/T_3) \times 10^3 \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$(\dot{T}_5/T_5) \times 10^3 \text{ (s}^{-1}\text{)}$
887,0000	1,1742e-3	6,8438e-4	1,1025e-3	1,2745e-3
946,0000	1,0634e-3	6,5739e-4	9,7324e-4	1,1840e-3
1005,0000	9,9206e-4	5,9524e-4	8,6207e-4	1,1054e-3
1064,0000	9,4289e-4	5,7471e-4	8,1967e-4	9,5694e-4
1123,0000	8,8252e-4	4,8611e-4	6,2500e-4	9,0498e-4
1182,0000	8,8563e-4	5,0607e-4	7,0281e-4	8,5837e-4
1241,0000	8,4589e-4	4,2567e-4	5,7803e-4	7,4830e-4
1300,0000	8,2482e-4	4,4700e-4	5,5866e-4	6,5104e-4
1359,0000	8,0328e-4	4,0423e-4	5,4054e-4	6,2657e-4
1418,0000	7,7160e-4	3,6430e-4	5,2356e-4	6,0386e-4
1477,0000	7,3034e-4	3,5651e-4	3,3841e-4	5,2448e-4
1536,0000	7,7564e-4	2,9087e-4	4,1459e-4	3,9548e-4
1595,0000	7,2661e-4	2,8588e-4	4,0453e-4	4,9669e-4
1654,0000	7,0264e-4	3,0916e-4	3,1596e-4	4,8232e-4
1713,0000	7,3584e-4	2,7594e-4	5,0388e-4	4,6875e-4
1772,0000	6,4468e-4	3,2573e-4	2,2573e-4	4,5593e-4
1832,0000	7,3216e-4	2,1299e-4	3,7120e-4	3,9448e-4
1891,0000	6,7911e-4	2,3659e-4	3,2680e-4	3,8536e-4
1950,0000	6,5880e-4	2,0736e-4	2,4929e-4	3,2957e-4
2009,0000	6,6138e-4	2,0481e-4	3,1579e-4	2,7701e-4
2068,0000	6,1120e-4	2,0233e-4	2,4105e-4	3,1789e-4
2127,0000	6,1428e-4	1,7491e-4	2,0367e-4	1,3369e-4
2186,0000	5,8729e-4	1,9782e-4	2,3474e-4	3,0946e-4
2245,0000	5,9058e-4	1,7107e-4	1,6534e-4	3,0382e-4
2304,0000	6,2490e-4	2,1771e-4	2,6195e-4	2,9838e-4
2363,0000	6,1684e-4	1,6714e-4	1,6119e-4	1,6750e-4
2422,0000	6,2057e-4	7,0922e-5	1,5964e-4	2,0730e-4
2481,0000	5,9832e-4	1,6478e-4	3,4788e-4	2,4570e-4
2540,0000	5,0505e-4	1,3986e-4	1,8587e-4	2,4213e-4
2600,0000	5,0085e-4	9,2464e-5	1,2255e-4	1,5911e-4
2659,0000	4,9808e-4	4,5977e-5	1,2165e-4	1,5760e-4
2718,0000	4,7761e-4	1,1463e-4	2,1135e-4	1,5613e-4
2777,0000	4,2691e-4	9,1075e-5	1,1926e-4	1,1601e-4
2836,0000	4,1516e-4	1,3587e-4	5,9207e-5	1,1521e-4
2895,0000	4,5860e-4	8,9847e-5	2,9499e-5	1,5256e-4
2954,0000	5,1199e-4	--	--	--

TABLA V. Valores relevantes de los parámetros Y_{ji} y X_{ji} para el cálculo de los valores de H y K con intervalo $\Delta x=12$ cm (posiciones pares).

	x_2		x_4		x_6	
t_i	Y_{i2}	X_{i2}		X_{i4}		X_{i6}

TABLA V (bis). Valores numéricos de los parámetros Y_{ji} y X_{ji} para el cálculo de los valores de H y K con intervalo $\Delta x=12$ cm, a partir del minuto 15 (posiciones pares).

$t(s)$	$(T_2^-/T_2) \times 10^3 \text{ (cm}^{-2}\text{)}$	$(\dot{T}_2/T_2) \times 10^3 \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$(\dot{T}_4/T_4) \times 10^3 \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$(\dot{T}_6/T_6) \times 10^3 \text{ (s}^{-1}\text{)}$
887,0000	9,7989e-4	8,1800e-4	1,2195e-3	1,4103e-3
946,0000	8,7313e-4	8,2846e-4	1,0606e-3	1,4184e-3
1005,0000	8,5113e-4	7,4280e-4	9,9715e-4	1,1983e-3
1064,0000	7,9630e-4	6,6667e-4	9,4086e-4	1,1179e-3
1123,0000	7,3006e-4	5,5556e-4	8,2697e-4	9,5238e-4
1182,0000	6,5481e-4	5,7899e-4	7,8788e-4	8,1081e-4
1241,0000	5,8287e-4	5,5955e-4	6,3657e-4	8,5911e-4
1300,0000	5,9616e-4	5,0271e-4	6,6890e-4	8,1699e-4
1359,0000	5,6306e-4	4,5045e-4	5,3591e-4	5,4517e-4
1418,0000	5,3302e-4	4,3860e-4	5,7113e-4	6,7873e-4

1477,0000	5,0451e-4	3,5613e-4	5,0201e-4	5,7971e-4
1536,0000	4,6490e-4	3,4868e-4	4,3860e-4	4,9020e-4
1595,0000	4,4114e-4	3,7568e-4	3,7987e-4	6,8027e-4
1654,0000	5,0100e-4	3,3400e-4	3,7140e-4	4,5752e-4
1713,0000	5,0480e-4	2,9470e-4	5,4496e-4	4,4529e-4
1772,0000	3,8878e-4	3,8610e-4	4,3975e-4	4,3371e-4
1832,0000	3,6688e-4	3,1447e-4	2,9991e-4	4,8309e-4
1891,0000	4,1152e-4	2,4691e-4	3,3670e-4	4,1080e-4
1950,0000	3,9284e-4	2,4331e-4	3,7129e-4	3,4364e-4
2009,0000	3,3723e-4	2,0983e-4	2,8249e-4	3,3670e-4
2068,0000	3,2070e-4	2,6643e-4	2,7778e-4	3,3003e-4
2127,0000	3,2780e-4	1,7483e-4	2,7322e-4	2,6969e-4
2186,0000	2,8835e-4	1,4418e-4	1,9201e-4	3,1847e-4
2245,0000	2,9779e-4	2,2870e-4	1,8983e-4	3,1250e-4
2304,0000	3,4076e-4	2,5381e-4	3,0030e-4	3,5787e-4
2363,0000	3,3565e-4	1,6667e-4	1,8437e-4	1,0010e-4
2422,0000	3,0941e-4	8,2508e-5	2,5529e-4	1,4925e-4
2481,0000	2,1666e-4	1,6420e-4	2,8736e-4	2,4655e-4
2540,0000	1,5808e-4	1,6260e-4	1,7655e-4	2,4295e-4
2600,0000	1,6774e-4	1,3419e-4	1,3976e-4	1,9157e-4
2659,0000	1,7749e-4	1,3312e-4	1,3860e-4	1,8939e-4
2718,0000	1,8709e-4	5,2826e-5	1,7182e-4	2,3408e-4
2777,0000	1,5359e-4	1,3165e-4	1,7007e-4	1,3850e-4
2836,0000	1,3062e-4	1,0449e-4	6,7340e-5	1,8315e-4
2895,0000	1,7307e-4	1,2980e-4	1,3414e-4	2,2645e-4
2954,0000	1,9320e-4	--	--	--

Los valores recogidos en la Tabla VI corresponden a las siguientes magnitudes, cuyas cuantías se obtienen de los valores registrados en las Tablas IV (bis) y V (bis)

columna 2: derivada segunda espacial relativa de T	Promedio de los valores de esta magnitud en Tablas IV(bis) y V(bis)
columna 3: derivada primera temporal relativa de T	Promedio por filas de los valores de esta magnitud en Tabla IV(bis)
columna 4: derivada primera temporal relativa de T	Promedio por filas de los valores de esta magnitud en Tabla V(bis)
columna 5: valor medio de la derivada primera temporal relativa de T	Promedio por filas de las columnas 3 y 4 anteriores (Tabla VII)

TABLA VI. Valores numéricos de los promedios de los parámetros Y_{ji} y X_{ji} para el cálculo de los valores de H y K con intervalo $\Delta x=12$ cm, a partir del minuto 15.

$t(s)$	$Y=(T''/T) \times 10^3$ (cm ⁻²)	$(\dot{T}/T)_{(media1)} \times 10^3$	$(\dot{T}/T)_{(media2)} \times 10^3$	$X=(\ddot{T}/T) \times 10^3$ (s ⁻¹)
887,0000	1,0770e-3	1,0205e-3	1,1493e-3	1,0849e-3
946,0000	9,6828e-4	9,3820e-4	1,1025e-3	1,0203e-3
1005,0000	9,2160e-4	8,5425e-4	9,7940e-4	9,1683e-4
1064,0000	8,6959e-4	7,8377e-4	9,0847e-4	8,4612e-4
1123,0000	8,0629e-4	6,7203e-4	7,7830e-4	7,2517e-4
1182,0000	7,7022e-4	6,8908e-4	7,2589e-4	7,0749e-4
1241,0000	7,1438e-4	5,8400e-4	6,8508e-4	6,3454e-4
1300,0000	7,1049e-4	5,5223e-4	6,6287e-4	6,0755e-4
1359,0000	6,8317e-4	5,2378e-4	5,1051e-4	5,1714e-4
1418,0000	6,5231e-4	4,9724e-4	5,6282e-4	5,3003e-4
1477,0000	6,1743e-4	4,0646e-4	4,7928e-4	4,4287e-4
1536,0000	6,2027e-4	3,6698e-4	4,2582e-4	3,9640e-4
1595,0000	5,8387e-4	3,9570e-4	4,7861e-4	4,3715e-4
1654,0000	6,0182e-4	3,6914e-4	3,8764e-4	3,7839e-4
1713,0000	6,2032e-4	4,1619e-4	4,2832e-4	4,2225e-4
1772,0000	5,1673e-4	3,3580e-4	4,1985e-4	3,7783e-4
1832,0000	5,4952e-4	3,2622e-4	3,6582e-4	3,4602e-4
1891,0000	5,4532e-4	3,1625e-4	3,3147e-4	3,2386e-4

1950,0000	5,2582e-4	2,6207e-4	3,1941e-4	2,9074e-4
2009,0000	4,9930e-4	2,6587e-4	2,7634e-4	2,7110e-4
2068,0000	4,6595e-4	2,5376e-4	2,9141e-4	2,7258e-4
2127,0000	4,7104e-4	1,7076e-4	2,3925e-4	2,0500e-4
2186,0000	4,3782e-4	2,4734e-4	2,1822e-4	2,3278e-4
2245,0000	4,4419e-4	2,1341e-4	2,4368e-4	2,2854e-4
2304,0000	4,8283e-4	2,5935e-4	3,0399e-4	2,8167e-4
2363,0000	4,7624e-4	1,6528e-4	1,5038e-4	1,5783e-4
2422,0000	4,6499e-4	1,4595e-4	1,6235e-4	1,5415e-4
2481,0000	4,0749e-4	2,5279e-4	2,3270e-4	2,4275e-4
2540,0000	3,3157e-4	1,8929e-4	1,9404e-4	1,9166e-4
2600,0000	3,3429e-4	1,2471e-4	1,5518e-4	1,3994e-4
2659,0000	3,3779e-4	1,0841e-4	1,5370e-4	1,3106e-4
2718,0000	3,3235e-4	1,6070e-4	1,5291e-4	1,5681e-4
2777,0000	2,9025e-4	1,0878e-4	1,4674e-4	1,2776e-4
2836,0000	2,7289e-4	1,0343e-4	1,1833e-4	1,1088e-4
2895,0000	3,1583e-4	9,0634e-5	1,6346e-4	1,2705e-4
2954,0000	3,5259e-4	--	--	--

$$k=1,08\pm 0,04 \text{ cal s}^{-1}\text{cm}^{-1}\text{K}^{-1},$$

$$h=1,6\times 10^{-4} \text{ cal s}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

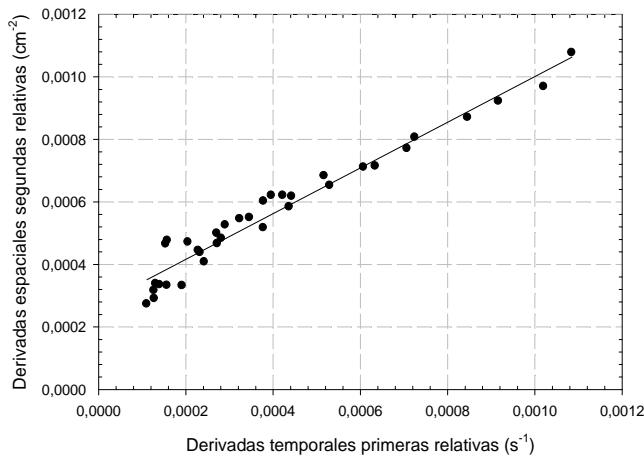


FIGURA 6. Ajuste de los datos correspondientes a la Tabla VII

V. RESULTADOS Y DISCUSION

La representación gráfica de los datos de Y frente a X recogidos en la Tabla VI (Figura 6) y el subsiguiente ajuste por mínimos cuadrados conduce a los siguientes resultados

$$K = \frac{\rho c}{k} = 0,7308 \frac{\text{cm}^{-2}}{\text{s}},$$

$$H = \frac{2h}{rk} = 2,7032 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2},$$

con un coeficiente de correlación $r=0,98$. Con estos resultados y habida cuenta de que para una temperatura ambiente media de $22,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($295,45 \text{ K}$), el valor de la densidad del cobre es $\rho=8,96 \text{ g/cm}^3$ y su calor específico sigue la fórmula [4] $c_p=22,6+10^{-2}T \text{ (J mol}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$, considerando que el peso atómico del cobre es $63,55 \text{ g/mol}$, se obtiene los siguientes resultados

El primer valor muestra un acuerdo que podemos considerar aceptable, con una discrepancia frente al valor tabulado [5] ($0,97 \text{ cal s}^{-1}\text{cm}^{-1}\text{K}^{-1}$) de un 10%, mientras que el segundo muestra unas pérdidas laterales prácticamente despreciables.

El valor de k también se puede deducir de la evolución térmica del agua del baño en contacto con la barra, habida cuenta que, el correspondiente balance calorífico en ausencia de pérdidas laterales, puede escribirse de forma aproximada como

$$Sk \frac{\Delta\theta}{L} = (mc + k^*) \frac{\Delta\theta_{(H_2O)}}{\Delta t}, \quad (9)$$

donde $\Delta\theta=T(1)-T(6)$ que corresponde a la diferencia de temperatura entre los puntos 1 y 6 de la barra en cierto instante t_i , L la longitud de la misma y S su sección recta, siendo m la masa del agua del baño (700 g), c su calor específico, con k^* el equivalente del conjunto calorimétrico (15 g), e $\Delta\theta_{(H_2O)}$ el cambio térmico del baño en el intervalo de tiempo Δt_i .

Conocido éste, siempre es posible para cada uno de los instantes considerados, determinar el cociente incremental en la forma

$$\frac{\Delta\theta_{(H_2O)}}{\Delta t} = \frac{\theta_{(H_2O)}(t + \Delta t) - \theta_{(H_2O)}(t)}{\Delta t}. \quad (10)$$

De ésta manera, para cada instante se puede obtener un valor de k , y proceder luego al promediado de los valores obtenidos. Los resultados correspondientes se recogen en la Tabla VII. El valor medio encontrado para k es $1,05 \text{ cal s}^{-1}\text{cm}^{-1}\text{K}^{-1}$ en buen acuerdo con el resultado antes obtenido.

TABLA VII. Valores obtenidos para los parámetros de la ecuación (10) correspondientes al calentamiento a partir del minuto 15, mostrando los valores de k para cada instante de tiempo.

$t(s)$	T_1 (°C)	T_6 (°C)	$(\Delta Q/L)*S$ (°C cm)	$\theta(H_2O)$ (°C)	$\Delta\theta(H_2O)/\Delta t$ (°C/s)	k_{fila} (cal s ⁻¹ cm ⁻¹ K ⁻¹)
887,0000	41,4000	13,0000	2,9740	22,1000	3,3333e-3	0,8014
946,0000	43,1000	14,1000	3,0369	22,3000	3,3333e-3	0,7848
1005,0000	44,8000	15,3000	3,0892	22,5000	3,3333e-3	0,7715
1064,0000	46,4000	16,4000	3,1416	22,7000	3,3333e-3	0,7586
1123,0000	48,0000	17,5000	3,1939	22,9000	5,0000e-3	1,1193
1182,0000	49,4000	18,5000	3,2358	23,2000	1,6667e-3	0,3683
1241,0000	50,9000	19,4000	3,2987	23,3000	6,6667e-3	1,4450
1300,0000	52,2000	20,4000	3,3301	23,7000	3,3333e-3	0,7157
1359,0000	53,6000	21,4000	3,3720	23,9000	5,0000e-3	1,0602
1418,0000	54,9000	22,1000	3,4348	24,2000	3,3333e-3	0,6939
1477,0000	56,1000	23,0000	3,4662	24,4000	6,6667e-3	1,3752
1536,0000	57,3000	23,8000	3,5081	24,8000	5,0000e-3	1,0191
1595,0000	58,3000	24,5000	3,5395	25,1000	5,0000e-3	1,0100
1654,0000	59,3000	25,5000	3,5395	25,4000	5,0000e-3	1,0100
1713,0000	60,4000	26,2000	3,5814	25,7000	5,0000e-3	0,9982
1772,0000	61,4000	26,9000	3,6128	26,0000	5,0000e-3	0,9895
1832,0000	62,6000	27,6000	3,6652	26,3000	6,6667e-3	1,3005
1891,0000	63,4000	28,4000	3,6652	26,7000	5,0000e-3	0,9754
1950,0000	64,3000	29,1000	3,6861	27,0000	5,0000e-3	0,9699
2009,0000	65,1000	29,7000	3,7071	27,3000	6,6667e-3	1,2858
2068,0000	65,9000	30,3000	3,7280	27,7000	5,0000e-3	0,9590
2127,0000	66,7000	30,9000	3,7490	28,0000	6,6667e-3	1,2715
2186,0000	67,4000	31,4000	3,7699	28,4000	5,0000e-3	0,9483
2245,0000	68,2000	32,0000	3,7909	28,7000	6,6667e-3	1,2574
2304,0000	68,9000	32,6000	3,8013	29,1000	5,0000e-3	0,9405
2363,0000	69,8000	33,3000	3,8223	29,4000	6,6667e-3	1,2471
2422,0000	70,5000	33,5000	3,8746	29,8000	6,6667e-3	1,2302
2481,0000	70,8000	33,8000	3,8746	30,2000	6,6667e-3	1,2302
2540,0000	71,5000	34,3000	3,8956	30,6000	6,6667e-3	1,2236
2600,0000	72,1000	34,8000	3,9060	31,0000	6,6667e-3	1,2203
2659,0000	72,5000	35,2000	3,9060	31,4000	6,6667e-3	1,2203
2718,0000	72,7000	35,6000	3,8851	31,8000	5,0000e-3	0,9202
2777,0000	73,2000	36,1000	3,8851	32,1000	8,3333e-3	1,5336
2836,0000	73,6000	36,4000	3,8956	32,6000	5,0000e-3	0,9177
2895,0000	74,2000	36,8000	3,9165	32,9000	6,6667e-3	1,2171
2954,0000	74,6000	37,3000	3,9060	33,3000	--	--

VI. CONCLUSIONES

El procedimiento expuesto para el estudio del transitorio en una barra metálica, calentada por uno de sus extremos, ha permitido la determinación simultánea del coeficiente de pérdidas laterales y de la conductividad térmica de la misma y se ha basado en la elaboración de una Tabla de temperaturas en puntos adecuadamente espaciados de la misma, para intervalos de tiempo suficientemente amplios. El manejo de los datos, mediante expresiones en incrementos finitos, permite reducir el problema a un simple ajuste lineal por mínimos cuadrados, de cuya pendiente y ordenada en el origen, se deduce la información deseada.

REFERENCIAS

- [1] Kinsler, M., Kinzel, E., *The Physics Teacher* **45**, 382-385 (2007).
- [2] Ortega, M. R., Ibáñez, J. A., *Lecciones de Física. Termología I* (DM, Murcia, 2003).
- [3] Díaz-Gilera, A., *Am. J. Phys.* **58**, 779-780 (1990).
- [4] DeHoff, R. T., *Thermodynamics in Materials Science*, (McGraw Hill, New York, 1993).
- [5] Benenson, W. *et al.*, *Handbook of Physics*, (Springer, New York, 2002).

Implementación del software DivYX en el laboratorio de Mecánica



Leonor Pérez-Trejo¹, Arturo F. Méndez Sánchez¹, Héctor A. González Flores²

¹Departamento de Física, Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional, Edif. 9 U. P. "Adolfo López Mateos" C. P. 073380, México D. F.

² Depto. de Física y Matemáticas de la Universidad de Monterrey, Av. Morones Prieto 4500 Pte., C.P. 66238, San Pedro Garza García. Nuevo León, México.

E-mail: leopt@esfm.ipn.mx; aptypo@hotmail.com; hgonzalez@udem.edu.mx

(Recibido el 3 de Septiembre de 2008; aceptado el 19 de Septiembre de 2008)

Resumen

En este trabajo se presenta una alternativa didáctica para el análisis de movimiento en una y dos dimensiones, como son movimiento con aceleración constante y tiro parabólico, a partir de la realización de experimentos sencillos y el uso del software DivYX[®]. Los experimentos propuestos fueron diseñados de tal manera que no requieren de equipo costoso ni involucran mucho tiempo en su desarrollo. Esto permite dedicar mayor tiempo al análisis e interpretación física de los resultados en una sola sesión. Asimismo, se muestran las ventajas de los dispositivos sugeridos en este trabajo y el uso de DivYX sobre los que usualmente se utilizan en un laboratorio de enseñanza.

Palabras clave: Prácticas de laboratorio, DivYX, movimiento con aceleración constante, tiro parabólico.

Abstract

A didactic alternative for analyzing movements in one and two dimensions like constant accelerated movement and parabolic movement is presented in this work. The purpose include simple experiments and the use of DivYX software. The experiments were designed in such a way they do not need expensive equipment and can be performed in a short time even in a classroom. The DivYX software implementation allows to spend more time in the analysis and interpretation of experimental data in a single session. Finally, the advantages of DivYX and the simple experiments proposed respect to those usually employed are shown.

Keywords: laboratory practices, DivYX, constant accelerated movement, parabolic movement.

PACS: 01.50.Lc, 01.50.Pa, 01.50.Ht, 07.05.Fb.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos de los cursos introductorios de laboratorio es el aprender a analizar los datos obtenidos de un experimento. Sin embargo, este objetivo a veces se ve opacado o se pierde, debido a que la instalación del arreglo experimental y el desarrollo del mismo experimento son complejos e involucran mucho tiempo lo cual implica que al final de la clase el alumno sólo obtiene una lista de datos experimentales y tiene que trabajar por su cuenta en el análisis de éstos. Además, en muchas ocasiones al graficar los datos experimentales, las curvas obtenidas no concuerdan con lo que se debería de obtener teóricamente, lo cual confunde al alumno al momento del análisis y de la interpretación física de ciertas constantes sin la orientación del profesor.

Por otro lado, el alto costo para instrumentar algunos experimentos de física, como en los casos de el Movimiento Rectilíneo Uniforme y Acelerado, hace casi imposible que se puedan realizar mediciones clásicas de

velocidad y movimiento en escuelas donde no se tiene la infraestructura necesaria, por lo que los alumnos se ven obligados a conformarse tan solo con la parte teórica, siendo la física una ciencia basada en la observación, experimentación y medición, es necesario que los estudiantes tengan experiencias significativas en el desarrollo de actividades experimentales.

El presente trabajo surge como una alternativa para realizar experimentos de bajo costo de implementación del dispositivo experimental y de tiempos cortos de realización. La propuesta consiste básicamente en grabar con una videocámara un experimento simple en una o dos dimensiones y después obtener los datos experimentales con ayuda de una PC y utilizando el software DivYX [1] diseñado para tal motivo. La videocámara puede sustituirse por una cámara digital o un teléfono celular, éste último es de uso común entre los estudiantes.

Los experimentos que se presentan corresponden a los cursos de laboratorio de mecánica en los primeros semestres de la licenciatura en física e ingenierías en los que se estudia el movimiento de una partícula en una y dos

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

dimensiones. Se muestran tres experimentos para el movimiento uniformemente acelerado y uno para tiro parabólico. En el desarrollo experimental se describe la manera en que se llevan a cabo estos experimentos de forma habitual en el laboratorio de Física correspondiente al primer semestre de la carrera Licenciatura en Física y Matemáticas que se imparte en la Escuela Superior de Física y Matemáticas (ESFM) del IPN, seguido de la descripción de los experimentos sugeridos y los detalles para la realización de los mismos utilizando una cámara de video y el posterior análisis con el software DivYX.

II. TEORIA

Para describir el movimiento de una partícula basta con especificar su posición, velocidad y aceleración. En un movimiento unidimensional y acelerado, la ecuación para la posición de la partícula como función del tiempo está dada por [2]:

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2, \quad (1)$$

en donde x_0 y v_0 son la posición y la velocidad al tiempo inicial, respectivamente y a es la aceleración de la partícula.

En particular para caída libre, la ecuación (1) se reduce a la siguiente ecuación:

$$y(t) = \frac{1}{2} g t^2, \quad (2)$$

en donde el cambio a $y(t)$ es debido a que el movimiento es en la dirección vertical y g es la aceleración debida a la gravedad.

En el caso de movimiento bidimensional, el ejemplo más usual es el movimiento de un proyectil, las ecuaciones que describen este movimiento son detalladas en diversos textos [2, 3, 4]. La manera más simple de analizar este movimiento es descomponerlo en un movimiento rectilíneo uniforme y un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. Las ecuaciones que describen el movimiento de un proyectil son:

$$x(t) = v_o \cos \theta, \quad (3)$$

$$y(t) = v_o \sin \theta - \frac{1}{2} g t^2, \quad (4)$$

$$y(x) = x \tan \theta - \frac{g}{2v_o^2 \cos^2 \theta} x^2, \quad (5)$$

$$v_o = \sqrt{(v_{0x})^2 + (v_{0y})^2}. \quad (6)$$

Donde: x , y y representan la posición al tiempo t , θ es el ángulo de disparo, v_{0x} y v_{0y} son las componentes horizontal y vertical de la velocidad inicial respectivamente y v_o es la magnitud de la velocidad inicial.

En las subsecciones A-C se da una descripción del desarrollo de los experimentos, tanto de los ya establecidos como de los propuestos para el uso del software DivYX. En todos los casos los experimentos alternativos tienen que ser filmados, en la sección D se tienen los detalles del procedimiento para la captura de los videos y del software DivYX.

A. Movimiento acelerado de un objeto sobre una superficie sin fricción.

En la figura 1, se presenta el diagrama del arreglo experimental que se utiliza generalmente para estudiar este movimiento. Consiste en un deslizador de masa m_1 que se mueve sobre un riel de aire sin fricción [5], tira de él una cuerda de masa despreciable atada a un bloque suspendido de masa m_2 que se encuentra bajo la acción de la gravedad g . Se está considerando que la fricción entre la cuerda y la polea es despreciable.

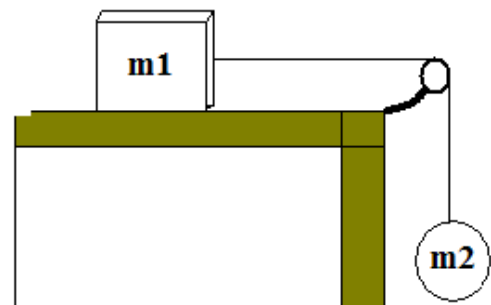


FIGURA 1. Dos masas unidas por una cuerda, una de ellas, m_1 desliza sin fricción sobre un riel de aire.

Del análisis de fuerzas involucradas [3], se llega a la siguiente expresión para la aceleración del sistema:

$$a = \frac{m_2}{m_1 + m_2} g. \quad (7)$$

En este experimento la masa de cada uno de los cuerpos es de $m_1=381\text{gr}$ (deslizador) y $m_2=50\text{gr}$ (cuerpo suspendido). Al tiempo en que el sistema se deja en movimiento, se activa un chispeador cuya frecuencia es de 60Hz, el arco del chispeador produce marcas sobre un papel impresor, lo que permite obtener información de posición y tiempo de la masa m_1 . Uno de los detalles en este procedimiento es la distancia a la que se libera el deslizador, ya que si no es la adecuada, la curva de tiempo-posición no describe una función de segundo orden. Por lo que se tienen que hacer varias pruebas antes de obtener los datos propicios. Uno de los objetivos de esta experimento es determinar la constante de la aceleración de la gravedad g , cuyo valor es igual a 9.78m/s^2 en la Cd. de México [6].

Como alternativa de bajo costo al riel de aire y demás accesorios, se ideó un móvil de aire el cual consiste en un disco compacto (CD) y un globo. El CD y el globo están conectados por medio de un tapón de hule con perforaciones de 1mm de diámetro aproximadamente. Los

Leonor Pérez Trejo, Arturo F. Méndez, Héctor A. González
 orificios tienen la función de dosificar la salida del aire en el globo y así formar una capa de aire entre el móvil y el plano la cual reduce la fricción entre las superficies. La figura 2 muestra una imagen del arreglo experimental.

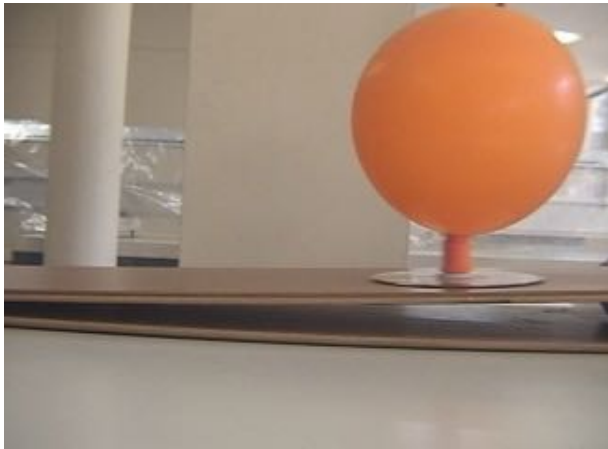


FIGURA 2. Disco compacto deslizando sobre un plano inclinado. El ángulo de inclinación es de 2.94° .

En la figura 3 se presenta un diagrama auxiliar para el análisis de las fuerzas involucradas en este movimiento. La expresión para la aceleración del sistema es [3]:

$$a = g \sin \theta, \quad (8)$$

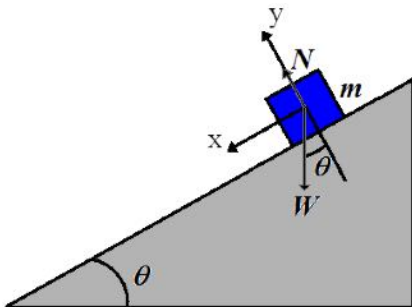


FIGURA 3. Diagrama de un objeto que se mueve sobre un plano inclinado. m es la masa del objeto, W es el peso, N es la normal a la superficie de contacto.

B. Caída Libre

El dispositivo para realizar este experimento consiste de un electroimán acoplado a un reloj electrónico y un interruptor [5], ver figura 4. Cuando se abre el circuito, se activa el reloj y el electroimán se desactiva dejando caer un balón. Cuando el balón atraviesa las fotoceldas el cronómetro digital se detiene e indica el tiempo que duró la caída del balón desde una altura dada. Posteriormente, se varía la distancia de la fotocelda y se deja caer el balón nuevamente, registrando el tiempo correspondiente.

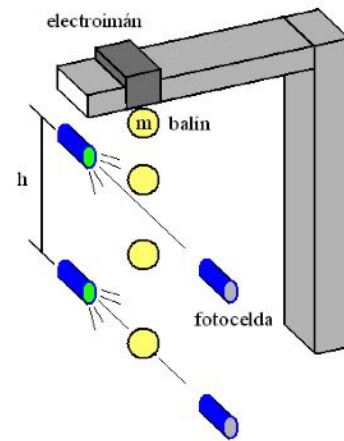


FIGURA 4. Diagrama para el experimento de caída libre.

En este caso, un experimento alternativo es dejar caer un objeto de dimensiones conocidas desde una altura fija. Nosotros utilizamos un objeto cúbico como el mostrado en la figura 5.



FIGURA 5. Experimento de caída libre, se observa un objeto de forma cúbica que se deja caer libremente.

C. Tiro parabólico

El movimiento en dos dimensiones se examina mediante el lanzamiento de un disco sobre una mesa de aire (ver figura 6) al cual se le toma una fotografía estroboscópica. Con este experimento es posible obtener la curva paramétrica de posición y se obtiene información a cerca del movimiento rectilíneo uniforme y del movimiento uniformemente acelerado en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente.

Por otro lado, la realización de este experimento resulta un tanto compleja, ya que requiere de varios accesorios como son cama de aire, disparador, estrobo, espejo de gran tamaño, cámara fotográfica, cuarto de revelado, entre otros [5]. Es por todo ello que la realización de este experimento involucra tiempos largos de experimentación y en una sesión el alumno tiene poco tiempo para dedicar al análisis de resultados experimentales, sin contar con el costo elevado del equipo necesario.

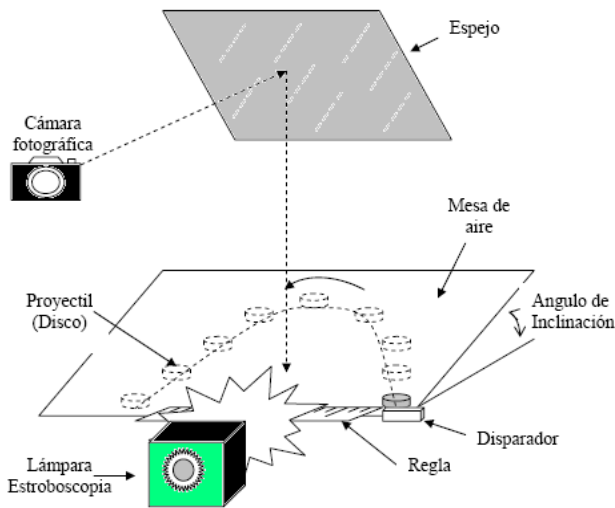


FIGURA 6. Diagrama de la mesa de aire inclinada donde se efectúa el tiro parabólico de un disco.

El experimento antes descrito, se puede sustituir por uno más sencillo de montar y de realizar. Tal experimento consiste en el lanzamiento de una esfera sólida, o balón, desde una rampa. El balón recorre una distancia d sobre la rampa antes de abandonarla (ver figura 7), éste cae desde una cierta altura “y” e impacta sobre una tabla horizontal a una distancia “x”.

Variando la altura desde donde se deja caer el balón y midiendo la distancia a la cual impacta sobre la superficie horizontal, se puede obtener una gráfica que describa la trayectoria del objeto. Pero las posiciones vertical y horizontal respecto del tiempo no se pueden determinar con este arreglo.

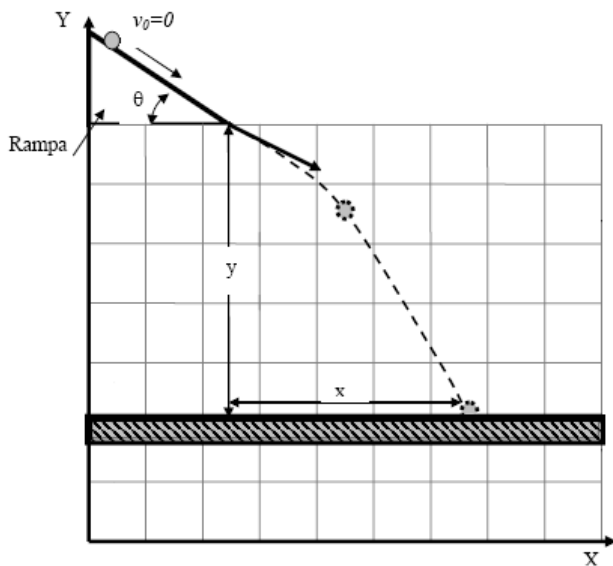


FIGURA 7. Diagrama Movimiento del descenso de un balón desde una rampa.

D. Captura de videos y software DivYX

Los experimentos fueron registrados usando una cámara digital 8 marca Sony® modelo DCR-TRV820 con una *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 2, No. 3, Sept. 2008*

Implementación del software DIVYX en el laboratorio de Mecánica velocidad de 30 cuadros por segundo. Posteriormente, el video fue capturado en una PC a través del puerto IEEE 1394 (FireWire) y fue editado a formato MPEG empleando el paquete de video VEGAS 5.0®. Es de mencionar, que alternativamente se utilizó una cámara digital fotográfica Canon® A510 de 3.2 Mpixeles, cuyo costo es mucho menor y los videos son almacenados directamente en formato MPEG a una velocidad de 30 cuadros por segundo, los resultados obtenidos con ambas cámaras fueron en esencia los mismos. Finalmente, los datos de posición y tiempo fueron obtenidos a partir del video usando el software DivYX.

El software DivYX es una idea original de Héctor A. González Flores y fue diseñado en conjunto con un equipo de tres alumnos de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales de la Universidad de Monterrey. El principal objetivo del software es obtener las coordenadas espaciales y temporales que caracterizan el movimiento de un objeto en una o dos dimensiones a través de un video cuyo formato es MPEG. Este tipo de archivos de video pueden ser grabados primariamente mediante una cámara de video o una cámara fotográfica digital o un teléfono celular con cámara. La idea básica de este software es seguir el movimiento de un punto en un objeto con ayuda del ratón en una serie de cuadros sucesivos que componen al video, esto permite asignarle unidades de posición de pantalla. Estas unidades, llamadas “twips”, son convertidas por el software en unidades físicas a partir de una dimensión conocida en el video (por ejemplo la longitud de un objeto) y las coordenadas temporales se pueden obtener ya que se conoce el tiempo entre cuadros sucesivos. DivYX se convierte en una herramienta cognitiva suficiente, mediante la cual los usuarios tienen a su disposición lo necesario para realizar la tarea de analizar cinemáticamente la situación que ellos deseen. Interesados en obtener una copia del software DivYX, ver referencia 1.

IV ANALISIS Y RESULTADOS

A. Movimiento acelerado de un objeto sobre una superficie sin fricción

En la figura 8 se muestran los resultados del movimiento uniformemente acelerado obtenidos para el sistema de masas que se mueve sobre el riel de aire. Los círculos corresponden a los datos obtenidos empleando el chispeador y el papel impresor, los triángulos corresponden a la curva teórica y los cuadros muestran el comportamiento obtenido a partir de utilizar el video y el software DivYX. Es evidente que de este último conjunto de datos se tiene un comportamiento claramente parabólico como era de esperarse según la ecuación (1), mientras que no es así de claro con los datos obtenidos empleando el chispeador. Esto último confunde a los alumnos al momento de hacer el análisis de datos ya que la gráfica no corresponde a lo que se esperaría según la naturaleza del movimiento. Note que existe gran concordancia entre los datos obtenidos con DivYX y los

Leonor Pérez Trejo, Arturo F. Méndez, Héctor A. González
de la curva teórica. Lo que muestra la efectividad del software.

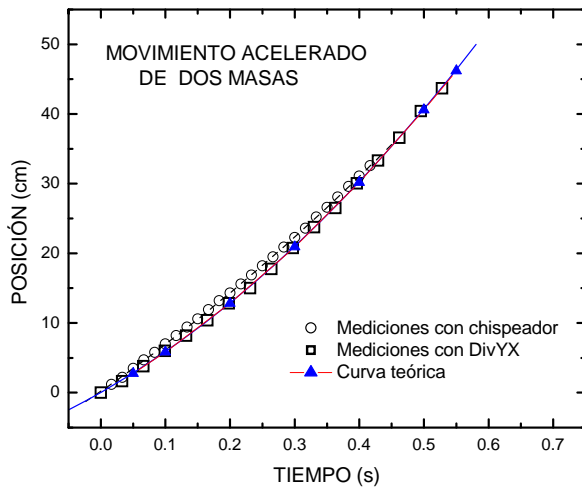


FIGURA 8. Gráficas de tiempo-posición para el arreglo de dos masas. Las líneas --- y — corresponden a los ajustes respectivos.

En la tabla I se muestran los valores de posición y velocidad inicial, así como la aceleración del sistema, obtenidos a partir del ajuste de cada conjunto de datos. Asimismo, se presenta el valor de la constante de aceleración de la gravedad calculado con la ecuación (7). Considerando que los experimentos se realizaron al nivel de la ciudad de México, el valor de la gravedad es igual a $g_{cd\ México}=978\text{ cm/s}^2$ [6] por lo que se tiene una diferencia porcentual del 43.1% y del 1.9% para el chispeador y el obtenido con DivYX respectivamente. Es evidente que existe una mayor aproximación empleando el video. Además, con el método del chispeador la obtención de los mismos resultados requiere de mayor tiempo debido principalmente al manejo y la medición de los datos experimentales.

TABLA I. Comparación de los parámetros de movimiento acelerado obtenidos por dos métodos diferentes.

Cantidad	Chispeador	DivYX
x_0 (cm)	0.197	0.039
v_0 (cm/s)	64.22	52.71
a (cm/s ²)	32.28	57.82
g (cm/s ²)	556.5	996.8

En la figura 9 se muestran los datos obtenidos con DivYX para el móvil deslizando sobre un plano inclinado. Se puede apreciar el comportamiento parabólico de la curva, lo cual es característico del movimiento uniformemente acelerado. Realizando el ajuste a los datos experimentales, se obtiene un valor de 46.48 cm/s^2 para la aceleración del objeto. Sustituyendo este valor en la ecuación (8) y sabiendo que el ángulo de inclinación es de 2.94° , se obtiene un valor de 906.22 cm/s^2 para la aceleración de la

gravedad en la Cd. De México, lo que nos da una diferencia del 7.3% respecto al valor reportado por Riveros [6].

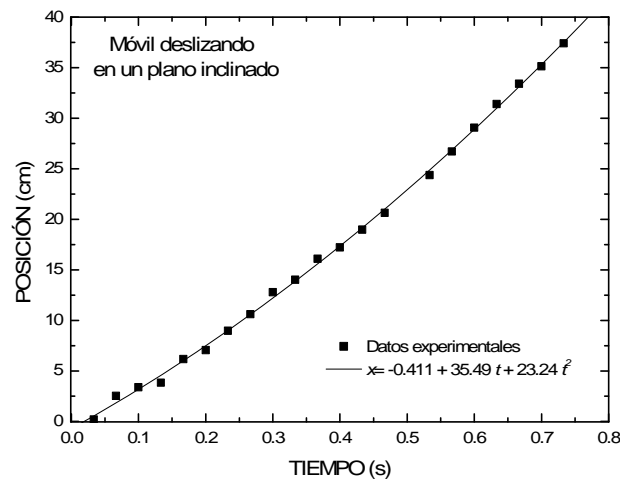


FIGURA 9. Gráfica de tiempo-posición para un disco moviéndose sobre un plano inclinado un ángulo de 2.94° . La línea continua representa el ajuste de datos.

B. Caída Libre

En la figura 10, se presentan los resultados obtenidos para el experimento de caída libre utilizando los dos sistemas experimentales. Como puede observarse, las graficas son evidentemente parabólicas, en concordancia con la ecuación (1) para ambos casos.

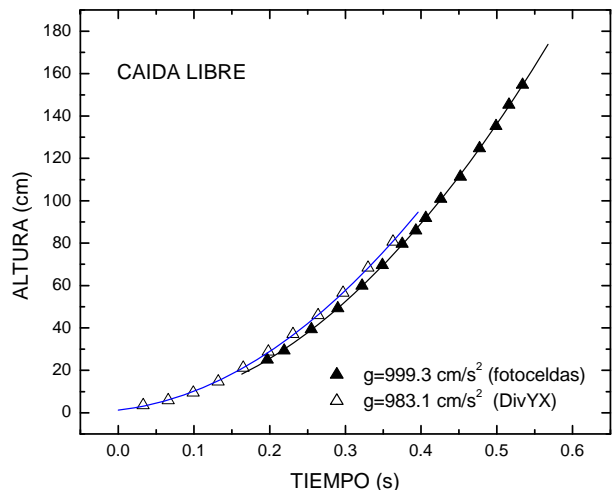


FIGURA 10. Gráfica tiempo-altura para el experimento de caída libre. Las líneas corresponden a los ajustes en cada caso.

Realizando el ajuste correspondiente y comparando con la ecuación (2) se evalúa el valor de la constante de gravedad. En este caso, empleando las fotoceldas se obtiene el valor de $g_{foto\ celdas}=999.35\text{ cm/s}^2$, por lo que existe una diferencia del 2.2% comparando con el valor reportado para la Cd. de México [6]. A partir del software DivYX se obtuvo una constante igual a $g_{DivYX}=983.1\text{ cm/s}^2$ y la diferencia se reduce al 0.4%.

Es de mencionar que en este experimento la obtención de datos con el software DivYX, está limitado a tiempos del orden de 0.5 segundos por la velocidad que alcanza el

objeto, ya que éste pierde definición en la fotografía, lo que dificulta obtener con precisión su posición vertical. Sin embargo, empleando el modo de aprendizaje de deportes, es posible obtener imágenes más claras debido a que el tiempo de obturación es menor. Si esto no fuera suficiente, entonces se puede emplear una cámara que obtenga un número mayor a 30 cuadros por segundo, aunque en este caso el costo podría incrementarse considerablemente.

C. Tiro parabólico

En la figura 11 se presentan dos conjuntos de datos para el experimento de tiro parabólico. El primero corresponde a mediciones directas de altura de la rampa y del desplazamiento horizontal del balón sobre el papel impresor. Observe que el comportamiento es parabólico y es consistente con la ecuación paramétrica (5). Al comparar esta ecuación con la ecuación de ajuste, se tiene que: $\tan\theta=0.9019$ lo cual implica que $\theta_{calc}=42.04^\circ$ mientras que el valor calculado de mediciones directas en el laboratorio es $\theta_{exp}=42.77^\circ$ lo que representa una diferencia porcentual del 1.73%. Es importante destacar que información adicional de este experimento por este método es imposible obtener.

Por otro lado, el segundo conjunto de datos en la figura 11 se obtuvo filmando el movimiento del balón para una altura fija de la rampa y empleando DivYX. En este caso el ángulo de disparo calculado a partir de las constantes de ajuste es $\theta_{DivYX}=42.9^\circ$, el cual presenta una diferencia porcentual del 0.33% respecto al valor experimental, lo que muestra nuevamente una mayor efectividad empleando DivYX.

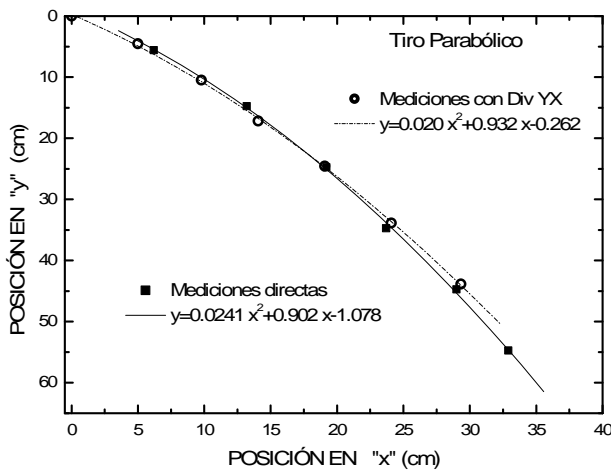


FIGURA 11. Trayectoria de un balón al abandonar una rampa. Las líneas representan los ajustes.

Las curvas correspondientes de desplazamiento horizontal y vertical contra el tiempo se presentan en las figuras 12 y 13 respectivamente. En la figura 12 se observa claramente el movimiento rectilíneo uniforme que experimenta el proyectil. Así, de una comparación entre la relación de ajuste y la ecuación (3) se determina la componente de la

velocidad en la dirección "x", esto es, $v_{ox} = v_o \cos\theta$, el cual tiene un valor de $v_{ox} = 141.61 \text{ cm/s}$.

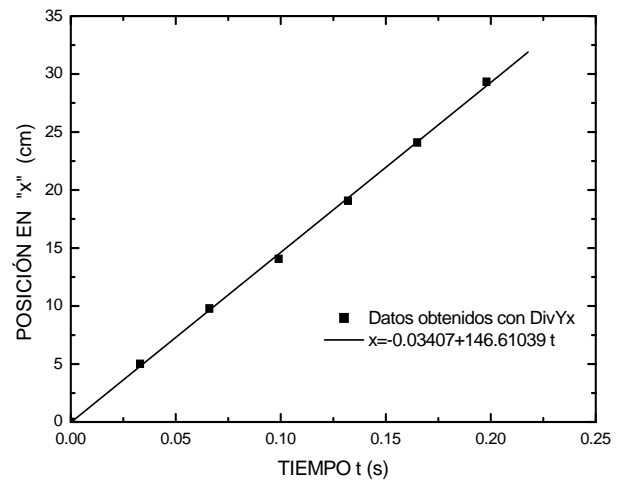


FIGURA 12. Curva de posición horizontal "x" contra tiempo, obsérvese el movimiento rectilíneo uniforme. La línea representa el ajuste.

Por otra parte, en la figura 13 se observa el movimiento vertical del proyectil en función del tiempo, el cual es característico de un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. Comparando las constantes del ajuste realizado con las constantes en la ecuación (4) se obtiene que $g_{DivYX} = 995.96 \text{ cm/s}^2$, el cual difiere en 1.8% respecto al valor reportado para la ciudad de México [6]. Asimismo, la componente de la velocidad inicial en el eje "y" toma el valor de $v_{oy} = 122.61 \text{ cm/s}^2$

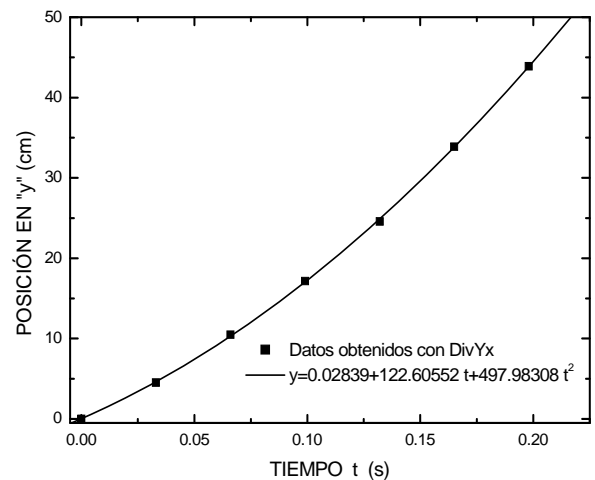


FIGURA 13. Curva de posición vertical "y" contra tiempo, obsérvese el movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. La línea representa el ajuste.

Finalmente, a partir de las componentes de la velocidad inicial y empleando la ecuación (6) se calculó la magnitud de la velocidad inicial que corresponde a la velocidad (v_o) con la que el balón abandona la rampa, obteniendo un valor de 191.12 cm/s .

V. CONCLUSIONES

Se analizaron dos tipos de movimiento, el movimiento uniformemente acelerado y el tiro parabólico. El primero se estudió a partir de los siguientes experimentos: el movimiento de un deslizador que viaja sobre un riel de aire horizontal, el movimiento de un móvil sobre un plano inclinado sin fricción y la caída libre de un objeto. En el segundo se estudió el movimiento de un balón al abandonar un plano inclinado.

En los experimentos en una dimensión se mostró la utilidad y la eficacia del software DivYX, al obtener gráficos que muestran la relación de segundo orden entre el tiempo y la posición del objeto, lo que ayuda a que el alumno evite confundirse al momento de proponer funciones para el ajuste. Además, se pudo evaluar la constante de gravedad, obteniéndose diferencias porcentuales menores al 2%, en la mayoría de los casos, mientras que las diferencias son hasta del 40% realizando los experimentos de la manera tradicional.

En el experimento de tiro parabólico, el uso del software permitió obtener información amplia del movimiento, se redujo notablemente el tiempo de experimentación y el costo del equipo en comparación al costo cuando se usa una mesa de aire y demás aditamentos.

Se mostró que experimentos sencillos que no requieren de grandes accesorios ni de mucho tiempo en su realización junto con el software DivYX son una alternativa didáctica, que permite dedicar mayor tiempo al análisis e interpretación física de los resultados durante la clase ya sea en el laboratorio o incluso en el salón de clases.

Finalmente, ya que la obtención de videos puede ser de manera muy diversa, es posible encomendar a los alumnos a realizar videos de experimentos que sean propuestos por ellos, lo que permite motivar su creatividad y aumentar su participación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores Méndez Sánchez y Pérez Trejo son becarios COFAA y EDD del IPN.

REFERENCIAS

- [1] González, H. A., *Manual de DivYX*, interesados en adquirir una copia solicitarla vía electrónica a la siguiente dirección, hgonzalez@udem.edu.mx.
- [2] Sears, F., Zemansky, M., Young, H. y Freedman, R., *Física Universitaria Vol. 1*, (Pearson Educación, 11^a Edición, México, 2004).
- [3] Resnick, R., Halliday, D. y Krane K. S., *Física, Vol. 1*, (CECSA, 5^a edición, México, 2004).
- [4] Serway, R. A., *Física, Vol 1*, (Mc Graw Hill INTERAMERICANA EDITORES, 4^a edición, México, 1997).
- [5] Rudolf, A. H., Rueda, L. G. y Ortega, G., *Manual de prácticas del laboratorio de física I: Mecánica*, (ESFM-IPN, México, 2002).
- [6] Riveros, H. G., *Los placeres del pensamiento*, Boletín de la Sociedad Mexicana de Física **20**, 47-49 (2006).

¿Cómo definir la energía en los cursos básicos?



Arnaldo González Arias

Dpto. Física Aplicada, Universidad de La Habana, San Lázaro y L, La Habana, Cuba

E-mail: arnaldo@fisica.uh.cu

(Recibido el 13 de Abril de 2008; aceptado el 8 de Junio de 2008)

Resumen

Se discute la siguiente definición como introducción a la energía en el estudio de las ciencias. Energía: capacidad de un cuerpo o sistema para ejercer fuerzas sobre otros cuerpos o sistemas o entre sus propios subsistemas. Si las fuerzas ocasionan variaciones temporales microscópicas y desordenadas, hay transmisión de energía en forma de calor. Si las variaciones son macroscópicas o microscópicas ordenadas (fenómenos eléctricos y magnéticos) hay transmisión de energía en forma de trabajo.

Palabras clave: Energía, calor, trabajo.

Abstract

The following definition is discussed as an introduction to energy in science teaching. Energy: ability of a body or system to exert forces on other bodies or systems, or between its own subsystems. If the forces cause disordered microscopic changes in time, the energy transmission is in the form of heat. If changes are macroscopic or ordered microscopic (electric and magnetic phenomena), the energy transmission is called work.

Keywords: Energy, heat, work.

PACS: 01.40.J-,45.20.dg, 44.10.+i

ISSN 1870-9095

En un artículo previo se analizó el concepto energía, su relación con las mediciones y las magnitudes fundamentales, el carácter dual de su significado y cómo la pseudociencia aprovecha estas características para introducir sus falsas proposiciones [1]. También se ha dicho anteriormente que "...de hecho, hoy día es prácticamente imposible encontrar en los libros de texto una definición generalizada de energía que no pueda ser impugnada por una razón u otra." [2]. Según Feynman^a: "*Es importante notar que en la física de hoy día no tenemos conocimiento acerca de lo que es la energía... Es un algo abstracto en el sentido que no nos dice el mecanismo o las razones para las diversas fórmulas*" [3].

Pero, por otra parte, resulta insoslayable resolver el problema de encontrar una forma simple de introducir el concepto energía en la enseñanza de las ciencias, al menos en una primera aproximación, y sin introducir ambigüedades. La necesidad es aún más perentoria para aquellos estudiantes que no escogerán la física o alguna otra ciencia afín como su especialidad.

Un reciente artículo referente a la cultura científica y la educación ambiental en la enseñanza media señala serias deficiencias en la comprensión del concepto energía y su degradación, resaltando la importancia que tienen estos conceptos para que el estudiante lograr assimilar cabalmen-

te la problemática energético-ambiental contemporánea [4].

Quizás una de las principales causas de estas deficiencias radique justamente en las definiciones un tanto abstractas que muchas veces se asocian a la energía, y en las discrepancias que ocasionalmente aparecen entre los cursos básicos de mecánica y los posteriores de termodinámica en relación al concepto. Otras veces se confunde la física con la filosofía, pretendiéndose dar al concepto de energía un alcance mucho mayor que el que la física es capaz de proporcionar (quizás esto haya influido en el criterio de Feynman citado anteriormente). Ver ref. [2].

Aclaremos.

La física trabaja exclusivamente con magnitudes. Por ejemplo, es posible definir el concepto "fuerza" de diferentes maneras^b. Sin embargo, cualquier posible indefinición desaparece cuando Ud. especifica *como se miden las fuerzas* (utilizando un dinamómetro calibrado previamente y especificando sus propiedades experimentales -se suman vectorialmente, etc.). Una definición igualmente precisa para la energía se puede obtener combinando las definiciones de energía cinética y potencial. Note que en física la energía NO ES un concepto primario independiente, sino que se deriva del concepto *fuerza* a partir de la definición de energía potencial y del teorema del trabajo y la energía. Tratar de encontrar una definición de energía ajena al concepto de fuerza sería como tratar de definir la aceleración

^a Richard Phillips Feynman, (1918-1988), es considerado uno de los físicos más importantes del siglo XX en los EE.UU. Compartió el premio Nóbel de Física en 1965 por su trabajo en electrodinámica cuántica y en 1972 la Medalla Oersted a la Enseñanza, entre otros galardones. Se considera una de las figuras pioneras de la nanotecnología y uno de los primeros en proponer la realización futura de ordenadores cuánticos.

Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 2, No. 3, Sept. 2008

^b En nuestro medio, la definición aceptada es usualmente "una medida de la interacción entre diferentes cuerpos o sistemas", tanto en el macro-mundo como en el micromundo.

A. González Arias

sin mencionar la velocidad: un flagrante error que únicamente tendería a obscurecer la definición.

A continuación se presenta una definición simple y general, con vistas a ser aplicada en las primeras etapas de la enseñanza de las ciencias, basada en la relación analítica inversa entre fuerza y energía.

Para la energía cinética E_c :

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad \text{donde } p = \sqrt{2mE_c},$$

mientras que para la energía potencial E_p ,

$$\vec{F} = -\nabla E_p, \quad \text{donde } \nabla \text{ es el operador gradiente.}$$

En el primer caso la fuerza está asociada a la variación temporal de la energía. En el segundo a la variación espacial. Esta última expresión indica que las fuerzas estáticas también son una medida de la energía de un sistema. Es decir, desde el punto de vista estrictamente mecánico, NO ES NECESARIO que haya variaciones temporales en un sistema para que haya energía almacenada^c. Expresando estos resultados analíticos en palabras, de forma resumida, se llega a:

Energía: capacidad de un cuerpo o sistema para ejercer fuerzas sobre otros cuerpos o sistemas o entre sus propios subsistemas.

Para completar la idea, se podría añadir:

Si las fuerzas ocasionan variaciones **temporales microscópicas y desordenadas**, hay transmisión de energía en forma de *calor*. Si las variaciones temporales son *macroscópicas o microscópicas ordenadas* (fenómenos eléctricos y magnéticos) hay transmisión de energía en forma de *trabajo*.

Comentario aparte merece la transmisión de energía en forma de calor, que puede ser por conducción, convección o radiación, ya que la radiación también puede transmitir trabajo (presión de la luz, efecto fotoeléctrico, señales de radio, TV, recepción en una antena, etc.).

El dilema se resuelve considerando a la radiación como *un sistema* con propiedades muy especiales, capaz de entregar su energía tanto en forma de calor como de trabajo.

(La radiación sólo existe a la velocidad de la luz, no tiene fronteras definidas, pero existe independientemente de la fuente que le dio origen).

Así, la radiación es en realidad tanto una forma de transmisión de calor como de trabajo, y sólo es necesario ampliar el concepto, mencionando el trabajo por radiación junto al calor por radiación (ver figura 1).



FIGURA 1. Diferentes formas de transmisión de la energía.

REFERENCIAS

- [1] González Arias, A., *Falsas Energías, Pseudociencia y Medios de Comunicación Masiva*, Rev. Cub. Fís. **19**, 68, (2002).
- [2] González Arias, A., *El Concepto Energía en la Enseñanza de las Ciencias*, (a) Revista de la Unión Iberoamericana de Sociedades de Física **1**, Agosto (2006); (b) Revista Iberoamericana de Educación, ISSN: 1681-565, número 38/2, Marzo 10 (2006).
- [3] Feynman, R. P., Leighton, R. B. and Sands, M., *The Feynman Lectures on Physics* Vol. 1, Cap. 4, (Addison-Wesley Pub. Co, 6th, Ed., USA, 1977).
- [4] Bosque Suárez, R., Merino, T. y Fundora, J., *Cultura científica y ambiental en el Decenio de la educación por el desarrollo sostenible*, V Congreso Internacional Didáctica de las Ciencias, Didáctica de las Ciencias, nuevas perspectivas, segunda parte, Palacio de las Convenciones de La Habana, Marzo 17-21 (2008).

^c Microscópicas siempre las habrá, excepto en el cero absoluto –al menos teóricamente.

La multimedia y la hipermedia en el estudio del movimiento browniano



R. Valdés Castro¹, V. Tricio Gómez², P. Valdés Castro³

¹*Escuela Politécnica Superior, Departamento de Física, Universidad de Burgos, Calle Villadiego s/n, 09001 Burgos, España.*

²*Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Universidad de Burgos, Plaza Misael Bañuelos s/s, 09001 Burgos, España.*

³*Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Quinta de los Molinos, Ciudad de La Habana, Cuba.*

E-mail: rvaldes@ubu.es

(Recibido el 10 de junio de 2008; aceptado el 28 de Agosto de 2008)

Resumen

En el trabajo describimos la metodología seguida para construir un documento con formato web, utilizado para el estudio de la unidad de aprendizaje Movimiento Browniano. Se presta especial atención al uso de fotografías y vídeos para realizar mediciones y a la posibilidad de experimentar con modelos numéricos. Intentamos hacer patente el empleo de ideas fundamentales de la didáctica de las ciencias.

Palabras clave: Física Educativa, computadoras en educación, medios audiovisuales.

Abstract

In this paper we describe the general structure of an electronic book for the study of Brownian motion. We developed the book according to constructivism in science education. We have focused attention on a simple way for experimental verification of Einstein's formula and simulation of Brownian particles movement.

Keywords: Physics education, computers in education, audio and visual aids.

PACS: 01.40.-d, 01.50.F-, 01.50.Lc

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Desde hace décadas asistimos a profundas transformaciones socioculturales indudablemente condicionadas por el vertiginoso desarrollo de la ciencia y la tecnología. La creación del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) es resultado y parte de dichos cambios. La enseñanza universitaria europea debe enfrentar hoy, conjuntamente, la tarea de modificar los objetivos, el contenido, los métodos, los medios, las formas de organización de la enseñanza y las actitudes de los profesores y alumnos [1, 2]. Para lograr este propósito en la enseñanza de la Física, el profesorado cuenta con los resultados de la investigación e innovación en didáctica de las ciencias [3, 4, 5, 6].

Es una aspiración de la enseñanza de la Física lograr el aprendizaje activo, sustentado en el planteamiento y la resolución de problemas que exija de los estudiantes no solo la apropiación de conocimientos y habilidades específicas, sino también la adquisición de experiencia creadora (en la emisión de suposiciones, la elaboración de modelos, el diseño de experimentos y algoritmos) y el desarrollo de actitudes (pensamiento crítico, autodidactismo, atención a las problemáticas de significación social). Semejante propósito ha de realizarse atendiendo a las características distintivas de la Física contemporánea [6] y, sin lugar a dudas, una de ellas

es la utilización de los medios informáticos en cálculos numéricos y analíticos, en la realización de experimentos, la construcción de modelos y en la búsqueda y transmisión de conocimientos.

En nuestra opinión, el estado actual de los medios informáticos y el desarrollo de las concepciones didácticas durante la última década, convierten en novedoso el objetivo de utilizar los medios informáticos conforme a la orientación investigadora del aprendizaje de la Física.

Atendiendo a dicho objetivo nos hemos planteado como finalidad de la innovación didáctica las tareas siguientes:

- Elaborar problemas experimentales que se solucionan mediante mediciones con fotografías y vídeos digitales.
- Preparar unidades de aprendizaje relacionadas con el contenido de los problemas experimentales
- Confeccionar un software que posibilite la resolución de los problemas experimentales.

En este trabajo nos proponemos ilustrar esas tres vertientes mediante la descripción de una unidad de aprendizaje para el estudio del movimiento browniano. Intentamos que se perciban como fondo de nuestra exposición, concepciones didácticas actuales que se encuentran en la base del proceso de adaptación de las universidades españolas al Espacio Europeo de Educación Superior.

II. ESTRUCTURA Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA UNIDAD DE APRENDIZAJE

La mayor parte del material docente de la unidad, titulada Movimiento de Partículas Brownianas se conformó con formato web (Fig. 1). La página principal del documento (que también llamaremos libro) contiene *hiperenlaces* que permiten acceder a los módulos que se muestran en la misma. Cuando se coloca el cursor del ordenador sobre las fotografías de los científicos, aparece un recuadro donde se leen los datos biográficos de ellos.

La unidad de aprendizaje fue concebida para ser utilizada durante el primer ciclo universitario. No obstante, debido a la diversidad de sus materiales que contiene es posible hallar algunos apropiados para el nivel de bachillerato.



FIGURA 1. Se muestra la página principal del documento Movimiento de Partículas Brownianas.

Sustentado en el planteamiento de sistemas de tareas de aprendizaje, el libro ha sido concebido para favorecer que los alumnos enfrenten situaciones problemáticas de interés, validen suposiciones y analicen diseños de experimentos, elaboren algoritmos, utilicen los ordenadores con sus funciones básicas en la Física, amplíen y profundicen de manera autónoma los conocimientos. El planteamiento de esas tareas tiene el propósito de centrar el pensamiento de los estudiantes en aspectos significativos del contenido. Los enunciados de las tareas que el alumno enfrenta durante la lectura (aquí nos referimos a unas pocas) los destacamos en cursiva y con la letra inicial **T**.

Los materiales preparados son los siguientes:

- Texto básico y sistema tareas para orientar el aprendizaje.
- Problemas experimentales.
- Tareas de ejercitación y consolidación.
- Fotografías y vídeos, con los cuales se realizan mediciones.
- Vídeo acerca de cómo llevar a cabo experiencias en el laboratorio docente.
- Hojas de cálculo hechas con *Excel* o *Mathematica*.
- Textos para lecturas complementarias.

Un elemento esencial del sistema de aprendizaje concebido es la resolución de problemas experimentales,

mediante mediciones con fotografías y vídeos digitales. Para estos efectos hemos confeccionado y empleamos en la unidad el software *Análisis de Imágenes* (Fig. 2). Este programa permite medir intervalos de tiempo entre fotogramas, determinar la intensidad relativa de la radiación que produjo una imagen fotográfica y detectar colores. Utilizando las líneas de coordenadas de la ventana principal del software, es posible medir distancias entre puntos seleccionados de una imagen e insertar automáticamente los resultados de las mediciones en una hoja de *Microsoft Excel*. Es una herramienta general para la resolución de tareas experimentales y por eso se instala en el ordenador independientemente de libro electrónico.

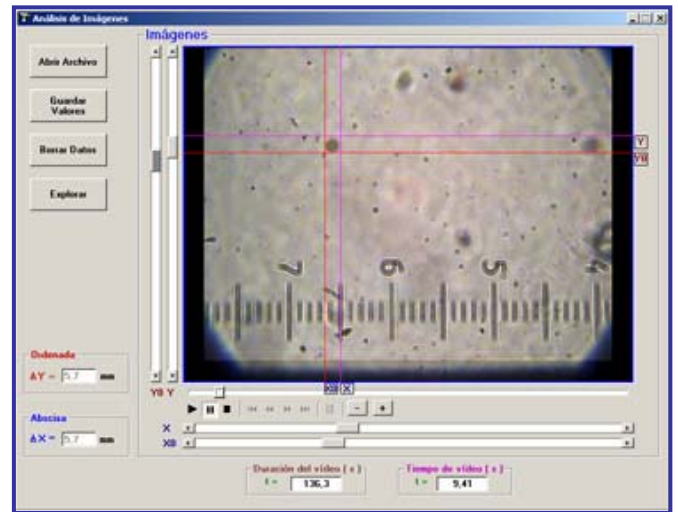


FIGURA 2. Ventana principal del programa Análisis de Imagen, con un fotograma de uno de los vídeos de la serie Partículas Brownianas. Una partícula del vídeo se ha enmarcado entre las líneas de coordenadas para determinar sus dimensiones.

Utilizando *Análisis de Imágenes*, fotografías y vídeos, se solucionan tareas relativas a la medición de las dimensiones de las partículas brownianas, la validación de la fórmula de Einstein [7] y la estimación del número de Avogadro.

El libro electrónico lo hemos organizado en los cinco módulos principales siguientes: Presentación, Texto Básico, Comentarios, Compilación y Materiales para mediciones. Cada módulo, a su vez, consta de varios apartados siguiendo una pauta similar entre ellos.

III. CONTENIDO PRINCIPAL DE LOS MÓDULOS DE LA UNIDAD DE APRENDIZAJE

A. Presentación

Este módulo es de carácter general y está constituido por las cinco secciones siguientes: Introducción, Objetivos, Contenido de aprendizaje, Materiales para realizar mediciones, autores bibliografía y tecnología empleada (Fig. 3).

De manera similar a como sucede en el resto de los módulos, puede accederse a cada apartado pinchando en el

índice que se muestra en la parte izquierda de la página o moviendo el cursor de la parte derecha.

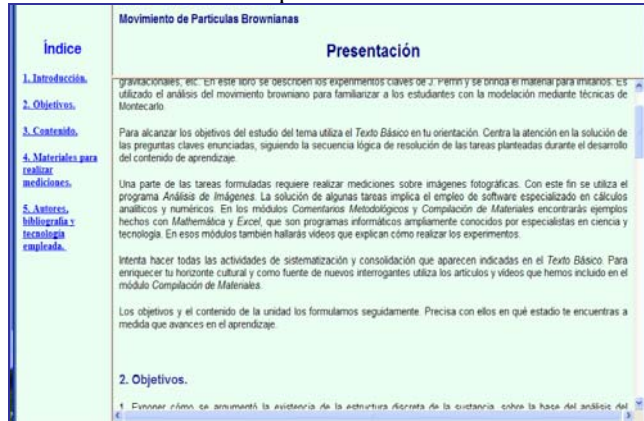


FIGURA 3. Representa un extracto del primer módulo de la unidad Movimiento de Partículas Brownianas. Vemos a la izquierda el índice, con hiperenlaces para acceder también a los contenidos.

B. Texto Básico

Es donde exponemos el contenido central de la unidad. En el Índice, a la izquierda de la página, se leen los títulos de las cinco secciones de este módulo: Introducción, Descubrimiento del movimiento browniano y su análisis cualitativo, Elaboración y comprobación de la teoría del movimiento browniano, Simulación del movimiento browniano y de la distribución de partículas con la altura y Tareas de sistematización y consolidación.

El *Texto Básico* esboza cómo fue evolucionando la comprensión del movimiento browniano, desde su descubrimiento hasta los trabajos realizados por Einstein, Smoluchowski y Perrin. La exposición es ilustrada con fórmulas, fotografías y tablas de datos experimentales, que dan a conocer los resultados obtenidos por esos investigadores.

La Fig. 4 muestra un extracto de dicho módulo. En ella se observan, a la izquierda, los nombres de los apartados y al centro, el enunciado de dos de las tareas y una fotografía que ha sido elaborada por nosotros como material para mediciones. En esencia el módulo consta de tres partes fundamentales: una introductoria, otra para el desarrollo de las ideas esenciales y la última dedicada a tareas de sistematización y consolidación.



FIGURA 4. Extracto del segundo módulo de la unidad Movimiento de Partículas Brownianas.

En la sección introductoria es esbozada la importancia del tema y son planteadas problemáticas claves que orientan el estudio de la unidad. Comenzamos el Texto Básico mencionando algunas temáticas que resaltan la importancia del estudio del movimiento browniano. Entre otras, consideramos las siguientes: la argumentación de la estructura discreta de la sustancia, la ilustración del carácter estadístico del segundo principio de la termodinámica, el comportamiento de aerosoles en la atmósfera, la geometría fractal y los motores brownianos y sus aplicaciones a la biología celular. Hacemos referencia también a trabajos que abordan dichas cuestiones y cuyos fragmentos se encuentran en la compilación de materiales [8, 9]. Esta parte introductoria finaliza con el planteamiento de las problemáticas claves. Tres de ellas son las siguientes:

- ¿Cómo observar el movimiento browniano en el laboratorio?
- ¿Cómo fue verificada la teoría del movimiento browniano en la ciencia y de qué forma puede ser comprobada en el laboratorio docente empleando la tecnología informática contemporánea?
- ¿Qué procedimientos pueden ser utilizados para simular matemáticamente el movimiento y la distribución espacial de partículas microscópicas suspendidas en un fluido?

En la segunda parte del Texto Básico se aporta la información necesaria para solucionar las problemáticas claves. Al propio tiempo, el aprendizaje es guiado mediante una secuencia de tareas relacionadas con la realización de cálculos, el diseño de experimentos, la elaboración de algoritmos, etc. Al final del texto se propone un sistema de actividades que demanda, más que la simple ejercitación de los conocimientos adquiridos, la ampliación, profundización y organización de los mismos.

A continuación enunciamos y en algunos casos resumimos la solución de varias tareas de esta parte del libro.

T. Observa los vídeos de la serie Partículas Brownianas. Utiliza el programa Análisis de Imágenes para estimar las dimensiones de los corpúsculos en movimiento. Entre las líneas de la escala del microscopio hay 1 mm (Fig. 2).

Referidas a la observación indicada en la tarea, son planteadas dos actividades que permiten a los estudiantes considerar la hipótesis del origen cinético-molecular del movimiento browniano y describir cualitativamente la posible relación entre el grado de agitación de los corpúsculos, las dimensiones de éstos y las características del fluido.

T. Intenta argumentar que el movimiento browniano no tiene naturaleza biológica, ni se debe a diferencias de temperatura dentro del fluido.

T. Desde la perspectiva de la teoría cinético-molecular explica cualitativamente el movimiento browniano. Propón algún tipo de relación entre el grado de agitación de los corpúsculos, sus dimensiones, la temperatura y la viscosidad del medio.

Después de analizar cualitativamente el movimiento browniano, el texto básico expone elementos de la teoría que describe el fenómeno. Una secuencia de tareas intercaladas

en la explicación, pretenden orientar la atención de los estudiantes hacia los aspectos claves tratados. Finalmente se aborda la cuestión de la comprobación experimental de dicha teoría [7, 8] y entre las tareas relacionadas con este punto se encuentra la siguiente:

T. Estima el número de Avogadro. Compara tus resultados con los que obtuviera Perrin.

Para ello, se hace uso de un vídeo que reproduce el movimiento de corpúsculos de acuarela en agua. La temperatura del ambiente durante la filmación era de 20 °C y el coeficiente de viscosidad del agua a dicha temperatura, $\eta = 1,00 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m s})$. El movimiento se capta (Fig. 2) con el programa *Análisis de Imágenes* y posteriormente se selecciona un corpúsculo browniano esférico, cuyo recorrido se sigue a lo largo de toda la película. Determinando con dicho software la posición del corpúsculo al cabo de intervalos de tiempo $\Delta t = 1 \text{ s}$, se obtiene una muestra experimental con más de 60 desplazamientos sobre el plano que denominamos *XOY*, que se convierte en el doble de datos experimentales en virtud de la equiprobabilidad de las direcciones de movimiento *X* e *Y*.

La correcta determinación del diámetro de la partícula es decisiva en la estimación del número de Avogadro. Dependiendo de la profundidad a que se halla el corpúsculo en la suspensión acuosa, se observa como si cambiara de tamaño. Nosotros hallamos el diámetro de la partícula, promediando tres medidas realizadas a partir de fotogramas en los que el corpúsculo se aprecia con las mayores dimensiones sin que aparezcan imágenes de difracción. Simbolicemos con la letra *A* el radio aparente de una partícula browniana, vista con el programa *Análisis de Imágenes*. Si *M* es el aumento del vídeo observado con el software, entonces $A = aM$. Representemos con la letra *d* los valores de los desplazamientos en las direcciones *X* e *Y*, medidos directamente sobre los fotogramas. En virtud de la isotropía del movimiento asociemos dichos valores al eje *X*.

Se utiliza la fórmula de Einstein adecuada a nuestro experimento, que ya ha sido comprobada por los alumnos en la resolución de una tarea anterior. Para el caso de una partícula esférica de radio aparente *A*, suspendida en un fluido de viscosidad η , la expresión es:

$$\langle d^2 \rangle = M^3 \frac{RT}{N_A} \frac{\Delta t}{3\pi A \eta} \quad (1)$$

Siendo $\langle d^2 \rangle = M^2 \langle \Delta x^2 \rangle$, donde $\langle \Delta x^2 \rangle$ es el valor del desplazamiento cuadrático medio de la partícula realizado en el lapso Δt en la dirección *X*; *T* es la temperatura absoluta, *R* la constante de los gases, y N_A el número de Avogadro.

La Figura 5 es una muestra de resultados experimentales y se puede observar el elevado coeficiente de correlación de la recta ajustada.

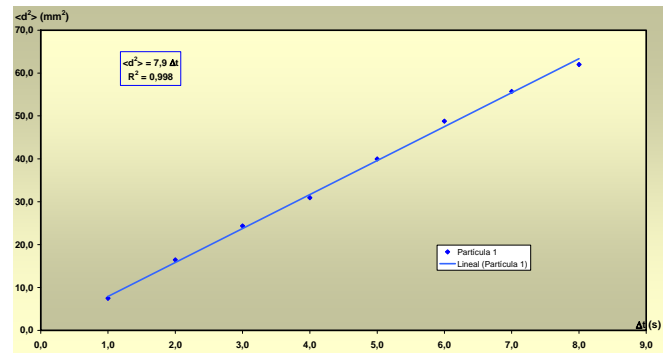


FIGURA 5. Se muestra el gráfico experimental para un corpúsculo nombrado por partícula 1; con las condiciones dadas el valor del desplazamiento cuadrático medio de la partícula es $\langle d^2 \rangle = 7.9 \Delta t$

El gráfico experimental se utiliza para determinar el coeficiente de proporcionalidad de la expresión (1), a partir del cual estimamos el número de Avogadro. Si tomamos la temperatura de la muestra igual a la del ambiente durante la filmación ($T = 293 \text{ K}$), para los datos experimentales que se han representado en la figura, obtenemos $5,8 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Similares resultados se obtienen para corpúsculos de diámetro diferente.

Además de actividades relativas a experimentos físicos, el texto aborda la construcción de modelos numéricos del fenómeno. Entre las tareas relacionadas con dicho tema se encuentra la siguiente:

T. Precisa el algoritmo para simular la distribución de partículas brownianas con la altura.

Analicemos cómo proceder para responder a esta tarea: Sea una variable aleatoria *X* distribuida en el intervalo $[0, \infty)$ con densidad de probabilidad

$$f(x) = \delta \exp(-\delta x), \quad (2)$$

donde δ es la esperanza matemática correspondiente. La fórmula (2) representa la ley de distribución exponencial.

El procedimiento de Montecarlo que permite obtener los valores de la variable aleatoria con las características dadas, se reduce a lo siguiente:

1. Definir la cantidad *n* de iteraciones que se realizarán.
2. Definir la constante δ .
3. Generar la variable aleatoria u_1 con distribución uniforme en $(0, 1]$.
4. Calcular $x = -\frac{1}{\delta} \ln u_1$
5. Repetir *n* veces los pasos 3 y 4.

La distribución exponencial de las partículas brownianas con la altura *z*, tiene densidad de probabilidad

$$f(z) = \alpha e^{-\alpha z}, \quad (3)$$

donde

$$\alpha = \frac{4}{3} \frac{\pi a^3 (\rho - \rho_0) g}{kT} \quad (4)$$

En la expresión anterior ρ y ρ_0 son las densidades de las partículas y del fluido respectivamente, g es la aceleración de la gravedad, k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura absoluta.

Siguiendo el algoritmo anteriormente descrito, en el que ahora n representa el número total de partículas que se observarán, es posible determinar las coordenadas de las partículas en la dirección vertical.

C. Comentarios Metodológicos

Este módulo contiene orientaciones que facilitan hallar la solución de tareas que no están resueltas en el Texto Básico, fundamentalmente las de sistematización y consolidación. Aquí incluimos la descripción de los montajes experimentales, ilustrándolos con fotografías y vídeos. Se accede a ejemplos de cálculos realizados con *Excel* y *Mathematica*.

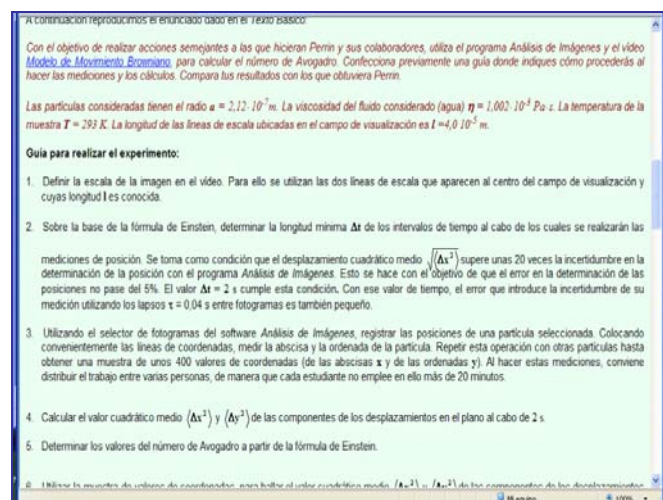


FIGURA 6. Extracto de la sección Comentarios Metodológicos. Se muestra parte de los contenidos siguientes: en marrón, el enunciado de una tarea; en negro los puntos de la guía para realizar el experimento; en azul y subrayado, uno de los hiperenlaces que salpican el documento.

En este apartado se encuentra, la descripción detallada de la experiencia *Observación y filmación del movimiento browniano*, en la que utilizamos equipos típicos de un laboratorio docente y materiales de bajo coste con el objetivo de que pueda ser realizada fácilmente en cualquier centro universitario o instituto de enseñanza secundaria. El estudiante tiene acceso a la explicación escrita del experimento [7] y a su ilustración con una película breve, utilizando el hiperenlace correspondiente.

Este módulo contiene la descripción de una tarea de consolidación titulada *Experimento con el modelo de movimiento browniano*. La solución se esboza mediante una guía para realizar la experiencia (Fig. 6).

Desde esta sección los alumnos pueden disponer del archivo *Distribución exponencial.nb*. Se trata de un ejemplo de la implementación del algoritmo de simulación de la distribución exponencial de las partículas brownianas con la altura. Dicho programa, hecho con *Mathematica*, construye

una representación de la imagen que pudiera observarse al microscopio (Fig. 7).

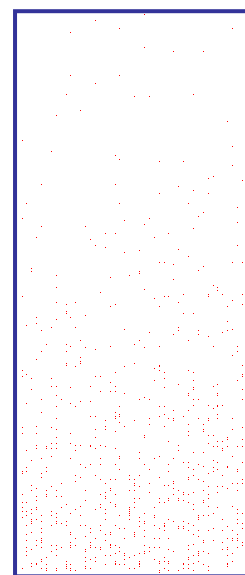


FIGURA 7. Distribución exponencial de las partículas. Esta representación está generada con un programa que ejecuta los algoritmos adecuados.

D. Compilación de Materiales

En este módulo incluimos abundante información complementaria de calidad. Desde aquí, se tiene acceso a fragmentos de importantes documentos de la Física [11, 12] y de artículos sobre la historia y las perspectivas de investigar en torno la temática tratada [13], también se pueden ver fotografías, vídeos de interés, etc.

Su página contiene los hiperenlaces a la derecha del título que permiten acceder a cada material preparado.

Se trata de un espacio sin límites para su enriquecimiento y apropiado para la exploración de conocimientos. En la Figura 8 se muestra un extracto de dicho módulo con la secuencia de alguno de los materiales

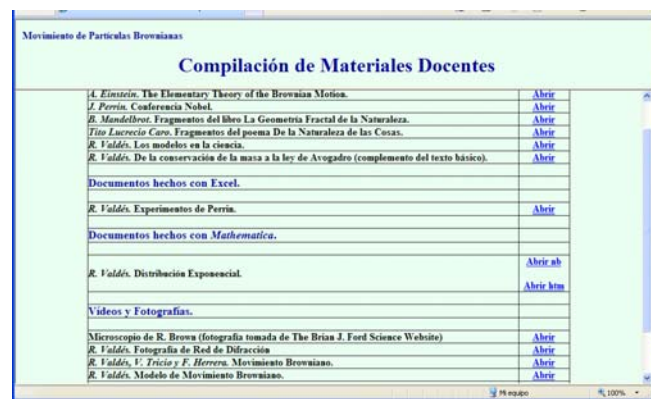


FIGURA 8. Extracto del cuarto módulo de la unidad Movimiento de Partículas Brownianas. Puede verse el título de alguno de los materiales clasificados de acuerdo al tipo, Excell, Mathematica, vídeos, fotografías y a la derecha los hiperenlaces con la palabra abrir.

E. Materiales para Mediciones

Se trata de una carpeta que contiene los elementos multimedia utilizados en la resolución de problemas experimentales. A este último módulo se accede desde el explorador de Windows o utilizando el programa *Análisis de Imágenes*.

Los elementos para esta unidad didáctica, que los hemos producido en el laboratorio docente, son cuatro vídeos, tres del movimiento de partículas brownianas y uno de la simulación de dicho fenómeno. Las Figs. 9 y 10 presentan un fotograma del vídeo *Movimiento Browniano* y del vídeo *Modelo de Movimiento Browniano* respectivamente, ambos incorporados en la carpeta citada.



FIGURA 9. Fotograma del vídeo *Movimiento Browniano*.

El vídeo *Movimiento Browniano* fue filmado mientras se realizaba el experimento en el laboratorio. El vídeo *Modelo de Movimiento Browniano* fue construido ensamblando fotogramas generados con una técnica de Montecarlo habitualmente usada para la modelación de la distribución normal. Los comentarios metodológicos recogen con detalle cómo se realiza dicha simulación.

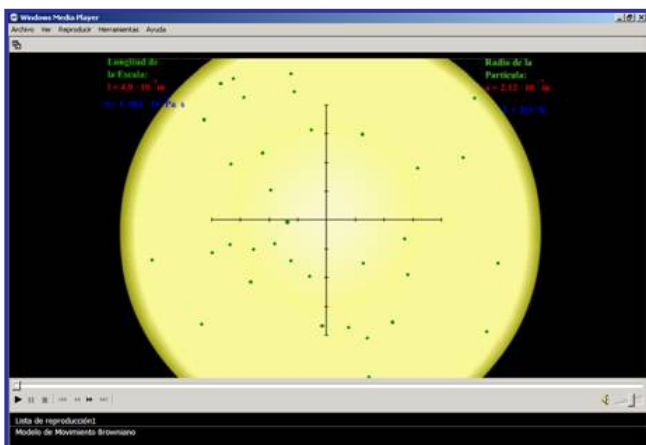


FIGURA 10. Fotograma del vídeo *Modelo de Movimiento Browniano*.

Cada fotograma (Fig. 10) simula la posición de partículas brownianas esféricas de radio $a = 2,12 \times 10^{-5} \text{ cm}$, suspendidas en agua a 20° C . En el algoritmo de cálculo consideramos variables aleatorias independientes a las componentes Δx_i y Δy_i ($i = 1, 2, \dots$) de los desplazamientos en el plano. También impusimos la condición de que estuvieran normalmente distribuidas con esperanza matemática $\mu = 0$ y dispersión

$$D = \frac{RT}{N_A} \frac{\Delta\tau}{3\pi a \eta};$$

donde $\Delta\tau$ es el intervalo de tiempo entre

dos fotogramas y toma el valor $\Delta\tau = 0,04 \text{ s}$.

La Fig. 11 muestra un fotograma del vídeo *Observación y filmación del movimiento browniano* que se realizó para ilustrar la experiencia de laboratorio que lleva el mismo nombre.



FIGURA 11. Fotograma del vídeo ilustrativo *Observación y Filmación del Movimiento Browniano*. Vemos alguno de los materiales y equipos empleados para la preparación de la muestra y la observación de la agitación de las partículas.

IV. CONCLUSIONES

Con el ejemplo del estudio del movimiento browniano, hemos esbozado una vía para lograr dos objetivos:

- Integrar coherentemente la idea del carácter activo del aprendizaje de la Física y la utilización de las tecnologías multimedia e *hipermedia*.
- Contribuir al diseño y confección de materiales atendiendo a los retos que impone la creación del EEES.

Las problemáticas solucionadas con ayuda del material multimedia descrito, suponen emplear al mismo tiempo fotografías, vídeos, un programa como *Análisis de Imágenes*, software para el cálculo numérico y analítico (*Microsoft Excel*, *Mathematica* o similares), textos que orientan la actividad de los alumnos, etc. Ello pone de manifiesto que es una tarea actual de la innovación didáctica elaborar documentos que posibiliten acceder ágilmente a tan diverso material docente. El reto estriba, desde nuestro punto de vista, en crear y utilizar estos medios con arreglo a las concepciones desarrolladas por la investigación e innovación didáctica, fomentar con ella el aprendizaje activo, independiente y orientado a la resolución de problemas que tienen o han tenido interés para la ciencia, la técnica y la sociedad. Concebir así el aprendizaje es una premisa para

adecuar mejor la enseñanza a las necesidades del estudiante como futuro profesional.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue presentado gracias a un proyecto conjunto de investigación e innovación didáctica en el marco del Convenio de Colaboración entre La Universidad de Burgos (UBU) de España y el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (INSTEC) de Cuba.

REFERENCIAS

- [1] MECD, *La integración del sistema universitario español en el espacio europeo de enseñanza superior* (Documento-Marco, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, Febrero, 2003).
- [2] *Proyecto Tuning*, <<http://tuning.unideusto.org/tuningeu/>>, Consultado el 03 de Noviembre de 2007.
- [3] Gil, D. et al., *¿Puede hablarse de un consenso constructivista en la educación científica?*, Enseñanza de las Ciencias **17**, 503-512 (1999).
- [4] Gil, D., *Contribución de la Historia y de la Filosofía de la Ciencia al Desarrollo de un Modelo de Enseñanza Aprendizaje como Investigación*, Enseñanza de las Ciencias **11**, 197-212 (1993).

- [5] McDermott, L. Ch., Oersted Medal Lecture 2001, *Physics Education Research—The Key to Student Learning*, Department of Physics, University of Washington, Seattle, Washington 98195-1560. Proceedings of VIII Inter-American Conference on Physics Education. July, 2003, Havana. © 2001 American Association of Physics Teachers.
- [6] Valdés, P., Valdés, R. y Macedo, B., *Transformaciones en la educación científica a comienzos del siglo XXI*. Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales, N° **15**, 95-114 (2001).
- [7] Valdés, R. y Tricio, V., *Ordenadores, vídeos y simulaciones durante el estudio del movimiento browniano*, Rev. Cub. Fís. **24**, 84-88 (2007).
- [8] Mandelbrot, B., *La geometría fractal de la naturaleza*. (Tusquets Editores, S. A. Matemáticas 49, Barcelona, 1997).
- [9] Seinfeld, J. and Pandis, S., *Atmospheric chemistry and physics*, (John Wiley & Sons, INC, pp. 470-480, New York 1997).
- [10] Newburgh, R., Peidle, J. and Rueckner, W., Einstein, Perrin, and the reality of atoms, 1905 revisited. American Journal of Physics **74**, 478-481 (2006).
- [11] Einstein, A., *Investigation on the theory of the brownian movement*, (Dover Publications, Inc, New York, 1956).
- [12] Perrin, J., *Les Atomes*. (Gallimard, París, 1970).
- [13] Parrondo, J., *Fluctuaciones brownianas y atomicidad*. Revista Española de Física **19**, 19-24 (2005).

El uso de la plataforma Moodle con recursos info-tecnológicos interactivos en la docencia en Física. Una experiencia en el Curso de Física Moderna II



J. Fuentes Betancourt y A. Pérez Perdomo

Facultad de Física, Universidad de la Habana, San Lázaro y L, Habana 10400, Cuba.

E-mail: jfuentes@fisica.uh.cu

(Recibido el 19 de Julio de 2008, aceptado el 26 de Agosto de 2008)

Resumen

En este trabajo se presenta el resultado de una experiencia en el empleo de la plataforma Moodle, cuyo objetivo es incrementar el aprovechamiento en el aprendizaje de los estudiantes, en un curso universitario de Física, empleando recursos info-tecnológicos interactivos. Se expone el trabajo realizado con el Wiki, el WebQuest y el Foro en el curso de Física Moderna II. Se presentan los resultados de una encuesta realizada sobre la aceptación de la experiencia.

Palabras clave: Plataformas interactivas, teoría del aprendizaje, WebQuest, Física Moderna.

Abstract

In this work the result of an experience with the LMS Moodle is presented whose objective is to increase the use in the learning of the students, in an university course of Physics, with the employment of interactive info-technological resources. It is exposed the work carried out with the Wiki, the WebQuest and the Forum in the course of Modern Physics II. The results of the survey carried out about the acceptances of the experience are also presented.

Keywords: Interactive Platforms, Learning Theory, WebQuest, Modern Physics.

PACS: 01.40.Ha, 01.40.Ha, 01.40.-d.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Continuando con las experiencias instrumentadas en nuestra Facultad de Física de la Universidad de la Habana, en la aplicación de las ideas y conceptos expuestos en el Modelo Educativo Virtual [1] elaborado por nuestro colectivo, el presente trabajo recoge la materialización de éstas en un curso de Física Moderna.

En nuestra concepción del proceso de enseñanza aprendizaje nos fundamentamos en las ideas de Vigotsky acerca de que el desarrollo cognitivo no puede entenderse sin referencia al contexto social, histórico y cultural en que ocurre, destacándose el carácter conversacional de una serie de procesos cognitivos, marcados por la interacción, la colaboración y la habilidad de negociación hasta llegar a consenso.

El aprendizaje ocurre allí donde la actividad del sujeto, está orientada consecuentemente a asimilar determinados conocimientos, hábitos y habilidades, formas de conducta y tipos de actividad, métodos y formas de apropiarse del conocimiento y de emplear el conocimiento adquirido en la solución de nuevos problemas, teóricos y prácticos, como norma de conducta [2].

Como se observa se le da el papel fundamental a la actividad gnóstica del estudiante: análisis y síntesis, identificación y distinción; abstracción y generalización; orientación y selección; clasificación y seriación; codificación y decodificación, etc. [2]. El aprendizaje está centrado en el estudiante. Consecuentemente cambian también las funciones del estudiante, éste pasa a desempeñar el papel de selector dirigido y de generador controlado de la información [3, 4]. Aún siendo el objeto de las influencias pedagógicas, él es el sujeto de la actividad cognoscitiva.

En el caso de las funciones del profesor, éstas también se modifican, éste deja de ser únicamente un “suministrador” de información elaborada, el aprendizaje no se trasmite mecánicamente de una persona a otra como si se tratara de un objeto material, sino mediante operaciones mentales que se suceden durante la interacción del sujeto con el mundo material y social. Su actividad se hace más compleja y enriquecedora. Debe conocer que sabe el estudiante y en función de esto, elaborar los materiales y las estrategias didácticas, con el objetivo de lograr un aprendizaje significativo donde el nuevo conocimiento modifique la estructura cognitiva del estudiante de manera no arbitraria y sustantiva; crear un ambiente que permita la motivación de los estudiantes, la gestión de actividades y dinámicas de grupo, guiando el proceso cognitivo en la reflexión grupal.

La base de la enseñanza es la orientación de la actividad del individuo hacia la elección, el procesamiento y la utilización de la información necesaria y de las actividades, y no la simple imposición de esta información y estas acciones.

Estos cambios en el proceso de enseñanza aprendizaje, fundamentados en el empleo de recursos info-tecnológicos, propician la interacción y la colaboración en grupos de estudiantes, lo que potencia la metacognición, facilita compartir información y desarrolla habilidades para llegar a conclusiones basadas en el consenso y lo que es, quizás, más trascendente, desplegar un proceso de enseñanza aprendizaje centrado en el estudiante. Se aumenta, además, la motivación del estudiante actual en la carrera de Física aprovechando las habilidades computacionales y en el manejo de los recursos informáticos que éste posee.

Es objetivo del presente trabajo continuar la experiencia de empleo de un curso mixto, ampliarla y profundizarla. También resulta importante señalar que esta experiencia permitió familiarizar a los estudiantes con una de las formas más difundidas de realización de la educación de postgrado, ya que muchas universidades [5] brindan cursos, diplomados, maestrías y doctorados de forma virtual con ayuda de plataformas de gestión de cursos.

II. DESARROLLO

El curso de Física Moderna II, se imparte en el cuarto año, primer semestre, para la carrera de Física y responde al programa de la asignatura de igual nombre que consta de 5 temas, con tres temas de Física Nuclear, uno de Partículas Fundamentales y otro de Cosmología. Su concepción responde a las del modelo educativo virtual [4] desarrollado en el curso 2004-2005 para cursos mixtos [6] fundamentalmente.

Un análisis de los cursos virtuales que se encuentran en internet nos muestra que son cursos fundamentalmente con el uso de “*applets*” [7], que aunque algunos de muy alta calidad no responden a los objetivos que nos planteamos para un curso del cuarto curso de la carrera de Física donde los alumnos deben, como se señaló desarrollar el análisis y síntesis, identificación y distinción; abstracción y generalización; orientación y selección de información.

Hemos trabajado con la variante de cursos mixtos, dado la ventaja que los mismos ofrecen de potenciar las ventajas del curso presencial y las que la plataforma interactiva ofrece. Se tiene el curso implementado y se estructuran pedagógicamente actividades desarrolladas en el curso virtual como son los wiki, foros o webquests con las actividades propias de la presencialidad tales como las clases prácticas con la resolución de ejercicios y preguntas en las conferencias.

Como se puede apreciar en la Tabla I en el curso impartido en la modalidad mixta, se produce un desplazamiento hacia formas que requieren de mayor actividad creadora y desarrollo del pensamiento científico por parte del estudiante.

TABLA I. Formas de docencia en cinco cursos sin o con el uso de recursos info-tecnológicos en horas lectivas.

Tipo de curso	Conferencias horas	Clases prácticas	Prueba parcial	Seminarios
Con recursos	24	18	----	8
Sin recursos	30	18	2	-----

Colocados en la plataforma Moodle, se cuenta con los recursos didácticos correspondientes para las actividades docentes: contenidos por temáticas; ejercicios y problemas a cumplimentar en las clases prácticas, con algunos resueltos de ayuda a los estudiantes; un glosario de términos donde se introducen conceptos nuevos de las conferencias y se incluyen noticias recientes sobre las temáticas del curso; además se colocan otros temas de interés tales como biografías de los científicos más relevantes, destacando sus posiciones progresistas y humanistas, en estas áreas de la ciencia, que promueven la formación de valores en los estudiantes.

Basándonos en nuestra experiencia docente hemos constatado que los materiales puestos a su consideración no deben limitarse a referencias bibliográficas sino que deben abarcar contenidos, estructurados de acuerdo a los objetivos del curso, que le sirvan de soporte para que la nueva información se relacione de manera no arbitraria y sustantiva con su estructura cognitiva, logrando la comprensión de las ideas fundamentales y desarrollando el interés por la búsqueda de nuevos conocimientos.

En el desarrollo de la experiencia fue necesario considerar que, no obstante su preparación en el empleo de los recursos computacionales, en la actualidad los estudiantes participantes no poseen habilidades en el empleo de plataformas interactivas en la docencia y tampoco están familiarizados con las herramientas y recursos de la Web 2.0, por lo que fue necesario familiarizarlos inicialmente con éstas, para lo que se realizó un seminario práctico, orientado a facilitar el manejo del Wiki, el WebQuest y el Foro.

A. Instrumentación del Wiki

El Wiki según Wikipedia es “Un Wiki (o una *Wiki*) (del hawaiano *wiki wiki*, «rápido») es un sitio Web colaborativo que puede ser editado por varios usuarios. Los usuarios de una Wiki pueden así crear, editar, borrar o modificar el contenido de una página Web, de forma interactiva, fácil y rápida; dichas facilidades hacen de la Wiki una herramienta efectiva para la escritura colaborativa”.

Considerando las posibilidades del Wiki, nos propusimos que los estudiantes crearan contenidos de forma interactiva. Fue seleccionada esta herramienta por las posibilidades que brinda para que los estudiantes del grupo al que se les asigna un tema, puedan colectivamente desarrollarlo y realizar su aprendizaje. Se partió de la motivación adicional que tendría para los estudiantes el uso de una herramienta que no conocían y les fueron explicadas las posibilidades que ofrecen de construir colectivamente textos. A este fin, se planificó utilizarlo en el tema sobre propiedades de los

núcleos estables, en dos aspectos específicos: uno sobre el neutrón: historia de su descubrimiento, sus propiedades, reacciones de obtención y usos y otro sobre los elementos transuránicos: sus propiedades, reacciones de obtención, las familias radioactivas y sus usos.

Se escogió el tipo de Wiki que permite la edición por parte de los alumnos y en el que se puede además conocer quien y cuando realizó algún aporte texto en el historial del menú de pestaña del wiki.

B. Instrumentación del Foro

Como es conocido, el Foro o conferencia en el sentido telemático [8], es un espacio virtual, que tiene entre sus características principales la posibilidad de emplearse como espacio social y espacio de encuentro para intercambio permanente, en nuestro caso entre los estudiantes entre sí y estos con el profesor formando todos, una comunidad lo que brinda la oportunidad de que se realice el aprendizaje como fue fundamentado en [9].

También tenemos que al conectarse al Foro estudiantes con diferentes experiencias y desarrollos cognitivos aprovechamos la Zona de Desarrollo Próximo (ZDP) de manera efectiva pues ellos son capaces de resolver los problemas planteados bajo la guía del profesor o en colaboración con sus pares que participan en el Foro

Este recurso fue utilizado fundamentalmente con un carácter de Foro de novedades y de noticias para todo el grupo. El uso de este recurso nos brindó además, la posibilidad de comunicarnos mediante correo electrónico con los participantes del curso. Permittiéndonos, de ser necesario, incluso colocar imágenes y adjuntar archivos en los mensajes.

C. Instrumentación del WebQuest

Es importante destacar por su importancia didáctica que, no obstante no ser el WebQuest un recurso destinado al trabajo colaborativo, su creador Bernie Dodge [10, 11] lo definió como una actividad orientada a la investigación donde toda o casi toda la información que se utiliza procede de recursos de la Web. Esta herramienta permite un aprendizaje avanzado en un contexto constructivista y al ser seleccionado un tema de investigación sobre un hecho real, propicia que se alcance por los alumnos un aprendizaje situado.

Con el desarrollo de la Web 2 se ha hecho un uso de nuevas herramientas de la misma para darle una nueva dimensión al WebQuest [12]. Así en este trabajo se aprovecharon las posibilidades que brindan la reflexión colectiva de las presentaciones realizadas por los alumnos en seminarios que permiten aprovechar las ventajas del aprendizaje conversacional. Se explotan de esta manera, las relaciones, que surgen en la discusión de estas ponencias, de los alumnos entre si y de estos con el profesor no solo en el plano cognitivo sino también en el plano afectivo.

Como es señalado en [11] al núcleo del WebQuest: la introducción y las conclusiones se añaden la tarea, una guía

de recursos en la Web y una descripción de cómo organizar la información para elaborar el informe.

A partir de la motivación que podía provocar en los estudiantes la importancia de las tareas a plantear por su relación con la realidad se propusieron cuatro WebQuest:

- Aplicación de los radioisótopos en la Medicina.
- El Accidente de Chernobil [13].
- El origen del Universo.
- Evolución de las estrellas,

que abarcan el tema de reacciones nucleares los dos primeros, y de cosmología los dos últimos. Las temáticas fueron escogidas por la diversidad de fuentes y enfoques que sobre ellas existe, lo que propicia el desarrollo de criterios propios y la adquisición de una formación ética por parte de los participantes, aspectos estos factibles de evaluar con esta herramienta.

III. DESARROLLO DE LA EXPERIENCIA

Resulta imprescindible, para el exitoso desarrollo de la experiencia, que el profesor realice una exhaustiva preparación, organizativa y establezca la clara definición de los objetivos de las actividades, en las cuales se emplean los recursos info-tecnológicos. Estos objetivos deben ser de conocimiento y consensuados con los estudiantes. Además es necesario mantener, por parte del profesor tutor una constante atención al desarrollo de las diferentes actividades, tomando las medidas oportunas y prestar la guía y el control necesario que garanticen su cabal cumplimiento.

Se dividió el grupo en dos sub-grupos, constituidos por siete integrantes cada uno, los que debían interactuar y colaborar entre sí, en la preparación de las diferentes actividades. A través del historial de la plataforma se pudo seguir la participación de los miembros de cada equipo en la elaboración del mismo, lo que permitió el efectivo control la participación de cada estudiante.

En la elaboración del Wiki fue necesario prestarles ayuda a los estudiantes para la colocación de imágenes en el mismo. El profesor leyó constantemente lo escrito y cuando lo estimó necesario promovió el intercambio con los estudiantes del equipo, debatiendo sobre la calidad y claridad de los contenidos elaborados e hizo las correcciones oportunas. Este método de trabajo permite reforzar el aprendizaje.

Se llevaron a cabo cuatro seminarios donde los miembros de cada grupo rindieron su informe sobre su tarea en el WebQuest. Estos seminarios se organizaron a partir de una presentación inicial de los estudiantes. Una vez concluida ésta todos los participantes realizaron preguntas o discreparon con algún enfoque expuesto, produciéndose el debate de manera natural. El tutor, en este caso, asumió el papel de facilitador, guiando la discusión y propiciando llegar a consenso sobre las ideas, opiniones, posiciones científicas, éticas, etc., en conflicto.

El tema de Cosmología fue desarrollado íntegramente en esta ocasión, con ayuda de los dos WebQuest, en los dos seminarios planificados al efecto. Los estudiantes demostraron su capacidad para, con la orientación del tutor, materializar su aprendizaje a partir de la búsqueda y análisis

crítico de información en libros y páginas Web y su posterior análisis colectivo.

IV. EVALUACIÓN

La evaluación del estudiante se realizó tomando en consideración: su desempeño en los seminarios; su participación en la elaboración del Wiki y en las actividades presenciales. Además, formó parte de la evaluación final, su participación en las clases prácticas y la competencia alcanzada en la resolución de ejercicios y problemas, mediante lo cual a su vez se valoraba el dominio de la teoría contenida en los materiales docentes preparados y la bibliografía recomendada.

Todo esto permitió, enriquecer la evaluación del estudiante en su aprendizaje con respecto al que tradicionalmente se realiza sin el empleo de la info-tecnología. No sólo se evaluaron los conocimientos teóricos que el estudiante se apropió mediante su estudio, sino que se valoró también las habilidades adquiridas para la metacognición; su capacidad de discriminar información y reelaborarla para su presentación y discusión ante el grupo; el hábito de escuchar los criterios ajenos y defender los propios hasta llegar a consenso, aspectos estos todos, de gran utilidad para su trabajo profesional en el futuro.

Hemos realizado el análisis de los últimos cinco cursos en que se impartió esta asignatura de Física Moderna II, de los cuales en tres se emplearon recursos info-tecnológicos y en dos no fueron utilizados.

Como podemos observar, en la Tabla II, el uso del curso de apoyo ha aumentado el por ciento de alumnos evaluados con Excelente y no hay alumnos desaprobados, lo que nos indica la influencia del curso de apoyo en el aprendizaje. Con el objetivo de validar esta hipótesis se aplicó a los datos de la Tabla II la prueba de hipótesis de proporciones para dos muestras independientes, una la de los resultados obtenidos con la aplicación del curso virtual con recursos infotecnológicos y la otra muestra de los resultados con el método presencial, obteniéndose que es significativa la diferencia de los dos grupos (*P-value* 0.0763).

TABLA II. Resultados docentes en 5 cursos con y sin recursos.

Tipo de curso	Excelente	Muy Bien	Bien	Desaprobado
Con recursos	82.75 %	13.8 %	3.45 %	----
Sin recursos	37.93 %	37.93 %	17.24 %	6.9 %

V. PERCEPCIÓN DE LOS ESTUDIANTES SOBRE LA EXPERIENCIA

Se elaboró una encuesta con el objetivo de recoger las opiniones de los estudiantes sobre el empleo de las TICs en el curso. Esta encuesta anónima fue entregada a los estudiantes a fines del período lectivo, una vez evaluados. Toda vez que la población de 15 estudiantes era pequeña, se entregó la encuesta a todos y fueron devueltas 9 encuestas

llenas. Esto hace que los resultados puedan ser tomados solamente como evaluadores de tendencias en el grupo de estudiantes.

De los resultados tenemos que:

- 87,5 % consideró útil su empleo. 12.5 % que era no muy útil
- Todos los encuestados emplearon por primera vez estos recursos.
- 75% le resultó fácil trabajar con la plataforma interactiva. 25 % que no mucho.
- 87.5% consideró útil la plataforma interactiva para su formación profesional. 12.5 % no mucho.
- Al 62,5 % les fue motivante el trabajo con el Wiki. 25 % que no mucho. 12,5 % poco.
- 87.5 % consideró útil el trabajo con el WebQuest. 12.5 % no mucho.
- 50% reconoce la utilidad de la experiencia en adiestrarse en la búsqueda de consenso.
- A la pregunta: “¿Considera útil el empleo de la plataforma interactiva y sus actividades cursos de Física. Argumente su respuesta”, todas las respuestas son positivas, dando criterios muy interesantes que argumentan su respuesta:
 - Si, la considero útil ya que me puede acercar a nuevas tecnologías informáticas que influyen de manera positiva en mi formación profesional, escribió uno de los estudiantes.
 - Si, porque así se pueden obtener documentos que solo existen en formato digital o son de muy difícil acceso.
 - El uso de un sistema de este tipo motiva a uno a aprender.
 - Uno puede profundizar en la dirección que quiera y en el momento que quiera.
- A la pregunta: “¿Qué recomendaciones daría para próximas experiencias de empleo de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en el proceso de Enseñanza-Aprendizaje?” Las respuestas se refieren fundamentalmente a:
 - la inserción de imágenes en los Wiki y
 - la conveniencia de tener un espacio de discusión en la plataforma.

VII. CONCLUSIONES

Esta experiencia sobre el uso de cursos virtuales en plataformas interactivas como apoyo al proceso de enseñanza aprendizaje en la asignatura de Física Moderna II podemos catalogarla de exitosa.

Cuando analizamos los resultados, en los últimos cursos, de esta asignatura, la que tradicionalmente ha contado con buenos resultados, vemos que la media de estudiantes con

resultados excelentes alcanza 37,93% y con la implementación de la experiencia ésta alcanzó el 82.75 %. Esto, estimamos, indica mayor calidad del aprendizaje, los datos analizados mediante la prueba de hipótesis de proporciones para dos muestras independientes, obteniéndose que es significativa la diferencia de los dos grupos (P -value 0.0763).

Se familiarizó a los estudiantes con la plataforma Moodle y otros recursos info-tecnológicos, hasta ahora desconocidos para ellos. Los participantes desarrollaron habilidades suficientes como para trabajar con estos recursos de manera independiente, lo que les será de utilidad en su futuro profesional.

Se amplió la experiencia anterior con la inclusión de nuevas actividades como el Wiki, el Foro y se consolidó la realización de los WebQuest.

El tema de Cosmología fue desarrollado íntegramente en esta ocasión, con ayuda de los WebQuest y los estudiantes demostraron su capacidad para, con la orientación del tutor, materializar su aprendizaje a partir de la búsqueda y análisis crítico de información en libros y páginas Web y su posterior análisis colectivo.

Pensando en futuras experiencias, con esta u otras asignaturas, estimamos es conveniente ampliar la utilización del Foro, dándole un carácter de discusión de diferentes temáticas del curso y no limitarse solo a noticias.

Recomendamos la inclusión del Blog como otra de las herramientas a usar en el curso por las implicaciones educativas que va teniendo y lo provechoso de la experiencia preliminar realizada este curso con un blog de los últimos descubrimientos sobre la estructura del neutrón.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dra. Vivian Sistachs de la Facultad de Cibernética-Matemática por la realización de las pruebas de hipótesis de los resultados de la promoción y al Dr. Eduardo García Tarajano de la Facultad de Física de la Universidad de La Habana, por la lectura crítica del manuscrito.

REFERENCIAS

- [1] Fuentes, J., Calzadilla, O. y Pérez, A., *Instrumentación de Modelo Educativo Virtual en la Facultad de Física de la Universidad de la Habana: Aplicación a la Física Moderna II*, CD del IV Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física, ISBN 959-16-0485-8. La Habana, Enero (2007).
- [2] Itelson, L. B., *La actividad docente. Sus orígenes, estructura y condiciones*. Lietopisi sovriemiennim problemam psijologii abuchenia. (Izdatelstbo Vladimir, URSS, 1972).
- [3] Martín, M., *El modelo educativo del Tecnológico de Monterrey*, (Ed. Tec. Monterrey, Monterrey, México, 2002).
- [4] Fuentes, J., Calzadilla, O. y Pérez, A., *Propuesta de modelo educativo virtual*, Rev. Cub. Fis. **24**, 59-63 (2007).
- [5] Se brindan estos programas virtuales en: Universidad Nacional de Educación a Distancia UNED, España, Universidad Nacional Abierta UNA de Venezuela, Athabasca University de Canadá, la Universidades Abiertas del Reino Unido y los países bajos entre otras.
- [6] González, J. C., *B-Learning utilizando software libre, una alternativa viable en Educación Superior*, Revista Complutense de Educación **17**, 121-133 (2006).
- [7] Cursos de Física en internet. <http://www.meet-physics.net/tica-la-fisica/tica-la-fisica.htm>. Tomado el 2 Julio 2008.
- [8] Martín de la Hoz, P., *El Foro como sistema de comunicación e interacción*, Revista Complutense de Educación, **18**, 95-112 (2007)
- [9] Pask, G., Conversation Theory, recuperado de <http://tip.psychology.org/pask.html> Tomado en Mayo de 2006.
- [10] Dodge, B., *WebQuests: A Technique for Internet-Based Learning*, Distance Educator **1**, 10-13 (1995).
- [11] Dodge, B., *Some Thoughts About WebQuests*, http://WebQuest.sdsu.edu/about_WebQuests.html. Tomado en Marzo del (2007).
- [12] March, T., *Revisiting WebQuests in a Web 2 World. How developments in technology and pedagogy combine to scaffold personal learning*, Interactive Educational Multimedia **15**, 1-17 (2007) Tomado el 10/03/2008, de www.ub.es/multimedia/iem
- [13] Fuentes, J., *WebQuest "El Accidente de Chernobil" II*, Jornadas Internacionales del WebQuest, Cataluña, España, Marzo (2006).

Enseñanza de la Física en la Educación Media Tecnológica a través de un diseño curricular por competencias, una experiencia en marcha



Andrea Cabot Echevarría^{1,2}

¹Inspección de Física del Consejo de Educación Técnico Profesional, San Salvador 1674, CP 11,200, Montevideo, Uruguay.

²Departamento de Física, Instituto de Profesores Artigas, Avda. del Libertador No.2025, CP 11,800, Montevideo, Uruguay.

E-mail: acabot@anep.edu.uy

(Recibido el 5 de Mayo de 2008; aceptado el 11 de junio de 2008)

Resumen

¿Cómo adecuamos nuestros conocimientos y actitudes para dar respuesta y aprovechar las nuevas oportunidades que la actual sociedad de la información nos ofrece? En el caso de la enseñanza de la Física en Uruguay, en cursos dependientes del Consejo de Educación Técnico Profesional (C. E. T. P.), por su vinculación directa con el perfil de egreso de cada una de las orientaciones ocupacionales, se está trabajando en el perfeccionamiento de la metodología de la enseñanza de modo que el estudiante logre conocer y comprender la esencia de la Física con un alto nivel de motivación, y que a su vez contribuya a aprender ante la necesidad actual del aumento cotidiano de la información. Esta educación cumple la doble función de permitir la inserción laboral a la vez que habilita la continuación de estudios universitarios.

Palabras clave: Diseño curricular, Competencias, Física.

Abstract

How do we adapt our knowledge and attitudes in order to give an answer and at the same time take advantage of all the technological breakthrough that we are offered nowadays? In some specific areas like Uruguayan Physics tuition (in courses which are dependent on Professional Technical Educative, C. E. T. P.) due to its direct involvement with each occupational orientation features, they are working on the improvement of the educational methodology, in which the student will be able to get to know and understand the essence of the Physics in a more motivating way, as well as contributing to the present necessity of having to be update with the relentlessly technological pace. Not only does this education obeys the double function of permitting the insertion in the labor market, but it also allows the continuation of university studies

Keywords: Design curriculum, Competences, Physics.

PACS: 01.40.Di, 01.40.ek, 01.40.G-

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Este diseño curricular se ubica en la Educación Media Tecnológica de Uruguay (en adelante, E. M. T.), nivel que corresponde como en muchos países a la educación post-obligatoria, que al igual que la Educación Media Superior habilita para el ingreso a las diferentes facultades y escuelas universitarias. Está orientada más hacia una formación tecnológica que a prácticas operativas y se desarrolla en varias orientaciones: Administración; Agro Tecnología, Construcción; Electromecánica, Electrónica y Electromecánica Automotriz; Informática; Química Básica e Industrial y Turismo [1].

La estructura curricular está organizada por espacios y trayectos curriculares:

- Espacio Curricular de Equivalencia, posibilitador del tránsito entre diferentes modalidades dentro de la Educación Media y fortalecedor de las competencias fundamentales; espacio que permite la reorientación de los jóvenes que transitan por una edad donde las opciones educativas y profesionales están aún en proceso de definición, en función de la conformación de la personalidad y su percepción de auto imagen en el contexto socio-económico y cultural en que se desarrollan.
- Espacio Curricular Tecnológico, define la diferenciación curricular, tendrá la perspectiva de la diferenciación tecnológico-propedéutica en función de las orientaciones. Es en este espacio curricular donde se desarrollan las asignaturas y laboratorios propios de cada orientación y el que constituye el componente tecnológico.

La asignatura Física, en el caso de las orientaciones Administración y Turismo, está comprendida en el Espacio Curricular de Equivalencia, mientras que en las de Agrotecnología, Construcción; Electromecánica, Electrónica y Electromecánica Automotriz; Informática; Química Básica e Industrial, forma parte del Espacio Curricular Tecnológico.

En todos los casos, la Educación Media Tecnológica tiene una duración de tres años en los que no siempre está la asignatura Física (esta situación varía en cada orientación).

II. ¿POR QUÉ UN DISEÑO CURRICULAR BASADO EN COMPETENCIAS?

Los avances científicos y tecnológicos tienen cada vez mayor rapidez de cambio. También se hace cada vez más visible por la ciudadanía la importancia de esos avances por su incidencia en diferentes ámbitos: sociales, económicos, cotidianos, etc.

Frente a este problema, varios investigadores han propuesto las competencias como eje de los nuevos modelos de educación [2].

Sin desconocer el origen “laboral” de las competencias, y su propia polisemia, el mismo se instaló en la educación y con él la dicotomía entre competencias y el conocimiento. Parecería que la formación a través de competencias podría significar dar la espalda a la asimilación de conocimientos. En todo caso, hay dos visiones que se debaten: en un extremo enseñar profundamente los conocimientos, dejando a cargo del individuo la creación de competencias; por el otro extremo, orientar el diseño curricular hacia las competencias, sin asociarlas a los contenidos provocando un vacío conceptual.

Sin embargo, las competencias aparecen no rechazando contenidos ni disciplinas, pero sí enfatizando su puesta en práctica. Las mismas pasan a ser las orientadoras de los conocimientos disciplinarios. La planificación y la organización de la formación, estarán dadas por las competencias a desarrollar, más que en los contenidos específicos. Tal enfoque rompería con la inercia pedagógica de las rutinas didácticas, la segmentación de los cursos, de una evaluación separada del proceso de aprendizaje, todo lo cual ha conducido a una formación dirigida a salvar los exámenes, más que a crear competencias [3].

En este sentido, Perrenoud [4], define la competencia “como una capacidad de actuar de manera más eficaz en un tipo definido de situación, capacidad que se apoya en conocimientos, pero no se reduce a ellos”. Aquí radica uno de los aspectos claves: la necesidad de movilizar los conocimientos. La construcción de competencias es inseparable de la formación de modelos de movilización de conocimientos de manera adecuada, en tiempo real y al servicio de una determinada acción.

En este enfoque se deben promover competencias esenciales para desarrollar a través de la enseñanza de las Ciencias. Reorganizar el currículo exige, más que nuevos contenidos, verlos articulados de una manera diferente, desde una nueva perspectiva, obviamente no por una visión utilitaria de los saberes teóricos, según Perrenoud la inclusión de los contenidos en los currículos no se justificarían sólo por la tradición, por un argumento de autoridad o por la influencia de un grupo de presión.

Varias investigaciones en didáctica de las ciencias, muestran que la misma se reduce, generalmente, a que los estudiantes aprendan sólo conocimientos científicos sin tener en cuenta su conexión con los problemas reales. Un diseño curricular basado en competencias permitiría una alfabetización científico - tecnológica que considere el papel central que juegan los problemas tecnológicos y científicos en la vida del siglo XXI. La necesaria toma de decisiones sobre los grandes problemas, requiere que las personas sean capaces de usar el conocimiento científico, identificando problemas y elaborando conclusiones [5].

A lo largo de los últimos años ha existido un consenso sobre la disparidad creciente entre la Ciencia que se enseña en nuestras aulas y la necesidades y los intereses de los jóvenes, que tendrán en su futuro una responsabilidad ciudadana. Los cambios tecnológicos acelerados y la globalización del mercado exigen individuos con educación general en diversas áreas, capacidades de comunicación, flexibilidad adaptativa y una capacidad para aprender a lo largo de toda su vida. Estas competencias no son compatibles con una enseñanza científica compartimentada en contenidos desligados de la realidad.

En esta perspectiva se deben promover competencias fundamentales para desarrollar a través de la enseñanza de las ciencias en la educación tecnológica. Reorganizar el currículo de las Ciencias exige, más que nuevos contenidos, verlos articulados de una manera diferente.

III. LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA EN LA EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

En décadas anteriores, las preocupaciones curriculares se centraban casi exclusivamente en la adquisición de conocimientos científicos, con el fin de familiarizar a los estudiantes con las teorías, conceptos y procesos científicos. Actualmente, la inclusión de asignaturas científicas en la currícula de la Educación Tecnológica busca favorecer el desarrollo de competencias científico-tecnológicas, indispensables para la comprensión de fenómenos naturales, así como las consecuencias de la intervención del hombre. Se busca una enseñanza orientada a las cuestiones sociotecnológicas [6].

En ese sentido es posible contextualizar la enseñanza de la asignatura con el fin de formar a los estudiantes para desenvolverse en un mundo impregnado por los desarrollos

científicos y tecnológicos, de modo que sean capaces de adoptar actitudes responsables y tomar decisiones fundamentadas.

La enseñanza de la Física en el marco de una formación científico-tecnológica actúa como articulador entre las tecnologías, no sólo por los contenidos específicos que aporta en cada orientación, sino por su postura frente a la búsqueda de resolución de problemas y elaboración de modelos que intentan representar la realidad.

Esta formación permite obtener autonomía y a la vez responsabilidad cuando cambia el contexto de la situación a otro más complejo, del mismo modo que posibilita realizar tareas no rutinarias. Esta flexibilidad requerida hoy, permitirá a los estudiantes movilizar sus conocimientos a nuevos contextos laborales y crear habilidades genéricas que provean una plataforma para aprender a aprender, pensar y crear.

IV. PROPUESTA METODOLÓGICA

En los cursos de Física, dentro de la Educación Tecnológica, hay que tener muy presente el tipo de alumnado que tiene que formar, así como el perfil de egreso de los estudiantes de esta carrera.

Se pretende que los estudiantes movilicen saberes y procedimientos a través de planteamientos de situaciones-problema o ejercicios que integren más de una unidad temática (para no reforzar la imagen compartimentada de la asignatura) de manera que no pueden ser resueltas sino a partir de nuevos aprendizajes. Así se asegura el desarrollo de las competencias y la cabal comprensión de los principios involucrados.

Las competencias estarán vinculadas a ciertos contenidos asociados que se pueden agrupar en conceptuales, procedimentales y actitudinales, que serán los recursos movilizables para el desarrollo de las distintas capacidades. La realización de un experimento requiere de conocimientos aceptable de las leyes que se ponen a prueba y de sus contextos de validez, las precauciones que deben tomarse durante el experimento que se realiza, tanto con respecto al instrumental, como a la eliminación de efectos no deseados. Además, el manejo de las aproximaciones a utilizar, y la cuantificación de variables, está en relación directa con el conocimiento acabado de las leyes y sus limitaciones.

La contextualización debe ser una de las preocupaciones permanentes del docente por su potencia motivacional. El abordaje a través de temas contextualizados en el ámbito industrial y medio ambiente resulta una estrategia que permite la coordinación con otras disciplinas del Espacio. Sin dejar de reconocer la validez de la ejercitación, en algunas instancias del proceso de aprendizaje, el docente deberá propiciar las actividades capaces de generar la transferencia a situaciones nuevas.

V. LA DEFINICIÓN DE COMPETENCIAS EN EL DISEÑO CURRICULAR

A continuación se presenta un cuadro con la definición de las competencias científicas fundamentales que se han identificado para alcanzar por parte de los estudiantes de cada Orientación de E. M. T., que a su vez permitirán desarrollar en un proceso gradual la adquisición de las competencias específicas necesarias para profundizar en estudios científico-tecnológicos, o especializaciones Técnicas.

TABLA I. Competencias Científicas Fundamentales.

Competencia	El desarrollo de esta competencia implica:
Comunicación a través de códigos verbales y no verbales relacionados con el conocimiento científico	Expresarse mediante un lenguaje coherente, lógico y riguroso. Leer e interpretar textos de interés científico. Buscar, localizar, seleccionar, organizar información originada en diversas fuentes y formas de representación, incluyendo TIC's. Comunicar e interpretar información presentada en diferentes formas: tablas, gráficas, esquemas, ecuaciones y otros. Reflexionar sobre los procesos realizados a nivel personal de incorporación y uso del lenguaje experto.
Investigación y producción de saberes a partir de aplicación de estrategias propias de la actividad científica	Plantear preguntas y formular hipótesis a partir de situaciones reales. Diseñar experimentos seleccionando adecuadamente el material y las metodologías a aplicar. Analizar y valorar resultados en un marco conceptual explícito. Modelizar como una forma de interpretar los fenómenos. Distinguir los fenómenos naturales de los modelos explicativos. Desarrollar criterios para el manejo de instrumentos y materiales de forma adecuada y segura. Producir información y comunicarla. Reflexionar sobre las formas de conocimiento desarrolladas.
Participación social considerando sistemas políticos, ideológicos, de valores y creencias	Ubicarse en el rango de escalas espacio-temporales en las que se desarrollan actualmente las investigaciones. Despertar la curiosidad, asociando sistemáticamente los conceptos y leyes a problemas cotidianos. Elaborar propuestas para incidir en la resolución de problemas científicos de repercusión social. Reconocer la dualidad beneficio-perjuicio del impacto del desarrollo científico-tecnológico sobre el colectivo social y el medio ambiente. Concebir la producción del conocimiento científico como colectiva, provisoria, abierta y que no puede desprenderse de aspectos éticos. Reconocer la actividad científica como posible fuente de satisfacción y realización personal.

Atendiendo al desarrollo de las competencias correspondientes al perfil de egreso del estudiante de E. M.

T. en cada orientación, y las competencias científicas anteriormente presentadas, la asignatura Física define su aporte mediante el conjunto de objetivos que aparecen en términos de competencias específicas:

TABLA II. Competencias Científicas ESPECÍFICAS.

Competencia	El desarrollo de esta competencia implica
Resolución de problemas	Reconoce los problemas de acuerdo a sus características. Identifica la situación problemática. Identifica las variables involucradas. Formula preguntas pertinentes. Jerarquiza el modelo a utilizar. Elabora estrategias de resolución. Aplica leyes de acuerdo a la información recibida. Infiere información por analogía.
Utilización del recurso experimental	Reconoce el enfoque experimental como un camino para producir conocimiento sobre una situación problemática y desde ciertas hipótesis de partida. Domina el manejo de instrumentos. Diseña actividades y elabora procedimientos seleccionando el material adecuado. Controla variables. Comunica los resultados obtenidos por diversos medios de acuerdo a un enfoque científico.
Utilización de modelos	Reconoce la utilización de modelos como una herramienta de interpretación y predicción. Elabora y aplica modelos que expliquen ciertos fenómenos. Argumenta sobre la pertinencia del modelo utilizado en diversas situaciones, de laboratorio, cotidiano, y del campo tecnológico específico. Reconoce los límites de validez de los modelos. Contrasta distintos modelos de explicación. Plantea ampliación de un modelo trabajado.

VI. LA SELECCIÓN DE CONTENIDOS

La necesidad de encontrar una adecuada vinculación teórico-práctica de los contenidos de Física con el perfil de egreso, conlleva a reflexionar sobre la organización de los mismos teniendo en cuenta situaciones profesionales, que propicien el aprendizaje de la misma.

Esto, sumado al hecho que la carga horaria asignada a la asignatura varía de acuerdo con las diferentes orientaciones, hace que resulte más complejo el proceso de selección de contenidos a jerarquizar en cada una.

El siguiente cuadro presenta una breve descripción de los contenidos seleccionados para cada orientación, así como su carga horaria semanal en cada año del Plan:

TABLA III. Contenidos por orientación.

ORIENTACIONES	1º	2º	3º	UNIDADES A DESARROLLAR:
▪ Administración	3	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Óptica Geométrica ▪ Oscilaciones y Ondas ▪ Óptica Física
▪ Agro Tecnología	2			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Trabajo y Energía ▪ Sólidos y fluidos
		3		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Principios de la Termodinámica ▪ Electroneumática
			2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Movimientos periódicos ▪ Oscilaciones ▪ Ondas
▪ Construcción	3			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Magnitudes ▪ Equilibrio ▪ Trabajo y Energía ▪ Materiales
		3		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fluidos ▪ Termodinámica ▪ Electromagnetismo ▪ Ondas
▪ Electromecánica	3			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Equilibrio ▪ Trabajo y energía ▪ Fuerza y movimiento
		3		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rotaciones ▪ Fluidos ▪ Termodinámica ▪ Electromagnetismo
			3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oscilaciones libres ▪ Oscilaciones forzadas ▪ Ondas ▪ Óptica física ▪ Sensores
▪ Electro Electrónica	3			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Equilibrio ▪ Trabajo y energía ▪ Fuerza y movimiento
		3		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Electromagnetismo ▪ Oscilaciones Libres
			3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oscilaciones forzadas ▪ Ondas mecánicas ▪ Óptica física ▪ Int. a la Física Moderna ▪ Sensores
▪ Electromecánica Automotriz	3			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Equilibrio ▪ Trabajo y energía ▪ Fuerza y movimiento ▪ Electromagnetismo
		3		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fluidos ▪ Termodinámica ▪ Rotaciones

ORIENTACIONES	1°	2°	3°	UNIDADES A DESARROLLAR:	
			3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oscilaciones libres ▪ Oscilaciones forzadas ▪ Ondas mecánicas ▪ Óptica física ▪ Sensores 	
▪ Informática	3	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Equilibrio ▪ Trabajo y energía ▪ Fuerza y movimiento ▪ Electromagnetismo 	
▪ Química Básica e Industrial	6			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema de Unidades y Medidas ▪ Fuerzas de la naturaleza ▪ Óptica Geométrica 	
			4		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Electricidad/ Electroestática ▪ Corriente Eléctrica ▪ Electromagnetismo
				4	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oscilaciones ▪ Ondas ▪ Física Moderna ▪ Corriente Alterna
▪ Turismo	2	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Energía y Materia ▪ Temperatura y Calor 	

VII. EL DESAFÍO

Este modelo de diseño curricular, elaborado a partir de un amplio proceso de trabajo colaborativo lleva cuatro años desde su implementación. Es así que se ha completado ya el pasaje de una generación completa que ha egresado de la Educación Media Tecnológica en 2007.

Si bien existen algunos indicadores de logros en esta propuesta, resulta imperioso en este momento realizar una evaluación que promueva una investigación (o al menos una indagación) continua acerca las competencias desarrolladas por los estudiantes, los niveles de eficacia y eficiencia del Plan así como la gestión de la propuesta.

REFERENCIAS

- [1] Cursos en <<http://www.utu.edu.uy>>, Consultado el 30 de Abril de 2008.
- [2] Rey, B., *De las competencias transversales a una pedagogía de la intención*. (Dolmen Ediciones S. A., Santiago de Chile, 1999).
- [3] Sosa, A., *Un enfoque sobre la enseñanza de las ciencias basada en competencias*. (Memorias de la VIII Conferencia Interamericana de Educación en Física, La Habana, 2003).
- [4] Perrenoud, P., *Construir competencias desde la escuela*. (Dolmen Ediciones S. A., Santiago de Chile, 2000).
- [5] Sosa, A. y Cabot, A., *What Scientific Competencies Should to be Developed in the Secondary School?* (World Conference 2003 on Science and Technology Education, Penang, Malaysia, 7 - 10 de Abril, 2003)
- [6] Acevedo, J., *Análisis de algunos criterios para diferenciar entre Ciencia y Tecnología*, Enseñanza de las Ciencias **16**, 409-420 (1998).

Fundamentación del holograma como un medio de enseñanza de la Física



Rolando Serra Toledo, Gilda Vega Cruz, Angel Ferrat Zaldo¹, José Joaquín Lunazzi, Daniel S. F. Magalhães²

¹ *Departamento de Física, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría - CUJAE, Ave. 114, 11901, CP 19390, Ciudad de la Habana, Cuba.*

² *Instituto de Física, P.O.Box 6165, Universidad Estadual de Campinas - UNICAMP, 13083 - 970, Campinas SP, Brasil.*

E-mail: serra@electronica.cujae.edu.cu

(Recibido el 28 de Mayo de 2008; aceptado el 22 de Agosto de 2008)

Resumen

Con el surgimiento de los hologramas reconstruibles con luz blanca y su desarrollo posterior, se abrieron grandes posibilidades para su utilización como medio de enseñanza por la característica de producir una imagen tridimensional que constituye un duplicado óptico de un objeto. En el trabajo se describen las características distintivas del holograma como un medio de enseñanza de la Física y se realiza la fundamentación pedagógica, sociológica y psicológica de su utilización con estos propósitos.

Palabras clave: Holograma, Medio de enseñanza, Física.

Abstract

With the emergence of the holograms viewed with white light and its later development, big possibilities were opened for its utilization as teaching medium by the characteristic of producing a three-dimensional image that constitutes an optical duplicate of an object. In the work the distinctive characteristics of the hologram are described as a Physics teaching medium and was realized the pedagogic, sociological and psychological foundation of its utilization by these purposes.

Keywords: Holography, Teaching medium, Physics.

PACS: 01.40.Ha, 01.40.d, 42.40.My

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La **Holografía** es un método de recuperación integral de la información relativa al campo de irradiación difundido por un objeto real, por lo que permite obtener imágenes ópticas tridimensionales de distintos tipos de objetos [1].

El **Holograma** es el resultado del proceso holográfico, de manera similar a la foto que es el resultado del proceso fotográfico. Para que se pueda comprender con mayor facilidad qué es un holograma, podemos decir que es una foto realizada con el empleo de un láser y que la principal característica que posee es el carácter tridimensional de la imagen.

Al mirar un holograma el espectador tiene la impresión de ver, a través de una placa de vidrio un objeto realmente existente y puede observarlo desde diferentes ángulos. El holograma refleja las zonas de luz y sombra, y la textura del material resulta visible, lo que acrecienta la impresión de relieve. En realidad el objeto no existe en la placa holográfica, pero crea la ilusión óptica de su presencia ya que el holograma envía al espectador ondas luminosas idénticas a las que reflejaría el objeto real. La singular

cualidad que permite al holograma producir un duplicado óptico de un objeto, indujo a estudiar las posibilidades de su utilización como medio de enseñanza de la Física.

En este trabajo se describen las características distintivas del holograma como un medio de enseñanza de la física y se realiza la fundamentación pedagógica, sociológica y psicológica de su utilización con estos propósitos.

II. FUNDAMENTACIÓN PEDAGÓGICA, SOCIOLÓGICA Y PSICOLÓGICA DEL HOLOGRAMA COMO MEDIO DE ENSEÑANZA

En relación con la concepción de utilización del holograma como un medio de enseñanza:

- En algunas clasificaciones de medios consultadas [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] aparece incluido el holograma pero no se realiza su fundamentación y caracterización teniendo en cuenta sus particularidades y funciones didácticas específicas.

- No se han encontrado referencias a la utilización del holograma como un medio de enseñanza y de educación social como resultado de la integración de los procesos de Investigación - Docencia - Extensión Universitaria.

En relación con la utilización del holograma como medio de enseñanza de la disciplina Física en Ingeniería:

- Después de haber analizado los planes de estudio de ingeniería de varias Universidades de América y Europa [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17], encontramos que existen muchas Universidades que no incluyen la Holografía como un tema de la Disciplina Física en Ingeniería, a pesar de que la misma permite estudiar varias técnicas ingenieriles de uso generalizado.
- La gran mayoría de las Universidades que incluyen este tema se limitan a analizar los fundamentos físicos en que se sustenta esta técnica y a discutir las aplicaciones en un marco teórico y de forma expositiva.
- No se han encontrado referencias a la utilización de una Exposición Didáctica de Holografía para la enseñanza de la Disciplina Física en Ingeniería que incluya además de las instalaciones, procedimientos de obtención y diferentes tipos de hologramas, las aplicaciones de esta técnica en la especialidad y en la vida cotidiana como contribución a la formación de una cultura general integral en los estudiantes de estas carreras.

A. Fundamentos pedagógicos

Para poder comprender al holograma como medio de enseñanza, es conveniente comenzar por analizar qué entenderemos por medio de enseñanza.

En la amplia literatura del tema encontramos diversas definiciones de medio de enseñanza [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Entre las más completas, a nuestro criterio, están las siguientes:

“Medio es todo aquel componente material o materializado del proceso pedagógico que en función del método sirve para:

- Construir las representaciones de las relaciones esenciales forma – contenido, es decir, el significado y sentido de los conocimientos y habilidades a adquirir que expresa el objetivo.
- Motivar y activar las relaciones sujeto – objeto, sujeto – objeto – sujeto o sujeto – sujeto, así como la internalización y externalización de contenidos y acciones individuales o conjuntas presentes en tal proceso pedagógico.” [18]

“Todo componente material del proceso docente educativo con el que los estudiantes realizan en el plano externo las acciones específicas dirigidas a la apropiación de los conocimientos y habilidades” [19].

“Componentes del proceso pedagógico, que pueden ser utilizados por profesores y estudiantes, con el empleo o no de variados mecanismos y recursos, que partiendo de una relación orgánica con los objetivos y métodos sirven para facilitar el proceso de construcción del conocimiento, su control, el desarrollo de hábitos, habilidades y la formación de valores ” [20].

Consideramos que estas definiciones se complementan entre sí por lo que nos adscribimos a ellas para el desarrollo de este trabajo.

Existen diversas clasificaciones de medios de acuerdo a sus funciones específicas, a su naturaleza física o a su forma de utilización directa o mediante equipamiento técnico [21, 22, 23, 24, 25, 26]. En algunas de las mismas se incluye al holograma como un medio pero no se fundamenta de forma pedagógica y mucho menos se analizan sus particularidades y características peculiares.

Para fundamentar pedagógicamente la concepción de utilización del holograma como un medio de enseñanza, partiremos del análisis de los principios pedagógicos que se derivan de las leyes generales de la pedagogía [27] y que sirven de base a esta investigación.

De las diferentes clasificaciones de principios pedagógicos que aparecen en la literatura, asumiremos la planteada por Addine [28], por estar enfocada a la dirección del proceso pedagógico. Ellos son:

1. Principio de la unidad del carácter científico e ideológico del proceso pedagógico.
2. Principio de la vinculación de la educación con la vida, con el medio social y el trabajo, en el proceso de educación de la personalidad.
3. Principio de la unidad de lo instructivo, lo educativo y desarrollador, en el proceso de educación de la personalidad.
4. Principio de la unidad de lo afectivo y lo cognitivo, en el proceso de educación de la personalidad.
5. Principio del carácter colectivo e individual de la educación y el respeto a la personalidad del educando.
6. Principio de la unidad entre la actividad, la comunicación y la personalidad.

Analicemos a continuación cómo estos principios han servido de sustento y de guía para la concepción del holograma como un medio de enseñanza, así como para la estructuración de las propuestas de utilización de este medio en la docencia universitaria y en la educación social en Cuba. El principio de la unidad del carácter científico e ideológico del proceso pedagógico nos indica que debe ser estructurado teniendo en cuenta los avances continuos de la ciencia y la técnica y en correspondencia con nuestra ideología.

En los últimos años se ha planteado en diversas conferencias, artículos científicos y en reuniones de importantes organismos internacionales la necesidad de implementar nuevas tecnologías en las universidades que incluyen la introducción y utilización de nuevos medios de enseñanza dentro del perfeccionamiento de la Educación Superior en el mundo [29, 30, 31, 32, 33, 34].

Existen numerosos ejemplos de universidades que tienen entre sus objetivos principales de trabajo el desarrollo y empleo de la tecnología educativa que incluye no solo la utilización de las nuevas tecnologías de la informática y las comunicaciones, sino también el uso de modernos medios de enseñanza de todo tipo [35, 36, 37, 38, 39].

Nuestra propuesta de utilización del holograma como medio de enseñanza no descansa en emplear hologramas importados, sino fundamentalmente en la fabricación de hologramas propios para ser utilizados en la enseñanza

universitaria y para la educación de toda la sociedad mediante hologramas que en su mayoría corresponden a objetos cubanos de alto valor patrimonial, histórico y patriótico lo que contribuye a la formación política e ideológica de nuestros estudiantes y de toda la población.

El principio de la vinculación de la educación con la vida, con el medio social y el trabajo en el proceso de educación de la personalidad es muy importante en nuestra concepción, al proporcionar el vínculo de los estudiantes con la realidad económica, política y social del país y además porque apunta a que la sociedad participa en la educación de todos sus ciudadanos.

Este principio sirvió de guía para concebir que la utilización del holograma como medio de enseñanza se realizará mediante la forma de organización Exposición Didáctica, que como analizaremos mas adelante, tiene entre sus principales objetivos el cumplimiento de este principio por las múltiples y crecientes aplicaciones de la holografía en la vida cotidiana.

De igual manera, la concepción de utilizar por sus características al holograma también como un medio de educación social en museología se sustenta en las potencialidades de algunos medios de enseñanza de desempeñar una importante función como un medio educativo en la educación del pueblo.

Este principio también sirve de base a nuestra concepción de lograr la utilización docente y social del holograma a partir de considerar los procesos universitarios de Investigación, Docencia y Extensión Universitaria, tradicionalmente no relacionados, como un único proceso integrado donde la actividad de extensión permite la aplicación de los resultados de la investigación y de la actividad docente a la educación social.

Addine [28], propone en este principio diferentes acciones para su aplicación. A continuación relacionamos las que deben ser consideradas en las formas de utilización docente del holograma:

- Seleccionar contenidos transferibles a situaciones de la vida cotidiana, que favorezcan el aprendizaje colectivo y la interacción grupal.
- Hacer del proceso pedagógico un proceso vinculado a todo lo que rodea al estudiante en lo social, lo económico, lo político, lo familiar, lo productivo y a la naturaleza.
- Desarrollar habilidades en el alumno para trabajar en grupo, para que aprenda con los otros y de los otros, interactuando cooperativa y solidariamente.
- Preparar a los estudiantes para comprender las problemáticas acuciantes del mundo de hoy, a través de actividades que permitan asimilar los conocimientos científico técnicos y desarrollar iniciativas.
- Trazar proyectos de trabajo que permitan la plena participación de la comunidad en el proceso pedagógico en su doble papel: fuente de conocimiento y como beneficio de la labor social de los estudiantes.

El principio de la unidad de lo instructivo, lo educativo y lo desarrollador en el proceso de educación de la personalidad tiene como fundamento la unidad dialéctica existente entre la

instrucción y la educación en el proceso de formación y desarrollo de la personalidad.

En las propuestas de utilización del holograma como medio de enseñanza de la Disciplina Física en carreras de Ingeniería y de su uso como medio educativo social en museología están muy presentes las características peculiares del holograma de mostrar una imagen óptica exacta del objeto original y de que en su construcción se aplican leyes y conceptos físicos, por lo que son objeto de estudio de la propia Física, convirtiéndose así el holograma en objeto y medio de enseñanza en el estudio de la Física General en Ingeniería. Si los objetos holografiados son de importancia patrimonial e histórica entonces son portadores, además de conocimientos físicos, de información cultural, estética, histórica y patriótica que contribuye a la formación integral de la personalidad y de una cultura general integral.

En estas propuestas ha sido un elemento muy importante el potencial instructivo y educativo que poseen los hologramas construidos en el Laboratorio de Holografía del Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, tanto en la enseñanza como en otros contextos no académicos como los museos y la comunidad.

El principio de la unidad de lo afectivo y lo cognitivo, en el proceso de educación de la personalidad es básico en la concepción del holograma como medio de enseñanza. Ya discutimos anteriormente cómo en él se daba la unidad de lo instructivo y lo educativo, a lo que podemos agregar que al brindar una imagen tridimensional de un objeto, produce en el observador la sensación y la impresión de que el objeto real está presente, razón por la cuál el holograma es altamente motivador, produciéndose la unidad entre lo afectivo, lo cognitivo y lo educativo que constituye uno de los aspectos fundamentales que lo caracteriza.

Esta influencia positiva en la motivación que brinda el holograma por las características de la imagen y por las variadas e interesantes aplicaciones de la holografía en la vida cotidiana, predisponen favorablemente al estudiante y al público en general para el aprendizaje de esta moderna e importante técnica.

Si partimos de que la motivación es esencialmente un impulso en la actuación del sujeto y que motivar quiere decir crear interés, estimular el deseo, llamar la atención, despertar la curiosidad, contagiar con entusiasmo y suscitar el gusto como impulso activador [40] llegamos a la conclusión de que el holograma está entre los medios de enseñanza y de educación social mas motivantes y propiciadores de la unidad entre lo afectivo y lo cognitivo.

El principio del carácter colectivo e individual de la educación y el respeto a la personalidad del educando está presente en la concepción de la actividad docente a desarrollar en la Exposición Didáctica de Holografía que se analizará en un próximo artículo.

El principio de la unidad entre la actividad, la comunicación y la personalidad considera que ésta se forma y se desarrolla en la actividad y en el proceso de comunicación [40].

Los medios de enseñanza y de educación social favorecen la comunicación que se establece entre el profesor y el alumno, entre los propios alumnos y en general entre todos los participantes de este proceso, influyendo

directamente en el desarrollo y educación de la personalidad. Para lograr este objetivo el proceso pedagógico debe ser estructurado de manera que facilite la mejor y más efectiva comunicación posible.

Este aspecto fue tenido en cuenta en el diseño de las actividades a realizar en una Exposición Didáctica de Holografía construida y utilizada en la enseñanza de la física y en la utilización de la holografía para aplicaciones museables.

B. Funciones didácticas del holograma como medio de enseñanza y de educación social

Si consideramos al holograma como un medio de enseñanza y de educación social, debemos analizar las funciones didácticas que puede desempeñar este medio al ser utilizado en los procesos pedagógicos curriculares o sociales. En la literatura consultada no existen referencias a la determinación de las funciones didácticas de los hologramas al ser considerados como medio de enseñanza y de educación social.

Diversos autores han estudiado las funciones que desde un punto de vista didáctico pueden desempeñar los distintos tipos de medios en los procesos pedagógicos: Klingberg [41], González [23], Fernández [42], Porto [18] y Bravo [20].

En su Tesis Doctoral, Vicente González Castro [23] destaca importantes aspectos pedagógicos y psicológicos relacionados con los medios de enseñanza que sirven de base para el análisis de las funciones didácticas que los mismos pueden desempeñar:

“No sólo para presentar evidencias del mundo material o sus representaciones, que es el uso que más convencionalmente se les atribuye, ellos deben servir de guía a la formación de conceptos, leyes, algoritmos lógicos, permitir la extrapolación de los resultados obtenidos hasta lo posible y permitir derivar generalidades; ayudar a establecer el ciclo de ascensión de lo abstracto a lo concreto. Establecer el nexo entre lo sensorial y lo racional y entre este y sus aplicaciones prácticas, así como permitir la búsqueda de nuevas interrogantes y sus soluciones, son las tareas más importantes de los medios de enseñanza en el marco de la educación superior”.

El papel de los medios de enseñanza y de educación social radica esencialmente en establecer los vínculos entre los niveles sensoriales y racionales del conocimiento, entre lo concreto y el pensamiento abstracto; es así donde pueden ayudar realmente al aprendizaje de los estudiantes, a hacer más comprensible los conceptos, y abstraerse más fácilmente, a representar en su mente con más claridad aquellas cosas que al profesor son sumamente claras e incuestionables.

Por otra parte, analiza las características particulares y la importancia de las reproducciones visuales.

“Las reproducciones visuales son las más complejas de todas las reproducciones, pero además, la más importante en la enseñanza, debido al valor que tiene la percepción visual, tanto para la recepción de información como para su retención.

- Las investigaciones demuestran que se necesita aproximadamente siete veces menos tiempo para captar las cualidades esenciales de un objeto viéndolo directamente que si se describe oralmente.
- Con los medios de enseñanza se aprovechan en mayor grado las potencialidades de nuestros órganos sensoriales. El 83 % de lo que el hombre aprende le llega a través del sentido visual”.

El holograma por sus particularidades, constituye una de las reproducciones visuales más icónica de las existentes, lo que constituye su principal cualidad en su utilización como un medio de enseñanza.

Teniendo en cuenta las características particulares de los hologramas, estos poseen fundamentalmente las siguientes funciones didácticas: cognoscitiva, comunicativa, informativa, motivadora e integradora.

Para el análisis de la **función cognoscitiva** podemos partir del criterio expresado por Klingberg [41] y referido por Bravo [20] cuando señalan que: “Estructurar el proceso de aprendizaje como un proceso del conocimiento requiere el empleo de medios de enseñanza”. El holograma se puede convertir en el medio audiovisual por excelencia para conocer las propiedades y características del objeto original e incluso suplantarlos para múltiples aplicaciones, a través de su imagen tridimensional. Esto se debe a que a través de la holografía se logra el nivel de reproducción completamente icónico, permitiendo la observación de la realidad lo más objetivamente posible. Otra arista de la función cognoscitiva del holograma, atendiendo a como se obtiene, es que mediante él se puede llegar a comprender conceptos y fenómenos de la física y en particular de la óptica que se ponen de manifiesto y se aplican en el proceso de obtención del medio.

La **función comunicativa** de los medios de enseñanza y de educación social se pone de manifiesto en el papel que desempeñan en el proceso de comunicación, como señala Bravo [20] “ocupan el lugar del canal que es a su vez soporte de la información”. El holograma al producir una imagen tridimensional como duplicado óptico de un objeto, comunica la máxima información posible en ausencia del objeto original, en relación con la textura, el color, el brillo, el paralaje o la posibilidad de observación desde diferentes ángulos de visión, o sea, trasmite la misma información que el objeto original. Una muestra de la importancia creciente que están teniendo los hologramas en la comunicación son las investigaciones relacionadas con la televisión y el cine holográfico [43], cuya aplicación no se encuentra aún en nuestro país.

La **función informativa** de los medios está muy relacionada con la comunicativa, ya que es a través de la comunicación que se da el proceso de información. Bravo [20] nos recordaba una idea importante donde se pone de manifiesto el significado de esta función al citar a Fernández [42] cuando expresó que “el empleo de los medios permite brindar una información más amplia, completa y exacta, ampliando los límites de la transmisión de los conocimientos”. Por las características de la reproducción holográfica analizadas anteriormente, es evidente que mediante un holograma se trasmite prácticamente la misma

información que nos llega del objeto original, excepto en lo referido al tacto, lo que no se logra con el empleo de ningún otro medio como la fotografía, la televisión, el vídeo o la computadora.

Para abordar la **función motivadora**, partiremos del criterio de González [23] ratificado por Bravo [20] cuando plantean que: “los medios aumentan la motivación por la enseñanza al presentar estímulos que facilitan la autoactividad del estudiante, la seguridad en el proceso de aprendizaje y el cambio de actividad”. De igual forma Porto, G [18] señalaba: “El medio cumple su función psicológica, si se convierte en factor emocional grato y duradero, en satisfacción por aprender, descubrir y solucionar, y si al contener todos los estímulos e incentivos apropiados alcanza la significación subjetiva necesaria y un clima favorable”. Al permitir el holograma la observación de una imagen tridimensional de un objeto no existente con un grado de realismo tal que da la impresión al observador de que el objeto realmente está presente, se crea un grado de motivación en el estudiante y en los visitantes al museo muy elevado, que se acrecienta cuando el observador comprueba que se conserva el paralaje de visión del objeto original y la sombra proyectada por el mismo. Por otra parte, es extraordinariamente motivador para el estudiante comprobar que mediante las técnicas holográficas se pueden visualizar efectos no apreciables a simple vista como los estados tensionales y deformacionales de los cuerpos del orden de los micrómetros. Esta función motivadora del holograma se completa cuando el estudiante comprueba las múltiples aplicaciones de la holografía en la vida cotidiana a través de las actividades docentes programadas.

Este efecto motivador del holograma es de gran importancia para despertar el interés del estudiante y de los visitantes a los museos por comprender cómo se fabrica y por consiguiente lo predispone favorablemente para entender las leyes y conceptos de la física que se aplican en el proceso de obtención del mismo.

La **función integradora** de este medio es muy importante ya que en un holograma se integran diferentes elementos de gran importancia en la formación integral del estudiante y de la población en general:

- Leyes y conceptos de la física presentes en el proceso de registro y elementos importantes de química que se aplican en las etapas de procesamiento químico y de conservación.
- Conocimiento de una moderna técnica que permite obtener la imagen tridimensional de un objeto y que tiene múltiples y crecientes aplicaciones en la vida cotidiana y en las investigaciones actuales relacionadas con el cine y la televisión holográfica.
- En el caso de hologramas de doble exposición o interferogramas permiten al estudiante el conocimiento de una importante técnica de ensayo óptico no destructivo de gran aplicación en todas las especialidades de ingeniería.
- Constituye un medio de apreciación estética donde están presentes elementos formales del objeto: forma, color, etc.
- Al ser la mayoría de los hologramas construidos en Cuba de objetos de alto valor histórico y patrimonial,

contribuyen significativamente en la formación cultural y patriótica de los estudiantes y de la población en general.

Para lograr el cumplimiento de los principios didácticos y de las funciones didácticas analizadas anteriormente en las propuestas de utilización del holograma como un medio de enseñanza y de educación social, debe estructurarse un proceso pedagógico con un enfoque holístico que logre la integración armónica de todos sus componentes.

Las posiciones teóricas asumidas nos permiten considerar que las propuestas de utilización del holograma como un medio de enseñanza y de educación social están pedagógicamente fundamentadas para el logro de los objetivos propuestos.

C. Fundamentos Sociológicos

La educación como fenómeno social históricamente desarrollado tiene entre sus objetos de estudio la sociología de la educación.

La definición que consideramos más completa sobre la sociología de la educación es la de Baxter [44], al considerar a la educación como: “influencia decisiva en la formación del hombre a lo largo de la vida. Para eso debe prepararlo tanto para el logro de una incorporación personal y social activa, como para el disfrute y plenitud que deriven de la misma”.

La sociología de la educación martiana tiene entre sus principales postulados:

- La igualdad plena de derechos a la educación de todos los ciudadanos.
- La relación entre la educación y la transformación revolucionaria de la sociedad.

Para nuestra concepción sobre la utilización del holograma como un medio de enseñanza, es de mucha importancia un enfoque sociológico que reconozca que el individuo se forma y se desarrolla no solamente bajo la influencia de acciones dirigidas desde el sistema educacional, sino también desde el contexto social donde vive el individuo.

En la propuesta de utilización docente del holograma como medio de enseñanza de la Disciplina Física en Carreras de Ingeniería mediante una Exposición Didáctica de Holografía, presentamos como una idea central la vinculación de los estudiantes con los problemas de la práctica social de las diferentes especialidades mediante el análisis de las aplicaciones de la holografía a las mismas, además de conocer y analizar las diferentes aplicaciones de esta técnica en la vida cotidiana, contribuyendo a la formación de una cultura general integral en los estudiantes de estas carreras universitarias.

Hoy no resulta suficiente pedirle al profesor únicamente estar informado. Al profesor se le pide además fomentar la convivencia, la participación, la cooperación, la autonomía del alumno, la autocrítica y la reflexión. Estos nuevos enfoques necesariamente inciden en la búsqueda de nuevos papeles a desempeñar por los medios audiovisuales en la enseñanza.

Teniendo en cuenta una perspectiva sociológica de la educación, la utilización de hologramas como medio de

enseñanza puede influir en la formación de valores importantes en los estudiantes y en la población mediante:

- Vínculo entre la especialidad y las aplicaciones en la técnica.
- Vínculo con las aplicaciones en la vida cotidiana.
- Necesidad de conservación y preservación de valores culturales y patrimoniales.
- Conocimiento del patrimonio cultural cubano.

D. Fundamentos Psicológicos

En la psicología contemporánea se desarrolló y consolidó en la segunda mitad del siglo pasado un enfoque epistemológico originado a partir de la escuela histórico cultural de Vigotski y seguidores [45, 46, 47, 48, 49] que encontró un campo de aplicación con muchas posibilidades en sociedades como la nuestra que promueven las condiciones sociales que aseguran un desarrollo pleno e integral del hombre.

En la Educación Superior Cubana en los últimos 15 años, se han aplicado algunos de los postulados fundamentales de este enfoque al perfeccionamiento del proceso pedagógico en la creación de condiciones de aprendizaje más favorables en distintas disciplinas de varias carreras universitarias.

Analizaremos a continuación cómo algunos de los postulados fundamentales del enfoque histórico cultural de Vigotski, sirven de basamento teórico a la utilización del holograma como medio de enseñanza.

Comenzaremos por analizar un primer aspecto en la utilización del holograma como medio de enseñanza. Nos referimos a la influencia del holograma en el incremento de la motivación de los estudiantes por el conocimiento y el aprendizaje, no solo por la información que transmiten sino también por los fundamentos físicos relacionados con la construcción del mismo. Un holograma es altamente motivador por las características del mismo de brindar la imagen tridimensional de un objeto que produce en el espectador la sensación de que el objeto real está presente en ese momento en la escena.

Con relación a la importancia de la motivación en el aprendizaje, Vigotski a partir de reconocer el carácter integral del psiquismo humano, analiza las relaciones existentes entre dos esferas tradicionalmente escindidas en las escuelas psicológicas precedentes: la esfera cognoscitiva y la afectiva.

En el primer capítulo de su libro *Pensamiento y Lenguaje* señala [46]:

“La primera cuestión que surge cuando hablamos de la relación del pensamiento y el lenguaje con respecto a los restantes aspectos de la conciencia, es el de la vinculación entre la inteligencia y el afecto. Como se sabe, la separación del aspecto intelectual de nuestra conciencia y del aspecto afectivo, volitivo, es uno de los defectos fundamentales y radicales de toda la psicología tradicional”. Mas adelante señala: “El análisis que divide el todo complejo en unidades... muestra que existe un sistema dinámico de sentido que representa la unidad de los procesos afectivos e intelectuales. Muestra que en toda idea se contiene, reelaborada, una relación afectiva del hombre hacia la realidad, representada en esa idea. Permite descubrir el

Fundamentación del holograma como un medio de enseñanza de la física

movimiento directo que va de la necesidad de los impulsos del hombre a la determinada dirección de su pensamiento, y el movimiento contrario, desde la dinámica del pensamiento a la dinámica del comportamiento y la actividad concreta de la persona”.

Con relación a la utilización curricular del holograma como medio de enseñanza, se fundamentará en un próximo artículo una forma de enseñanza: La Exposición Didáctica de Holografía, aplicada en este caso a la enseñanza de la Disciplina Física en Ingeniería. El objetivo fundamental de este tipo de clase es contribuir al desarrollo de una cultura general integral en los estudiantes abordando un tema o un aspecto específico del contenido de una asignatura de forma integral con la utilización protagónica de los medios de enseñanza adecuados, donde se manifieste en un entorno natural el vínculo Investigación - Docencia - Extensión universitaria y se utilicen los métodos participativos y de elaboración conjunta que garanticen la creación de un ambiente de trabajo colectivo.

En la fundamentación de la metodología propuesta para desarrollar este tipo de actividad docente, planteamos que por su concepción, una de las características fundamentales de esta actividad es el empleo de métodos participativos y de elaboración conjunta que garanticen una participación activa de los estudiantes y la creación de un ambiente de trabajo colectivo de gran importancia para el logro de los objetivos. El desarrollo integral de la personalidad del estudiante es el centro del enfoque histórico cultural al que nos adscribimos. Algunos autores han profundizado en la concepción Vigotskiana de aprendizaje que lo considera como una actividad social, y no solo un proceso de realización individual como se había sostenido [49, 50].

De los postulados del enfoque histórico cultural y de su concepción de aprendizaje se desprenden los siguientes elementos que han servido de base en el diseño de la actividad en la Exposición Didáctica de Holografía:

- La importancia que se adjudica a la actividad conjunta, a la relación de cooperación entre los alumnos y entre estos y el profesor. Lo que las personas puedan hacer con ayuda de otros puede ser en cierto sentido más indicativo de su desarrollo mental que lo que pueden hacer por sí solos.
- Cuando se organiza la enseñanza en actividad conjunta donde interactúan profesor y alumno o alumnos entre sí se fomenta en el estudiante el desarrollo de una serie de cualidades de su personalidad, de formas de relación en las situaciones grupales, de intereses relacionados con el estudio. Además, se genera un clima emocional favorable muy eficaz para el aprendizaje.
- Se coloca el proceso de aprendizaje como centro de atención a partir del cual se debe proyectar el proceso pedagógico. Supone utilizar todo lo que está disponible en el sistema de relaciones más cercano al estudiante para propiciar su interés y un mayor grado de participación e implicación personal.
- En lo relacionado con el estudiante, implica utilizar todos los resortes de que dispone en su personalidad en relación con los que aporta el grupo de clase, involucrando a los propios estudiantes en la

construcción de las condiciones más favorables para el aprendizaje.

- En lo relacionado con el profesor, supone extraer de sí mismo todos los elementos que permitan el despliegue del proceso de redescubrimiento y reconstrucción del conocimiento por parte del estudiante, de sus particularidades personales, la relación de comunicación en sus diferentes tipos de función (informativa, afectiva y reguladora) que permita un ambiente de cooperación, de colaboración, de actividad conjunta dentro del aula.
- Este enfoque trata de utilizar al máximo las posibilidades educativas que brinda cualquier situación de instrucción que sea concebida íntimamente vinculada con la vida de la sociedad y de la profesión, en el contexto socio histórico en que vive el estudiante.

III. EL HOLOGRAMA Y SUS PARTICULARIDADES COMO MEDIO DE ENSEÑANZA

Antes de adentrarnos en el análisis de las particularidades que caracterizan al holograma como un medio de enseñanza, expondremos algunas de las diferencias fundamentales del mismo en comparación con su antecesor más cercano, la fotografía (Ver TABLA I), lo que ayudará en la comprensión de las características particulares y distintivas que posibilitan no solo su utilización en la docencia y en la educación de la población, sino también en múltiples aplicaciones en la técnica y en la vida cotidiana.

TABLA I. Diferencias fundamentales entre la Fotografía y la Holografía

Fotografía	Holografía
1. Resolución del material baja.	1. Resolución del material alta.
2. Se utiliza para iluminar el objeto cualquier fuente de luz normal.	2. Se utiliza para iluminar el objeto un láser.
3. Se usa una lente para formar la imagen en el medio de registro.	3. No usa una lente y no se forma la imagen en el medio de registro. Lo que se forma en el mismo es un patrón de interferencia.
4. Almacena la información relacionada con la intensidad.	4. Almacena la información relacionada con la intensidad y con la fase.
5. Los puntos individuales brillantes y oscuros son la imagen.	5. Las áreas brillantes y oscuras son franjas de interferencia microscópicas que no son la imagen del objeto.
6. Se obtiene un negativo y la foto se hace a partir del negativo.	6. Se obtiene directamente el holograma
7. La foto resultante es una imagen plana o bidimensional del objeto sin paralaje.	7. La imagen resultante en el holograma es tridimensional con paralaje total.

Las **características distintivas** del holograma como un medio de enseñanza y de educación social son las siguientes [50]:

- Brinda una imagen tridimensional exacta del objeto real con paralaje total y visualización de las zonas de luz y sombra, que puede sustituir satisfactoriamente al objeto real para múltiples aplicaciones.
- En la construcción del mismo se aplican leyes y conceptos de la Física, en particular de la Óptica y el Láser, lo que lo convierte además en objeto de enseñanza cuando se utiliza curricularmente.
- Los estudiantes pueden construir el medio de enseñanza en prácticas de laboratorio de la Disciplina Física.
- Permite visualizar efectos no apreciables a simple vista (estados tensionales y deformacionales de los cuerpos del orden de 10^{-6} m). Esto se logra mediante la holografía de doble exposición y constituye una técnica de ensayo óptico no destructivo.
- Permite obtener imágenes tridimensionales de objetos con perspectiva invertida.
- Permite mostrar en el aula la imagen tridimensional de objetos imposibles de mostrar directamente por sus características, medidas excepcionales de seguridad y conservación, etc.
- Permite obtener imágenes con ampliación o reducción del tamaño real del objeto (Hologramas de imagen enfocada) [1]. Especialmente importante para que el estudiante o el público en general pueda apreciar detalles muy pequeños, no perceptibles a simple vista.
- Se puede lograr el cambio de color de la imagen del objeto al cambiar la posición de observación (Hologramas de arcoiris) [1].

Existen algunas limitantes en la utilización de hologramas como medios de enseñanza y de educación social entre las cuales podemos destacar las siguientes:

- Existen algunos objetos que por sus características no son holografiables.
- Existe limitación en la realización de hologramas de objetos con mucha profundidad.
- Para poder ver los hologramas se necesita una fuente de luz blanca puntual o con filamento estrecho.
- Los hologramas poseen un ángulo de visión relativamente restringido por lo que no se pueden ver desde cualquier posición del observador.
- Es un medio relativamente costoso y para su construcción deben crearse las condiciones materiales necesarias.
- Para su elaboración debe existir una experiencia de investigación en los profesores y técnicos del Departamento Docente.

IV. CONCLUSIONES

Se ha realizado la fundamentación pedagógica, sociológica y psicológica del holograma como un medio de enseñanza de la Física, definiéndose las funciones didácticas específicas que lo distinguen.

En la fundamentación pedagógica se analizó cómo los principios pedagógicos que se derivan de las leyes generales de la pedagogía sirven de sustento a la concepción de utilización del holograma como un medio de enseñanza y de educación social, así como para la estructuración de las propuestas de utilización de este medio en la docencia universitaria y en la educación social mediante sus aplicaciones en museología.

Se analizó como en esta concepción es de gran importancia un enfoque sociológico que reconozca que el individuo se forma y se desarrolla no solo bajo la influencia de acciones dirigidas desde el sistema educacional, sino también desde el contexto social donde vive.

Por otra parte, se analizaron las potencialidades de la utilización del holograma como medio de enseñanza tomando como fundamento algunos de los planteamientos fundamentales del enfoque histórico cultural de Vigotski y otros investigadores en relación con la importancia de la motivación en el proceso de aprendizaje y la necesidad de utilización de métodos participativos que permitan la creación de un ambiente de trabajo colectivo.

REFERENCIAS

- [1] Saxby, G., *Practical Holography*, (Prentice Hall, University Press, Cambridge, 1996).
- [2] García, J., *Los medios en el proceso pedagógico*, Curso a distancia, Dirección de Tecnología Educativa, I.S.P. Enrique José Varona, Cuba, (1997).
- [3] González, V., *Teoría y práctica de los medios de enseñanza*, (Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1986).
- [4] García, A., *Acerca de la capacitación didáctico-metodológica de los estudiantes para el trabajo con los medios de enseñanza en las Universidades Pedagógicas de la República de Cuba*, Tesis doctoral, Cuba, (1989).
- [5] Álvarez de Zayas, C. M., *Hacia una escuela de excelencia*, (Editorial Academia, Cuba, 1996).
- [6] Parra, I., *Acerca de la integración entre los métodos y medios de enseñanza*, Revista electrónica Orbita Científica 1, Cuba, En: < <http://www2.ceniai.inf.cu> >, consultado en diciembre 2007.
- [7] Fernández, B., *Los medios de enseñanza y la tecnología educativa*, Material del curso de postgrado de Pedagogía, (1997).
- [8] Macías, J., *Un software como medio didáctico para la enseñanza de la lectura en la Licenciatura en Lengua Inglesa*, Tesis Doctoral, Capítulo 1, (2000).
- [9] Universidad politécnica de Cataluña, < <http://goliat.upc.es> >, consultado en febrero 2008.
- [10] Universidad Carlos III de Madrid, < www.uc3m.es >, consultado en febrero de 2008.
- [11] Universidad Complutense de Madrid, < www.ucm.es >, consultado en febrero de 2008.
- [12] Universidad de Zaragoza, < www.unizar.es >, tomado en febrero de 2008.
- [13] Universidad Autónoma de México, < www.unam.mx >, consultado en febrero de 2008.
- [14] Pontificia Universidad Católica del Perú, < www.pucp.edu.pe >, consultado en febrero de 2008.

- [15] Unión de Universidades de América Latina (UDUAL), < www.unam.mx/udual >, consultado en febrero de 2008.
- [16] University of Ghent, < www.rug.ac.be >, consultado en febrero de 2008.
- [17] University of Oxford, < www.ox.ac.uk >, consultado en febrero de 2008.
- [18] Porto, A., *Tareas para capacitarse en el trabajo con los medios*, Tesis Doctoral, Cuba, (1995), p. 42.
- [19] Cubero, J., *Psicopedagogía de los medios de enseñanza*. Material inédito, (1997), p. 27.
- [20] Bravo, C., *Un sistema multimedia para la preparación docente en medios de enseñanza, a través de un curso a distancia*, Tesis Doctoral, Cuba, (1999), p. 35.
- [21] Dorrego, E., *Dos modelos para la producción y evaluación de materiales instruccionales*, (Fondo editorial de la Universidad Central de Venezuela, 1991).
- [22] Araujo, B., *Tecnología educativa, Teoría de la instrucción*, (Editora Vozes, Brasil, 1991).
- [23] González, V., *Teoría y metodología del uso de la televisión en circuito cerrado como parte del sistema de medios de enseñanza de la educación superior*, Tesis Doctoral, Cuba, (1984), p. 52.
- [24] González, V., *Diccionario cubano de medios de enseñanza y términos afines*, (Editorial Pueblo y Educación, Cuba, 1993).
- [25] Cabero, J., *Análisis de medios de enseñanza*, (Alianza, Sevilla, España, 1990).
- [26] Norbis, G., *Didáctica y estructura de los medios audiovisuales*, (Editorial Kapeluz, Buenos Aires, 1978).
- [27] Calzado, D., *La Ley de la Unidad de la Instrucción y la Educación*, Didáctica Teórica y Práctica, Capítulo 2, (Cuba, 18-29, 2003).
- [28] Addine, F., *Principios para la dirección del proceso pedagógico*, (Compendio de Pedagogía, Editorial Pueblo y Educación, Cuba, 80-101, 2002).
- [29] Revista Iberoamericana de Educación, < www.campus-oei.org/revista/novedades.htm >, consultado en febrero de 2008.
- [30] EDUTEKA, < www.eduteka.org >, consultado en febrero de 2008.
- [31] Organización de Estados Iberoamericanos, < www.oei.org >, consultado en febrero de 2008.
- [32] UNESCO, < www.unesco.org/education >, consultado en febrero de 2008.
- [33] Comisión Europea, < <http://europa.eu.int/comm/education> >, consultado en febrero de 2008.
- [34] Proyecto EDUTECH de Tecnologías y Educación Superior, < www.edutech.ch/edutech >, consultado en febrero de 2008.
- [35] Universidad de Alicante, < www.ua.es >, consultado en febrero de 2008.
- [36] Instituto Tecnológico de Massachusetts, < www.mit.edu.org >, consultado en febrero de 2008.
- [37] Universidad Nacional a Distancia (España), < www.uned.es >, consultado en febrero de 2008.
- [38] Open University, < www.open.ac.uk >, consultado en febrero de 2008.
- [39] Instituto tecnológico de Monterrey,

< www.tecdemonterrey.edu.mx>, consultado en febrero de 2008.

[40] Delicio, M., *Sistema de Actividades Educativas para promover el interés y la satisfacción de los alumnos de la enseñanza primaria por el Museo de Ciencia y Técnica de la Universidad Federal de Ouro Preto*, Tesis Doctoral, Cuba, (2004).

[41] Klingberg, L., *Introducción a la Didáctica General*, (Editorial Pueblo y Educación, 1978), p. 87.

[42] Fernández, B., *Utilización del sistema de medios de enseñanza en la asignatura: Anatomía, Fisiología e higiene del hombre, de la educación General y Politécnica*, Tesis doctoral, Cuba, (1989), p. 34.

[43] Lunazzi, J. J.; Magalhães, D. S. F.; Rivera, N. I. R.; Rigon, M., *Holo-Television System with a Single Oblique Plane: First Results*, Memorias en CD del XXVIII Encuentro Nacional de Física de la Materia Condensada, SBF, Santos – Sao Paulo, 10-14 de mayo, (2005).

[44] Báxter, E., *La escuela y el problema de la formación del hombre*, (Compendio de Pedagogía, Editorial Pueblo y Educación, Cuba, 143-192, 2002).

[45] Vigotsky, L., *Historia de las funciones psíquicas superiores*, (Editorial Científico-Técnica, La Habana, 1987).

[46] Vigotsky, L., *Pensamiento y Lenguaje*, (Edición Revolucionaria, La Habana, 1966), p. 37.

[47] Galperin, P. Ya, *Sobre el método de formación por etapas de las acciones intelectuales*, (Pueblo y Educación, C. de la Habana, Cuba, 1982).

[48] Talizina, N. F., Conferencia sobre *Los fundamentos de la enseñanza en la Educación Superior*, (Universidad de la Habana, CEPES, 1985).

[49] González, O., *El enfoque histórico-cultural como fundamento de una concepción pedagógica*, Tendencias pedagógicas contemporáneas, (Universidad de la Habana, El Poirá, Editores e impresores, Ibagué, Colombia, 1996).

[50] Serra, R., *La utilización del holograma como medio de enseñanza y de educación social en Cuba a través del vínculo Investigación- Docencia-Extensión Universitaria*, Tesis Doctoral, Cuba, (2004).

Comportamiento dual de la fuerza: como vector y como covector



Yolanda Benítez Trejo^{1,2}, Zbigniew Oziewicz¹, César Mora²

¹Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Departamento de Física. Antigua Carretera México-Teoloyucan km 2.5 Col. San Sebastián Xhala. Cuautitlán Izcalli. CP 54714, Estado de México.

²Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. Instituto Politécnico Nacional. Av. Legaria # 694, Col. Irrigación, CP 11500, México D. F.

E-mail: ybenitez@unam.mx; oziewicz@unam.mx; cmoral@ipn.mx

(Recibido el 2 de Junio de 2008; 29 de Agosto de 2008)

Resumen

En éste artículo se describe la fuerza en la Física con dos diferentes comportamientos: como vector y como covector. La fuerza se comporta como vector (con dirección), en la Segunda Ley de Newton, cuando ésta se encuentra proporcionada con la aceleración. Por otro lado, la fuerza se comporta como covector (sin dirección), si ésta se encuentra relacionada con el escalar de trabajo. Esto forma parte del concepto de dualidad. Para que exista el espacio de vectores, debe existir el espacio de covectores. Cada forma no puede existir por sí sola.

Palabras clave: Fuerza como vector, fuerza como covector, fuerza y trabajo.

Abstract

In this article the force in Physics is described with two different behaviors: like vector and covector. The force behaves like vector (with direction), in the Second Law of Newton, when this one is proportionate with the acceleration. On the other hand, the force behaves like covector (without direction), if this one is related the scalar of work. This is part of the duality concept. So that the space of vectors exists, the convector space must exist. Each form cannot exist by itself.

Keywords: Force like a vector, force like a covector, force and work.

PACS: 45.20.D-, 45.20.dg, 45.50.Dd.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

El principio de *dualidad onda-partícula*, resolvió una aparente paradoja, demostrando que la luz y la materia poseen propiedades de partícula y de onda. De acuerdo con la física clásica existen diferencias entre onda y partícula, una partícula ocupa un lugar en el espacio y tiene masa; mientras que una onda se extiende en el espacio caracterizándose por tener una velocidad definida y masa nula.

Hawking consideró el principio de dualidad onda-partícula como un “*concepto de la mecánica cuántica según el cual no hay diferencias fundamentales entre partículas y ondas: las partículas pueden comportarse como ondas y viceversa.*” [1], hecho comprobado experimentalmente. El físico francés De Broglie [2, 3], en 1924 en su tesis doctoral propuso la existencia de ondas de materia, “*Inspirado por el comportamiento dual onda-corpúsculo de la radiación, De Broglie especuló sobre la posibilidad que también la materia tuviera un comportamiento dual, esto es que las entidades físicas que consideramos como partículas (electrones, átomos, bolas*

de billar, etc.) pudieran en determinadas circunstancias manifestar propiedades ondulatorias.”[4].

Esta característica establece que la materia tiene una onda asociada a ella, la cual es una idea revolucionaria. Otras analogías físicas en la naturaleza son: tiempo y espacio, campo eléctrico y magnético, onda y partícula, cantidad de movimiento (o momento) y posición, etc. En forma similar el concepto de fuerza se puede explicar mediante su comportamiento dual: como vector y como un covector. Sin embargo, en ambos comportamientos se usa el mismo nombre de ‘fuerza’ para dos diferentes conceptos matemáticos. Por eso, es importante discutir la diferencia entre estas dos concepciones. El presente trabajo tiene el objetivo de utilizar el concepto de fuerza para discutir la relación entre vectores y covectores.

El artículo está organizado como sigue, en la Secc. II analizamos la fuerza como vector, luego en la Secc. III se muestran las diferenciales de escalar y de vector. En la Secc. IV mostramos la fuerza y el trabajo mediante formas diferenciales. Finalmente, en la Secc. V mostramos nuestras conclusiones.

II. FUERZA COMO VECTOR

Debido al concepto de dualidad podemos definir a la Fuerza como un vector y a su dual como un covector, así Tendremos dos conceptos de fuerza: uno como vector y otro como covector. Así identificamos matemáticamente a estas dos cantidades y las escribimos como sigue

$$*\mathbf{F} = \mathcal{F} \quad *^{-1} \mathcal{F} = \mathbf{F}.$$

Donde, como es usual se representa al operador de dualidad indicado con un asterisco * actuando sobre el vector de fuerza \mathbf{F} para producir a su dual \mathcal{F} , y posteriormente indicamos a la operación inversa de dualidad $*^{-1}$ que hace exactamente el mapeo inverso.

Se pueden efectuar dos análisis diferentes para detectar una fuerza: midiendo la aceleración y midiendo el trabajo.

La fuerza se comporta como un vector si y solo si ésta se encuentra relacionada con la aceleración. La segunda ley de Newton [5, 6] relaciona la aceleración del centro de masa de un cuerpo con la fuerza que actúa sobre él, la fuerza se encuentra proporcionada con la aceleración,

$$\text{Fuerza} = \text{masa} \cdot \text{aceleración}, \quad (1)$$

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}. \quad (2)$$

De forma común diversos autores expresan la fuerza \mathbf{F} como $\mathbf{F} = F_x \hat{\mathbf{i}} + F_y \hat{\mathbf{j}} + F_z \hat{\mathbf{k}}$ [5, 6], donde las componentes escalares de la fuerza son F_x, F_y, F_z .

La posición de una partícula describe una trayectoria como se ilustra en la figura 1, en donde se muestra un desplazamiento del punto 1 al punto 2. La posición de la partícula en un instante de tiempo se representa por medio del vector de posición

$$\mathbf{r} = x\hat{\mathbf{i}} + y\hat{\mathbf{j}} + z\hat{\mathbf{k}}. \quad (3)$$

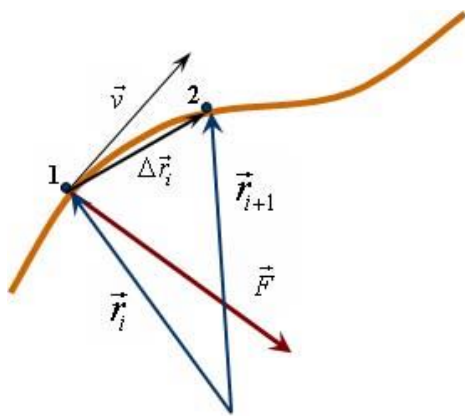


FIGURA 1. Los vectores fuerza y desplazamiento asociados a una partícula en movimiento.

En los instantes de tiempo t_1 y t_2 , la partícula se encuentra en los puntos 1 y 2 respectivamente, el vector de desplazamiento (cambio de posición), se escribe como:

$$\Delta \mathbf{r}_i \equiv \mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i, \quad (4)$$

en donde $\Delta \mathbf{r}_i$ es un incremento pequeño, en el vector de desplazamiento i -ésimo, en donde

$$\mathbf{r}_i = x_i \hat{\mathbf{i}} + y_i \hat{\mathbf{j}} + z_i \hat{\mathbf{k}}, \quad (5)$$

y

$$\mathbf{r}_{i+1} = x_{i+1} \hat{\mathbf{i}} + y_{i+1} \hat{\mathbf{j}} + z_{i+1} \hat{\mathbf{k}}. \quad (6)$$

Por lo tanto,

$$\Delta \mathbf{r}_i = (\Delta x_i) \hat{\mathbf{i}} + (\Delta y_i) \hat{\mathbf{j}} + (\Delta z_i) \hat{\mathbf{k}}. \quad (7)$$

El trabajo realizado por la fuerza sobre una trayectoria se obtiene mediante el producto punto o producto escalar $\mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{r}_i$ como

$$\text{Trabajo} = \mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{r}_i = \text{Escalar}, \quad (8)$$

$$U = \mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{r}_i = F (\Delta r_i) \cos \theta, \quad (9)$$

en donde F es la magnitud de la fuerza, $\Delta \mathbf{r}$ es la magnitud del desplazamiento y el ángulo θ lo forman los dos vectores \mathbf{F} y $\Delta \mathbf{r}_i$.

Aplicando el producto punto a \mathbf{F} y $\Delta \mathbf{r}_i$ se obtiene:

$$\mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{r}_i = (F_x \hat{\mathbf{i}} + F_y \hat{\mathbf{j}} + F_z \hat{\mathbf{k}}) \cdot (\Delta x \hat{\mathbf{i}} + \Delta y \hat{\mathbf{j}} + \Delta z \hat{\mathbf{k}}), \quad (10)$$

$$U = \mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{r}_i = F_x (\Delta x) + F_y (\Delta y) + F_z (\Delta z), \quad (11)$$

en donde $\Delta x, \Delta y$ y Δz son números pequeños (escalares).

Así, se entiende que el producto punto aplicado a dos vectores nos da un escalar.

Por otro lado, el trabajo total realizado por varias fuerzas es la suma del trabajo efectuado por cada una de ellas, así tenemos

$$\text{Trabajo total} = U_{\text{total}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n, \quad (12)$$

$$U_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n \text{Fuerza}_i \cdot (\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i). \quad (13)$$

Comportamiento dual de la fuerza: como vector y como covector
Este resultado muestra que $d\mathbf{r}$ es un (1,1)-tensor.

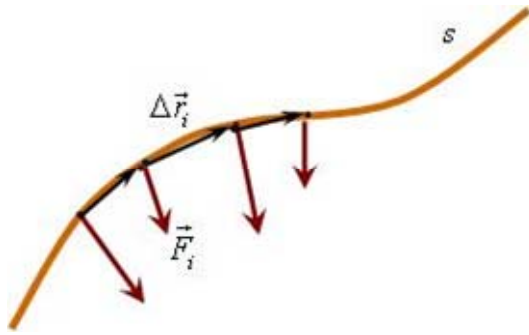


FIGURA 2. Desplazamiento de la partícula a lo largo de una trayectoria.

III. DIFERENCIAL DE UNA MAGNITUD ESCALAR Y DIFERENCIAL DE UN VECTOR

Si \mathbf{r} es un vector, entonces ¿qué es $d\mathbf{r}$ [7, 8]?, para poder contestar esta pregunta, primero se explicará que $d\mathbf{r}$ no es $\Delta\mathbf{r}$.

Si se obtiene la diferencial de un escalar, el resultado es un covector, si se obtiene la diferencial de un vector, el resultado es un tensor (Fig. 3).

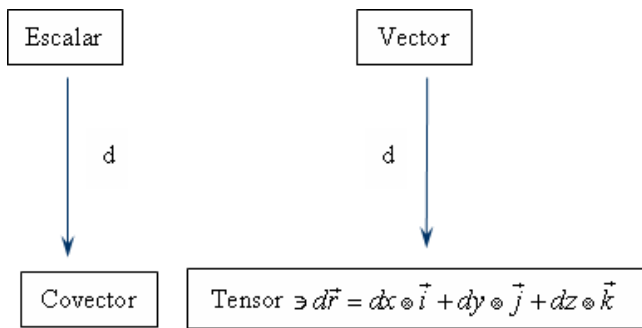


FIGURA 3. Diferencial de escalar y diferencial de vector.

Consideremos el vector de posición \mathbf{r} y su diferencial

$$\mathbf{r} = x\hat{\mathbf{i}} + y\hat{\mathbf{j}} + z\hat{\mathbf{k}}, \quad (14)$$

$$d\mathbf{r} = d(x\hat{\mathbf{i}} + y\hat{\mathbf{j}} + z\hat{\mathbf{k}}), \quad (15)$$

$$d\mathbf{r} = d(x\hat{\mathbf{i}}) + d(y\hat{\mathbf{j}}) + d(z\hat{\mathbf{k}}), \quad (16)$$

$$d\mathbf{r} = dx \otimes \hat{\mathbf{i}} + x \otimes d\hat{\mathbf{i}} + dy \otimes \hat{\mathbf{j}} + y \otimes d\hat{\mathbf{j}} + dz \otimes \hat{\mathbf{k}} + z \otimes d\hat{\mathbf{k}}. \quad (17)$$

Suponiendo que $d\hat{\mathbf{i}}, d\hat{\mathbf{j}}, d\hat{\mathbf{k}} = 0$, entonces tenemos que

$$d\mathbf{r} = dx \otimes \hat{\mathbf{i}} + dy \otimes \hat{\mathbf{j}} + dz \otimes \hat{\mathbf{k}}. \quad (19)$$

IV. FUERZA Y TRABAJO CON FORMAS DIFERENCIALES

La fuerza se comporta como un covector si y solo si ésta se encuentra relacionada con la integral de trabajo. Recordemos que si existen dos vectores, \vec{F} y $\Delta\vec{r}$ el producto punto entre ellos es

$$\mathbf{F} \cdot \Delta\mathbf{r} = \text{Escalar}, \quad (20)$$

pero, de acuerdo a la notación

$$*\mathbf{F}(\Delta\mathbf{r}) = \text{Escalar}, \quad (21)$$

$$*\mathbf{F} = \text{covector} = \mathcal{F}, \quad (22)$$

en donde \mathcal{F} es la fuerza como covector. Esto quiere decir que la fuerza como covector se aplica a un vector y como resultado se obtiene un escalar.

$$(\text{covector})(\text{vector}) = \text{escalar}, \quad (23)$$

$$\mathcal{F}(\Delta\mathbf{r}) \in \mathcal{R}. \quad (24)$$

Pero si se tienen un vector y un tensor, el producto punto entre ellos es un covector

$$(\text{vector}) \cdot ((1,1) \text{ tensor}) = \text{covector}. \quad (25)$$

El producto punto para la expresión $\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$ expresa la fuerza como covector:

$$\mathcal{F} = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}. \quad (26)$$

Sustituyendo los valores de \vec{F} y de $d\vec{r}$, obtenemos

$$\mathcal{F} = (F_x\hat{\mathbf{i}} + F_y\hat{\mathbf{j}} + F_z\hat{\mathbf{k}}) \cdot (dx \otimes \hat{\mathbf{i}} + dy \otimes \hat{\mathbf{j}} + dz \otimes \hat{\mathbf{k}}), \quad (27)$$

$$\mathcal{F} = F_x dx (\hat{\mathbf{i}} \otimes \hat{\mathbf{i}}) + F_y dy (\hat{\mathbf{j}} \otimes \hat{\mathbf{j}}) + F_z dz (\hat{\mathbf{k}} \otimes \hat{\mathbf{k}}), \quad (28)$$

$$\mathcal{F} = F_x dx + F_y dy + F_z dz. \quad (29)$$

La integral de $\int_{\text{ruta}} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$ es el trabajo realizado por una fuerza \mathbf{F} que actúa sobre una partícula (Fig. 1) cuando ésta se desplaza del punto 1 al punto 2, esto es,

$$\text{Trabajo} = \int_{\text{ruta}} \text{Fuerza como covector}, \quad (30)$$

$$U = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}. \quad (31)$$

Una curva se puede aproximar como la suma de vectores. Por lo tanto, la integral sobre la curva se puede aproximar como la suma de valores de fuerza (como covector) sobre los vectores que aproximan la curva (Fig. 4).

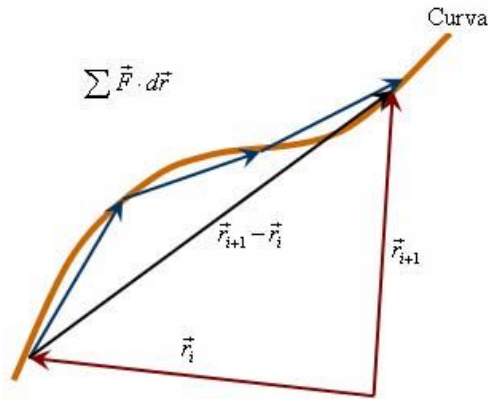


FIGURA 4. Representación del trabajo total.

$$\text{Trabajo} \approx \text{Fuerza} (\text{desplazamiento}), \quad (32)$$

$$U = (\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r})(\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i), \quad (33)$$

$$\mathcal{F} = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = F_x dx + F_y dy + F_z dz, \quad (34)$$

$$U = \mathcal{F} (\Delta \mathbf{r}), \quad (35)$$

en donde $\mathcal{F} = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$ = Fuerza como covector, sin desplazamiento, porque $d\mathbf{r}$ es un (1,1)-tensor, y $\Delta \mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_i$ es un desplazamiento. En este caso la fuerza actúa como un covector [8], entonces:

$$\mathcal{F} = g\mathbf{F} = *\mathbf{F}, \quad (36)$$

en donde g es el potencial gravitacional. La dualidad consiste en que; para que exista el espacio de vectores, debe existir el espacio de covectores.

V. CONCLUSIONES

Cuando el físico Francés De Broglie publicó su trabajo sobre la radiación de la materia, aún no se había observado el comportamiento ondulatorio asociado con el movimiento de una partícula, aunque el tema había sido investigado en varias ocasiones, de Broglie afirmó: “*toda la materia presenta características tanto ondulatorias como corpusculares comportándose de uno u otro modo dependiendo del experimento específico*” [2]. En forma similar se ha mostrado que el comportamiento de la fuerza, asociado a una masa posee una naturaleza dual: su comportamiento como vector y como covector, dependiendo del *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 2, No. 3, Sept. 2008*

experimento a que nos refiramos. La fuerza se comporta como vector cuando se encuentra relacionada con la segunda Ley de Newton y se comporta como covector cuando se puede medir a través del trabajo.

La medida del trabajo es una medición de curvas (superficies), el trabajo en dirección de una curva de potencial es cero; es decir, no es sensible a la dirección del movimiento, se observa que el trabajo de una partícula para desplazarse de un punto a otro es independiente de la trayectoria.

AGRADECIMIENTOS

C. Benitez y Z. Oziewicz recibieron apoyo de la cátedra de Investigación “Tecnología Informática para la Investigación Educativa y la enseñanza de la Mecánica” y del proyecto del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la UNAM, IN 104908. C. Mora es becario COFAA y EDI-IPN, y recibió apoyo mediante los proyectos de investigación SIP-20082788 y CONACYT-91335.

REFERENCIAS

- [1] Hawking, S. Wave/particle Duality. Available on <<http://www.hawking.org.uk/activity/acindex.html>>, Consultado el 1 de junio de 2008.
- [2] De Broglie, L. V., *Recherches sur la théorie des quanta* (Researches on the quantum theory), Thesis, Paris, 1924.
- [3] De Broglie, L. V., *The wave nature of the electron*, (1929). Disponible en http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1929/broglie-lecture.pdf. Consultado el 1 de junio de 2008.
- [4] De Broglie, L. V., *Propiedades ondulatorias de la materia*, (1929). Disponible en <http://www.lfp.uba.ar/Julio_Gratton/cuantica/06.DeBroglie.pdf> Consultado el 1 de junio de 2008.
- [5] Beer F., Johnston E. Jr., Eisenberg E., *Mecánica Vectorial para Ingenieros. Dinámica*. (Editorial Mc. Graw Hill. 8^{ava} Edición, México, pp. 697-699, 2007).
- [6] Hibbeler R. C., *Mecánica vectorial para ingenieros. Estática*, (Editorial Pearson Educación 10^a edición, México, 2004). <www.pearsoneducacion.net/hibbeler>.
- [7] Flanders, H., *Differential Forms with Applications to the Physical Sciences*. (Dover Publications, INC. New York, 1989).
- [8] Oziewicz, Z., *350 Años de controversias en Fundamentos de Cálculo Diferencial e Integral*, Material Didáctico para el Taller de Enseñanza de la Matemática y la Física, Universidad Jesuita de Guadalajara, Jalisco. México. p 56. (2005).

Deformaciones de un frente de onda



**Magdalena Marciano-Melchor, María Aurora Molina-Vilchis y
Ramón Silva-Ortigoza**

*CIDETEC-IPN. Departamento de Posgrado. Unidad Profesional Adolfo López Mateos.
C.P. 07700, México, D.F., México.*

E-mail: mmarciano@ipn.mx

(Recibido el 1 de Agosto de 2008; aceptado el 3 de Septiembre de 2008)

Resumen

Usando ciertas condiciones de la teoría de la óptica geométrica presentamos las ecuaciones analíticas que describen las deformaciones de un frente de onda esférico afectado por la combinación lineal de las aberraciones de Seidel. Además, se muestra la posible evolución geométrica del frente de onda deformado.

Palabras clave: Aberraciones de Seidel, frente de onda, óptica geométrica.

Abstract

Using certain conditions of the theory of the geometric optics we presented the analytical equations that describe the deformations of a spherical wavefront affected by the linear combination of the aberrations of Seidel. In addition, is the possible geometric evolution of the deformed wavefront.

Keywords: Aberrations of Seidel, wavefront, geometric optics.

PACS: 42.15.Fr, 42.15.Dp, 42.15.-i

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La óptica geométrica tiene sus orígenes en las primeras lentes localizadas en Egipto (2600 años AC). Existen trabajos bien documentados en otros momentos y partes del mundo que hacen referencia al descubrimiento de lentes utilizadas para correcciones visuales, por ejemplo lentes encontradas en México y Perú que datan de la época prehispánica [1, 2]. Con los estudios realizados por físicos notables, como Newton, Huyghens, Young y Maxwell, el estudio formal de la óptica geométrica, se practica con la estrecha relación entre las lentes y los rayos de luz que generan las imágenes de los objetos. Así, su desarrollo ha proporcionado un panorama no sólo para el estudio de las lentes, sino de sistemas ópticos sofisticados y del conocimiento de las leyes y principios físicos que rigen a las imágenes que estos producen. De este modo, podemos argumentar que la óptica geométrica tiene como objetivo describir la trayectoria de la luz en los instrumentos ópticos y dar los fundamentos para la construcción más adecuada de los mismos [3]. En la búsqueda de la construcción de sistemas *ópticos perfectos*, es decir, sistemas ópticos con calidad en las imágenes, se presentó en el año de 1860 por medio de Philipp Ludwig von Seidel matemático alemán, la primera caracterización de las deformaciones de las imágenes producidas por los componentes ópticos, tales como lentes o espejos. Las deformaciones que caracterizó Seidel, ahora referidas comúnmente como aberraciones de Seidel o aberraciones geométricas son: aberración esférica, coma, astigmatismo,

curvatura de campo y distorsión, estas han sido abordadas desde el punto de vista tanto físico, como médico, llegando a establecerse criterios de solución para cada una de ellas [4, 5, 6, 7]. Sin embargo, en este trabajo planteamos que en la necesidad de encontrar la mejor imagen formada por un sistema óptico, se obtendrían mayores resultados si conjuntamos las aberraciones, en este caso, apoyados en la teoría de la óptica geométrica, considerando que la evaluación de las imágenes está basada de forma conveniente en términos de las aberraciones del frente de onda que produce el sistema. Cabe aclarar que este trabajo forma parte de un proyecto que conlleva a la necesidad de encontrar la mejor imagen producida por un sistema óptico con miras a la contribución en el campo de la visión artificial [8]. En esta ocasión deseamos expresar de forma analítica la deformación de un frente de onda esférico afectado por las aberraciones de Seidel en un sistema óptico simétrico y mostrar la representación geométrica de esa deformación. Por lo anterior, este trabajo está organizado como sigue. En la sección II, como un caso particular, se plantea la existencia de un sistema óptico simétrico. En la sección III ayudados por la teoría de la óptica geométrica, se hace el planteamiento de las funciones que deformarán un frente de onda esférico. Como resultados, en la sección IV, se muestra geoméricamente la deformación del frente de onda esférico, descrito por las ecuaciones analíticas obtenidas en la sección III. Finalmente, en la sección V se presentan las conclusiones de nuestro trabajo.

II. CONDICIONES PARA EL PROBLEMA

Para comenzar consideraremos dentro de la óptica geométrica, un caso particular, la existencia de un sistema óptico simétrico, es decir, un sistema que alinea el eje óptico con el eje coordenado z , ver Figura 1, donde (ξ, η) son las coordenadas de la fuente puntual sobre el plano objeto y el punto con coordenadas (x_0, y_0, z_0) se encuentra sobre el frente de onda esférico, a $\Delta(x_0, y_0)$ se le conoce como función de aberración que para este trabajo la consideraremos como la diferencia entre el frente de onda real y el frente de onda esférico.

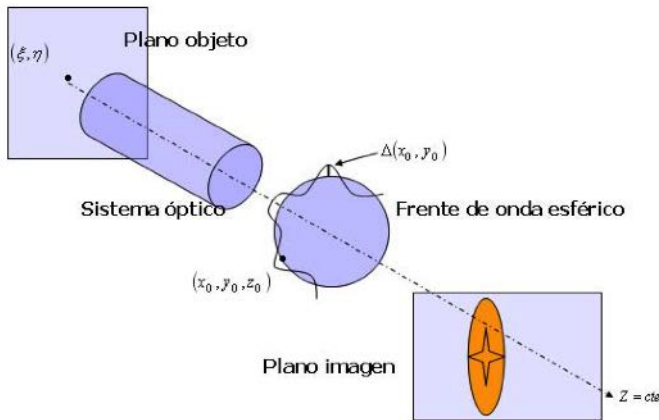


FIGURA 1. Sistema óptico simétrico.

III. PLANTEAMIENTO DE LAS ECUACIONES

Consideraremos las ecuaciones que dentro del límite de la óptica geométrica y en la mayoría de las aplicaciones se asumen [9]:

$$|\Delta(x_0, y_0)| \ll R_0, \quad z_0 \cong -R_0, \quad \frac{z_0}{R_0} \ll 1, \quad (1)$$

donde R_0 es el radio del frente de onda esférico que debe cumplir con tales aproximaciones. Las expresiones del mapeo que representa la evolución del frente de onda aberrado, utiliza las Ecs. (1) para encontrar que el frente de onda estará deformado como en [10]:

$$\begin{aligned} x(x_0, y_0, z) &= -\frac{zx_0}{R_0} + R_0 \frac{\partial \Delta(x_0, y_0)}{\partial x_0}, \\ y(x_0, y_0, z) &= -\frac{zy_0}{R_0} + R_0 \frac{\partial \Delta(x_0, y_0)}{\partial y_0}, \\ z(x_0, y_0, z) &= z, \end{aligned} \quad (2)$$

Por otra parte, para encontrar la forma analítica de la ecuación que involucra a las aberraciones de Seidel, haremos el siguiente desarrollo en serie de potencias a cuarto orden de una función $f : R^3 \rightarrow R$ el cual está dado por

$$\begin{aligned} f(x) &= f(0) + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial f}{\partial x_i} \Big|_{x=0} x_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^3 \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \Big|_{x=0} x_i x_j + \\ &+ \frac{1}{3!} \sum_{i,j,k=1}^3 \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_j \partial x_k} \Big|_{x=0} x_i x_j x_k + \\ &+ \frac{1}{4!} \sum_{i,j,k,l=1}^3 \frac{\partial^4 f}{\partial x_i \partial x_j \partial x_k \partial x_l} \Big|_{x=0} x_i x_j x_k x_l + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

en nuestro caso debido a la simetría del sistema óptico alrededor del eje Z , la función de aberración $\Delta(x_0, y_0)$ únicamente puede depender de los siguientes invariantes

$$(\xi, \eta) \cdot (\xi, \eta), \quad (x_0, y_0) \cdot (x_0, y_0), \quad (\xi, \eta) \cdot (x_0, y_0),$$

donde (ξ, η) como ya mencionamos denota la posición de la fuente puntual en el plano objeto y (x_0, y_0) son las coordenadas x y y de un punto sobre el frente de onda aberrado inicial. Si $|(\xi, \eta)| = \tilde{h}$, $|(x_0, y_0)| = \rho$ y $\text{Cos}((\xi, \eta) \cdot (x_0, y_0)) = \text{Cos} \psi$, entonces la función de aberración debe ser una función de ρ^2, \tilde{h}^2 y $\rho \tilde{h} \text{Cos} \psi$. Aplicando la Ec. (3) a la función $\Delta(x_1, x_2, x_3) = \Delta(\rho, \tilde{h}, \text{Cos} \psi)$ se obtiene [11]:

$$\begin{aligned} \Delta(\rho, \tilde{h}, \text{Cos} \psi) &= a_0 + b_0 \tilde{h}^2 + b_1 \rho^2 + b_2 \tilde{h} \rho \text{Cos} \psi + c_0 \tilde{h}^4 + c_1 \rho^4 + \\ &+ c_2 \tilde{h}^2 \rho^2 \text{Cos}^2 \psi + c_3 \tilde{h}^2 \rho^2 + c_4 \tilde{h}^3 \rho \text{Cos} \psi + c_5 \tilde{h} \rho^3 \text{Cos} \psi + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

La información que requerimos está contenida en los términos que se relacionan con c_1, c_2, c_3, c_4 y c_5 a los que se conoce como coeficientes de aberración de Seidel asociados con: aberración esférica, astigmatismo, curvatura de campo, distorsión y coma, respectivamente. Por otra parte, si se considera $(\xi, \eta), (x_0, y_0)$ y se renombra a los coeficientes asociados con las aberraciones de Seidel la función de aberración toma la siguiente forma [9]

$$\begin{aligned} \Delta(x_0, y_0) &= \frac{1}{4} B(x_0^2 + y_0^2)^2 - F(x_0^2 + y_0^2)(\xi x_0 + \eta y_0) + C(\xi x_0 + \eta y_0)^2 + \\ &+ \frac{1}{2} D(\xi^2 + \eta^2)(x_0^2 + y_0^2) - E(\xi^2 + \eta^2)(\xi x_0 + \eta y_0), \end{aligned} \quad (5)$$

finalmente, si la fuente puntual está dada por $(\xi, \eta) = (0, \eta_0)$, donde η_0 es una constante, la función de aberración es

$$\Delta(\rho, \psi) = C_1 \rho^4 + C_2 \rho^3 \text{Cos} \psi + C_3 \rho^2 \text{Cos}^2 \psi + C_4 \rho^2 + C_5 \rho \text{Cos} \psi, \quad (6)$$

donde las c_i $i=1, \dots, 5$ son constantes y las coordenadas polares (ρ, ψ) varían en $0 \leq \psi \leq 2\pi$ y $0 \leq \rho \leq a$, siendo a el radio de la pupila de salida del sistema óptico.

Una vez obtenida la función de aberración como una combinación lineal de las aberraciones de Seidel, se muestra que para este caso el mapeo de las Ecs. (2) que representará la evolución del frente de onda aberrado es:

$$\begin{aligned}
 x(\rho, \psi, z) &= -\left(\frac{z}{R_0}\right)\rho \text{Sen} \psi + 2R_0(2C_1\rho^2 + C_2\rho \text{Cos} \psi + C_4)\text{Sen} \psi \\
 y(\rho, \psi, z) &= -\left(\frac{z}{R_0}\right)\rho \text{Cos} \psi + \\
 &\quad + R_0[2(2C_1\rho^2 + C_3 + C_4)\rho \text{Cos} \psi + C_2\rho^2(2 + \text{Cos} 2\psi) + C_5] \\
 z(\rho, \psi, z) &= z.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

IV. RESULTADOS

Para tener una aproximación geométrica de la evolución del frente de onda aberrado descrito por las Ecs. (7) nos apoyamos en el programa de *Mathematica*, donde consideramos a las $C_i = 1$ con unidad de medida $1/m^3$ y donde el valor de a se considera $\rho = 0.124224 m$ y sin pérdida de generalidad $-50 < Z < 50$. En la Figura 2 se muestra la evolución del frente de onda aberrado representado por las Ecs. (7) con los parámetros mencionado

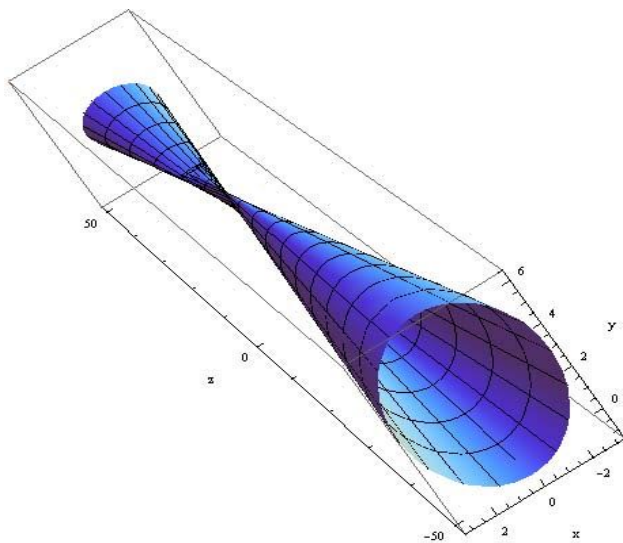
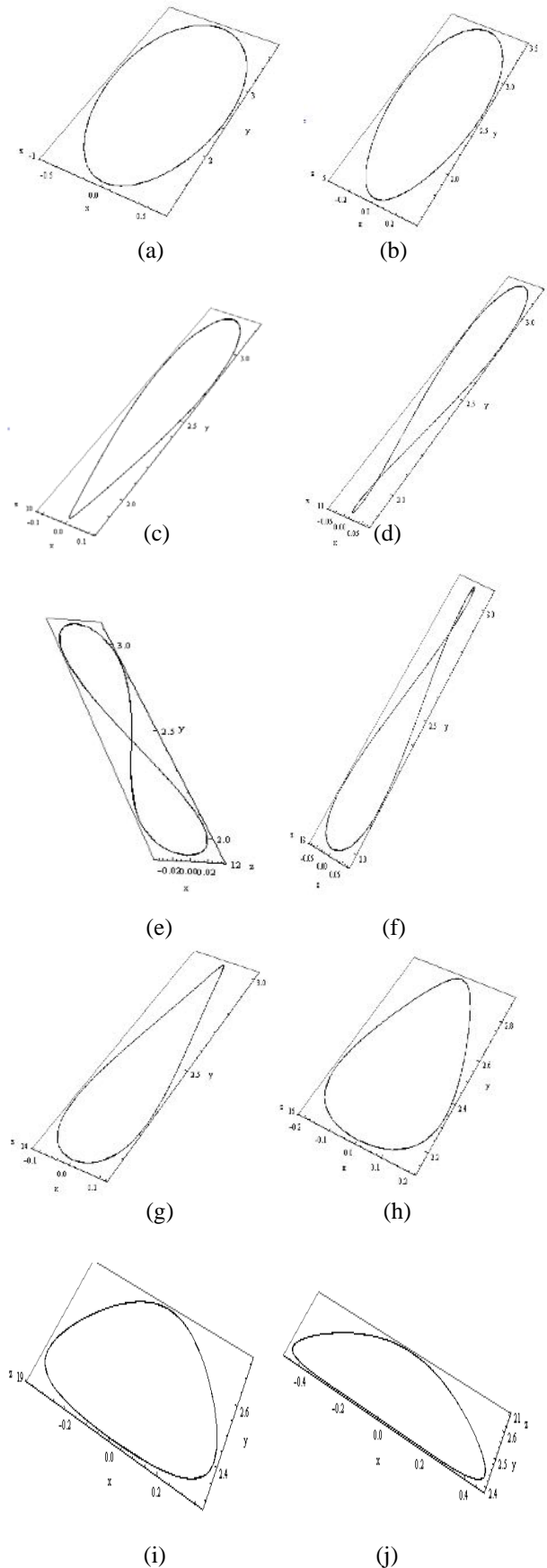


FIGURA 2. Mapeo asociado con un frente de onda deformado por la combinación lineal de las aberraciones de Seidel, Ecs. (7), cuando $\rho = 0.124224m, C_i = 1/m^3$ y $-50 < Z < 50$.

Para visualizar lo ocurrido con el frente de onda esférico deformado en la Figura 3 se muestra una secuencia de 17 imágenes generadas por intersecciones de planos $Z =cte$, en las cuales se aprecia un contorno circular representativo para puntos $Z > -1$, ver Figura 3(a), el contorno circular comienza a deformarse en puntos $5 < Z < 10$, ver Figuras 3(b) y 3(c), y en puntos $11 < Z < 13$ se generan intersecciones en dicho contorno, ver Figuras 3(d) – 3(f), finalmente en los puntos $Z > 14$ las intersecciones del contorno han desaparecido de tal manera que en el proceso este contorno casi llega a convertirse en línea recta, hasta que nuevamente evoluciona en forma de contorno circular, ver Figuras 3(g) – 3(q).



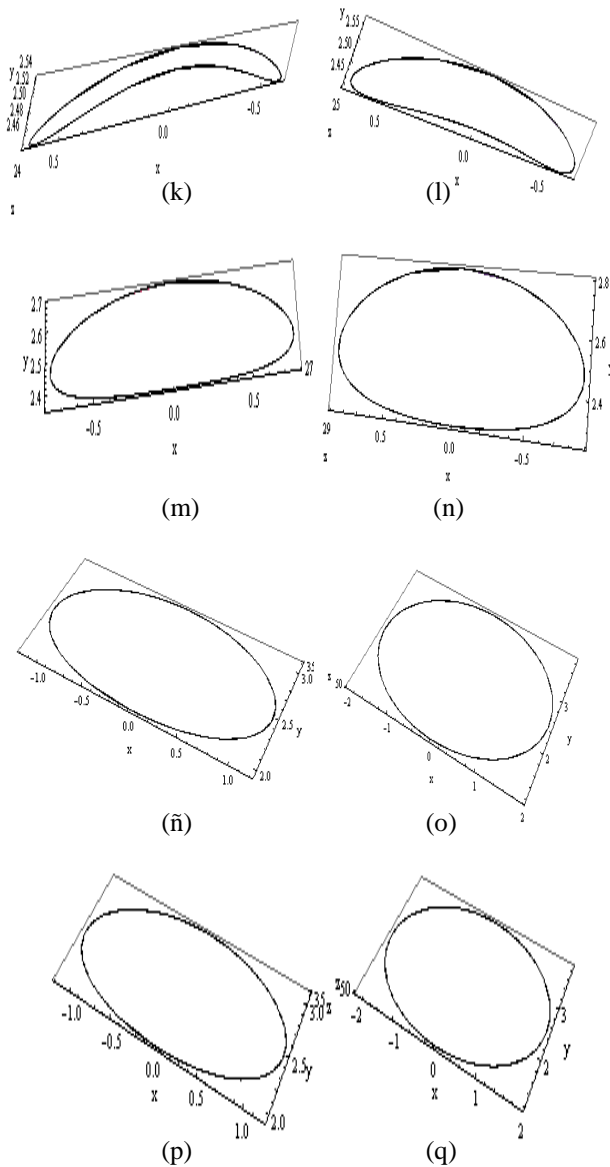


FIGURA 3. Cortes transversales para $Z = cte.$ de la evolución del frente de onda deformado por la combinación lineal de las aberraciones de Seidel.

Podemos observar, que al menos en teoría existe una representación aproximada de la deformación de un frente de onda esférico deformado por las aberraciones de Seidel.

V. CONCLUSIONES

Usualmente el tema de aberraciones ha sido tratado, como mencionamos en la introducción, por otros autores y con otros enfoques. Sin embargo, utilizando la óptica geométrica y fundamentos matemáticos nosotros concluimos de acuerdo a los resultados de las secciones II, III y IV de este trabajo, que para un frente de onda esférico en un sistema óptico simétrico puede hallarse de forma

aproximada la representación geométrica de la deformación que produce la combinación de las aberraciones de Seidel. Dichos resultados a pesar de ser teóricos consideramos que pueden ser aplicables a frentes de onda y sistemas ópticos no simétricos, con el propósito de encontrar la mejor imagen formada por un sistema óptico.

AGRADECIMIENTOS

M. Marciano-Melchor agradece el apoyo recibido por la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN (SIP-IPN), a través del proyecto 20080161 y del programa EDI, así como del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), México. **M. A. Molina-Vilchis** agradece el apoyo recibido por los programas EDD y de exclusividad del IPN. **R. Silva-Ortigoza** agradece el soporte económico recibido por la SIP-IPN, y del programa EDI, así como al SNI.

REFERENCIAS

[1] Lunazzi, J., *Optica precolombina del Perú* Rev. Cub. de Física **24**, 170-174 (2007).
 [2] Sánchez, A., <http://gavab.escet.urjc.es>. Consultado el 07 de Mayo de 2008.
 [3] Calvo, M. and Enoch, J., *Introduction to the history of lenses and visual corrections: a reference to Spain and the spanish colonies in the new world (XV-XVI C.)*, Revista Cubana de Física **22**, 3-12 (2005).
 [4] Voss, K., *Análisis de Imágenes de Objetos Tridimensionales* (Instituto Politécnico Nacional, México, 2006).
 [5] Thibos, N., <http://research.opt.indiana.edu/Library/wavefronts/index.htm>. Consultado el 19 de febrero de 2008.
 [6] Wyant, J. and Creat, K., *Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology*, Applied Optics And Optical Engineering **XI**, 1-53 (1992).
 [7] Nio, K. and Jansonius, M., *Spherical and irregular aberrations are important for the optimal performance of the human eye*, Ophthal Physiol. Opt. **22**, 103-112 (2002).
 [8] Harris, F., *Astigmatism*, Ophthal Physiol. Opt. **20**, 11-30 (2000).
 [9] O'Neil, E., *Introduction to Statistical Optics* (Addison-Wesley, Massachusetts, 1963).
 [10] Silva, G. and Marciano, M., *Exact computation of the caustic associated with the evolution of an aberrated wavefront*, Journal of Optics A: Pure and Applied Optics **4**, 358-365 (2002).
 [11] Born, M. and Wolf, E., *Principles of Optics* (Cambridge University Press, New York, 2006).

Introducción a las ondas gravitacionales



Claudia Moreno¹, R. García-Salcedo², Arturo Lara¹, Jaime Ramírez¹

¹Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería de la Universidad de Guadalajara, Corregidora No.500, Sector Reforma, CP.44420, Guadalajara, Jal., México.

²Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada-Unidad Legaria del Instituto Politécnico Nacional, Legaria #694. Col. Irrigación, CP.11500, México, D. F.

E-mail: claudia.moreno@cucei.udg.mx; rigarcias@ipn.mx; jaelectronic@hotmail.com

(Recibido el 10 de julio de 2008; Aceptado el 26 de agosto de 2008)

Resumen

En este artículo explicamos de una manera sencilla el tema de ondas gravitacionales (OG); señalaremos la relación que manifiesta con las ondas clásicamente conocidas, como lo son las ondas mecánicas y electromagnéticas. El estudio de las OG es importante, ya que pueden proporcionar pruebas indirectas de la existencia de hoyos negros, dimensiones extras e incluso las condiciones iniciales en las primeras etapas de nuestro universo.

Palabras clave: Relatividad General, ondas gravitacionales, interferometría.

Abstract

In this article, we will speak in an easy way the Gravitational Waves (GW) topic; we will show the relation between the classical known waves, such as the mechanic and electromagnetic waves. The study of GW is very important, because it can give us indirect proofs about the existence of black holes, extra dimension and the initial conditions in the first stages in our universe.

Key words: General Relativity, gravitational waves, interferometer.

PACS: 01.55.+b, 01.30.-y, 95.10.-a, 98.80.-k

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Las ondas gravitacionales (OG) es una de las predicciones más importantes de la Teoría de la Relatividad General de Einstein [1]. A nivel mundial, se está realizando un gran esfuerzo para descubrir la radiación gravitacional, ya que su detección será la prueba contundente para verificar la teoría de Einstein. El estudio de las OG se realiza desde el punto de vista teórico, numérico y experimental [2]. En México, estamos comenzando a difundir estos temas, donde varios investigadores de diversas universidades en el país, están involucrados. Para empezar a describir las OG de una manera sencilla, revisaremos aspectos clásicos de las ondas con las que cotidianamente vivimos: ondas mecánicas y electromagnéticas. En cuanto a las ondas que aparecen en la mecánica cuántica no hablaremos, ya que no están al alcance de este artículo.

Las ondas electromagnéticas que utilizamos diariamente en sus diferentes expresiones [3] son un fenómeno de naturaleza lineal, y aparecen sin ninguna aproximación. Las ondas mecánicas, sin embargo, son lineales solo en la aproximación de pequeños desplazamientos. Un péndulo, por ejemplo, es solo un oscilador armónico ya que se toma la aproximación $\sin(\theta) \approx \theta$ cuando $\theta \ll 1$, [4]. En el caso de una masa unida a un resorte, solo se consideran intensidades pequeñas de la fuerza de restauración, con lo que

obtenemos una aproximación también lineal. Para interpretar el caso de la radiación gravitacional, la teoría se tiene que aproximar de la misma manera que el caso mecánico, esto es, la teoría que se utiliza para determinarlas es la teoría de la relatividad de Einstein, que en general es un sistema de 10 ecuaciones diferenciales parciales acopladas no-lineales, lo cual hace que hace muy difícil su comprensión e interpretación física [1]. De lo que sabemos acerca del fenómeno de ondas en otros campos, el camino más fácil para aproximarse a las oscilaciones en el campo gravitacional, es considerar el límite de un campo gravitacional débil, el cual resultará en una teoría de la gravedad linealizada. La linearización es, sin embargo, un concepto muy útil para poder entenderlas. Además, desde un punto de vista físico, esta aproximación es justificable, ya que en un lugar muy alejado de un objeto masivo, la curvatura de nuestro universo es muy pequeña. Precisamente, el límite del campo débil significa que consideramos al espacio-tiempo plano con una pequeña perturbación, tal que los términos de segundo y mayores órdenes en la perturbación son casi insignificantes.

El presente artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección **II**, se deduce la ecuación de onda para las oscilaciones mecánicas, a partir del ejemplo de una cuerda que se encuentra oscilando. En la sección **III** se da una breve descripción de las ecuaciones de Maxwell, de las cuales, se deducirán las ecuaciones de onda para los

campos eléctrico y magnético. En la sección IV, se deduce la ecuación de onda gravitacional, la cual surge de una teoría linealizada del campo gravitacional. En la Sección V, se describe brevemente la parte experimental que se estudia actualmente para tratar de detectarlas de una forma directa. Finalmente, en la sección VI se dan algunas conclusiones.

II. ONDAS MECÁNICAS

Cualquiera de nosotros tenemos una comprensión intuitiva de lo que son las ondas [3], por ejemplo, las perturbaciones que se observan en una cuerda, en un resorte, en el sonido o en la superficie del agua. Éstas, son situaciones físicas producidas en un punto del espacio, que se propagan a través del mismo y se reciben en otro punto. Todos estos procesos son ejemplos de movimiento ondulatorio.

El movimiento ondulatorio se manifiesta en casi todas las ramas de la Física, por ejemplo, mecánica, electromagnetismo, gravitación y mecánica cuántica. La similitud de las descripciones físicas y matemáticas de estas distintas clases de ondas, indica que el movimiento ondulatorio es uno de los temas unificadores de la Física.

En esta sección mostraremos una deducción de la ecuación que describe las ondas mecánicas, y veremos una de sus soluciones, la más útil en términos de los fenómenos que describe a nivel general.

Estamos familiarizados con el hecho de que la energía y el ímpetu (o momento lineal) se transportan de un lugar a otro, en virtud del movimiento de las partículas; el movimiento ondulatorio, proporciona una forma alternativa en que la inercia y el ímpetu se mueven de un lugar a otro, sin que las partículas materiales viajen. Las ondas de agua y las ondas sonoras son ejemplos de ondas mecánicas, que viajan a través de un medio deformable o elástico. Debido a las propiedades elásticas del medio, la perturbación se propaga a través de éste.

A nivel microscópico, propiedades mecánicas tales como las fuerzas entre los átomos, son las causantes de la propagación de las ondas mecánicas, cuando una onda alcanza una partícula situada en el medio, pone a esa partícula en movimiento y la desplaza, transfiriéndole así energía cinética y potencial. Las partículas del medio se mueven al pasar la onda, únicamente distancias pequeñas con respecto a sus posiciones originales, sin experimentar un desplazamiento neto en la dirección del viaje de la onda. En tales casos, ignoraremos la estructura molecular de la materia y supondremos que se trata de un medio continuo. Esta suposición es válida, mientras la variación espacial de la onda sea grande comparada con la distancia intermolecular. Con el movimiento ondulatorio, puede transferirse (a grandes distancias) no solamente energía, sino además información sobre la naturaleza de la fuente de las ondas.

Como sabemos, las ondas se van dispersando conforme avanzan, es decir que la altura de la cresta va disminuyendo, lo que significa que su energía se va dispersando al medio elástico en el que se propaga. Para

la descripción que haremos a continuación de estas ondas, consideraremos que en el medio de propagación no hay ni disipación ni dispersión. Cabe aclarar que existen ondas que se dispersan muy lentamente conocidas como ondas solitarias o solitones, para una descripción más completa de este tipo de ondas, se puede revisar el trabajo de Agüero et al. [5].

Para describir el movimiento ondulatorio consideremos un pulso, que está descrito matemáticamente por una función $y = f(x)$, en un tiempo fijo dado, como el que se muestra en la figura 1.

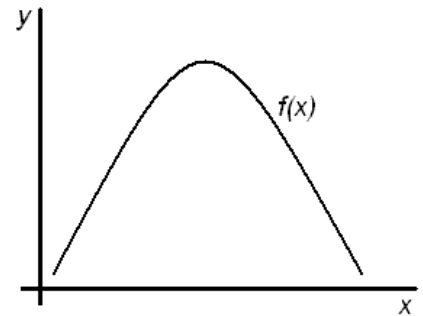


FIGURA 1. Un pulso descrito por una función de $y = f(x)$.

Si consideramos que el pulso está viajando hacia la derecha a una velocidad v , entonces después de un tiempo t , todos los puntos del pulso se han desplazado una distancia vt , como se muestra en la figura 2, de tal forma que la nueva coordenada $x' = x + vt$, la cual al despejarse de x , se tiene que el pulso entonces se puede describir con una función que depende tanto de x como de t

$$y = f(x, t) = f(x - vt), \quad (1)$$

la cual se denomina función de onda.

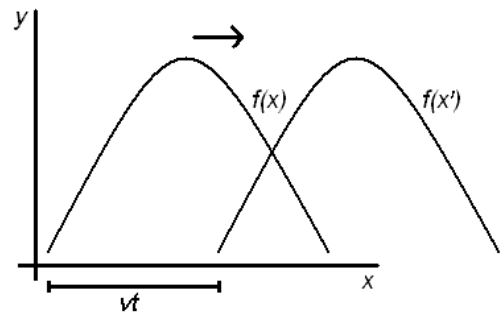


FIGURA 2. Un pulso descrito por una función de $y = f(x, t) = f(x - vt)$.

En forma general, si el pulso avanza hacia la derecha o hacia la izquierda, la función tendrá la combinación,

$$y(x, t) = f(x \pm vt) = f(u). \quad (4)$$

El signo negativo se utiliza para una onda que se mueve en el sentido positivo de x , en tanto que el signo positivo se

usa para una onda que se desplaza en el sentido negativo de x .

De una forma más general podemos encontrar una ecuación para las ondas mecánicas, que tenga como solución la función de onda descrita anteriormente.

En lo subsecuente, haremos una deducción matemática de la ecuación de onda, aquella cuyas soluciones nos describirán pulsos que se propaguen en el espacio y el tiempo. Una deducción distinta de la ecuación de onda mediante las propiedades mecánicas tanto del medio como de la cuerda por la que se propaga, puede encontrarse en [3].

Si tomamos la primera derivada respecto de cada variable de la función $y(x, t)$ tenemos que:

$$\frac{\partial y(x, t)}{\partial x} = \frac{\partial f(u)}{\partial u},$$

$$\frac{\partial y(x, t)}{\partial t} = \pm v \frac{\partial f(u)}{\partial u},$$

cuyas segundas derivadas serán,

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2},$$

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 f(u)}{\partial u^2},$$

igualando de forma adecuada las últimas relaciones se tiene la ecuación de onda

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2}. \quad (5)$$

Las soluciones de la ecuación (5), son todas las funciones de la forma (4), en particular aquellas que corresponden a un movimiento armónico simple, y tienen la forma de una función cosenoidal o senooidal,

$$y = A \operatorname{sen} \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x \pm vt) \right], \quad (6)$$

una de estas ondas se muestra en la figura 3.

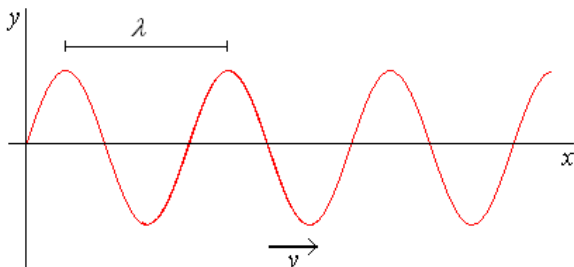


FIGURA 3. Esquema de una onda armónica.

Al tiempo que tarda una onda en recorrer una la distancia de una longitud de onda λ , se le conoce como periodo T . De la misma forma, se define la frecuencia ν , como:

$\nu \propto 1/T$. Por lo tanto, la velocidad de la onda estará dada por:

$$v = \lambda / T = \lambda \nu. \quad (7)$$

La expresión (6) se puede escribir también de la siguiente forma:

$$y = A \operatorname{sen}(kx - \omega t),$$

donde $k = 2\pi / \lambda$ y $\omega = 2\pi / T = 2\pi\nu$ son conocidas como el número de onda angular y la frecuencia angular, respectivamente. De esta forma la velocidad de onda también puede expresarse como $v = \omega / k$.

Generalizando la ecuación de onda unidimensional, a una ecuación de onda tridimensional, en donde la función de onda $F(x, y, z, t)$ sea solución, de tal forma que

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 F}{\partial t^2}.$$

Esta es la ecuación diferencial de onda tridimensional, y se escribe en una forma más compacta, introduciendo el operador laplaciano

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

quedando simplemente como

$$\nabla^2 F = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 F}{\partial t^2}.$$

Esta forma de la ecuación diferencial de onda tridimensional, es de suma importancia en diversas aplicaciones físicas.

Como es bien sabido, las ondas reales se van dispersando conforme avanzan, es decir que la altitud de las cresta va disminuyendo, lo que significa que su energía se va dispersando en el medio elástico en el que se propaga.

III. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Las propiedades de los campos electromagnéticos [4, 6] se pueden describir por cuatro ecuaciones diferenciales parciales, conocidas generalmente como ecuaciones de Maxwell, en honor de su descubridor. Estas ecuaciones, fueron comprobadas y deducidas tanto de manera teórica como por métodos experimentales, lo anterior fué realizado por científicos como Faraday, Coulomb, Gauss y Ampère entre otros, en el siglo XVIII. Dos de estas ecuaciones son las leyes de Gauss, para los campos eléctrico y magnético, la tercera ecuación es la ley de Faraday y la cuarta ecuación, es una modificación y generalización de la ley de Ampère que realizó el propio

Maxwell, estas ecuaciones en su forma diferencial en el vacío se pueden escribir como

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (9)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (10)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{J}, \quad (11)$$

en donde \mathbf{E} es el vector de campo eléctrico y \mathbf{B} es el vector de inducción magnética, los cuales son generados por las fuentes de carga de densidad ρ , y la fuente de corriente de densidad \mathbf{J} , μ_0 y ϵ_0 son constantes. A μ_0 se le conoce como la permeabilidad del espacio libre, y a ϵ_0 como la permitividad del espacio libre.

La ecuación (8) se conoce como la ley de Gauss eléctrica, la cual relaciona la carga eléctrica con el campo eléctrico. Ésta establece que el número total de líneas de campo eléctrico que divergen a través de cualquier superficie cerrada en el espacio libre es igual a la densidad de carga eléctrica encerrada en dicha superficie, dividida por ϵ_0 .

La ecuación (9) es la ley de Gauss magnética, la cual establece que el flujo magnético total de salida, a través de cualquier superficie cerrada es cero. Esto es debido a que las líneas de flujo magnético siempre se cierran sobre sí mismas, de aquí se desprende que no existen cargas magnéticas aisladas, en comparación con las cargas eléctricas. Esto se puede ilustrar si consideramos a un imán de barra con la designación tradicional de polo norte y polo sur, si lo dividimos en dos, aparecerán dos imanes más pequeños con sus respectivos polos norte y sur, podemos seguir dividiendo esos imanes en dos, y nuevamente aparecerán en cada uno de los segmentos sus respectivos polos norte y sur, se puede seguir el proceso de división hasta obtener imanes infinitesimalmente pequeños, pero cada uno de los imanes tendría su polo norte y sur, es decir, no se conocen de forma aislada los monopolos magnéticos.

La ecuación (10) es la llamada ley de inducción de Faraday, la cual relaciona el cambio de la inducción magnética \mathbf{B} en el tiempo con el campo eléctrico, mediante la inducción de una fuerza electromotriz al cambiar el flujo magnético. El campo \mathbf{B} así inducido variable en el tiempo, genera un campo \mathbf{E} , que es perpendicular en todas partes en la que \mathbf{B} cambia.

La ecuación (11) es una generalización de la ley de Ampère, la cual realizó el propio Maxwell, y relaciona la creación de campos magnético, mediante corrientes eléctricas. El campo eléctrico variable con el tiempo induce un campo magnético \mathbf{B} , que en todas partes es perpendicular a la dirección en la que el campo \mathbf{E} cambia, y este campo inducido es dependiente del tiempo.

Maxwell empleó las ecuaciones mencionadas anteriormente, para estudiar las relaciones entre los

campos eléctrico y magnético. Sin pronosticarlo, obtuvo las ecuaciones de onda para ambos campos en el caso particular en el que no haya cargas ni corrientes externas ($\rho = 0$ y $\mathbf{J} = 0$). Para deducir las ecuaciones de onda para los campos electromagnéticos, tomamos el rotacional de (10), y usando la relación vectorial

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A},$$

en conjunto con (8) y (11) se obtiene,

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) &= \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E}, \\ &= -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times \mathbf{B} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}. \end{aligned}$$

De aquí obtenemos que

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}.$$

Esta expresión es la ecuación de onda para el campo eléctrico, por su similitud con la ecuación de onda tridimensional vista en la sección anterior.

De la misma forma tomamos $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{B})$ para la inducción magnética, lo que nos conduce a

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2},$$

la cual, es la ecuación de onda para el campo de inducción magnética.

De esta forma los campos \mathbf{E} y \mathbf{B} pueden considerarse, como dos aspectos de un solo fenómeno físico, *el campo electromagnético*, cuya fuente es una carga en movimiento. La perturbación, una vez que ha sido generada en el campo electromagnético, es una onda, que se mueve más allá de su fuente e independiente de ella. Maxwell encontró, además, que estos campos apareados, llamados colectivamente *electromagnéticos*, se pueden propagar en el vacío a manera de ondas, y obtuvo una expresión para la velocidad de propagación de estas ondas electromagnéticas. Cuando él evaluó numéricamente esta expresión teórica, en términos de variables puramente electromagnéticas, encontró que el resultado estaba en excelente acuerdo con las mediciones experimentales de la velocidad de la luz, tendiendo el valor de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ o bien

$$c = 1 / \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}.$$

Su trabajo puso en claro que las ondas de luz son ondas electromagnéticas. En términos de la velocidad de la luz, las ecuaciones de onda para los campos se expresan como

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}, \quad \nabla^2 \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}. \quad (12)$$

Observemos la gran similitud que tienen con la ecuación de ondas mecánicas. Las funciones armónicas son soluciones a la ecuación de onda electromagnética. Para el campo eléctrico \mathbf{E} , la componente E_x tiene la forma

$$E_x = E_{0x} \cos(kz - \omega t).$$

La cual es una onda que se propaga en la dirección z positiva, para distintos valores de t .

Alternativamente, los campos \mathbf{E} y \mathbf{B} pueden escribirse en términos de un potencial vectorial \mathbf{A} y un potencial escalar V . De la ecuación (9) podemos concluir que,

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A},$$

y de la ecuación (10),

$$\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}.$$

Sustituyendo ambas ecuaciones en la ecuación (11), tenemos

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \mu \mathbf{J} - \mu \epsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla V + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}),$$

y utilizando la relación

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A},$$

obtenemos

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu \mathbf{J} + \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A} + \mu \epsilon \frac{\partial V}{\partial t}).$$

La definición de un vector requiere de la especificación tanto de su rotacional como de su divergencia. Es por ello que en este caso, se toma la libertad de elegir

$$\nabla \cdot \mathbf{A} + \mu \epsilon \frac{\partial V}{\partial t} = 0, \tag{13}$$

lo cual se conoce como condición o norma de Lorentz (en inglés, gauge) para los potenciales. La ecuación (13) permite obtener las ecuaciones de onda no homogéneas para dichos potenciales, quedando de la siguiente forma:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu \mathbf{J},$$

$$\nabla^2 V - \mu \epsilon \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon}.$$

Una de las ventajas del uso estas últimas ecuaciones de onda para los potenciales radica en que es más sencillo encontrar el campo eléctrico \mathbf{E} , a partir del potencial eléctrico V , el cual se puede encontrar a partir de la densidad de carga ρ . De la misma forma, conociendo la densidad de corriente \mathbf{J} es simple encontrar el potencial \mathbf{A} y con ello saber cuál es el campo magnético \mathbf{B} , [6].

Sabemos que siempre se debe satisfacer el principio de conservación de la carga, para cualquier situación física. La ecuación (11), nos permite corroborar que la conservación de la carga se satisface, es decir

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}.$$

Esta ecuación la podemos obtener calculando la divergencia de la ecuación (11).

IV. ONDAS GRAVITACIONALES

Pudiera decirse que las ondas gravitacionales (OG) son una de las predicciones más importantes de la teoría de la Relatividad General (1915) de Einstein [1, 7, 8]. Sin *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 2, No. 3, Sept. 2008*

embargo, éstas aún no han sido detectadas experimentalmente, lo cual será una prueba contundente de la existencia de estas ondas y la completez de las ecuaciones de esta teoría. En 1916, Einstein fundamentó la teoría de las ondas gravitacionales, para ello, restringió su teoría a ondas débiles (linealizadas) emitidas por cuerpos con autogravedad casi nula, y propagación a través de espacio tiempos (podemos imaginarlas como superficies) vacíos y planos.

La teoría de Einstein, está expresada matemáticamente en términos de objetos matemáticos conocidos como tensores, los cuales son una generalización de los llamados vectores. Los tensores se crearon para describir de una forma más adecuada la curvatura del espacio tiempo en términos geométricos. La cantidad más fundamental de esta teoría es lo que se conoce como métrica de un espacio tiempo,

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \tag{14}$$

donde los subíndices μ y ν toman los valores enteros de 0 a 3, la cual mide la distancia entre dos puntos en un espacio ya sea plano o curvo, como podría ser una esfera, cilindro, o superficies curvas más complejas.

En base al tensor métrico $g_{\mu\nu}$, la ecuaciones de campo gravitacional de la relatividad general, tienen la forma

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}, \tag{15}$$

en donde $G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}$ es el tensor de Einstein, que describe la geometría del espacio tiempo a partir del tensor métrico; $R_{\mu\nu}$ es el conocido como tensor de Riemann; R es el escalar de curvatura; Λ es la llamada constante cosmológica que no fue originalmente presentada en las ecuaciones de Einstein, y $T_{\mu\nu}$ representa el tensor de energía momento, lo cual corresponde al tipo de materia que genera la distorsión del espacio tiempo [1], [2]. Con $\Lambda = 0$ y $\kappa = 8\pi G / c^4$, la ecuación (15) toma la forma

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}, \tag{16}$$

donde G es la constante gravitacional de Newton. El valor de κ fue obtenido por la exigencia de que las ecuaciones de Einstein, tenían que predecir el comportamiento correcto del movimiento de los planetas internos en el sistema solar.

Tomar el límite del campo débil, significa considerar que el espacio-tiempo es plano ante una pequeña perturbación, tal que los términos de segundo orden en la perturbación son insignificantes, por lo que se desprecian.

En términos matemáticos, la expresión a esta perturbación es

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} - h_{\mu\nu} + O(h_{\mu\nu}^2), \quad (17)$$

donde $\eta_{\mu\nu} = \text{diagonal}(-1, +1, +1, +1)$ corresponde al tensor métrico de un espacio plano, y $h_{\mu\nu}$ es la perturbación de dicho espacio plano. Si $h_{\mu\nu} \ll 1$,

podemos excluir los términos de orden $O(h_{\mu\nu}^2)$ en todas las ecuaciones y, de esta forma, conseguir la versión linealizada de la Relatividad General.

Uno puede escribir los tensores en diferentes sistemas de coordenadas, en particular aquellos que resulten más adecuados para realizar los cálculos. En este caso, las coordenadas que consideraremos son las coordenadas de Lorentz [7].

Ahora, consideremos el siguiente cambio de coordenadas,

$$x^{\alpha'} = x^\alpha + \xi^\alpha(x^\beta), \quad (18)$$

donde ξ^α es un vector cuyas componentes dependen de las coordenadas originales. Para subir o bajar índices, simplemente usamos la métrica $g_{\mu\nu}$. El objetivo de esta transformación de coordenadas, es que deje invariante al sistema original. Sí exigimos que ξ^α sea pequeña, entonces tenemos que, a primer orden

$$g_{\alpha'\beta'} = \eta_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta} - \xi_{\alpha,\beta} - \xi_{\beta,\alpha}, \quad (19)$$

donde

$$\xi_\alpha = \eta_{\alpha\beta} \xi^\beta, \quad (20)$$

la coma indica derivada convencional $\xi_{\beta,\alpha} = \partial \xi_\beta / \partial x^\alpha$,

lo cual nos permite redefinir $h_{\alpha\beta}$ como,

$$h_{\alpha\beta} \rightarrow h_{\alpha\beta} - \xi_{\alpha,\beta} - \xi_{\beta,\alpha}. \quad (21)$$

Si todas las cantidades $|\xi_{\alpha,\beta}|$ son pequeñas, entonces la nueva $h_{\alpha\beta}$ es pequeña, y estamos aún en un sistema de coordenadas aceptable. Este cambio es el llamado *gauge de transformación*, que es un término usado en analogía con el gauge de transformaciones del campo electromagnético [2]. La libertad de coordenadas de las ecuaciones de Einstein, significa que somos libres para

escoger un vector arbitrario (pequeño) ξ^α en la ecuación (21). Usaremos esta libertad para simplificar los cálculos.

A orden lineal en $h_{\mu\sigma}$, el tensor de Riemann toma la forma,

$$R_{\mu\nu\rho\sigma} = \frac{1}{2} (\partial_\rho \partial_\nu h_{\mu\sigma} + \partial_\sigma \partial_\mu h_{\nu\rho} - \partial_\sigma \partial_\nu h_{\mu\rho} - \partial_\rho \partial_\mu h_{\nu\sigma}), \quad (22)$$

tal que las ecuaciones de Einstein en un campo débil quedan expresadas de la siguiente manera,

$$G_{\alpha\beta} = -\frac{1}{2} (\bar{h}_{\alpha\beta,\mu}{}^{,\mu} + \eta_{\alpha\beta} \bar{h}_{\mu\nu}{}^{,\mu\nu} - \bar{h}_{\alpha\mu,\beta}{}^{,\mu} - \bar{h}_{\beta\mu,\alpha}{}^{,\mu}) + O(\bar{h}_{\alpha\beta}^2), \quad (23)$$

esta ecuación se simplificará si consideramos que:

$$\bar{h}_{\alpha\beta,\mu} = 0. \quad (24)$$

La formula anterior representa cuatro ecuaciones, y ya que tenemos cuatro funciones libres gauge ξ^α , podemos ser capaces de encontrar un gauge en que la ecuación (23) sea verdadera. Es siempre posible escoger un gauge que satisface la ecuación (24). Así nos referimos como una condición gauge y específicamente, como una condición de gauge de Lorentz. Si tenemos un $h_{\mu\sigma}$ que satisface esto, decimos que estamos trabajando en el gauge de Lorentz. Otra vez el gauge tiene este nombre, por la analogía con el electromagnetismo. Otros nombres que uno encuentra en la literatura para el mismo gauge incluye el gauge armónico y el gauge de Donder.

En este gauge, la ecuación (23) toma la forma

$$G_{\alpha\beta} = -\frac{1}{2} \square^2 \bar{h}_{\alpha\beta}, \quad (25)$$

de tal forma que las ecuaciones de Einstein para un campo débil quedan

$$\square^2 \bar{h}_{\alpha\beta} = -16\pi G T_{\alpha\beta} / c^4. \quad (26)$$

Estas son las llamadas ecuaciones de campo de la *teoría linealizada*, ya que ellas se obtienen al considerar términos lineales en $h_{\alpha\beta}$.

Puede ser que en una región del espacio tiempo el campo gravitacional sea débil pero no estacionario. Esto pasa lejos de una fuente relativista que sufre cambios rápidos, y que le toma bastante tiempo a las perturbaciones producidas por estos cambios alcanzar la región distante bajo consideración. Estudiaremos este problema usando la

ecuación de campo débil desarrollado en el párrafo anterior.

Las ecuaciones (26), en vacío ($T_{\alpha\beta} = 0$) son

$$\left(-\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2 \right) \bar{h}_{\alpha\beta} = 0, \quad (27)$$

siendo ∇^2 el laplaciano. La ecuación (27) es llamada la ecuación de onda tridimensional.

La ecuación de onda lineal y homogénea, tiene como solución general a

$$h_{\alpha\beta} = C_{\alpha\beta} e^{i k_\lambda x^\lambda}, \quad (28)$$

donde $C_{\alpha\beta}$ es un tensor sin traza, simétrico y constante con componentes $C_{\mu 0} = C_{0\mu} = 0$, la cual contiene la polarización de la onda, y es también llamado tensor de polarización. La solución $C_{\alpha\beta} e^{(i k_\mu x^\mu)}$ es llamada la onda plana, (por supuesto, en aplicaciones físicas, uno usa solo la parte real de esta expresión, permitiendo a $C^{\alpha\beta}$ ser compleja). Por el teorema del análisis de Fourier, cualquier solución de la ecuación (15), es una superposición de la solución del plano de la onda.

El valor de $\bar{h}_{\alpha\beta}$ es constante en una hipersuperficie en

la que el producto interno $k_\alpha x^\alpha$ es constante,

$$k_\alpha x^\alpha = k_0 t + \mathbf{k} \cdot \mathbf{x} = \text{constante}, \quad (29)$$

donde \mathbf{k} se refiere al vector espacial cuyas componentes son k^i , si el cuadrivector asociado k_α es un vector nulo de Minkowski, *i.e.* tangente a la línea de mundo de un fotón. En analogía con las ondas clásicas nombramos las componentes del vector de onda $k_\lambda = (\omega/c, k_1, k_2, k_3)$. Para cualquier solución no trivial, el vector de onda debe satisfacer

$$k_\lambda k^\lambda = \mathbf{k}^2 - \omega^2 / c^2 = 0, \quad (30)$$

que se refiere a la relación de dispersión de la onda, y es la misma relación de dispersión como la de los fotones en el vacío. Para los lectores que están familiarizados con la teoría de ondas, se ve inmediatamente de la ecuación (30) que la velocidad de fase de la onda es 1, como es la velocidad grupo. Recordando que estamos usando unidades en que $c = 1$, la ecuación (30) nos dice que las OG se propagan a la velocidad de la luz. Note, sin embargo, que en realidad impusimos la velocidad de fase c escogiendo $k_\lambda = (\omega/c, \mathbf{k})$. De esta forma, dado que las OG no tienen masa, ellas tienen que propagarse a la

Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 2, No. 3, Sept. 2008

velocidad de la luz para llevar una energía finita, tal como lo hacen las ondas electromagnéticas.

V. DETECCIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES

Como se mencionó en la sección anterior, la existencia de las OG fue descubierta por el mismo Einstein en 1916. La búsqueda experimental [9-11] de las OG fue iniciada por Joseph Weber, cuando nada era conocido sobre posibles fuentes cósmicas, y cuando nadie tenía la visión de ver alguna tecnología con posibles éxitos para detectar OG. Después de una década de esfuerzos, Weber (1969) anunció al mundo la tentativa evidencia física de la existencia de OG, utilizando dos detectores basados en el principio masa resonante (uno cerca de Washington, D.C., y el otro cerca de Chicago), los cuales supuestamente fueron excitados simultáneamente por OG [12]. Alrededor de quince grupos de investigación en el mundo, fueron motivados para realizar sus propios experimentos y operar detectores de barras similares (Tyson and Giffard, [13]; Almadi [14] y otros [15]). Lamentablemente, aún con sensibilidades adecuadas, la repetición de la detección de las ondas gravitacionales no fue posible.

Al comienzo de este texto, se indicó que todavía se está tratando de detectar de forma directa las OG, no obstante ya se han detectado de forma indirecta, esto gracias a Russell Hulse y Joseph Taylor (premio Nobel de física en 1993) [11]. Su trabajo consistió en detectar (1974), y hacer un seguimiento del pulsar binario PSR 1913+16, ubicado en la constelación de *el águila*. Después de tomar datos en 1983, divulgaron que habían detectado un cambio sistemático en los tiempos del periastron. En 1982, el PSR 1913 + 16 arribaba a su periastron un segundo antes de como lo hacía en 1974. Es decir, como se esperaba que lo hiciera si su órbita permanecía constante desde 1974. Esto impulsó en mucho la investigación en OG. Existen dos tipos de detectores de OG, los detectores por masa resonante (metálicos) y por interferometría láser.

En la actualidad los detectores de barra resonante que están en funcionamiento son: el AURIGA [16], NAUTILUS y EXPLORER [17] (National Institute of Nuclear Physics, Italia), por parte de detectores de masa resonante esféricos se encuentran; El Graviton (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Sao Paulo, Brasil), y el MiniGrail [18] (Kamerlingh Onnes Laboratory, Leiden University - Holanda).

Motivados por los resultados obtenidos del premio nobel, y por el fracaso de la detección de las OG haciendo uso de detectores metálicos, se empezaron a construir detectores por interferometría láser, los cuales deberían ser de mayor tamaño que los metálicos; tendrían en teoría mayores posibilidades de encontrar las OG. Los proyectos más importantes que están actualmente en curso son: LIGO [19] en Livingston-Louisiana (USA), TAMA300 [20] (Mitaka, Japan), GEO600 [21] (Hannover, Germany) y VIRGO [22] (Cascina, Italy). A pesar de la enorme

tecnología con la que cuentan estos detectores, no ha sido posible detectar de manera directa las OG.

Las OG son generadas por procesos astrofísicos violentos. Algunas de las fuentes principales que generan OG son: explosiones de supernova, colisión de dos estrellas de neutrones [23], colisión de hoyos negros [23] e incluso la radiación de fondo generada por el Big Bang [24].

A diferencia de las OE (ondas electromagnéticas), las OG no son fácilmente absorbidas ni dispersadas por la materia. El espectro de las OE comienza con frecuencias de $f \approx 10^3$ Hz y se extiende hacia arriba por 20 órdenes de magnitud, mientras que el espectro de OG comienza en $f \approx 10^4$ Hz y se extiende hacia abajo por cerca de 20 órdenes de magnitud.

El paso de una OG en nuestro planeta, provoca que los objetos se ensanchen y acorten, lo cual implica que quizá nosotros nos movemos con ellas mismas, y es por eso que no nos damos cuenta de su presencia. Si consideramos los objetos como partículas de prueba libres, su efecto en estas partículas de prueba, será la contracción y el estiramiento de la distancia entre las partículas, en la dirección transversal a la dirección de propagación. Detectar directamente esos cambios de distancia es lo que los físicos quieren observar para determinar la existencia de las OG. La magnitud del estiramiento es por supuesto determinado por la amplitud de la onda.

El problema de detección de las OG, es medir cambios en la distancia de un orden aproximado a

$$\delta L = L|h| \approx 10^{-19} m, \quad (31)$$

si consideramos separaciones de $L \approx 10^3$ m, donde L es el tamaño del brazo de un interferómetro. Usando efectos de interferencia, uno puede fácilmente medir distancias del orden de la acostumbrada longitud de onda. Aquí, sin embargo, estamos hablando de medir una parte muy pequeña de una longitud de onda ($1/10^{13}$).

El problema básico en los detectores para la detección de OG, es por supuesto el ruido. Para los detectores en tierra, la principal fuente de ruido son los ruidos sísmicos (vibraciones en la tierra provocadas por la tala de árboles, el paso de vehículos, pequeños movimientos tectónicos entre otros) y ruidos térmicos (la temperatura de las suspensiones de los espejos, causa vibraciones a frecuencias por arriba de la frecuencia de las OG).

Las fuentes de OG (binarias) radian bajo la frecuencia del ruido térmico, es especialmente el ruido sísmico ese límite de detección de OG. Para deshacerse de este ruido de baja frecuencia, los detectores tienen obviamente que estar desacoplados de la Tierra. Es por esto que la NASA está planeando un detector de OG que funcionará en el espacio la Antena Espacial por interferometría láser (LISA) [25]. Además de evitar el ruido sísmico, LISA tiene la ventaja que los brazos del interferómetro pueden ser de varios órdenes de magnitud, más grande que los detectores basados en Tierra, y esto mejora la posibilidad de detectarlas. Los brazos de LISA estarán planeados

para ser de 5 millones de kilómetros de longitud. Las principales limitaciones de ruido para LISA son: ruido binario debido a la gran densidad de las estrellas binarias; ruido de fuerza aleatoria orbitando alrededor del Sol aproximadamente a 50 millones de kilómetros detrás de la Tierra, ruido de disparo debidos a fluctuaciones cuánticas del laser.

En un artículo posterior, hablaremos más sobre el tema de detección gravitacional.

V. CONCLUSIONES

El estudio de las OG es de suma importancia, ya que al detectarlas revolucionaría la visión que tenemos del Universo, esto será comparable como cuando se descubrió la radioastronomía, en el que se descubrieron los cuásares, pulsares y radiación térmica entre otros. Con las OG se espera detectar objetos en el Universo nunca antes vistos por el hombre.

En particular, si las ondas gravitacionales se lograsen detectar, entonces nuestra visión del momento en el que el Universo nació sería más precisa, podríamos “ver” más lejos y, por tanto, más en el pasado.

Cabe mencionar que debido a la búsqueda de las OG, se han logrado importantes avances en ciencia y tecnología, es por ello la importancia de seguir con este tipo de investigación.

Esperamos que estas notas, sean comprensibles para alumnos que hayan concluido una formación universitaria y que esta forma de explicar la importancia de las ondas gravitacionales los invite a estudiar este interesante y apasionante tema.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a SNI-CONACyT por su apoyo. RG-S agradece las becas COFAA y EDI del IPN. Este trabajo fue parcialmente financiado por los proyectos CONACyT J-49924, 52327 y proyecto del IPN SIP-20080759.

REFERENCIAS

- [1] Schutz, B. F., *A first course in General Relativity*, Cambridge University Press (1985). Price, R.H., “General Relativity primer”, *Am. J. Phys.* **50**(4), 300-329 (1982).
- [2] Moreno, C., *Ondas Gravitacionales*, aceptado para publicarse en el libro *Tendencias actuales de la Física en México*, editado por el Instituto Politécnico Nacional (2007).
- [3] Halliday, D. and Resnick, R., *Physics* volumen I, Wiley Publisher (2001).
- [4] Halliday, D. and Resnick, R., *Physics* volumen II, Wiley Publisher (2001).

- [5] Aguero, M.; Fujioka, J. y Ceciliano, I., “La antisoleidad de la onda solitaria”, *Ciencia Ergo sum* **9**(2), 197-201 (2002.)
- [6] Cheng, D. K., *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*, Princeton Hall (1992).
- [7] Carrol, S., *Spacetime and Geometry*, Addison Wesley (2004).
- [8] Thorne, K.S., *Gravitational Waves*, [arXiv:gr-qc/9506086](https://arxiv.org/abs/gr-qc/9506086).
- [9] Saulson, P.S., *Fundamentals of interferometric gravitational wave detectors*, World Scientific Publishing (1994).
- [10] Thorne, K.S., *Gravitational Radiation*, [arXiv:gr-qc/9704042](https://arxiv.org/abs/gr-qc/9704042).
- [11] Jim Hough, Sheila Rowan. *Gravitational Wave Detection by Interferometry*. Living Review (2000). [<http://relativity.livingreviews.org/Articles/subject.html>]
- [12] Weber, J., “Anisotropy and polarization in the gravitational-radiation experiments”, *Phys. Rev. Lett.*, **22**, 1320, (1969). Weber, J., “Evidence for discovery of gravitational radiation”, *Phys. Rev. Lett.*, **25**, 180, (1970).
- [13] Tyson, J.A., and Giffard, R.P., “Gravitational-Wave Astronomy”, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **16**, 521, (1978).
- [14] Amaldi, E., Aguiar, O., Bassan, M., Bonifazi, P., Carelli, P., Castellano, M.G., Cavallari, G., Coccia, E., Cosmelli, C., Fairbank, W.M., Frasca, S., Foglietti, V., Habel, R., Hamilton, W.O., Henderson, J., Johnson, W., Lane, K.R., Mann, A.G., McAshan, M.S., Michelson, P.F., Modena, I., Palletino, G.V., Pizzella, G., Price, J.C., Rapagnani, R., Ricci, F., Solomonson, N., Stevenson, T.R., Taber, R.C., and Xu, B.-X., “First gravity wave coincident experiment between resonant cryogenic detectors: Louisiana-Rome-Stanford”, *Astron. Astrophys.*, **216**, 325-332, (1989).
- [15] Ju, L., Blair, D.G., and Zhau, C. “Detection of Gravitational Waves.” *Reports on Progress in Physics* **63** 1317–1427 (2000).
- [16] Bignotto, M., “New suspension system for the gravitational wave bar detector AURIGA”, *Rev. Sci. Instrum.* **76**, 084502 (2005). [<http://www.auriga.inl.infn.it/>]
- [17] Astone, P. *et al.* “EXPLORER and NAUTILUS gravitational wave detectors: A status report.” *Class.Quant.Grav.* **25**, 114048 (2008).
- [18] Damour, T. and Taylor, J. H., *Astroph. J.* **366**, 501 (1991).
- [19] Minigral, <http://www.minigrail.nl/>.
- [20] LIGO, (<http://www.ligo-la.caltech.edu/>).
- [21] Takahashi, R *et al.*, “Operational status of TAMA300 with the Seismic Attenuation System (SAS)”, *Class. Quant. Grav.* **25**, 114036 (2008).
- [21] Grote, H. “The status of GEO 600”, *Class. Quant. Grav.* **25**, 114043 (2008) [<http://www.geo600.uni-hannover.de/>]
- [22] Acernese, F., *et al.* “Status of Virgo”, *Class. Quant. Grav.* **25**, 114045 (2008).
- [23] Sopuerta, C., “Gravitational Radiation from Neutron Stars and Black Holes”, <http://arxiv.org/abs/0808.0389>.
- [24] Zhao, W., “Relic Gravitational Waves and the Evolution of the Universe”, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0505588> (2005). Pritchard, J.R and Kamionkowski, M., “Cosmic Microwave Background Fluctuations from Gravitational Waves: An Analytic Approach”, *Annals Phys.* **318** 2-36, (2005) <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0412581>.
- [25] Danzmann, K. and Rudiger, A. “LISA technology - Concept, status, prospects”, *Class.Quant.Grav.* **20**, S1-S9 (2003). [LISA, <http://lisa.nasa.gov/>]

Sobre la existencia del Potencial de Lanczos



César Mora, Rubén Sánchez

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada. Instituto Politécnico Nacional. Av. Legaria 694, Col. Irrigación, CP 11500, México D. F.

E-mail: cmoral@ipn.mx; rsanchezs@ipn.mx

(Recibido el 2 de Junio de 2008; aceptado el 31 de Julio de 2008)

Resumen

En éste artículo discutimos brevemente el problema de integrabilidad del potencial de Lanczos para espacios de Riemann en varias dimensiones. Comentamos que la prueba original de existencia ofrecida por Lanczos era incorrecta, y que posteriormente este error fue corregido, analizado e investigado por Bampi y Caviglia. También hacemos notar cuáles son las ventajas que ofrece el formalismo espinorial en el análisis sobre la existencia de dicho potencial.

Palabras clave: Potencial de Lanczos, tensor de Weyl, espinores.

Abstract

In this article we briefly discuss the trouble of the integrability condition in Lanczos potential for Riemann spaces in several dimensions. We comment about the original flawed proof supplied by Lanczos of the existence of his potential, and how this was analyzed and searched by Bampi and Caviglia. We also emphasize which is the advantage of the espinorial formalism in the espinorial analysis about the existence of this potential.

Keywords: Lanczos' Potential, Weyl's tensor, spinors.

PACS: 45.20.D-, 45.20.dg, 45.50.Dd.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Hace más de 40 años que Cornelius Lanczos [1] propuso un modelo para derivar al tensor de Curvatura conforme de Weyl a partir de un potencial que lleva su nombre.

En 1983 Bampi y Caviglia [2] prueban que la demostración original de Lanczos acerca de la existencia de su potencial estaba equivocada, entonces ellos proponen una demostración alternativa que es de carácter local y que sirve básicamente para espacios analíticos en sólo cuatro dimensiones. Acerca de este hecho, ahora existe un trabajo muy completo e interesante presentado por Dolan y Gerber [3] acerca de la existencia de este potencial en dos, tres y cuatro dimensiones. La novedad aquí, es que Dolan y Gerber incorporan la teoría de Janet y Riquier [10] sobre Jets en haces fibrados diferenciales y hacen un análisis exhaustivo sobre la involución de los sistemas diferenciales que representan el encontrar un potencial de Lanczos en dos, tres y cuatro dimensiones. Así hallan, por ejemplo, que en dos dimensiones el problema es siempre involutivo, desde el punto de vista matemático, lo que trae como consecuencia inmediata, que en el caso de dos dimensiones el problema de integrabilidad del potencial, quede completamente resuelto. En el caso de tres dimensiones el problema no está en involución, de tal forma que para este caso se presentan soluciones que son singulares, como en el caso del espacio de Gödel reducido. Y finalmente, para el caso de cuatro dimensiones, el problema tampoco presenta involución, lo que requiere para la existencia del potencial, una prolongación y dar una condición de integrabilidad,

como lo han sugerido Bampi y Caviglia [2]. Illge [4] ha probado en forma espinorial e introduciendo un criterio más amplio acerca de la existencia del potencial como un problema de Cauchy. El formalismo espinorial de Illge ha mostrado ser más simple y sencillo de entender que su contraparte tensorial, cuando se aplica a los modelos de espacio tiempo (estos son variedades diferenciales de clase C^∞ , y con signatura de Lorentz). También es importante hacer notar, que para la signatura de Lorentz, el potencial de Lanczos satisface la ecuación de onda, y que cuando lo examina como un problema de Cauchy de existencia de solución, en su prueba omite la condición de analiticidad.

También es importante analizar la existencia de superpotenciales, es decir de potenciales que generen mediante la diferenciación correcta al potencial de Lanczos. Nuevamente, aquí el formalismo espinorial gana terreno demostrando cómo un superpotencial de rango 2 puede generar al potencial de Lanczos que resulta ser un tensor de rango 3.

II. EL ESPINOR DE ILLGE

La ecuación espinorial, sobre la que descansa el análisis de Illge [8] es

$$W_{ABCD} = 2\nabla_{(A} \dot{A} L_{BCD)\dot{A}}, \quad F_{BC} = \nabla^{AA} L_{ABC\dot{A}}. \quad (1)$$

Donde $W_{(ABCD)} = W_{ABCD}$ es un espinor totalmente simétrico en sus cuatro índices, y que no necesariamente necesita ser <http://www.journal.lapen.org.mx>

el espinor del tensor de Weyl. Vale la pena recalcar que los resultados de Illge, son matemáticamente más generales, y abarcan no nada más a un espinor con las características particular del espinor de curvatura conforme de Weyl. La primera de las ecuaciones (1) se conoce como la ecuación de Weyl-Lanczos y a L_{ABCD} se le llama el potencial espinorial de Lanczos. En cuanto a la segunda ecuación en el sistema (1), a la cantidad F_{AB} se la conoce como el gauge diferencial de L_{ABCD} . En particular si se escoge $F_{AB} = 0$, entonces se tiene el gauge de Lanczos.

El trabajo de Illge, también comprende la existencia de potenciales para espinores de índices completamente simétricos, con un número arbitrario de índices punteados y no punteados.

II. EXISTENCIA DEL POTENCIAL

Según Edgar y Höglund [4], la demostración de que el potencial de Lanczos existe en cuatro dimensiones para variedades con signatura de Lorentz, se llevó a cabo para un tensor W_{abcd} de rango 4 con las siguientes propiedades de simetría (la prueba en sí no involucra directamente al tensor de Weyl sino a un posible candidato de tensor de Weyl W_{abcd})

$$\begin{aligned} W_{abcd} &= W_{[ab]cd} = W_{ab[cd]} = W_{cdab}, \\ W^a{}_{bad} &= 0, \quad W_{a[bcd]} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

El potencial está dado por un tensor L_{abc} con las propiedades siguientes

$$L_{abc} = L_{[ab]c}, \quad L_{[abc]} = 0. \quad (3)$$

De acuerdo a la siguiente identidad, el tensor W_{abcd} queda generado por el potencial L_{abc}

$$\begin{aligned} W_{abcd} &= 2L_{ab[c;d]} + 2L_{cd[a;b]} - g_{a[c} (L_{|b|d];f}^f \\ &\quad - L_{d]b;f}^f - L_{d]f;b}^f) + g_{b[c} (L_{|a|d];f}^f \\ &\quad - L_{d]a;f}^f + L_{d]a;f}^f \\ &\quad - L_{d]f;a}^f) + \frac{4}{3} g_{a[c} g_{d]b} L_{f;h}^f. \end{aligned} \quad (4)$$

Lanczos originalmente impuso las dos condiciones siguientes, que se conocen como la condición algebraica de Lanczos y la condición diferencial del mismo nombre

$$L_{ab}{}^b = 0, \quad L_{ab;c}{}^c = 0. \quad (5)$$

El sistema constituye el gauge de Lanczos, y no son condiciones fundamentales que debe de cumplir el potencial. La libertad de gauge a la hora de encontrar al candidato de tensor de Weyl se puede escribir [5] como el conjunto de dos ecuaciones

$$L'{}_{abc} = L_{abc} + \chi_{abc}, \quad W_{abcd}(L') = W_{abcd}(L). \quad (6)$$

Por otro lado, Novello y Velloso [7] proporcionan un método basado en vectores de Killing para encontrar potenciales de Lanczos, y aplican su método a la métrica de Schwarzschild y a la geometría de Kasner.

Brian y Hölung [9] han demostrado el siguiente teorema de existencia del tensor de Lanczos para generar a un tensor de Weyl

Teorema: Un potencial de Lanczos para el tensor de curvatura de Weyl no existe para todos los espacios de dimensión $n \geq 7$.

Lanczos originalmente descubrió el potencial que lleva su nombre a través de un Lagrangiano, que está basado en el doble dual del tensor de Riemann R_{abcd} . De modo que el tensor L_{abc} , surge como un multiplicador de Lagrange para este Lagrangiano. La expresión para el tensor de Weyl C_{abcd} , en términos de ciertos multiplicadores de Lagrange en la forma siguiente

$$\begin{aligned} C_{abcd} &= L_{abc;d} - L_{abd;c} + L_{cda;b} - L_{cdb;a} \\ &\quad + g_{bc} L_{(ad)} + g_{ad} L_{(bc)} - g_{bd} L_{(ac)} - g_{ac} L_{(bd)} \\ &\quad + \frac{2}{3} L^rs{}_{rs} (g_{ac} g_{bd} - g_{ad} g_{bc}), \end{aligned} \quad (7)$$

donde se define

$$L_{ab} = L^r{}_{a;b;r} - L^r{}_{a;r;b}. \quad (8)$$

Si imponemos las restricciones (5), en esta ecuación encontramos la siguiente simplificación

$$\begin{aligned} C_{abcd} &= L_{abc;d} - L_{abd;c} + L_{cda;b} - L_{cdb;a} \\ &\quad - g_{bc} L^r{}_{ad;r} - g_{ad} L^r{}_{bc;r} \\ &\quad + g_{bd} L^r{}_{ac;r} + g_{ac} L^r{}_{bd;r}. \end{aligned} \quad (9)$$

Brunis [11] ha querido derivar al mismo tensor de Riemann a partir de un potencial similar al de Lanczos \tilde{L}_{abc} , originando así, otro problema de existencia similar, llamado el problema de Riemann-Lanczos. Las relaciones matemáticas que describen cómo el potencial \tilde{L}_{abc} genera el tensor de Riemann son

$$R_{abcd} = \tilde{L}_{abc;d} - \tilde{L}_{abd;c} + \tilde{L}_{cda;b} - \tilde{L}_{cdb;a}. \quad (10)$$

Bampi y Caviglia demostraron lo siguiente:

1. El problema de existencia del potencial de Lanczos o problema de Weyl-Lanczos descrito por las ecuaciones (7) y (9) tiene soluciones no singulares para las dimensiones de espacio tiempo $n = 4, 5$.
2. Para $n = 4$, el problema de Riemann-Lanczos representado por la ecuación (10) tiene soluciones no singulares, lo cual significa que los caracteres de Cartan no adoptan sus valores máximos.

3. La condición diferencial de gauge (dada en la segunda ecuación del sistema (5), no tiene efecto sobre la existencia de solución del potencial de Lanczos.

Hay que mencionar que el problema de Weyl-Lanczos es siempre una involución, y que el problema de Riemann-Lanczos, *no* lo es. Por lo que, en el segundo caso sólo se pueden hallar soluciones singulares, siempre y cuando el problema *no* es modificado. Sin embargo, Bampi y Caviglia [2] han sugerido una prolongación del problema de Riemann-Lanczos para hacer a su ecuación diferencial una involución.

REFERENCIAS

- [1] Lanczos, C., *The splitting of Riemann tensor*, Rev. Mod. Phys. **34**, 379-389 (1962).
- [2] Bampi, F. and Caviglia, G., *Third-order tensor potentials for the Riemann and Weyl tensors*, Gen. Rel. and Grav. **15**, 375-386 (1983).
- [3] Andersson, F. and Edgar, S. B., *Local Existence of Spinor and Tensor Potentials*, arXiv:gr-qc/9902080 v2, (2000).
- [4] Edgar, S. B. and Hölung, A., *The Lanczos potential for the Weyl curvature tensor: existence, wave equation and algorithms*, Proc. R. Soc. Lond. A **453**, 835-851 (1997).
- [5] Dolan, P. and Kim, C. W., *Some Solutions of the Lanczos vacuum wave equation*, Proc. R. Soc. Lond. A. **447**, 577-585 (1994).
- [6] Dolan, P. and Kim, C. W., *The wave equation for the Lanczos potential I*, Proc. R. Soc. Lond. A. **447**, 557-575 (1994).
- [7] Novello, M. and Velloso, L., *The Connection Between General Observers and Lanczos Potential*, Gen. Rel. Grav. **19**, 1251-1265 (1987).
- [8] Illge, R., *On potentials for several classes of spinor and tensor fields in curved spacetimes*, Gen. Rel. Grav. **31**, 551-564 (1999).
- [9] Brian, E. S. and Hölung, A., *The non-existence of a Lanczos potential for the Weyl Curvature tensor in dimensions $n \geq 7$* , arXiv:gr-qc/0202081 v1, (2000).
- [10] Dolan, P. and Gerber, A., *Exterior differential systems, Janet-Riquier theory and the Riemann-Lanczos problems in two, three and four dimensions*, J. Math. Phys. **44**, 3013-3034 (2003).
- [11] Brinis, E. U., *Mech. Fis. Mat. Instituto Lombardo (rend. Sc.)* **111** (1977), p. 466.

Un proceso de formalización matemática: Desde las rotaciones hasta las matrices de spin de Pauli



Orlando Organista, Juan C. Rodríguez, Andrés C. Sevilla

Grupo Física y Matemática, Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional,
Calle 72 No.11-86. Bogotá, Colombia.

E-mail: jorganis@pedagogica.edu.co

(Recibido el 25 de Abril de 2008; Aceptado el 2 de Julio de 2008)

Resumen

Se reconocen temas de la física básica como altamente elaborados. Una de las tareas del profesor de física es aportar elementos que ayuden a ser estos inteligibles. En este artículo se presenta un proceso de formalización matemática en torno al tema de las rotaciones. Reconstruimos mediante analogías, deducciones e inferencias, el camino que nos lleva desde una descripción de las rotaciones en \mathbb{R}^3 hasta las matrices de spin de Pauli.

Palabras claves: Rotaciones, procesos de formalización, matrices de Pauli.

Abstract

We recognize the basic physics topics as highly processed. One of the tasks of physics teacher is to provide elements that help these topics be intelligible. This paper presents a mathematical formalization process on the issue of rotations. We rebuild through analogies, deductions and inferences a path that leads from a description of rotations in \mathbb{R}^3 until the parent spin of Pauli.

Key words: Rotations, formalization processes, Pauli's matrices.

PACS: 01.55.+b, 03.65.Ca, 02.10.Yn.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Consideramos que una de las tareas del profesor de física es hacer inteligible los principios, las leyes, los procedimientos y los conceptos que resultan de la actividad científica. Asumir esta responsabilidad nos ha llevado a construir procesos lógicos de formalización matemática, que dan sentido y significado a representaciones simbólicas en torno a temas de la física básica considerados como altamente elaborados. Este proceso de entendimiento de naturaleza semántica implica a su vez procesos de comprensión por analogías, deducciones e inferencias a partir de ideas previas [1, 2].

El entendimiento y los procesos básicos del pensamiento resultan optimizados a través de la formalización matemática. Desde este punto de vista, esta se interpreta como un recurso del pensamiento para conocer y describir los fenómenos físicos.

Un tema de la física que exige cierto grado de elaboración matemática es el de las rotaciones. Por ejemplo, rotar un objeto puede resultar una acción sencilla de ejecutar. Sin embargo, cuando se trata de describir esta rotación en forma matemática puede resultar engorroso el

ejercicio, esto se evidencia en artículos como *Rotation Operators* [3] en donde se presentan diversos puntos de vista e interpretaciones de las rotaciones como operadores. Además, si se requiere de una generalización del concepto de rotación, como es el caso para la teoría del espín de los sistemas cuánticos, entonces las imágenes¹ formadas desde el pensamiento clásico [5] se tornan inadecuadas para la explicación de los fenómenos correspondientes. Estos problemas tanto de representabilidad de fenómenos y sus relaciones, como de búsqueda de universalidad encuentran un aliciente en la formalización matemática. Las formas matemáticas producto de este proceso se constituyen en un recurso del pensamiento necesario para hacer inteligible los fenómenos estudiados por las teorías modernas de la física [6], por ejemplo, Hestenes propone en su artículo *Reforming the mathematical language of physics* [7] como una herramienta para el modelado de la realidad física el uso de la matemática.

¹ Las imágenes, como lo dice Moreira hacen referencia a las representaciones internas, o *representaciones mentales*, que permiten "representar" internamente el mundo externo [4].

Distintos estudios acerca de la teoría de rotaciones se presentan en la literatura, con enfoques diferentes, por ejemplo:

Marshall hace una comparación entre la representación de las rotaciones en el espacio tridimensional a partir de matrices reales 3×3 y matrices complejas 2×2 [8].

Por su parte Sivardiere muestra que los productos de rotaciones pueden ser estudiados desde un punto de vista geométrico, siguiendo un método sencillo, basado en la descomposición de las rotaciones en dos reflexiones (tipo espejo) [9].

Por su parte Koehler y Trickey estudian las rotaciones a partir de relaciones existentes entre las matrices de rotación y vectores de Euler [10].

En este artículo presentamos un proceso de formalización matemática que nos lleva desde la descripción de las rotaciones espaciales hasta las matrices de spin de Pauli.

Inicialmente, se explicitan y formalizan ciertas nociones básicas constitutivas de una rotación espacial (secciones II y III). Este ejercicio de abstracción nos lleva a representar una rotación en \mathbb{R}^3 como un elemento del grupo $SO(3)$. Mediante transformaciones adecuadas de las nociones constitutivas de una rotación se construye el grupo $SU(2)$, el cual es una representación en el plano complejo del grupo de rotaciones espaciales $SO(3)$ (sección IV) [11]. Interpretando los elementos de $SU(2)$ correspondientes a rotaciones respecto a los ejes coordenados como curvas y usando ideas del cálculo se obtienen las matrices de spin de Pauli. Se resaltan analogías entre los ejes $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ y estas matrices $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$.

II. NOCIONES BÁSICAS QUE SUBYACEN A LA IDEA DE ROTACIÓN

Para describir una rotación se requiere fundamentalmente un eje² \hat{n} y un ángulo α ; un eje queda especificado con ayuda de tres direcciones $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ mutuamente ortogonales. En la Fig. 1 se hace notar que \hat{n} queda determinado por la pareja (θ, φ) .

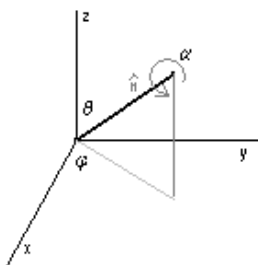


FIGURA 1. Eje de rotación.

Así, una rotación está definida por tres parámetros $(\theta, \varphi; \alpha)$ y la denotaremos por $R_{\hat{n}}(\alpha)$.

² Conjunto de puntos que permanecen fijos respecto a un movimiento de rotación dado.

En una rotación, un objeto pasa de una orientación a otra; podemos formalizar matemáticamente este cambio de orientación señalando que el vector de posición \vec{r} se ha transformado al vector de posición \vec{r}' ; simbólicamente esta afirmación la representamos por

$$\vec{r}' = R_{\hat{n}}(\alpha)\vec{r}, \quad (1)$$

donde,

$$\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad y \quad \vec{r}' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}; \quad (2)$$

estas ternas de números reales están referenciadas a partir de las tres direcciones que sirven para determinar el eje en el espacio \mathbb{R}^3 , Fig. 1.

Nótese que hay fundamentalmente dos entidades en una rotación: el operador de rotación $R_{\hat{n}}(\alpha)$ [3, 12] y el espacio que se transforma debido a la rotación, en nuestro caso \mathbb{R}^3 . En la siguiente sección mostramos cómo se puede representar $R_{\hat{n}}(\alpha)$.

III. FORMALIZACIÓN DE LAS ROTACIONES

Para llevar a cabo el proceso de formalización es suficiente tomar del espacio \mathbb{R}^3 sólo los vectores de posición unitarios, puesto que cualquier otro vector es múltiplo de alguno de estos. El conjunto que forman estos vectores constituyen lo que se conoce como la esfera unidad. Esta se denota como S^2 ; por lo tanto,

$$S^2 \equiv \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 / x^2 + y^2 + z^2 = 1\}. \quad (3)$$

Por otro lado, la acción de rotar se puede interpretar como una operación [3, 12] que actúa sobre un elemento de S^2 transformándolo en otro también de S^2 ; simbólicamente tenemos:

$$R_{\hat{n}}(\alpha): S^2 \rightarrow S^2. \quad (4)$$

Para determinar una representación matemática explícita, usamos el principio de isotropía del espacio \mathbb{R}^3 [13]. De acuerdo con este principio todas las direcciones son equivalentes y por lo tanto todos los puntos de S^2 rotan de la misma manera, es decir, en la misma dirección y con la misma intensidad (el mismo ángulo). Estos hechos se formalizan matemáticamente señalando que las rotaciones son transformaciones lineales, es decir,

$$\begin{cases} x' = a_{xx}x + a_{xy}y + a_{xz}z \\ y' = a_{yx}x + a_{yy}y + a_{yz}z \\ z' = a_{zx}x + a_{zy}y + a_{zz}z \end{cases}; \quad (5)$$

los coeficientes a_{ij} contienen la información acerca del eje de rotación y del ángulo de rotación, por lo tanto,

$$a_{ij} = a_{ij}(\theta, \psi; \alpha), \quad i, j = x, y, z; \quad (6)$$

los coeficientes a_{ij} correspondientes a una rotación respecto al eje \hat{z} , son fácilmente deducibles. Estos coeficientes los organizamos en filas y columnas, es decir, en una matriz y constituye la representación de la acción de rotar para este eje particular; específicamente,

$$R_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Permutando cíclicamente los ejes $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$, obtenemos las representaciones matriciales correspondientes a rotaciones respecto a los ejes \hat{x} y \hat{y} . Por ejemplo, cuando se efectúa la permutación cíclica, en la que el eje \hat{y} pasa a ser el eje \hat{z} , el eje \hat{z} pasa a ser el eje \hat{x} y el eje \hat{x} pasa a ser el eje \hat{y} , simbólicamente:

$$\begin{array}{ccc} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ & \searrow & \searrow \\ \hat{z} & \hat{x} & \hat{y} \end{array}, \quad (8)$$

se obtiene una reorganización de las entradas de la matriz $R_z(\alpha)$ dada por:

$$\begin{array}{ccc} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \hat{z} & \hat{x} & \hat{y} \end{array}, \quad (9)$$

que permite obtener la matriz de rotación correspondiente al eje \hat{y} ; por ejemplo, las entradas matriciales:

$$a_{xx}, a_{xy}, a_{xz}, \quad (10)$$

de la matriz $R_z(\alpha)$ pasan a ser las entradas matriciales

$$a_{zz}, a_{zx}, a_{zy}, \quad (11)$$

de la rotación respecto al eje \hat{y} . Se obtiene entonces,

$$R_y(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Análogamente se obtiene la representación matricial para la rotación con respecto al eje \hat{x} :

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Nótese dos hechos matemáticos esenciales presentes en estas representaciones matriciales: el determinante de cada una de estas matrices es 1 y la matriz inversa, en cada caso, es la matriz transpuesta. Así, surge la siguiente cuestión: ¿Estas dos características están presentes en todas las matrices de rotación?

Para responder la cuestión anterior se requiere determinar la matriz de rotación respecto a un eje \hat{n} arbitrario, lo cual a su vez exige definir la idea de composición. Esta operación queda definida como la realización consecutiva de rotaciones.

Por ejemplo, si rotamos primero respecto a un eje \hat{n}_1 y en seguida respecto a otro eje \hat{n}_2 , entonces representamos esta composición mediante:

$$R_{\hat{n}_3}(\alpha_3) = R_{\hat{n}_2}(\alpha_2) \circ R_{\hat{n}_1}(\alpha_1); \quad (14)$$

empíricamente, por ejemplo, se puede verificar que:

$$\begin{cases} R_x(\alpha) = R_y\left(\frac{\pi}{2}\right) \circ R_z(\alpha) \circ R_y\left(-\frac{\pi}{2}\right) \\ R_y(\alpha) = R_x\left(-\frac{\pi}{2}\right) \circ R_z(\alpha) \circ R_x\left(\frac{\pi}{2}\right) \end{cases}, \quad (15)$$

y para un eje \hat{n} arbitrario,

$$R_{\hat{n}}(\alpha) = R_{\hat{n} \times \hat{z}}(-\beta) \circ R_z(\alpha) \circ R_{\hat{n} \times \hat{z}}(\beta), \quad (16)$$

donde β es el ángulo formado por los ejes \hat{n} y \hat{z} .

Nótese que $\hat{n} \times \hat{z}$ es un vector \hat{m} que pertenece al plano xy , pero una rotación con respecto a este vector \hat{m} , se puede obtener a partir de la composición,

$$R_{\hat{m}}(\beta) = R_z(-\gamma) \circ R_x(\beta) \circ R_z(\gamma), \quad (17)$$

donde γ es el ángulo entre el eje \hat{m} y \hat{x} .

De esta manera una rotación cualquiera $R_{\hat{n}}(\alpha)$ se puede generar a partir de rotaciones en los ejes coordenados. Para tal efecto basta sustituir (17) en (16):

$$R_{\hat{n}}(\alpha) = R_z(-\gamma) \circ R_x(-\beta) \circ R_z(\gamma) \circ R_z(\alpha) \circ R_z(-\gamma) \circ R_x(\beta) \circ R_z(\gamma). \quad (18)$$

La cuestión planteada inicialmente en esta sección se puede responder con ayuda de la ecuación anterior. Puesto que el determinante del producto de matrices es el producto de sus determinantes, y como cada matriz de rotación respecto a los ejes coordenados tiene determinante 1 se obtiene trivialmente que:

$$\det R_n(\alpha) = 1 \tag{19}$$

Igualmente, puesto que el producto de dos matrices ortogonales es ortogonal, y la matrices dadas en (7), (12) y (13) son ortogonales entonces resulta evidente que $R_n(\alpha)$ es ortogonal.

Así, las matrices de rotación del espacio \mathbb{R}^3 son matrices 3×3 , ortogonales y de determinante 1; este conjunto tiene estructura de grupo [11,14] y se conoce en la literatura como el grupo $SO(3)$.

Una conclusión preliminar de este proceso de formalización matemática nos lleva a afirmar que lo que se rota es S^2 y la acción de rotar la efectúan los elementos del grupo $SO(3)$.

IV. TRANSFORMACIONES

Vamos a transformar la esfera unidad S^2 la representación matricial de las rotaciones, las condiciones que formalizan la acción de rotar e incluso, vamos a tener otra representación para el sistema de referencia $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$. Estas transformaciones permiten generalizar a otros "espacios" la idea de rotación.

A. Transformando la esfera S^2 : proyección estereográfica

La asociación biunívoca entre los puntos de $S^2 - \{(0,0,1)\}$ y los puntos del plano cartesiano uv , dada por:

$$u = \frac{x}{1-z}, \quad v = \frac{y}{1-z}, \tag{20}$$

o

$$x = \frac{2u}{u^2 + v^2 + 1}, \quad y = \frac{2v}{u^2 + v^2 + 1}, \quad z = \frac{u^2 + v^2 - 1}{u^2 + v^2 + 1}, \tag{21}$$

se conoce como proyección estereográfica [15, 16]; una representación visual se muestra en la fig. 2. Esta asociación permite transformar la esfera en el plano \mathbb{R}^2 ; y mediante la función $f: \mathbb{R}^2 \rightarrow C_\infty$ definida por:

$$f((\hat{u}, v)) = u + iv, \tag{22}$$

se logra poner en correspondencia biunívoca los puntos de S^2 con los números complejos C_∞ . Nótese que $(0,0,1)$ se aplica en ∞ . De esta manera S^2 se ha transformado en C_∞ . Surge entonces la pregunta: ¿cómo se transforman las matrices de rotación cuando S^2 se transforma en C_∞ ? Abordamos esta cuestión a continuación.

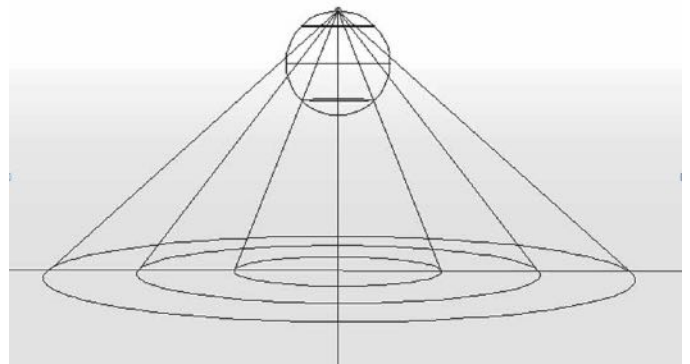


FIGURA 2. Proyección estereográfica.

B. Transformando a $SO(3)$: la transformación de Möbius

Un elemento $g \in SO(3)$ hace corresponder elementos de S^2 con elementos de S^2 , pero S^2 se ha transformado en C_∞ . De esta manera g induce una correspondencia \tilde{g} de C_∞ en C_∞ . Por ejemplo, si:

$$g = R_z(\alpha), \tag{23}$$

entonces, la correspondiente $\tilde{g}: C_\infty \rightarrow C_\infty$, viene determinada por:

$$\tilde{g} = ze^{i\alpha}, \tag{24}$$

puesto que corresponde a una rotación del plano como se observa en la Fig 2.

Sin embargo, para una rotación arbitraria, $g = R_z(\alpha)$, la correspondiente \tilde{g} no se obtiene directamente. Además las dos condiciones que definen a $SO(3)$, $\det A = 1$ y $AA^T = I$, no se mantienen en el correspondiente caso de C_∞ en C_∞ .

Para recuperar las condiciones que definen a $SO(3)$, en el contexto del plano complejo, necesitamos que la transformación inducida \tilde{g} tenga naturaleza matricial. En teoría de variable compleja se estudia el conjunto de transformaciones de C_∞ en C_∞ [17] definidas por:

$$f(z) = \frac{az + b}{cz + d}, \tag{25}$$

donde a, b, c, d y z representan números complejos. Este tipo de transformaciones se conocen como transformaciones de Möbius, y son inducidas por matrices 2×2 de la forma:

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, \tag{26}$$

El conjunto de matrices de Möbius tiene estructura de grupo [11, 14] con la composición de funciones como operación entre los elementos. Esta operación se corresponde con la multiplicación de matrices 2×2 .

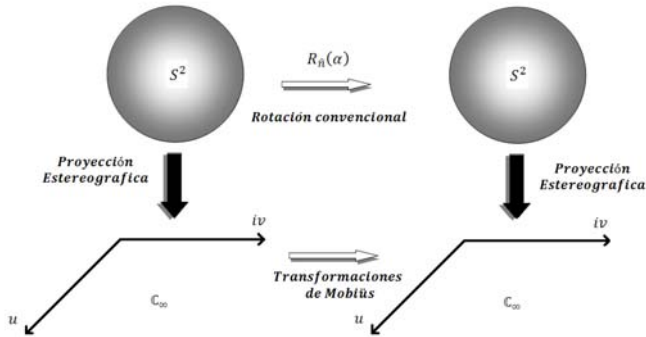


FIGURA 3. Esquema que permite representar las rotaciones en el contexto del plano complejo.

De esta manera tenemos transformaciones del plano complejo dadas en forma matricial. Un subgrupo de estas transformaciones se asociarán con las rotaciones de la esfera S^2 , y nos permitirán reinterpretar las condiciones que definen a $SO(3)$, en el contexto del plano complejo; un esquema de esta asociación se muestra en la Fig. 3. Para una visualización de las transformaciones de Möbius en relación con distintos movimientos de la esfera unidad se invita a ver la referencia [18].

El punto de partida para determinar el subgrupo de transformaciones de Möbius correspondientes a $SO(3)$ es la ecuación (18). Esta ecuación muestra que una rotación arbitraria se puede generar por medio de una composición de rotaciones respecto a los ejes coordenados. Por esta razón se requiere determinar las transformaciones de Möbius correspondientes a estas rotaciones. Esta tarea se lleva a cabo a continuación.

C. Las transformaciones de Möbius correspondientes a $R_x(\alpha)$, $R_y(\alpha)$ y $R_z(\alpha)$

Escribiendo (24) en la forma:

$$\tilde{g}(z) = \frac{e^{\frac{i\alpha}{2}}z + 0}{0z + e^{-\frac{i\alpha}{2}}}, \quad (27)$$

se obtiene la transformación de Möbius correspondiente a $R_z(\alpha)$ es decir,

$$R_z(\alpha) \rightarrow U_z(\alpha) = \begin{pmatrix} e^{\frac{i\alpha}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-\frac{i\alpha}{2}} \end{pmatrix}, \quad (28)$$

Para determinar las correspondientes transformaciones de Möbius de $R_x(\alpha)$ y $R_y(\alpha)$ usaremos (15); para tal efecto se requiere primero determinar las transformaciones de Möbius correspondientes para $R_x(\frac{\pi}{2})$, $R_x(-\frac{\pi}{2})$, $R_y(\frac{\pi}{2})$, $R_y(-\frac{\pi}{2})$.

La rotación $R_x(\frac{\pi}{2})$ produce la siguiente secuencia de asociaciones entre los puntos de S^2 :

$$(0,1,0) \rightarrow (0,0,1) \rightarrow (0,-1,0) \rightarrow (0,0,-1) \rightarrow (0,1,0); \quad (29)$$

esta se corresponde con la secuencia de números complejos:

$$i \rightarrow \infty \rightarrow -i \rightarrow 0 \rightarrow i, \quad (30)$$

debido a la proyección estereográfica, ver figura 4.

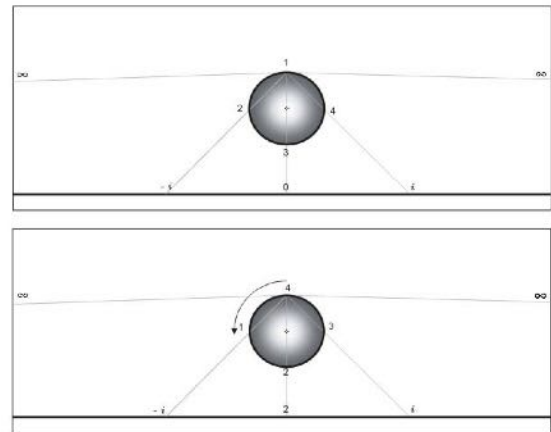


FIGURA 4. Rotación $R_x(\frac{\pi}{2})$ y su proyección en C_∞ .

Así, se requiere una transformación de Möbius $f(z)$ tal que:

$$f(i) = \infty, \quad f(\infty) = -i, \quad f(-i) = 0, \quad f(0) = i, \quad (31)$$

estas restricciones nos permiten determinar los coeficientes a , b , c y d , obteniendo finalmente la transformación de Möbius:

$$f(z) = \frac{z+i}{iz+1}; \quad (32)$$

esta transformación es inducida por la matriz 2×2

$$\begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}. \quad (33)$$

Siguiendo este mismo procedimiento se obtienen las transformaciones de Möbius:

$$\begin{pmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \text{ y } \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (34)$$

correspondientes a las rotaciones: $R_{\hat{x}}(-\frac{\pi}{2})$, $R_{\hat{y}}(\frac{\pi}{2})$ y $R_{\hat{z}}(-\frac{\pi}{2})$ respectivamente. Sin pérdida de generalidad, se puede escoger en vez de (33) y (34) las correspondientes matrices de determinante 1.

Como se mencionó anteriormente, con ayuda de (15) una rotación arbitraria sobre el eje \hat{x} se puede escribir como:

$$R_{\hat{x}}(\alpha) = R_{\hat{y}}\left(\frac{\pi}{2}\right) \circ R_{\hat{z}}(\alpha) \circ R_{\hat{y}}\left(-\frac{\pi}{2}\right), \quad (35)$$

reemplazando estas rotaciones por las correspondientes matrices 2×2 (28, 34) se obtiene:

$$U_x(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\alpha/2} \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (36)$$

y efectuando las operaciones se halla finalmente la transformación de Möbius correspondiente a $R_{\hat{x}}(\alpha)$:

$$U_x(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \frac{\alpha}{2} & i \sin \frac{\alpha}{2} \\ i \sin \frac{\alpha}{2} & \cos \frac{\alpha}{2} \end{pmatrix}. \quad (37)$$

Igualmente a partir de la relación dada en (15) y siguiendo el procedimiento anterior obtenemos la transformación de Möbius $U_y(\alpha)$ correspondiente a $R_{\hat{y}}(\alpha)$:

$$U_y(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \frac{\alpha}{2} & -\sin \frac{\alpha}{2} \\ \sin \frac{\alpha}{2} & \cos \frac{\alpha}{2} \end{pmatrix}. \quad (38)$$

Nótese que $U_x(\alpha)$, $U_y(\alpha)$ y $U_z(\alpha)$ son matrices de la forma

$$\begin{pmatrix} a & b \\ -b^* & a^* \end{pmatrix}, \quad (39)$$

tal que $|a|^2 + |b|^2 = 1$.

Ahora, (18) muestra que cualquier rotación se puede expresar en términos de rotaciones respecto a los ejes coordenados. Así, la transformación de Möbius correspondiente a una rotación arbitraria $R_{\hat{n}}(\alpha)$ es el producto de matrices U_x , U_y y U_z y estos productos no alteran la característica dada por (39); es decir, tenemos dos cualidades esenciales presentes en todas las matrices $U_n(\alpha)$: el determinante es 1 y son matrices unitarias: $U^*U = I$. Se toman estos dos hechos matemáticos como las condiciones que definen el grupo de rotaciones en el contexto del plano complejo; este es conocido en la

literatura como el grupo $SU(2)$. De esta forma $SO(3)$ se representa ahora como $SU(2)$.

V. CURVAS, DERIVADAS Y LA FUNCIÓN EXPONENCIAL

En cursos introductorios de análisis matemático de una variable real, se estudian las condiciones para representar una función $f(t)$ mediante una serie de Taylor [19]. Asumiremos estas condiciones en lo que sigue. Entonces realizando una expansión alrededor de $t_0 = 0$, la función $f(t)$ se representa mediante la serie de potencias:

$$f(t) = f(0) + tf'(0) + \frac{1}{2!}t^2f''(0) + \dots, \quad (40)$$

si efectuamos las sustituciones:

$$f'(0) = X, \quad (41)$$

$$f''(0) = X^2,$$

$$f^{(n)}(0) = X^n,$$

en (40), entonces

$$f(t) = e^{tX}. \quad (42)$$

Esta ecuación nos muestra que la función exponencial permite vincular una curva $f(t)$, Fig. 5, y sus derivadas en el origen.

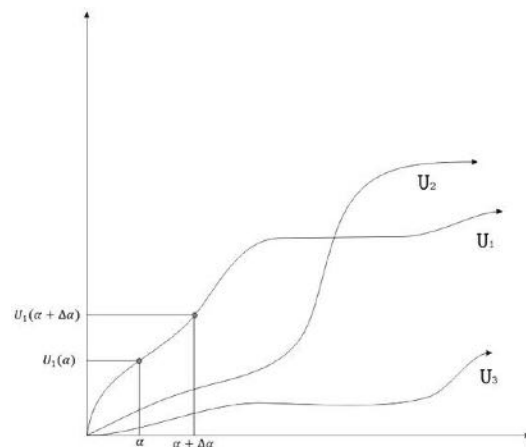


FIGURA 5. Interpretación de curvas o familias de rotaciones en los ejes.

Aplicaremos esta idea a las matrices U 's. Para tal efecto, consideramos estas matrices como tres tipos de curvas. En analogía con (41), tenemos que las derivadas en el origen para las curvas $U_x(\alpha)$, $U_y(\alpha)$ y $U_z(\alpha)$ son:

$$X_x = \frac{d}{d\alpha} U_x(\alpha)|_{\alpha=0} = \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} = \frac{i}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \equiv \frac{i}{2} \sigma_x, \quad (43)$$

$$X_y = \frac{d}{d\alpha} U_y(\alpha)|_{\alpha=0} = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} = -\frac{i}{2} \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \equiv -\frac{i}{2} \sigma_y,$$

$$X_z = \frac{d}{d\alpha} U_z(\alpha)|_{\alpha=0} = \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix} = \frac{i}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \equiv \frac{i}{2} \sigma_z,$$

donde σ_x , σ_y y σ_z son las matrices de spin de Pauli. Entonces las expresiones análogas a (42) son:

$$U_x(\alpha) = \exp\left(i\frac{\alpha}{2}\sigma_x\right), \quad (44)$$

$$U_y(\alpha) = \exp\left(-i\frac{\alpha}{2}\sigma_y\right),$$

$$U_z(\alpha) = \exp\left(i\frac{\alpha}{2}\sigma_z\right),$$

Continuando con la construcción de la generalización del concepto de rotación a otros espacios por medio de analogías, deducciones e inferencias, surge la cuestión ¿cuál es el análogo en \mathbb{R}^3 de las matrices de spin de Pauli?, esta pregunta será tratada en la siguiente sección.

VI. LOS EJES $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ Y LAS MATRICES σ

Hay profundas relaciones entre el conjunto de vectores unitarios $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ y el conjunto de matrices de Pauli. Por ejemplo, las relaciones:

$$\begin{cases} \sigma_x \sigma_y = i\sigma_z \\ \sigma_y \sigma_z = i\sigma_x \\ \sigma_z \sigma_x = i\sigma_y \end{cases}, \quad (45)$$

son análogas al producto vectorial de los vectores de dirección $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$. Igualmente, las relaciones:

$$\begin{aligned} \exp\left(-i\frac{\theta}{2}\sigma_z\right)\sigma_x\exp\left(i\frac{\theta}{2}\sigma_z\right) &= \sigma_x \cos\theta + \sigma_y \sin\theta, \\ \exp\left(-i\frac{\theta}{2}\sigma_z\right)\sigma_y\exp\left(i\frac{\theta}{2}\sigma_z\right) &= -\sigma_x \sin\theta + \sigma_y \cos\theta, \quad (46) \\ \exp\left(-i\frac{\theta}{2}\sigma_z\right)\sigma_z\exp\left(i\frac{\theta}{2}\sigma_z\right) &= \sigma_z, \end{aligned}$$

permiten enfatizar el comportamiento vectorial de las matrices σ_x , σ_y y σ_z como análogo al comportamiento vectorial de los vectores directores $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$, pues, (46) evidencia que las matrices de Pauli se transforman como las componentes de un vector bajo una rotación sobre el eje σ_z en dirección del reloj.

Estas inferencias permiten afirmar que las matrices σ_x , σ_y y σ_z se pueden considerar como la base canónica de un espacio vectorial análogo al espacio \mathbb{R}^3 . Denominamos a este espacio el σ -espacio.

El análogo a la esfera unidad S^2 en este σ -espacio viene dado por el conjunto de matrices:

$$n_x \sigma_x + n_y \sigma_y + n_z \sigma_z, \quad (47)$$

donde n_x , n_y y n_z son números reales tales que:

$$n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1, \quad (48)$$

esta analogía se justifica por la relación:

$$(\hat{n} \cdot \vec{\sigma})^2 = I, \quad (49)$$

donde $\hat{n} \cdot \vec{\sigma}$ es la abreviación de (47).

VII. CONCLUSIONES

Dos ideas que subyacen al concepto de rotación son la acción de rotar y el espacio de rotación. La formalización de estas ideas nos ha llevado, en el caso de rotaciones ordinarias, a construir el grupo $SO(3)$ como operadores que actúan sobre la esfera unidad S^2 . Este esquema permite concebir la idea de rotación en otros espacios. Es así como se construyó el grupo $SU(2)$ actuando sobre el σ -espacio. Ilustramos de esta manera cómo la formalización matemática es un recurso del pensamiento que ayuda a la construcción de modelos explicativos coherentes, necesarios para la comprensión de las teorías modernas de la física.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con apoyo del proyecto de investigación DFI-075-08. Se agradece especialmente la colaboración de D. Jaimes y V. Gómez por sus discusiones iniciales en el desarrollo de este proceso de formalización matemática llevado a cabo en este artículo.

IX. REFERENCIAS

[1] Vera, J. Pimentel, E. and Batista, F., *Redes semánticas: Aspectos teóricos, técnicos, metodológicos y analíticos*, Ra Ximhai **1**, 439-451 (2005).

- [2] Organista, O., Gómez, V., Jaimes, D. y Rodríguez, J., *Una idea profunda en la comprensión del mundo físico: El principio de la superposición de estados*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **1**, 83-88 (2007).
- [3] Wolf, A., *Rotations Operators*, Am. J. Phys. **37**, 531-536 (1969).
- [4] Moreira, M. A., *Modelos mentais*, Investigações em Ensino de Ciências. **1**, 196-206 (1996).
- [5] Schwinger, J., *Quantum Mechanics: symbolism of atomic measurements* (edited by Berthold-Georg Englert, Berlin, 2001).
- [6] Boniolo, G. and Budinich, P., *The role of the mathematics in physical sciences and Dirac's methodological revolution* (Springer, Netherlands, 2005).
- [7] Hestenes, D., *Reforming the mathematical language of physics*, Am. J. Phys. **71**, 104-121 (2003).
- [8] Marshall, J., *Representation of Rotations in Three-Space by Complex 2X2 Matrices*, Am. J. Phys. **24**, 515-518 (1956).
- [9] Sivardiere, J., *Products of rotations: A geometrical point o view*. Am. J. Phys. **62**, 737-743 (1994).
- [10] Koehler, T. and Trickey, S., *Euler vectors and rotations about an arbitrary axis* (IBM research laboratory, California, 1977).
- [11] Hall, B., *Lie groups, Lie algebras and representations* (editorial Board, United States of America, 2003).
- [12] Leubner, C., *Coordinate-free rotation operator*, Am. J. Phys. **47**, 727-729 (1979).
- [13] Landau, L. D. and Lifshitz, E. M., *Mecánica vol. 1*, (editorial Reverté, Barcelona, 1975).
- [14] Hamermesh, M., *Group theory and its applications to physical problems* (Addison-Wesley publishing company, London, 1962).
- [15] Rubiano, G., *Topología general* (Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2002).
- [16] Goldstein, H., *Classical Mechanics*, (Addison-Wesley, 2nd ed., Massachusetts, 1980).
- [17] Murray, S., *Variable compleja* (McGraw-hill, Colombia, 1971).
- [18] Rogness, J., <http://www.youtube.com/watch?v=JX3VmDgiFnY>, consultado el 10 de abril del 2008.
- [19] Apostol, T., *Análisis Matemático* (Reverté, Barcelona, 1960).

¡Cuando la tostada resbala de la mano!



Adrián Corona Cruz y Guillermo Martínez Peña

*Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
AP 1152, 72001 Puebla, Pue., México.*

E-mail: acorona@cfm.buap.mx

(Recibido el 4 de Junio de 2008; aceptado el 30 de Julio de 2008)

Resumen

El comportamiento de la tostada cayendo de una mano se usa para estudiar la dinámica de los sistemas rotacionales. El sistema ya ha sido estudiado considerando el deslizamiento de la tostada de la orilla recta de la mesa. Sin embargo, esa situación no es muy probable en la vida real. Si las tostadas se nos caen es muy probable que caigan de la mano. Es natural modelar la orilla de la mano como redonda. Los valores experimentales de la velocidad angular máxima que adquiere la tostada al caer de los bordes redondos resultaron ser mayores que los que se dan el caso de borde recto. Nosotros estudiamos el efecto de la redondez en la velocidad angular de un paralelepípedo (tabla), que simula un pan tostado, al caer desde la orilla redonda de una superficie. La tabla se hace caer desde diferentes orillas con el objetivo de determinar el efecto que tiene la posición inicial en el ángulo que la tabla llega al piso. La velocidad angular de rotación de la tabla fue determinada de la secuencia de las imágenes de su video. Para conocer el efecto de la redondez de la orilla, se identificaron tres radios: el primero se refiere a una orilla recta; el segundo redondo ($R=1.1$ cm) que simula la orilla de la palma de una mano; y el tercero ($R=1.75$ cm) que simula la orilla de una mesa. Los resultados experimentales se describen bien por la solución numérica (simulación mediante el software Interactive Physics, IP), un modelo que hace simple predecir las diferentes conductas y evaluar el efecto de los parámetros físicos involucrados en la dinámica del sistema.

Palabras clave: Murphy, enseñanza, velocidad angular, laboratorio de física, simulación.

Abstract

The behavior of the toast falling from a hand is used for studying the dynamics of the rotational systems. The system has already been studied, considering the slip of the toast of the right-angled edge of a table. However, this situation is no very likely in real life. If the toasts fall, it is more likely they will fall from a hand. It is natural to model the edge of a hand as being round. The experimental values of the maximum angular speed that acquires the toast in falling of round edges turned out to be bigger than those in the case of the falls of a right-angled edge. We study the effect of the roundness in the angular speed of a parallelepiped (table) that simulates a toast when falling from the round edge of a surface. The table is made fall to different salient with the objective of determining the effect that has the initial position in the angle that the table arrives to the floor. The angular speed of rotation of the table was determined from the sequence of the images of its video. To know the effect of the roundness of the edge, three radios they were identified: the first one refers to a right-angled edge; the second to a round edge ($R=1.1$ cm) that simulates the edge of the palm of a hand; and the third ($R=1.75$ cm) that simulates the edge of a table. The experimental results are described well by the numeric solution (simulation by the software Interactive Physics, IP), a model that makes simple to predict the different behaviors and to evaluate the effect of the physical parameters involved in the dynamics of the system.

Key words: Murphy, teaching, angular speed, laboratory of physics, simulation.

PACS: 01.40gb, 01.50.Lc, 07.05.Fb, 45.20.dc.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Hay la creencia de que un pan tostado untado con mantequilla (localmente llevando otros contenidos) que se cae de un plato o de una mesa, llegará con su contenido hacia el piso, cumpliendo así, con la ley de Murphy [1]. Esta superstición se ha explicado suponiendo que la mantequilla produce una asimetría en la tostada (centro de masa) que induce a que al caer, lo haga con la mantequilla hacia el piso; de hecho ahora se sabe que el efecto aerodinámico de la mantequilla a primero orden es despreciable [2]. También, se ha considerado que la altura de la caída, en el caso de caiga de las manos o la orilla de la mesa, la tostada sólo tendrá el tiempo suficiente para que rote lo suficiente para que el lado de la

mantequilla quede hacia abajo; la teoría sugiere que la tostada que se cae de alrededor de 3 metros tiene el tiempo suficiente para que aterrice con la mantequilla hacia arriba [3]. Esto confirma la expectativa teórica que, contrariamente a la creencia popular, la presencia de mantequilla u otro no puede ser explicado con la Ley de Murphy; en condiciones estándar, la frecuencia con la que la tostada cae con la mantequilla hacia el piso: incluso en ausencia de la mantequilla, la tostada tiene la tendencia a caer cara abajo [2]. En contraste, la mayoría de los científicos consideran la tal creencia como absurda. Una investigación del programa de ciencia de TV BBC demostró que la creencia es nada más un mito urbano, la falta de control en el tiro de la tostada, hizo que el resultado fuera equivalente a un hecho de azar [3].

El problema de la tostada no implica jugar con la comida, es un fenómeno común de la vida cotidiana que se puede estudiar haciendo física. Quizás los argumentos para los estudiantes sean difíciles de entender, pero pensamos que a los estudiantes les cautiva el estudio de éste tipo de problemas [4]. También, Matthews considera que el objetivo de éste tipo de actividades animan a que los alumnos descubran que la ciencia y el método científico asienten estudiar los fenómenos cotidianos [3].

A consecuencia del trabajo terminal del laboratorio básico de mecánica de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y la cuarta sugerencia planteada el artículo “A closer look at tumbling toast” [5] fue planteada la presente investigación. En éste trabajo se estudia el efecto de la redondez de la orilla (mano o mesa) por donde gira-resbala la tostada. La consistencia de nuestros resultados se obtuvo del buen acuerdo que muestran resultados reportados por Bacon [5], con los obtenidos de su simulación con Interactive Physics (IP) [6]. El uso de una cámara de video cuyo tiempo de 1/500 de segundo de obturación y el programa (IP), ayudaron a obtener datos que permitieron llegar a mostrar la similitud de resultados y las conclusiones derivadas de su análisis. En particular mediante la simulación se determina el ángulo último de contacto entre la orilla de la mesa y la tostada. También, se “comprueba” que durante la rotación hay deslizamiento por lo que se requiere considerarla en la solución teórica, deslizamiento (fricción cinética) de la tostada durante su contacto con la orilla.

II. CONSIDERACIONES TEORÍCAS

En la figura1, se muestra un diagrama de cuerpo libre del sistema, y el eje coordenado para analizar teóricamente los cambios de energía de la tostada.

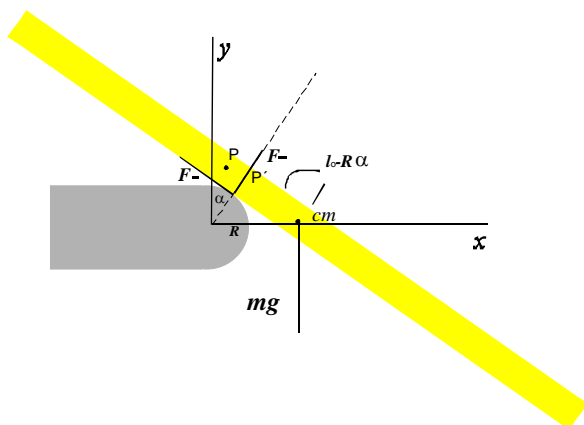


FIGURA 1. Tostada girando en la orilla de la mesa: (P) punto desde el que se mide la distancia (l_0) que sobre sale de la mesa al centro de masa (cm) de la tabla; (P') punto de contacto cuando la tabla forma un ángulo (α) con la vertical; (R) es el radio de la orilla de la mesa; (F_y) y (F_R) la fuerza de fricción y normal respectivamente; (mg) el peso de la tabla.

La ecuación de movimiento para el sistema formado por la tabla rotando-resbalando en la orilla de una superficie horizontal, se establece considerando las coordenadas del centro de masa (CM) de la tabla en el sistema cartesiano polar:

$$x_{CM} = (l_0 - R\alpha) \cdot \cos \alpha + R \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

$$y_{CM} = R \cdot \cos \alpha - (l_0 - R\alpha) \cdot \sin \alpha, \quad (2)$$

donde l_0 es la distancia desde el punto de apoyo al centro de masa, y α el ángulo formado entre el punto de contacto, el origen coordenado y el eje y.

Si derivamos las ecuaciones (1) y (2) se obtienen las velocidades en sus componentes:

$$\dot{x}_{CM} = -l_0 \cdot \sin \alpha \cdot \dot{\alpha} + R\alpha \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

$$\dot{y}_{CM} = R\alpha \cdot \cos \alpha \cdot \dot{\alpha} - l_0 \cdot \cos \alpha \cdot \dot{\alpha}. \quad (4)$$

Elevando al cuadrado las ecuaciones (3) y (4) y sumando se obtiene la energía cinética:

$$\dot{x}_{CM}^2 + \dot{y}_{CM}^2 = l_0^2 \dot{\alpha}^2 + R^2 \alpha^2 \dot{\alpha}^2 - 2Rl_0 \alpha \dot{\alpha}^2, \quad (5)$$

$$T = \frac{1}{2} m \left[(l_0^2 + R^2 \alpha^2) \dot{\alpha}^2 - 2Rl_0 \alpha \dot{\alpha}^2 \right] + \frac{1}{2} I_0 \dot{\alpha}^2, \quad (6)$$

y de la ecuación (2) la energía potencial

$$U = mg [R \cdot \cos \alpha - (l_0 - R \cdot \alpha) \sin \alpha]. \quad (7)$$

Restando las ecuaciones (6) y (7) se obtiene el Lagrangeano del sistema:

$$L = \frac{1}{2} I(\alpha) \dot{\alpha}^2 - mRl_0 \alpha \dot{\alpha} - mgR \cos \alpha + mg(l_0 - R\alpha) \sin \alpha, \quad (8)$$

donde $I(\alpha)$ es momento de inercia de la tabla rotando en un eje a una distancia $l-R\alpha$, e I_0 el momento de inercia de la tabla respecto a un eje que pasa por su centro de masa y es paralela a su superficie.

$$I(\alpha) = ml_0^2 + I_0 + mR^2 \alpha^2 \quad \text{con} \quad I_0 = \frac{1}{12} m \ell^2. \quad (9)$$

Para obtener la ecuación de movimiento del sistema, al aplicar la ecuación de Lagrange se obtiene una ecuación diferencial de segundo orden, cuya solución no presenta una solución analítica simple. Consecuentemente se usa el programa IP, que simula numéricamente la solución.

III. MÉTODO EXPERIEMETAL

En éste caso la tostada es sustituida por una tabla de madera de dimensiones (10.0, 7.0, 0.8 cm), la caída será realizada con su eje de giro a lo largo de los 7.0 cm. Los

cambios de posición durante la caída se obtuvieron del video tomado con una cámara Canon Optura 600, con un tiempo de obturación de un 500 de segundo. Los valores de la velocidad angular para diferentes posiciones iniciales de la tostada, fue obtenida de la razón del cambio angular, como se muestra en la figura 2, que la tostada realiza durante cada intervalo de tiempo ($t=1/14$ s) que tarda la cámara para tomar cada imagen; para los casos a) orilla recta, b) orilla con radio de 1.75 cm y c) radio de 1.1 cm. Se realizaron variaciones de cada 0.5 cm, medidos a partir del centro de masa de la tabla (CM). Así llegamos obtener los valores que graficados muestran la dependencia entre la velocidad angular y su posición inicial.

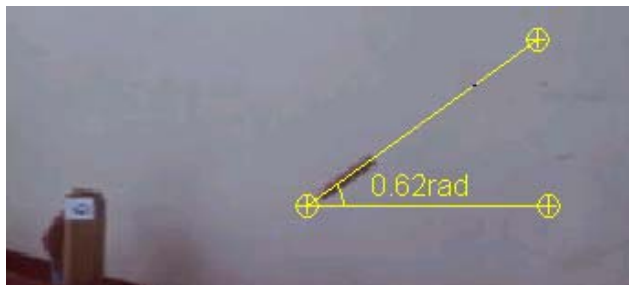


FIGURA 2. Medición del ángulo de giro, mediante el programa Data video de Coach 5 [7]. Los cambios se determinan avanzando la película cuadro por cuadro.

IV RESULTADOS

En la figura 3, presentamos los resultados experimentales reportados en [5], comparados con los valores obtenidos simulando con IP, simulando la tostada de 10 cm de largo y un coeficiente de fricción estático y cinético de $\mu_s=0.24\pm 0.02$, $\mu_k=0.24\pm 0.02$ respectivamente. El buen acuerdo que se observa muestra la viabilidad del uso del programa IP, para valorar nuestros resultados experimentales.

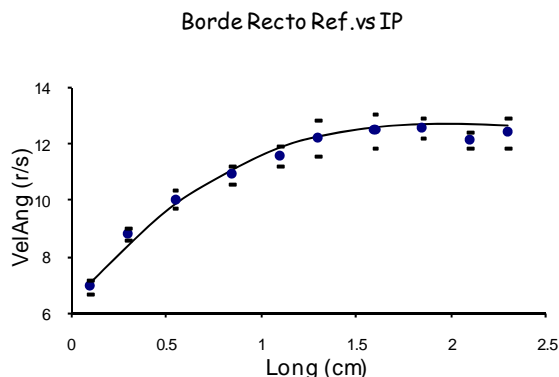


FIGURA 3. Comparación del comportamiento de la velocidad angular ω como una función de la longitud l_0 de la “tostada” reportada por Bacon, y los obtenidos por medio de su simulación (IP) para la orilla recta. La velocidad angular máxima 12.57 ± 0.37 r/s se da cuando la tostada sobresale su centro de masa el 18% de su longitud. Note el buen acuerdo entre los valores reportados y los obtenidos de la simulación.

Caso A: Orilla Recta

La figura 3 refleja lo que se observa durante el experimento. La velocidad aumenta hasta un máximo (20% de L_0), para luego empezar a disminuir.

Para el caso de la orilla recta, en la figura 4, se muestra el comportamiento de los valores medidos y su comparación con los valores obtenidos al simular la caída de la tabla usada en éste trabajo. En éste caso los valores también muestran un buen acuerdo. Es de observarse que la velocidad angular máxima se da para la misma posición, con una magnitud del mismo orden.

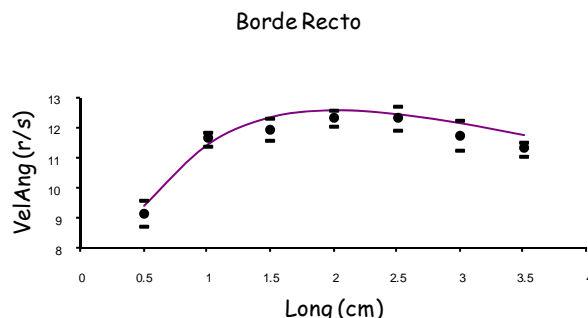


FIGURA 4. Comparación del comportamiento de la velocidad angular de la tostada cuando cae desde una orilla recta con los datos obtenidos por IP. La velocidad angular máxima es 12.3 ± 0.4 r/s y se da cuando la tostada sobresale su centro de masa el 20% de su longitud.

Caso B: Orilla Redonda ($R=1.75$ cm)

Para el caso de la orilla redonda con un radio similar a la dimensión del borde de una mesa, en la figura 5, se muestran graficados los valores experimentales y la comparación con los obtenidos de la solución numérica (simulación). Se observa que la velocidad máxima de la tabla se obtiene a aproximadamente 27% de su longitud. La velocidad angular máxima resultó ser mayor que el caso recto.

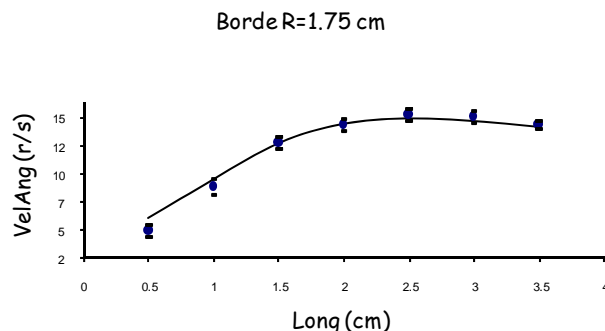


FIGURA 5. Comparación del comportamiento de la velocidad angular de la tostada cuando cae desde una orilla es redonda ($R=1.75$ cm) con los datos obtenidos por IP. La velocidad angular máxima es 14.9 r/s y se da cuando la tostada sobresale su centro de masa el 27% de su longitud.

Caso C: Orilla Redonda ($R=1.1$ cm)

Para el caso de la orilla redonda ($R=1.1$ cm), en la figura 6, se muestra la comparación de los valores experimentales y los obtenidos de la solución numérica. Se encontró que la velocidad máxima de la tabla se obtiene aproximadamente al 25% de su longitud. Comparando con la velocidad angular del caso B, resultado ser menor pero mayor al caso recto o Caso A.

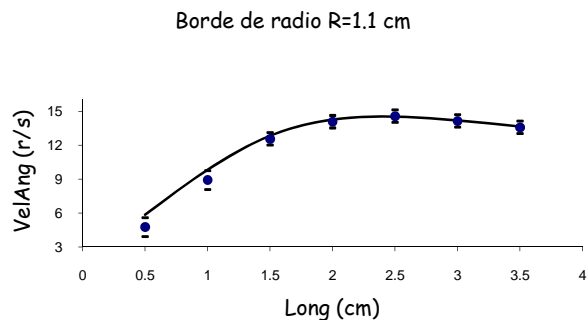


FIGURA 5. Comparación del comportamiento de la velocidad angular de la tostada cuando cae desde una orilla es redonda ($R=1.1$ cm) con los datos obtenidos por IP. La velocidad angular máxima es 14.5 r/s y se da cuando la tostada sobresale su centro de masa el 25% de su longitud.

Con el objetivo de mostrar el efecto de la dimensión (radio) de la orilla en la velocidad angular en la figura 7, se muestra el comportamiento simulado para diferentes radios. Se obtiene que a medida que aumenta el radio del borde, la gráfica muestra que el comportamiento de la “tostada” es complejo, llegando a valores máximos y mínimos del mismo sistema.

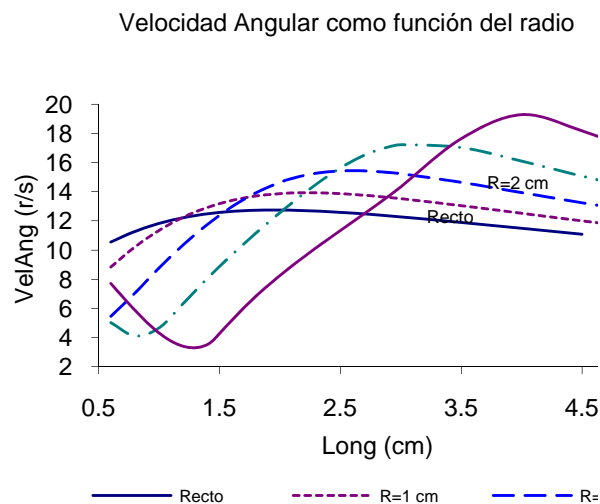


FIGURA 7. Comportamiento de la velocidad angular de la tostada cuando cae desde diferente redondez de la orilla obtenidos con IP.

También, con el objetivo de mostrar el efecto en la velocidad angular para diferentes salientes l_0 en la figura 8, se muestra el comportamiento simulado para diferentes posiciones iniciales. Se observa que a menor l_0 , el efecto de la dimensión del borde es mayor.

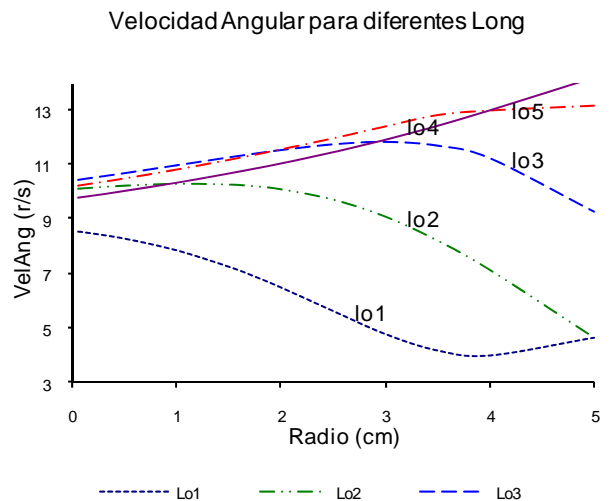


FIGURA 8. Presentamos las predicciones del comportamiento de la velocidad angular de la tostada como función del radio de la orilla de la mesa, para diferentes distancias l_0 : 1 se refiere a $l_0 = 1$ cm., 2 a $l_0 = 2$ cm., 3 a $l_0 = 3$ cm., 4 a $l_0 = 4$ cm. y 5 a $l_0 = 5$ cm. En todos los casos se observa que la redondez afecta la velocidad angular, siendo mayor para cuando l_0 es menor.

Con el fin de conocer el comportamiento de la tostada durante su contacto con la orilla, en la Tabla I, se muestran los valores obtenidos mediante la simulación de los sistemas estudiados. Se encontró que en promedio el 93%, 85% y el 80% de la velocidad final de la tostada se da mientras esta rotando, en los casos $R=1.75$ cm, $R=1.1$ cm y Recto, respectivamente. Es decir, que durante su rotación la velocidad aumenta más en el caso de una orilla redonda de mayor diámetro, lo cuál es consistente con el hecho de que logra mayor velocidad angular. Los valores de la orilla recta corresponden a los calculados con los datos reportados.

TABLA I. Velocidades angulares a las que la tostada llega al final de su rotación (V_{Rot} r/s) y durante su deslizamiento (V_{Des} r/s), en las orillas estudiadas.

l_0	$V_{Rot}(1.75)$	$V_{Des}(1.75)$	$V_{Rot}(1.1)$	$V_{Des}(1.1)$	$V_{Rot}Rec$	$V_{Res}Rec$
0.5	8.0	1.0	5.9	4.8	7.7	3.9
1.0	9.5	4.8	9.2	4.6	7.8	4.9
1.5	8.0	6.5	7.5	6.1	6.8	5.5
2.0	6.3	7.0	6.0	6.5	5.7	5.7

De la misma simulación en la Tabla II, se muestran los ángulos a los que llega la tostada durante su rotación y el realizado durante su deslizamiento. Se observa que a medida que aumenta la redondez de la orilla, la tostada gira un mayor ángulo que su giro durante su deslizamiento.

En el caso del perfil recto en promedio es un 6% menor durante su rotación.

TABLA II. Ángulos a los que la tostada gira durante su rotación (Rot) y durante su deslizamiento (Des), en las orillas estudiadas.

l_0	Rot1.75	Des1.75	Rot1.1	Des1.1	RotRef	DesRef
0.5	22	57	23	60	16	47.5
1.0	16	54	15	48	11	41
1.5	10	46	9	42	8	37
2.0	7	41	6	38	6	35

En general, se observa el efecto de la orilla de la mesa o la redondez de los dedos, son factores importantes en la posición en la que la tostada cae al piso. Los valores obtenidos de la simulación, son un indicador de la complejidad de la solución de la ecuación 10.

Según los rangos de las velocidades angulares, si la tostada cae desde la orilla de una mesa (0.7 m), caería boca a bajo; para $\omega = 8.3$ r/s; en el caso de la orilla redonda ($R=1.75$ cm), se logra cuando su centro de masa sobresale aproximadamente 1.5 cm; para $R=1.1$ cm, será aproximadamente a 1 cm; para el caso de la orilla recta la tostada lo será cuando su centro de masa sobresalga 0.5 cm.

V. CONCLUSIONES

Hemos podido estudiar un experimento simple y “fácil” de realizar, que analíticamente presenta gran complejidad, haciendo uso de la solución numérica (simulación). El experimento introduce al estudiante al planteamiento de las ecuaciones de movimiento, hacer uso de alternativas de solución; encontrar experimentalmente respuesta a sus preguntas.

En suma, se ha tratado un claro ejemplo de cómo las leyes de la mecánica se aplica a situaciones reales. Si bien, usamos una tabla para simular la tostada, fue claro para los

alumnos, que dentro del control de variables esta la resistencia del aire que afecta fuertemente el comportamiento del pan durante su caída.

Queda por estudiar el efecto del grosor de la tostada; esto corresponde al caso en el que la tostada lleva ensalada, carne u otros.

La enseñanza basada en **problemas-proyecto**, como la desarrollada en este artículo, centradas en actividades prácticas y cognoscitivas en la dirección científica, propicia el pensamiento reflexivo y creativo produciendo el desarrollo de estrategias metacognitivas, y la apropiación y aplicación del contenido de la enseñanza, creando las experiencias de aprendizaje significantes.

VI. REFERENCIAS

- [1] Blake-Coleman, B., *It's Probably Murphy's Law*, <http://www.epemag.com/murphy.pdf> (1997) consultado el 3 de junio de 2008
- [2] Matthews, R. A. J., *Tumbling toast, Murphy's Law an the fundamental constants*, *European Journal of Physics* **16** (1995), p. 172
- [3] Matthews, R. A. J., *Testing Murphy's Law: urban myths as a source of school science projects*, *School Science Review* **83**, 302 (2001).
- [4] Stratmann, K. Gymnasium, L. und Mellert, V., *Das Toast-Problem oder Ist Materie bösartig?* <http://www.physikfuerkids.de/lab1/versuche/toast/TOAST.PDF>, (1999) consultado el 2 de junio de 2008.
- [5] Bacon, M. E., Heald, G. and James, M., *A closer look at tumbling toast*, *Am. J. Phys.* **69**, 38-43 (2001).
- [6] Interactive Physics 2000 (IP), MSC. Working Knowledge, 66 Bovet Road, Suite 200, San Mateo, CA 94402, United States, <http://www.interactivephysics.com>
- [7] AMSTEL Institute/CMA (Coach-5), Universiteit van Amsterdam, Kruislaan 404, 1098 SM Amsterdam, The Netherlands. <http://www.cma.science.uva.nl/index.html>

El potencial redox y la espontaneidad de las reacciones electroquímicas



Erik Albarrán-Zavala

Facultad de Ingeniería, Dirección Académica de Ingeniería Química,
Universidad Tecnológica de México, Campus Atizapán, C.P. 52999, México, Edo. Mex.

E-mail: caesar_erik@yahoo.com

(Recibido el 31 de Mayo de 2008; aceptado el 20 de Agosto de 2008)

Resumen

Dentro de la Electroquímica y la teoría de la corrosión es importante identificar claramente la dirección espontánea de las reacciones cuando éstas ocurren, para así conocer los compuestos que se oxidan y los que se reducen. Sin embargo, los alumnos presentan muchos problemas para entender y aplicar los criterios cuando se busca la dirección espontánea de las reacciones redox.

Palabras clave: Oxidación, reducción, potencial redox, reacción espontánea.

Abstract

Into Electrochemistry and Corrosion's Theory it is important to identify clearly the spontaneous direction of the reactions when they happened, in this way, we can know the compounds that suffer oxidation and the others that suffer reduction. However, the students show a lot of problems to understand and to use the criteria when they search the spontaneous direction of the redox reactions.

Keywords: Oxidation, reduction, redox potential, spontaneous reactions.

ISSN 1870-9095

PACS: 82.60.-s, 82.47.-a, 82.45.Bb

I. INTRODUCCIÓN

En los variados planes de estudio de distintas ingenierías es necesario abordar temas de Electroquímica y corrosión, ya sea como un curso que se estudia durante uno o dos semestres completos o bien como unidades o capítulos que se encuentran dentro de un curso de Química general o dentro de algún otro curso. Durante el estudio de la Electroquímica, el estudiante promedio presenta problemas para aprender a identificar claramente la dirección espontánea de las reacciones redox.

Como lo afirma [1], la Electroquímica es uno de los temas más difíciles de abordar dentro de los cursos de Química correspondientes a los planes de estudio del nivel medio superior. De Jong, *et. al.* [1] realizaron un estudio sobre los problemas que surgen durante el proceso de enseñanza del tema de **Reacciones Redox**. Dicho estudio fue enfocado hacia los estudiantes del nivel medio superior, encontrándose algunos conceptos o temas que presentan dificultades, los cuales son: a) Transferencia de electrones, b) Identificación de los reactivos como agentes oxidantes o reductores, c) Números de oxidación y sus valores, d) Balanceo de ecuaciones redox, y e) Fuerza relativa de los agentes oxidantes y reductores.

De igual forma, De Jong, *et. al.* [1] identificaron ocho errores cometidos por parte del profesor durante la exposición del tema, de los cuales queremos destacar sólo tres: i) dar explicaciones superficiales, ii) usar lenguaje o

terminología confusa, y iii) dar demasiada importancia a los procedimientos utilizados por los expertos en la materia, (procedimientos de los libros de texto).

Por otro lado, Österlund, *et. al.* [2] hicieron un estudio a nivel medio superior para analizar el desempeño de los alumnos en el análisis de reacciones redox espontáneas, donde observaron que algunos alumnos llegaban a confundir las definiciones de oxidación y reducción.

Al impartir clases en el nivel superior (ingeniería química), el autor de este artículo ha observado que los alumnos tienen muchos problemas al tratar de entender y utilizar correctamente los criterios para seleccionar la dirección espontánea de las reacciones electroquímicas. La deficiencia radica en que el alumno no domina ni entiende claramente los conceptos de **oxidación**, **reducción**, **potencial redox** y **espontaneidad**. Así mismo, el alumno en la mayoría de las veces se confunde porque no sabe leer o interpretar las flechas que conectan a los reactivos con los productos y que indican la dirección en la que ocurre una reacción electroquímica dada.

Otro de los problemas a los que se tiene que enfrentar el alumno cuando estudia Electroquímica es que ésta rama del conocimiento es una intersección entre la Química, la Termodinámica y la Electricidad. Por lo general, el alumno de ingeniería solamente tiene preferencia o sólo está familiarizado con una de estas áreas del conocimiento, dependiendo de los gustos y de la preparación previa adquiridos durante la carrera que está estudiando. Cabe

hacer la aclaración de que existen enormes diferencias entre los conocimientos que tiene un estudiante de ingeniería en alimentos, uno de ingeniería química, uno de ingeniería metalúrgica, uno de Física, uno de Química, etc.

En este artículo presentamos y desarrollamos cada tema involucrado con las reacciones redox, planteando y tratando de dar una explicación clara y detallada de algunos errores conceptuales clásicos que cometen los estudiantes cuando tienen que abordar los temas de corrosión y/o Electroquímica.

II. ESPONTANEIDAD DE UN FENÓMENO

Todos los fenómenos físicos pueden ocurrir en dos direcciones: una de ellas es la forma natural del fenómeno, a la cual se le conoce como la **dirección espontánea**. Por otro lado el fenómeno también puede ocurrir en dirección contraria a la natural, la cual se denomina **dirección no espontánea**. La condición de espontaneidad para un fenómeno físico está dada por la transferencia de energía entre el sistema de estudio y los alrededores. Para un **proceso espontáneo**, dicha condición nos exige lo siguiente: el sistema físico de estudio forzosamente tiene que pasar de un estado de mayor energía a otro estado de menor energía. En otras palabras, el fenómeno que ocurre en **forma espontánea** siempre provocará la liberación de energía, la cual eventualmente se convertirá y disipará como calor. Por el contrario, para que un fenómeno ocurra como un **proceso no espontáneo**, es necesario que los alrededores realicen trabajo sobre el sistema físico de estudio, suministrándole energía. Dicho de otro modo, el fenómeno que ocurre en **forma no espontánea** siempre recibe energía, misma que almacena en forma de trabajo mecánico, químico, eléctrico, etc.

En el caso de las reacciones químicas es necesario contar con un criterio termodinámico para decidir si las mismas ocurren en la dirección espontánea, por lo cual se debe recurrir a la energía libre de Gibbs [3, 4, 5]:

$$G = U + PV - ST, \quad (1)$$

donde G es la energía libre de Gibbs, U es la energía interna, P es la presión, V es el volumen, S es la entropía y T es la temperatura.

Según éste criterio, un proceso es espontáneo cuando la variación en la energía libre de Gibbs es negativa y es no espontáneo cuando el cambio en la energía libre de Gibbs es positivo, [3, 4, 5]:

$$\text{Proceso espontáneo} \quad \Delta G_{\text{Sistema}} < 0, \quad (2)$$

$$\text{Proceso no espontáneo} \quad \Delta G_{\text{Sistema}} > 0. \quad (3)$$

Cuando se consideran reacciones químicas que ocurren en condiciones de temperatura y presión constantes, entonces la variación en la energía libre de Gibbs corresponde exactamente con la energía química de la reacción, la cual puede ser considerada como trabajo químico (dirección no espontánea) o como calor liberado (dirección espontánea), según se comporte el fenómeno.

III. POTENCIAL GRAVITACIONAL

La energía potencial gravitacional se presenta cuando una masa es sumergida dentro de un campo gravitacional. Dicha energía depende de la posición de la masa dentro del campo antes mencionado. Si se deja que dicha masa se mueva libremente, entonces la forma espontánea de este movimiento será siempre en la dirección hacia la cual disminuye la energía potencial gravitacional. Otra forma de describir esto es considerando que el sistema siempre tratará de minimizar la energía potencial gravitacional. Según [6], la fórmula conocida para calcular la energía potencial gravitacional $\mathcal{E}^{\text{grav}}$ almacenada en un objeto de masa m , en una posición definida por la coordenada vertical z y sometido a una aceleración de la gravedad g es:

$$\mathcal{E}^{\text{grav}} = mgz. \quad (4)$$

A partir de la fórmula anterior es conveniente definir la función potencial gravitacional U :

$$U = gz. \quad (5)$$

Por lo tanto, la energía potencial gravitacional para una masa dada se puede expresar como la masa multiplicada por el potencial gravitacional:

$$\mathcal{E}^{\text{grav}} = mU. \quad (6)$$

El proceso natural se lleva a cabo cuando los cuerpos se mueven desde una posición z superior (altura mayor) hacia una posición z inferior (altura menor). En términos de la función potencial gravitacional, el movimiento espontáneo ocurre cuando la masa se ha desplazado desde un potencial gravitacional mayor hacia un potencial gravitacional menor. La figura 1 muestra gráficamente el movimiento. Para calcular la diferencia de energía durante el proceso, es necesario hacer la resta entre las condiciones iniciales y finales, referidas por los subíndices i y f respectivamente:

$$\mathcal{E}_i^{\text{grav}} = mU_i \quad \mathcal{E}_f^{\text{grav}} = mU_f, \quad (7)$$

$$\Delta \mathcal{E}^{\text{grav}} = m\Delta U. \quad (8)$$

Donde definimos la diferencia de energía potencial gravitacional como $\Delta \mathcal{E}^{\text{grav}} = \mathcal{E}_f^{\text{grav}} - \mathcal{E}_i^{\text{grav}}$, y por otro lado definimos la diferencia de potencial gravitacional como $\Delta U = U_f - U_i$. La ecuación (8) adquiere valores negativos cuando el objeto se mueve en dirección espontánea, de esta forma, el signo menos nos dice que el sistema está perdiendo energía, la cual se convertirá y disipará como calor. Por el contrario, el signo positivo implica que el objeto se está moviendo en la dirección no espontánea y que se está haciendo trabajo sobre él, de esta forma el sistema adquiere y almacena energía.

$$\text{Proceso espontáneo} \quad \Delta \mathcal{E}^{\text{grav}} < 0, \quad (9)$$

$$\text{Proceso no espontáneo} \quad \Delta \mathcal{E}^{\text{grav}} > 0. \quad (10)$$

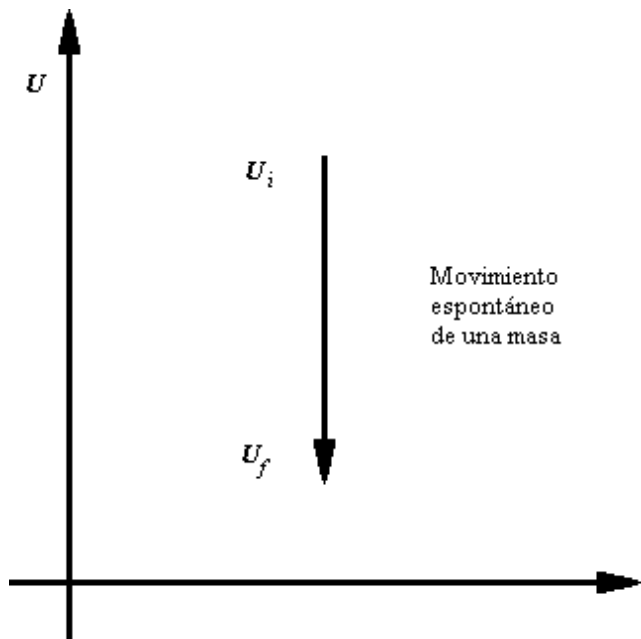


FIGURA 1. Caída espontánea de una masa sometida a la acción de un potencial gravitacional. Los cuerpos caen moviéndose desde un potencial gravitacional mayor hacia uno menor.

IV. POTENCIAL ELÉCTRICO

Por otro lado, un cuerpo cargado eléctricamente con una carga q puede almacenar energía potencial eléctrica debido a su posición espacial dentro de un campo eléctrico. Durante un proceso espontáneo, las partículas cargadas siempre se moverán en la dirección hacia la cual disminuya la energía potencial eléctrica. Sin embargo, el movimiento de las cargas positivas será opuesto al de las cargas negativas.

La energía potencial eléctrica $\mathcal{E}^{\text{elect}}$ se puede definir de manera análoga a la energía potencial gravitacional al introducir la función potencial eléctrico Φ según la siguiente expresión [7]:

$$\mathcal{E}^{\text{elect}} = q\Phi. \quad (11)$$

De igual forma que la masa, una partícula cargada se moverá desde una posición inicial hasta una posición final, referidas por los subíndices i y f respectivamente:

$$\mathcal{E}_i^{\text{elect}} = q\Phi_i \quad \mathcal{E}_f^{\text{elect}} = q\Phi_f. \quad (12)$$

Si definimos la diferencia de energía potencial eléctrica como $\Delta\mathcal{E}^{\text{elect}} = \mathcal{E}_f^{\text{elect}} - \mathcal{E}_i^{\text{elect}}$ y la diferencia de potencial eléctrico como $\Delta\Phi = \Phi_f - \Phi_i$, entonces se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta\mathcal{E}^{\text{elect}} = q\Delta\Phi. \quad (13)$$

El criterio para decidir la dirección del proceso es el mismo y consiste en prestar atención al signo del cambio de energía potencial eléctrica, donde el signo negativo nos

Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 2, No. 3, Sept. 2008

El potencial redox y la espontaneidad de las reacciones electroquímicas indica que el proceso es espontáneo y el signo positivo nos indica que el proceso ocurre en dirección no espontánea:

$$\text{Proceso espontáneo} \quad \Delta\mathcal{E}^{\text{elect}} < 0, \quad (14)$$

$$\text{Proceso no espontáneo} \quad \Delta\mathcal{E}^{\text{elect}} > 0. \quad (15)$$

Debido a que las partículas pueden tener carga negativa o positiva, el movimiento puede llegar a ser confuso. Si consideramos una partícula con carga positiva, entonces ésta se moverá espontáneamente desde un potencial eléctrico mayor hacia un potencial eléctrico menor, por lo que $\Delta\Phi$ será negativo. Si por el contrario, la carga es negativa y se desea mantener el proceso como espontáneo, entonces dicha carga está obligada a moverse en sentido contrario, es decir, debe moverse desde un potencial eléctrico menor hacia uno mayor, entonces $\Delta\Phi$ debe ser positivo tal y como lo muestra la figura 2.

Entonces, los **Procesos Espontáneos** para las cargas eléctricas deben cumplir con $\Delta\mathcal{E}^{\text{elect}} < 0$ y además:

$$\text{CARGAS POSITIVAS} \quad \Delta\Phi < 0, \quad (16)$$

$$\text{CARGAS NEGATIVAS} \quad \Delta\Phi > 0. \quad (17)$$

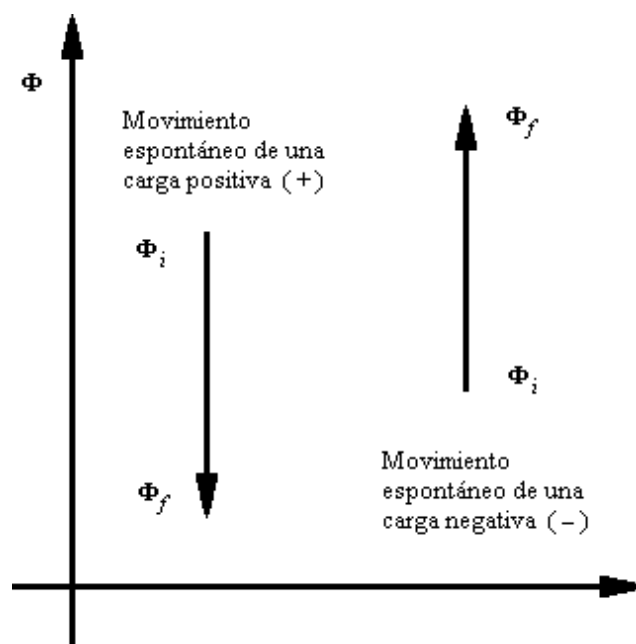


FIGURA 2. Movimiento espontáneo de las cargas eléctricas sometidas a un potencial eléctrico. Las cargas positivas se mueven desde un potencial eléctrico mayor hacia uno menor, mientras que las cargas negativas se mueven a la inversa.

V. OXIDACIÓN Y REDUCCIÓN

Antes de explicar el concepto de potencial redox, es necesario explicar los conceptos de oxidación y reducción. Aunque estos conceptos tienen definiciones muy sencillas, el alumno promedio olvida las definiciones y las confunde con mucha frecuencia.

Reducción: Ganancia de electrones por parte de un átomo, molécula, grupo de átomos o grupo de moléculas.

Oxidación: Pérdida de electrones por parte de un átomo, molécula, grupo de átomos o grupo de moléculas.

Quizá las definiciones anteriores sean correctas, pero seguramente son difíciles de imaginar, comprender y memorizar para un alumno promedio y comúnmente éste confunde la primera con la segunda. Por lo tanto es altamente recomendable enseñarle al alumno alguna nemotecnia para recordar fácilmente las definiciones anteriores. A continuación presentaremos una nemotecnia que es de utilidad sólo para los iones formados por átomos individuales.

“El que se **reduce** es el que se **reduce**.”

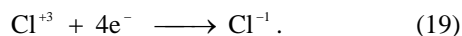
“El que se **oxida** es el que se **incrementa**.”

Los enunciados anteriores deben ser utilizados para analizar la valencia del compuesto en cuestión desde el punto de vista de la recta numérica. Un ejemplo sería la siguiente semi-reacción para el zinc:



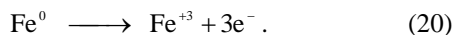
En este ejemplo, el zinc tiene inicialmente una valencia de +2, pero al final de la semi-reacción la valencia es 0, desde el punto de vista de los números reales en la recta numérica, vemos que **la valencia del zinc se ha reducido**, entonces **el zinc se ha reducido**. Y en efecto, el zinc ha sufrido una ganancia de dos electrones, por lo que cumple con la definición de reducción.

Un segundo ejemplo podría ser la siguiente semi-reacción para el cloro:



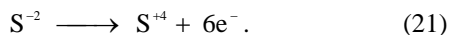
Claramente se ve que **la valencia del cloro se ha reducido** desde +3 hasta -1, por lo tanto **el cloro se ha reducido**. Se puede observar fácilmente que el cloro ha ganado cuatro electrones, por lo que también cumple con la definición de reducción.

Ahora utilizaremos al hierro como ejemplo:



Observamos que al inicio de la semi-reacción el hierro tiene una valencia de 0 y al final la valencia es +3, por lo tanto decimos que desde el punto de vista de la recta numérica **la valencia del hierro se ha incrementado**, lo que implica que **el hierro se ha oxidado**. De hecho, el hierro ha sufrido la pérdida de tres electrones por lo cual cumple con la definición de oxidación.

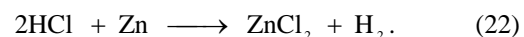
Otro ejemplo es la semi-reacción del azufre:



Vemos que **la valencia del azufre se ha incrementado** desde -2 hasta +4, por lo que **el azufre se ha oxidado**. Nuevamente se cumple con la definición de oxidación ya que el azufre ha perdido seis electrones.

La gran utilidad de esta técnica radica en la facilidad para memorizar las combinaciones de palabras **reduce-reduce** y **oxida-incrementa**.

Finalmente, analicemos un ejemplo donde se presente una reacción redox completa:

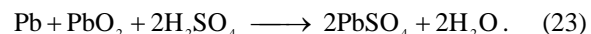


Podemos observar que el cloro mantiene su valencia sin cambios y con el valor de -1. Pero la valencia del hidrógeno se redujo de +1 a 0 y la valencia del zinc se incrementó de 0 a +2, por lo tanto el hidrógeno se redujo y el zinc se oxidó.

VI. LECTURA DE REACCIONES QUÍMICAS

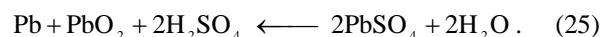
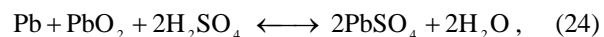
Quizá el error conceptual más común que presentan los alumnos cuando se enfrentan a las reacciones químicas es el interpretar equivocadamente el sentido de las reacciones químicas cuando las leen de un libro o cuando las escriben, es decir, no saben leer una ecuación química.

Como sabemos, las reacciones químicas se escriben conectando mediante una flecha a los grupos de reactivos con los grupos de productos. Desafortunadamente, en los cursos de Química de secundaria y de preparatoria se enseña que las reacciones químicas sólo ocurren en una dirección, de tal forma que siempre se escriben a la izquierda los reactivos y a la derecha siempre se escriben los productos. El estudiante acredita sus cursos de secundaria y preparatoria sin saber que existen otras posibilidades para escribir una reacción química. Para analizar este error tan común, estudiaremos la reacción que ocurre en una batería de automóvil, “el acumulador de plomo”. Pensemos en la siguiente reacción [5]:



El alumno considera que la reacción avanza de izquierda a derecha donde el Pb, el PbO₂ y el H₂SO₄ son reactivos y el PbSO₄ y el H₂O son productos. Sin embargo, aunque la conclusión del alumno es correcta, el proceso mental para llegar a ella es erróneo.

Para dar una explicación de lo dicho en el párrafo anterior veamos las siguientes dos ecuaciones:



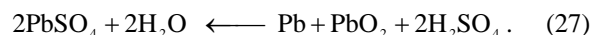
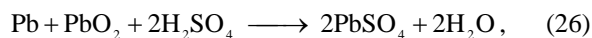
La ecuación (24) nos indica que la reacción puede ocurrir en ambas direcciones, por lo que todas las especies químicas involucradas pueden ser productos y a la vez pueden ser reactivos. En el caso de la ecuación (25), la reacción está ocurriendo de derecha a izquierda por lo que los papeles se han invertido respecto a la ecuación (23), es decir, el Pb, el PbO₂ y el H₂SO₄ ahora son productos y por otro lado, el PbSO₄ y el H₂O ahora son reactivos.

No obstante que las ecuaciones (23), (24) y (25) tienen significados muy diferentes entre sí, la experiencia dice que el alumno mostrará una gran tendencia a creer que las tres ecuaciones son idénticas a la ecuación (23).

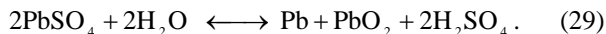
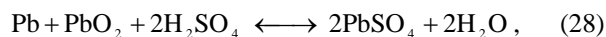
Este error en la lectura de las reacciones químicas se debe a que el estudiante **no presta atención a la flecha** que conecta ambos lados de la ecuación, sino que **sólo observa el orden** en que están escritos los símbolos químicos de los compuestos involucrados, llegando a la **falsa creencia**: **“los reactivos siempre están a la izquierda y los productos siempre están a la derecha”**.

Para eliminar dicho error conceptual es muy necesario que el profesor dedique un tiempo de clase razonable para enseñar a los alumnos a observar la flecha y a leer las ecuaciones en ambas direcciones. Así mismo es recomendable enseñar a leer, escribir y reescribir los distintos casos en los que dos ecuaciones son equivalentes aunque aparenten ser lo contrario. Como ejemplo escribiremos todas las posibles combinaciones para la reacción de la ecuación (23) y simultáneamente analizaremos cuales de ellas son equivalentes entre sí:

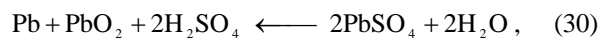
a) Producción de PbSO₄ y H₂O:



b) Todos son productos y todos son reactivos:



c) Producción de Pb, PbO₂ y H₂SO₄:



Observamos que existen seis posibles combinaciones, a partir de las cuales se generan tres parejas de ecuaciones equivalentes. Las ecuaciones (26) y (27) son equivalentes pero un alumno promedio se confundirá fácilmente al observarlas, debido a que están escritas en orden contrario. Lo mismo ocurre con la pareja de ecuaciones (28) y (29) o con la pareja (30) y (31). El alumno deberá entender que la parte más importante de una reacción es la flecha, dejando en segundo plano el orden en que están escritos los compuestos químicos.

VII. POTENCIAL REDOX

Dentro de una reacción redox siempre existe una sustancia que se oxida y otra que se reduce, lo que implica una transferencia de electrones entre las mismas. La reacción redox va acompañada por un intercambio de energía química, ya sea que se libere o que se almacene en los compuestos químicos implicados en el proceso.

La forma más fácil de analizar la espontaneidad de una reacción química es utilizando la energía libre de Gibbs como criterio [3, 4, 5]:

$$dG = -SdT + VdP + \sum_{k=1}^N \mu_k dn_k, \quad (32)$$

donde G es la energía libre de Gibbs, S es la entropía, T es la temperatura, V es el volumen, P es la presión, μ_k es el potencial químico de la k -ésima especie química y n_k es el número de moles de la k -ésima especie química. El último término corresponde a la energía química [3,4]:

$$dG^{\text{quím}} = \sum_{k=1}^N \mu_k dn_k. \quad (33)$$

En la mayoría de los casos se hacen análisis de las reacciones químicas en condiciones de temperatura y presión constantes ($dT = 0$ y $dP = 0$), por tanto concluimos que la energía libre de Gibbs corresponde exactamente con la energía química [3, 4]:

$$dG = dG^{\text{quím}} \quad \Delta G = \Delta G^{\text{quím}}. \quad (34)$$

Debido a que es muy difícil medir o calcular los potenciales químicos, entonces debemos encontrar una forma más fácil de hacer el cálculo. Lo que se ha hecho es conectar la energía química intercambiada durante una reacción con la carga eléctrica transportada por los electrones cuando éstos se mueven desde una sustancia que se oxida hacia una sustancia que se reduce. Esto se hace suponiendo que la energía química se puede sustituir por una **energía potencial eléctrica imaginaria o ficticia** referida específicamente al transporte de los electrones. Para lograr esto, también es necesario creer en la existencia de una **diferencia de potencial eléctrico imaginaria**.

$$\Delta G^{\text{quím}} = \Delta G_{\text{imag}}^{\text{elect}}, \quad (35)$$

o bien:

$$\Delta G = q\Delta\Phi^{\text{imag}}. \quad (36)$$

Esta diferencia de potencial eléctrico imaginaria corresponde exactamente con la **diferencia de potencial redox** denotada por ΔE , por lo tanto tenemos [5, 8]:

$$\Delta G = q\Delta E. \quad (37)$$

Por lo anterior podemos decir que la diferencia en la energía libre de Gibbs de una reacción química se calcula como el producto de la diferencia de potencial redox ΔE multiplicada por la carga eléctrica q transportada por los electrones. Por otro lado, las reacciones electroquímicas siempre tratarán de liberar energía en forma análoga al comportamiento del potencial gravitacional y del potencial eléctrico, por lo que los electrones siempre se moverán espontáneamente desde un potencial redox menor hacia un potencial redox mayor. En el caso de los electrones, éstos se comportan de la misma forma bajo la acción de un

potencial eléctrico que bajo la acción de un potencial redox. Ver figuras 2 y 3.

$$\text{Proceso espontáneo} \quad \Delta G < 0, \quad (38)$$

$$\text{Proceso no espontáneo} \quad \Delta G > 0. \quad (39)$$

Se debe mencionar, que el potencial redox depende de las condiciones de concentración y de temperatura para una especie química dada, por lo que si se alteran estas condiciones, entonces el valor del potencial redox también se verá alterado. Por lo anterior es necesario definir un potencial redox en condiciones estándar, las cuales consisten en tener al sistema de estudio a la temperatura de 25 °C y a la presión de 1 bar. Así mismo, es necesario que la actividad termodinámica a_k de cada una de las especies químicas sea igual a la unidad, $a_k = 1$. El potencial redox estándar se denota por E° , [5, 8].

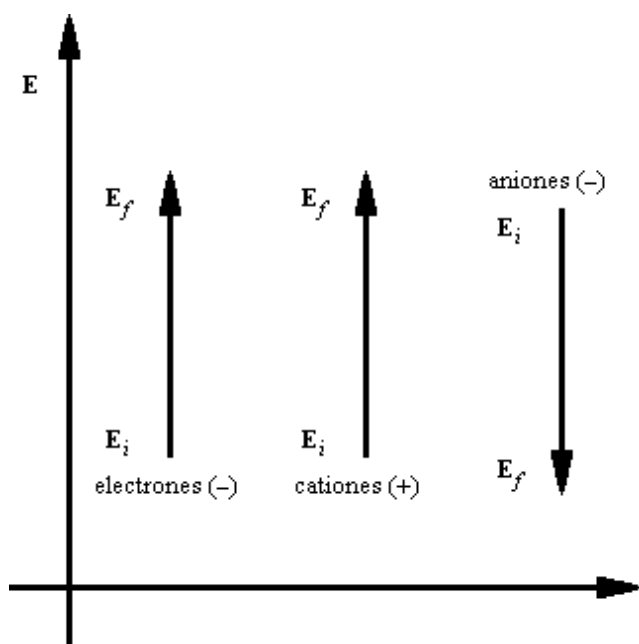


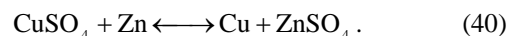
Figura 3. Los electrones y los iones positivos (cationes) se mueven espontáneamente desde un potencial redox menor hacia un potencial redox mayor. Sin embargo, los iones negativos (aniones) se mueven espontáneamente en sentido contrario.

El comportamiento de los portadores de carga puede ser un tanto confuso, ya que los electrones junto con los iones positivos se mueven espontáneamente desde un potencial redox menor hacia un potencial redox mayor, pero los iones negativos se mueven espontáneamente en sentido inverso, la figura 3 nos muestra dicho comportamiento.

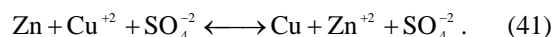
Es necesario hacer énfasis en que el potencial redox está definido exclusivamente en términos de los electrones, por lo cual sólo los electrones se comportarán de la misma forma en un potencial eléctrico que en un potencial redox. En cambio el comportamiento de los iones positivos y negativos será completamente diferente en un potencial redox que en un potencial eléctrico. Para aclarar mejor esta idea, observe y relacione la figura 3 de esta sección, con la figura 4 de la sección VIII y la figura 5 de la sección X.

VIII. CELDA DE Cu / Zn

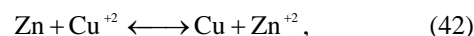
El ejemplo más conocido y sencillo de abordar es la celda de cobre-zinc, la cual consiste en sumergir un pedazo de cobre metálico y un pedazo de zinc metálico en una solución acuosa de sulfato de cobre y sulfato de zinc. Este arreglo nos permite observar la siguiente reacción de desplazamiento simple [5]:



Si deseamos considerar esta reacción en forma iónica, entonces tenemos:



Como se puede apreciar, el ion sulfato es sólo un observador de la reacción entre el zinc y el cobre, por lo que la reacción puede ser expresada de la siguiente forma:



y ésta a su vez puede ser expresada en forma de dos semi-reacciones [5, 8]:



A cada una de las semi-reacciones se le asocia un potencial redox, y también a cada una de ellas se la llama “*electrodo*”. Para decidir cuál es el “*electrodo positivo*” y cuál es el “*electrodo negativo*”, se debe analizar los valores numéricos de los potenciales redox asociados desde la perspectiva de la recta numérica. De esta forma, el electrodo que se encuentre a la izquierda (potencial redox menor) será el negativo y el que se encuentre a la derecha (potencial redox mayor) será el positivo.

$$E_-^\circ < E_+^\circ. \quad (45)$$

Para lograr lo anterior, se recomienda hacer un gráfico con la recta numérica y observar el lugar que ocupa cada electrodo en ella. En el caso del cobre y del zinc podemos ver que:

$$E_{\text{Zn}}^\circ < E_{\text{Cu}}^\circ \quad -0.7618 < +0.3370. \quad (46)$$

Por lo tanto el zinc es el electrodo negativo y el cobre es el electrodo positivo.

Una vez identificado el electrodo positivo y el negativo, se procede a elegir la dirección en la cual ocurre cada una de las semi-reacciones. Para ello se debe tener en mente en todo momento que los electrones siempre se mueven espontáneamente desde el electrodo negativo hacia el electrodo positivo.

Por lo anterior, el electrodo negativo “*libera*”, “*genera*” o “*pierde*” electrones, es decir, sufre una “*oxidación*”. La ecuación de éste electrodo en forma

IX. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS REDOX

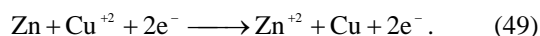
espontánea debe ser escrita con la flecha apuntando hacia la derecha y con los *electrones en el lado derecho* de la misma. De esta forma, la ecuación (44) se debe reescribir como:



A su vez, el electrodo positivo “*captura*”, “*absorbe*” o “*gana*” electrones, por lo que sufre una “*reducción*”. La ecuación para este electrodo debe ser escrita con la flecha apuntando hacia la derecha y con los *electrones en el lado izquierdo* de la ecuación. Así, la ecuación (43) se reescribirá como:



Entonces, sumando las ecuaciones (47) y (48) para obtener la reacción global se tiene:



Como último paso, necesitamos conocer la diferencia de potencial redox, la cual se calcula como el electrodo final menos el electrodo inicial.

$$\Delta E^{\circ} = E^{\circ}_f - E^{\circ}_i . \quad (50)$$

Recordando que en dirección espontánea la diferencia de potencial redox siempre es positiva [5], y para el caso de la celda de Cu/Zn que estamos estudiando se tiene:

$$\Delta E^{\circ} = +0.337 \text{ V} - (-0.7618 \text{ V}) = +1.0988 \text{ V} . \quad (51)$$

Podemos observar que las ecuaciones (47), (48) y (49) son completamente compatibles con lo expresado en el diagrama de la figura 3. El fenómeno que ocurre en esta celda de Cu/Zn se muestra físicamente en la figura 4.

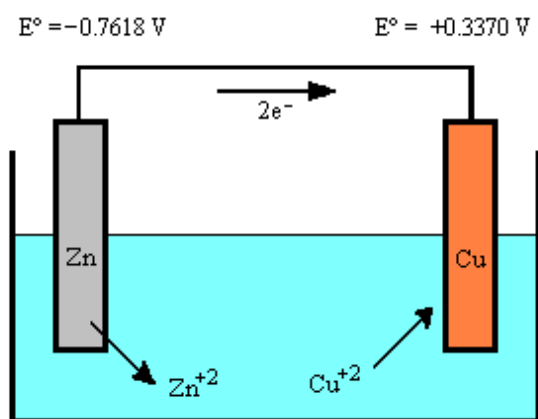


FIGURA 4. Diagrama físico de la celda de Cu/Zn. Se puede observar que tanto los electrones como los iones positivos (aniones) se mueven espontáneamente desde el potencial redox menor hacia el potencial redox mayor, siendo consistentes con lo expresado en la figura 3.

Para concluir este trabajo, utilizaremos los conocimientos expuestos en el mismo y presentaremos un procedimiento para escribir las reacciones redox en el sentido espontáneo.

Si se realizan los siguientes pasos, el alumno podrá analizar correctamente la espontaneidad de las reacciones redox de forma muy fácil. Sólo se debe hacer énfasis en la memorización y en el manejo de los mismos.

Dadas dos semi-reacciones redox y sus respectivos potenciales redox, el alumno debe seguir cuidadosamente el procedimiento que se presenta a continuación:

1. Identificar cuál es el electrodo positivo y cuál es el electrodo negativo utilizando el criterio de la recta numérica con los valores de los potenciales redox, recordando que: $E^{\circ}_- < E^{\circ}_+$.

2. En forma espontánea, la semi-reacción del **electrodo negativo** se escribe con la flecha apuntando de izquierda a derecha y con los *electrones en el lado derecho*. Se debe recordar que ésta es una semi-reacción de **oxidación**. Recuerde que: “El que se **oxida** es el que se **incrementa**.”

3. En forma espontánea, la semi-reacción del **electrodo positivo** se escribe con la flecha apuntando de izquierda a derecha y con los *electrones en el lado izquierdo*. Se debe recordar que ésta es una semi-reacción de **reducción**. Recuerde que: “El que se **reduce** es el que se **reduce**.”

4. Se balancea el sistema de ecuaciones utilizando el método del ion-electrón, asegurándose que ambas semi-reacciones tengan el mismo número de electrones. Posteriormente se suman dichas semi-reacciones para obtener la reacción global en la dirección espontánea.

5. Se calcula la diferencia de potencial redox al hacer la resta entre el electrodo final (positivo) menos el electrodo inicial (negativo). Siempre hay que tener en mente que la diferencia de potencial redox en la dirección espontánea debe ser positiva en todos los casos: $\Delta E^{\circ} > 0$.

En las secciones X y XI expondremos dos ejemplos de aplicación de los pasos propuestos en esta sección, los cuales corresponden a la celda de combustión de hidrógeno y a la celda de aluminio-zinc en medio alcalino.

X. CELDA DE COMBUSTIÓN DE H₂ / O₂

Aplicaremos el procedimiento de la sección IX estudiando las semi-reacciones de la **celda de combustión de hidrógeno**, las cuales se llevan a cabo en una solución alcalina.

Según [5], las semi-reacciones para la celda de H₂/O₂ son:



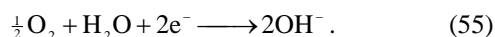
Ahora utilizaremos los cinco pasos descritos en la sección anterior para poder identificar el sentido espontáneo de esta reacción redox.

1. Vemos rápidamente que $-0.828 < +0.401$, por lo tanto el electrodo del hidrógeno (ecuación 53) es el electrodo negativo y el electrodo del oxígeno (ecuación 52) es el electrodo positivo.

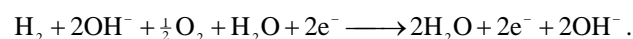
2. El electrodo del hidrógeno se **oxida** por lo tanto:



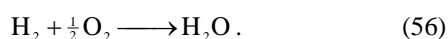
3. El electrodo del oxígeno se **reduce** por lo tanto:



4. La reacción global queda como:



La cual podemos simplificar como:



5. La diferencia de potencial redox es:

$$\Delta E^\circ = +0.401 \text{ V} - (-0.828 \text{ V}) = +1.229 \text{ V} \quad (57)$$

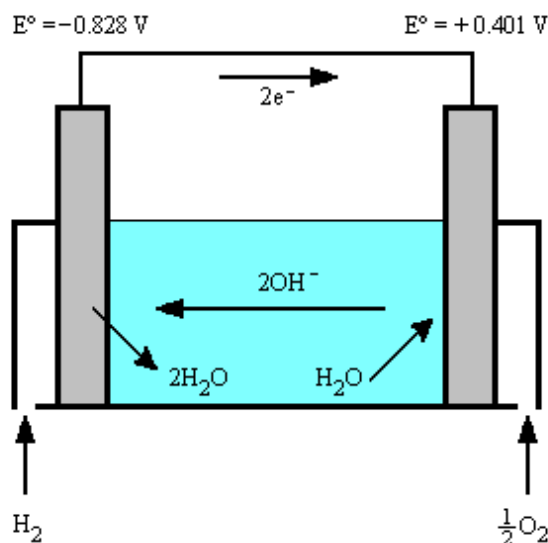
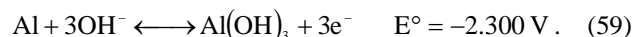
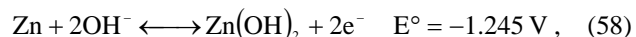


FIGURA 5. Celda de combustión de hidrógeno. La celda está formada por un recipiente que contiene una solución alcalina, que puede ser de KOH. Debe contar con dos paredes hechas de un metal poroso que sirva de conductor a los electrones y que permita la difusión de los gases H_2 y O_2 para que puedan reaccionar con los iones OH^- . Observe que el flujo de cargas es consistente con la figura 3.

XI. CELDA DE Al / Zn EN MEDIO ALCALINO

Como último ejemplo estudiaremos la celda de aluminio-zinc. Este ejemplo nos presenta la oportunidad de balancear un sistema de semi-reacciones que inicialmente tienen diferente número de electrones. Por otro lado, nos permite trabajar con dos potenciales redox que tienen el mismo signo (ambos son negativos). Este ejemplo es de particular interés debido a que los alumnos se confunden a menudo cuando tienen que trabajar con potenciales redox que tienen el mismo signo y/o cuando necesitan balancear semi-reacciones que tienen distinto número de electrones. Según [8], las semi-reacciones para la celda de Al/Zn son:



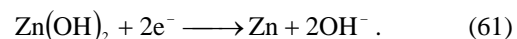
Nuevamente, utilizaremos los cinco pasos descritos en la sección IX para identificar el sentido espontáneo de esta reacción electroquímica.

1. Observamos que $-2.300 < -1.245$, por lo tanto el electrodo del aluminio (ecuación 59) es el electrodo negativo y el electrodo del zinc (ecuación 58) es el electrodo positivo.

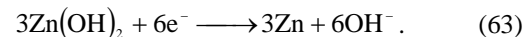
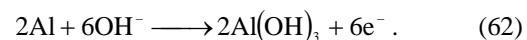
2. El electrodo del aluminio se **oxida** por lo tanto:



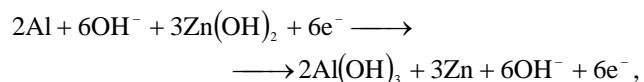
3. El electrodo del zinc se **reduce** por lo tanto:



4. Debemos balancear el sistema formado por las ecuaciones (60) y (61), asegurándonos que ambas tengan el mismo número de electrones, por lo que es necesario multiplicar por 2 la ecuación (60) y multiplicar por 3 la ecuación (61):



Sumando las ecuaciones (62) y (63) obtenemos:



la cual podemos simplificar como:



5. La diferencia de potencial redox es:

$$\Delta E^\circ = -1.245 \text{ V} - (-2.300 \text{ V}) = +1.055 \text{ V} \quad (65)$$

XII. CONCLUSIONES

El autor de este artículo, observó que los alumnos hacían demasiadas preguntas durante la exposición del tema. Al finalizar la clase, los alumnos se quedaban con muchas dudas. Después de tres o cuatro clases, varios alumnos aún se confundían al seleccionar la dirección espontánea de una reacción redox. No importaba cuantas veces se repitiera la explicación, los alumnos sencillamente no entendían. Podemos pensar que el profesor estaba cometiendo los tres errores identificados por De Jong, *et. al.* [1] que se señalaron en la introducción, i) quizá el profesor estaba explicando el tema rápida y superficialmente de forma que la información era insuficiente para el alumno, ii) quizá el lenguaje utilizado era muy confuso o muy reciente para el alumno, de tal forma no lo entendía, o iii) quizá el procedimiento enseñado por el profesor (procedimiento del libro de texto) no era accesible para los alumnos. Cabe recordar que los procedimientos de los libros de texto, en ocasiones omiten algunos pasos y en otras ocasiones ofrecen más pasos de los necesarios, lo que puede causar confusión.

El porcentaje de éxito de los alumnos al resolver problemas en los exámenes estaba entre el 50% y el 60%. Debido a que sólo hay dos posibilidades para elegir la dirección espontánea de una reacción, se puede analizar el resultado anterior como si fuera una pregunta de **falso o verdadero**, restando el porcentaje que contestó erróneamente al porcentaje que contestó correctamente. En el mejor de los casos podemos suponer que el 60% acertó y el 40% se equivocó, por lo que si hacemos $60-40=20$ se observa que sólo el 20% de los alumnos entendieron el tema, y por otro lado, los alumnos correspondientes al 80% restante simplemente estaban adivinando.

Después de prestar atención al tipo de preguntas y al tipo de errores de los alumnos, se pudo identificar las siguientes deficiencias durante el análisis de las reacciones redox por parte de los estudiantes:

1. No saben leer ecuaciones químicas.
2. Confunden los conceptos de oxidación y reducción.
3. Desconocen el concepto de potencial redox.
4. Desconocen el concepto de espontaneidad.

Las deficiencias antes mencionadas pueden intervenir negativamente durante la exposición de los cinco temas o conceptos conflictivos identificados por De Jong, *et. al.* [1]. En otras palabras, la deficiencia 1 puede causar inconvenientes durante la exposición del tema de **Balanceo de ecuaciones redox**. La deficiencia 2 coincide con lo dicho por Österlund, *et. al.* [2] y afecta la enseñanza de los tópicos: **Identificación de los reactivos como agentes oxidantes o reductores** y **Números de oxidación y sus valores**. Por otro lado, las deficiencias 3 y 4 afectan la enseñanza de los conceptos: **Transferencia de electrones** y **Fuerza relativa de los agentes oxidantes y reductores**.

Para neutralizar estos inconvenientes es necesario que el profesor conozca un procedimiento que le permita impartir la clase de una forma ordenada, clara y sencilla, para lo cual se proponen las siguientes soluciones:

1. Hacer énfasis y dedicar tiempo en enseñar a leer y a escribir las ecuaciones químicas con distintos sentidos de la flecha y diferente orden en los reactivos y productos. El profesor debe dedicar tiempo a este tópico, así como ordenar al alumno la resolución de numerosos y diferentes ejercicios al respecto.
2. Hacer que el alumno se ayude de alguna nemotecnia para memorizar y recordar fácilmente los conceptos de oxidación y reducción.
3. Explicar al alumno el concepto de potencial redox utilizando y haciendo analogías entre el potencial gravitacional, el potencial eléctrico y el potencial redox. Ayuda mucho hacer uso de diagramas como los de las figuras 1 a la 5.
4. Explicar al alumno el concepto de espontaneidad utilizando las analogías entre los potenciales gravitacional, eléctrico y redox. Por otro lado, se debe enseñar al alumno el procedimiento de los cinco pasos para el análisis de las reacciones redox.

Los puntos anteriores fueron puestos a prueba en un grupo de 8 alumnos de ingeniería química, que cursaron la materia de Electroquímica. El grupo estaba formado por 5 mujeres y 3 hombres. Se observó que surgieron muy pocas dudas durante la exposición del tema. Los alumnos adquirieron el conocimiento prácticamente desde la primera clase, resolviendo problemas con bastante facilidad. En clases posteriores, los alumnos casi no realizaron preguntas relacionadas con el tema.

Posteriormente, se realizó un examen final donde se pidió a los alumnos seleccionar la dirección espontánea de dos reacciones redox. Dos de las mujeres del grupo se equivocaron en ambos problemas, mientras que el resto de los alumnos pudo resolver los dos problemas correctamente. Es decir, el 75% de los estudiantes respondió correctamente y el 25% se equivocó. Si hacemos $75-25=50$, concluimos que el 50% del grupo entendió correctamente el tema y por el otro lado, el 50% restante estaba adivinando durante el examen.

Por lo anterior, podemos decir que se observó una mejoría durante el proceso de enseñanza-aprendizaje. Con este trabajo se espera ayudar a mejorar tanto el desempeño del profesor en el momento de exponer el tema así como el desempeño del alumno a la hora de aprenderlo.

XIII. REFERENCIAS

- [1] De Jong, O., Acampo, J., Verdonk, A., *Problems in Teaching the Topic of Redox Reactions: Actions and Conceptions of Chemistry Teachers*, J. Res. Sci. Teach. **32**, 1097-1110 (1995).
- [2] Österlund, L. L., Ekborg, M., *Students' Reasoning of Redox Reactions in Three Different Situations*, Department of Chemistry, Department of Mathematics Technology and Science Education, University of Umeå, Sweden, 2008 (no publicado), disponible en: http://symposium9.khi.is/synopsis/nfsun9_submission_4_2.doc, última consulta el día 17 de Agosto de 2008.

[3] García-Colín Scherer, L., *Introducción a la Termodinámica Clásica* (Ed. Trillas, 4ª Edición, México, 1990).

[4] Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbot, M. M., *Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química* (Ed. McGrawHill, 5ª Edición, México, 1997).

[5] Petrucci, R. H., Harwood, W. S., Herring, F. G., *Química General* (Ed. Pearson-Prentice Hall, 8ª Edición, Madrid, 2003).

[6] Resnick, R., Halliday, D., Krane, K. S., *Física Vol. I* (Ed. CECSA, México, 2002).

[7] Resnick, R., Halliday, D., Krane, K. S., *Física Vol. II* (Ed. CECSA, México, 2002).

[8] Huheey, J. E., *Química Inorgánica: Principios de estructura y reactividad* (Ed. Harla, 2ª Edición, México, 1981).

La aceleración en el espacio y en el tiempo: cinemática de los arrancones



Adrián Corona Cruz

*Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Apartado Postal 1152, 72001 Puebla, México.*

E-mail: acorona@fcfm.buap.mx

(Recibido el 16 de Agosto de 2008; Aceptado el 17 de Septiembre de 2008)

Resumen

Para el presente trabajo, se considera que la descripción del movimiento de los objetos, en lo general, se hace bajo la concepción de que éste ocurre en el espacio y en el tiempo, y que las interacciones o causas del mismo se describen de igual manera; no importando si la interacción se desarrolla en el espacio o en el tiempo. Esto hace que los movimientos sean incorrectamente analizados. Aquí se examinan a manera de ejemplos dos sistemas, uno tratado en el laboratorio básico de física y otro en pistas de carreras de autos (arrancones). Se hace evidente la diferencia en las aceleraciones obtenidas considerando sus promedios en el espacio y en el tiempo. También, se muestra que en las dos situaciones en las que podemos describir el movimiento, a) aquellas donde sólo se conoce la situación inicial y final y b) aquellas donde se conoce la posición en cada instante, se observa la diferencia en las aceleraciones.

Palabras clave: arrancones, aceleración espacial, aceleración temporal, interacciones.

Abstract

In the present work, it is considered that the description of movement of the objects, in general, takes place in the conception of this happens in the space time, and that its interactions or causes are described of equal way; not mattering if the interaction is developed in the space or the time, this causes that the movements be incorrectly analyzed. Here two examples of systems are examined, one in the basic laboratory of physics and another one in tracks of car races (dragster). The difference in the obtained accelerations becomes evident considering its averages in the space and the time. Also, we show that in both situations in which we can describe the movement, a) those where the initial situation is only known and final, and b) those where knows the position at every time, the difference in the accelerations is observed.

Key words: dragster, spatial acceleration, temporal acceleration, interactions.

PACS: 01.50.Wg, 01.55.+b, 01.40.E

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

A nivel clásico o newtoniano, en la frase “*todo se mueve*”, se implica la materia (todo) y el movimiento (se mueve), es decir, espacio, tiempo y energía. La fusión de estas dimensiones (lógico matemático) sirve para explicar los fenómenos fundamentales de la realidad, tales como velocidad, aceleración, energía cinética, etc. El movimiento de los objetos, por medio de una serie de formulas, son examinados, fusionando el espacio y el tiempo, interpretando así el comportamiento del universo (todo se mueve).

Frente a los hechos de la realidad, los físicos, para estudiar el proceso del conocimiento físico, clásicamente examinan por separado al espacio y al tiempo, de esta manera estructuran la lógica de la dimensionalidad, es decir, una lógica intuicionista; al considerar al espacio y al tiempo; para definir mediante un proceso intuitivo, por ejemplo establece la velocidad sin entrar a considerar sus fundamentos físicos o matemáticos [1].

El movimiento de un objeto en condiciones cotidianas, general es complicado de estudiar. Una

simplificación se puede dar cuando el objeto se traslada en una dimensión espacial, y más cuando sólo nos interesa su comportamiento promedio; un sistema mecánico de éste tipo, y comúnmente tratado como ejercicio en clase o problema de evaluación es formulado como: *¿cuál es la aceleración media de un auto que después de arrancar y recorrer una distancia x alcanza una velocidad v ? o ¿cuál es la aceleración media de un auto que después de arrancar en un tiempo t consigue moverse a una velocidad v ?* El estudiante podría imaginar que el auto en su recorrido se le pudo poner una llanta, u modificar su trayecto debido por alguna causa vial, es decir las variables desplazamiento y el tiempo impactan respectivamente en los problemas, y sin embargo el resultado no se modifica por los hechos. Si ambos enunciados corresponden al mismo evento, se obtendrían dos aceleraciones seguramente diferentes. Es claro que con la información o datos del problema, éste sólo se puede resolver calculando los valores promedio de la aceleración. En el primer caso, el valor promedio de la aceleración en el espacio, es decir los cambios en la velocidad del auto debido a las interacciones a lo largo de su trayectoria. En el segundo

caso se requiere conocer los cambios de la velocidad del auto en cada instante del tiempo que duró el recorrido.

El no hacer la distinción conceptual y analítica de la aceleración, se producen errores, como el discutido más tarde. La situación puede corregirse haciendo que el estudiante entienda las diferencias de las aceleraciones introduciendo y usando explícitamente eventos debidos a las acciones o interacciones que se realizan en el espacio (teorema trabajo-energía) y aquellos que se realizan en el tiempo (impulso-momentum).

Usando el teorema del valor medio, para la aceleración que experimenta el auto a lo largo de su recorrido y en cada instante:

$$\begin{aligned} \text{Aceleración promedio en el espacio} & \quad \text{Aceleración promedio en el tiempo} \\ \bar{a}_x = \frac{\int a \cdot dx}{\int dx}, & \quad \bar{a}_t = \frac{\int a \cdot dt}{\int dt}, \end{aligned}$$

considerando que los autos parten del reposo, se obtiene

$$\bar{a}_x = \frac{v^2}{2x}, \quad (1) \quad \bar{a}_t = \frac{v}{t}, \quad (2)$$

donde x es la distancia recorrida, v la velocidad final donde t es el tiempo en el que el auto alcanza la velocidad v

Se puede mostrar que sólo en el caso en el que el movimiento es uniformemente acelerado, los valores de las aceleraciones son iguales: $a_x = a_t$. También, ocurre que a medida de que el móvil, experimenta más variaciones en la aceleración, la diferencia entre las aceleraciones se hace más grande.

Conviene hacer la reflexión de que de a_x se deriva la definición de trabajo, energía cinética y potencial, y que de a_t el impulso y el cambio de momentum.

II. ANALISIS DE OBJETOS ACELERADOS

A. Carro de fricción y pelota en caída libre

A manera de ejemplo, en la grafica mostrada en la figura 2, se muestran los datos graficados de la posición vs tiempo, de dos objetos, y en la tabla I, se muestran los valores, obtenidos de las graficas de las aceleraciones de un carrito de cuerda mostrado el la figura 1, moviéndose sobre una superficie de madera, y una pelota de básquetbol cayendo.



FIGURA 1. Carrito de cuerda.

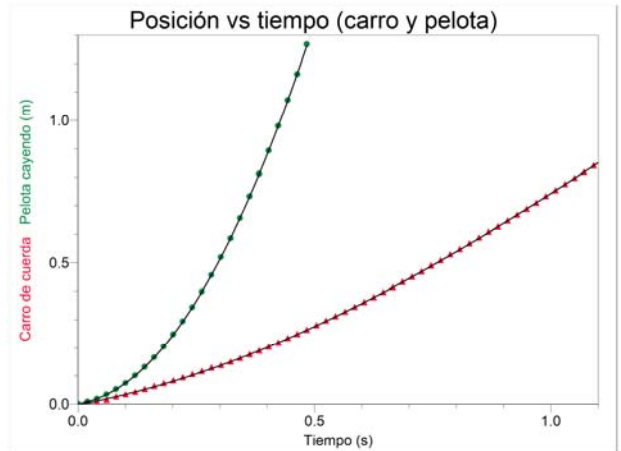


FIGURA 2. Gráfica de posición vs tiempo de un carrito de fricción corriendo horizontalmente sobre madera, y los datos del movimiento de caída libre de un balón de básquetbol (pesado). Las líneas corresponden respectivamente a ajustes con polinomios cuadrático y cúbico.

El movimiento fue cuantificado por medio de un sonar (sensor de movimiento a 60Hz) conectado a una interfase 500, PASCO acoplado a una PC. El sonar fue colocado con su emisor alineado normal al piso. Cuando el carro (previamente cordado) se encuentra aproximadamente a 30 cm del sonar, se libera, capturando su posición cada sesentavo de segundo (± 0.001 m, ± 0.01 s). Así, los valores de la distancia recorrida, el tiempo y la velocidad final son obtenidos. Para la pelota el sensor se coloca dirigido hacia el piso. En la tabla I, se puede observar que en el caso de la pelota la aceleración por ser constante las aceleraciones coinciden, mientras que para el carro moviéndose sobre madera (rugosa), las aceleraciones difieren en el 24 %.

TABLA I. Valores del movimiento de un carro de fricción y una pelota. Los valores son extraídos de los datos de posición tiempo.

Móvil	t (s)	x (m)	v_f (m/s)	a_x (m/s ²)	a_t (m/s ²)
Carro de cuerda	± 0.01	± 0.001	± 0.01	± 0.02	± 0.01
	1.19	0.977	1.24	0.79	1.04
Pelota en caída libre	0.47	1.076	4.59	9.81	9.82

B. Arrancones (Dragster)

El Top-Fuel Dragster es el carro más rápido de los vehículos de carreras para arrancones, acelera a casi 4 g's a lo largo de un cuarto de milla (402.5 m) en menos de cinco segundos. Alcanza velocidades por arriba de los 44.7 m/s (100 mph) en menos de un segundo y termina la carrera con velocidades mayores de 143 m/s (320 mph). Un esquema del Dragster se muestra en la figura 3 [2].

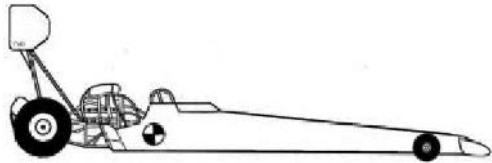


FIGURA 3. Esquema del Dragster. Tomado de la ref. 2

Por el comportamiento del carro durante la carrera, hay dos regiones que determinan cómo estudiar su movimiento; a) en la primera región (tracción) la aceleración es tan grande que las ruedas resbalan, y la longitud que recorre depende de la habilidad del conductor, la velocidad al final se llama la velocidad crítica; b) en la segunda región (potencia), las ruedas no patinan y continúa acelerando.

Las ecuaciones de movimiento para el dragster se derivan considerando todas las fuerzas que actúan en el vehículo. Estas incluyen las propiedades aerodinámicas y de tracción del carro, el peso, las dimensiones, alerones, etc. [2].

La ecuación para la región de tracción $0 < v < v_{cr}$

$$\ddot{x} + a\dot{x}^2 + b = 0. \tag{3}$$

Para la región de potencia: $v_{cr} < v$

$$\ddot{x} + \frac{c}{\dot{x}} + d\dot{x}^2 + e = 0, \tag{4}$$

donde los coeficientes a , b , c , d y e son función del coeficiente de fricción, masa del carro, densidad del aire, potencia y parámetros geométricos, etc. La idea de este modelo es optimizar las propiedades del vehículo para aumentar su velocidad.

Para validar al modelo se usan datos de posición y velocidad, de una carrera del dragster. Datos de posición vs tiempo y velocidad vs distancia [3]. Para obtener de ellas las relaciones aceleración vs tiempo y aceleración vs posición, se diferenciaron las soluciones de las ecuaciones 3 y 4.

El sistema para cronometrar la carrera del dragster "TSI 2000+' (Servicios de pista Incorporado) [4] se basa en foto celdas acopladas a una PC diseñado específicamente para la carrera. El hardware de la computadora recibe señales de los sensores posicionados en puntos específicos a lo largo de la pista. Los sensores se posicionan a lo largo de la pista; 60 pies, 330 pies, 1/8 milla, 1000 pies y claro 1/4 milla. El haz emitido a través de un agujero en la pared, colocada a lo largo de la pista, refleja en un reflector montado en la pared del centro de la pista. El vehículo rompe el haz cuando él pasa y envía una señal a la computadora. La velocidad es obtenida con la señal de un sensor adicional montado a 66 pies antes de los 1/8 y 1/4 milla.

La validación posición vs tiempo mostrada en figura 4, esta reportada por Winn [3]. En esta grafica, los puntos son los datos experimentales y las líneas muestran el comportamiento de las soluciones de las ecuaciones 3 y 4; es obvio que la solución para la parte tracción, es

cuadrática, sin embargo la solución para la región de potencia, es numérica. Se observa que las soluciones emparejan muy bien con los datos reales. En la figura 5, se muestran reproducidos, durante la carrera, el comportamiento de la aceleración en el tiempo del dragster.

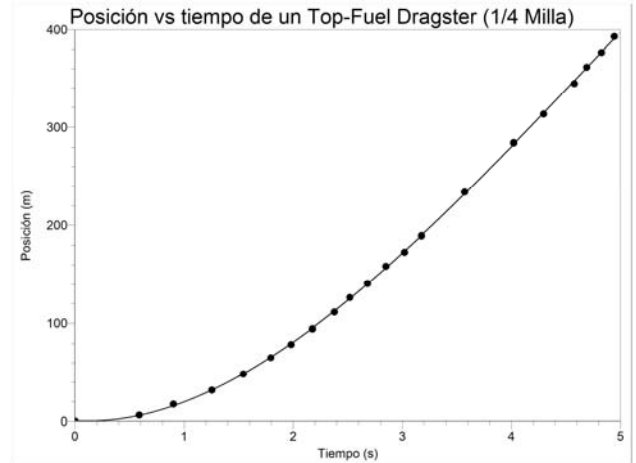


FIGURA 4. Validación de las soluciones de las ecuaciones 3 y 4, (Posición vs Tiempo) del Top-Fuel Dragster, los puntos son los datos y la línea las funciones.

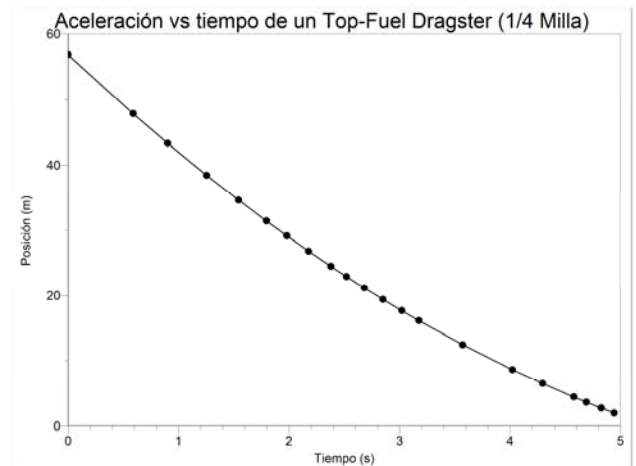


FIGURA 5. Validación de la segunda derivada de las soluciones de las ecuaciones 3 y 4 (Aceleración vs Tiempo) del Top-Fuel Dragster, los puntos son los valores calculados de la aceleración y la línea la función. La aceleración promedio es 22.4 m/s^2 .

También los datos de velocidad contra los datos de posición fueron usados por Winn [3], para validar el modelo. Estos datos se muestran en figura 6 con los círculos y con la línea curva las soluciones de las ecuaciones 3 y 4. Una vez más se encuentra un buen acuerdo con los datos. Respecto a los valores mostrados en la figura 7, estos se obtuvieron calculando con la ecuación 1, la aceleración promedio entre cada uno de los cambios de velocidad.

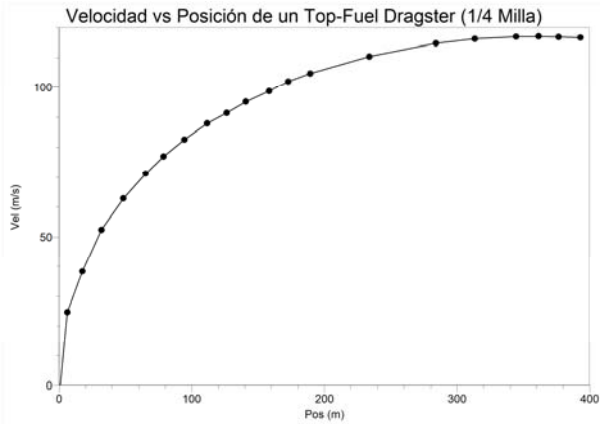


FIGURA 6. Validación de las soluciones de las ecuaciones 3 y 4, (Velocidad vs Posición) del Top-Fuel Dragster, los puntos son los datos y la línea las funciones.

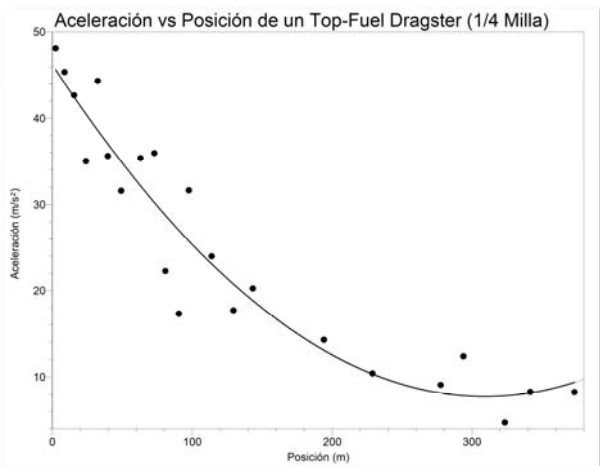


FIGURA 7. Validación de la segunda derivada de las soluciones de las ecuaciones 3 y 4 (Aceleración vs posición) del Top-Fuel Dragster, los puntos son los valores calculados con la ecuación 1, y la curva muestra el comportamiento de los datos. La aceleración promedio es 25.4 m/s^2 .

Es interesante observar el comportamiento de la aceleración para los dos conjuntos de datos, ambos en magnitud son del mismo orden, pero su comportamiento varía en su rapidez de cambio.

Debido a la rapidez con la que se desarrolla la carrera, sólo se llegan a reportar los datos medidos y calculados de los tiempos de recorrido, la velocidad final, y en algunos casos la velocidad en algunos puntos del recorrido. En la tabla II se muestran datos de móviles del mismo estilo. En ella se puede observar las aceleraciones promedio calculadas con las ecuaciones 1 y 2, usando los datos de los tiempos y velocidades alcanzadas por los móviles al recorrer el cuarto de milla.

TABLA II. Comparación de las velocidades y aceleraciones medias de varias máquinas, recorriendo un cuarto de milla (402.5 m) [5].

Movil	t (s)	v (m/s)	a_t (m/s^2)	a_x (m/s^2)
Top Fuell Dragster	4.4	148.8	33.8	27.5
Rocket Dragster	3.6	172.5	48.2	37
He rocketed	10.3	64.3	6.24	5.1
Boat	4.5	147.5	44	27

Información como ésta, suele ser usada para plantear problemas como los antes formulados:

- ¿Cuál es la aceleración media de un bote que después de arrancar y recorrer una distancia x alcanza una velocidad v ? o
- ¿Cuál es la aceleración media de un Rocket Dragster que después de arrancar en un tiempo t consigue moverse a una velocidad v ?

III CASO CONTROVERTIDO

En la revista “Popular Science” (Oct. 2002, pp. 92-94) reporta las siguientes distancias, tiempos y velocidades de una carrera de Top Fuell Dragster. Los datos se muestran en las tres primeras columnas de la tabla III.

TABLA III. Datos de x , t , v , de una carrera y los valores de las aceleraciones obtenidas por medio de las ecuaciones 2 y 3, de un auto recorriendo un cuarto de milla (402.5 m) [6].

t (s)	x (m)	v (m/s)	a_x (m/s^2)	a_t (m/s^2)
0.5	18.3	17.9	8.7	35.8
1	45.7	44.7	30.6	53.6
2	91.5	89.4	65.6	44.7
3.5	198	123	33.4	22.3
4	305	134	13.5	22.3
4.5	402.44	147	18.7	26.0

Con las preguntas: ¿podemos interpretar estos datos y calcular la aceleración del coche?, ¿la posición y velocidad están relacionadas, la velocidad es la derivada de la posición?, la validez de estos datos fueron puestos a prueba por Riveros [6].

Para encontrar las respuestas, Riveros graficó los datos, obteniendo la gráfica de la figura 8, observando que el comportamiento entre las curvas no es consistente, mientras en la curva de distancia hay una zona recta lo que implica una velocidad constante (aceleración cero), en la curva de velocidad en la misma zona es recta (aceleración constante), significando que los datos de posición y velocidad no son compatibles entre sí.

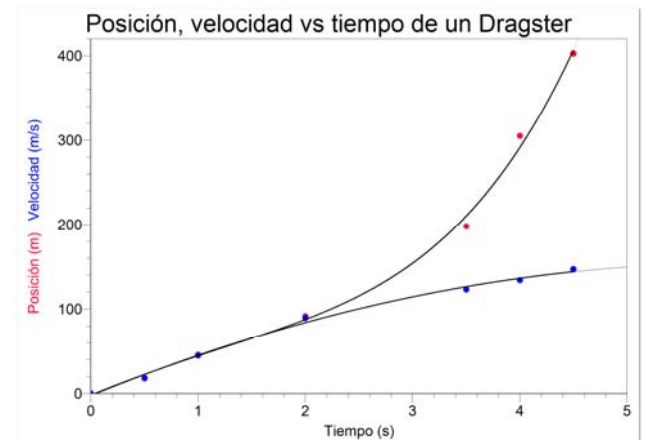


FIGURA 8. Gráfica de los datos reportados en la revista *Popular Science*. Las curvas sólo muestran el comportamiento de los datos.

Como se puede ver la interpretación de los datos que hace Riveros, no es correcta. El análisis debe hacerse calculando los cambios de velocidad. En las gráficas 9 y 10 se muestran los comportamientos de las aceleraciones obtenidas usando las ecuaciones 1 y 2, cuyos valores se muestran en las últimas dos columnas de la tabla III. De manera que como respuesta a las preguntas de Riveros, en las graficas se puede calcular la aceleración del coche, que la posición y velocidad están relacionadas. En el artículo de Riveros hay otras observaciones a los datos que también pueden discutirse.

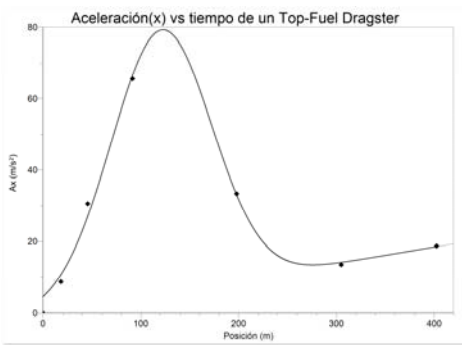


FIGURA 9. Gráfica de las aceleraciones promedio, calculadas con la ecuación 1, usando los datos reportados en Popular Science.

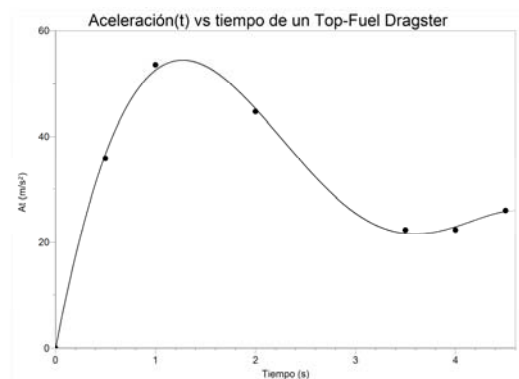


FIGURA 10. Gráfica de las aceleraciones promedio, calculadas con la ecuación 2, usando los datos reportados en Popular Science.

Se interpreta el comportamiento de las graficas de aceleración en términos de las zonas de tracción y potencia, referidas por Buratti [2], se podría considerar que

en la gráfica 9, (aceleración tiempo), se da la tracción del dragster.

IV CONCLUSIONES

El estudio de los movimientos, en general se restringen a aquellos que son uniformemente acelerados, siendo que en la realidad la mayoría de los movimientos en el entorno del alumno son “complejos”. De esto, para encontrar las leyes que gobiernan los diversos cambios de posición que experimentan los cuerpos a medida que el tiempo transcurre, debemos crear las condiciones para medir y describir los cambios en el espacio y en el tiempo. Este punto de análisis en lo general no es tratado, en los textos ni en las aulas.

REFERENCIAS

- [1] Vallejos, M. A., *Continuo cuatro dimensional y realidad*, http://www.serbi.luz.edu.ve/pdf/rluz/v03n10/art_05.pdf, Visitado Julio 29, 2008
- [2] Buratti, T. M., *Top-Fuel Dragster wing design using cfd and its influence on vehicle dynamic performance*, Faculty of the Graduate College of Oklahoma State University, (2000), http://www.caselab.okstate.edu/pubs/tmb_thesis.pdf, Visitado Mayo 6, 2008
- [3] Winn, R. C., Kohlman, D. L., and Kenner, M. T., *Optimal Wing Design for Top-Fuel Dragsters*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Paper No. 99-0464, (1999).
- [4] Andy Marrs and Steve Horn, TSI 2000+, <http://www.eurodragster.com/tsitimers>, Visitado Mayo 29, 2008
- [5] Glenn, E., *Acceleration of a Dragster*, [The Physics Factbook](http://hypertextbook.com/facts/2007/AnamAhmed.shtml), An educational, Fair Use website, <http://hypertextbook.com/facts/2007/AnamAhmed.shtml>, Visitado Mayo 12, 2008
- [6] Riveros, H., *Los Placeres del Pensamiento*, Bol. Soc. Mex. Fís. **16**, 237-238 (2002).

Nota: La Prueba PISA de la OCDE



H. G. Riveros

*Instituto de Física-UNAM, Ciudad Universitaria, Apartado Postal 20-364,
México 04510, D. F.*

E-mail: riveros@fisica.unam.mx

(Recibido el 31 de Julio de 2008; aceptado el 5 de Agosto de 2008)

PACS: 01.40.Di, 01.40.ek, 01.40.G-

ISSN 1870-9095

La prueba PISA (Programme for International Student Assessment) se aplica a estudiantes de 15 años de los países miembros de la OCDE (Organization for the Economic Co-Operation and Development), con resultados relativamente malos para los estudiantes mexicanos [1]. La prueba PISA no pretende calificar a las escuelas, sino a los sistemas educativos de los países miembros. Consultando en Internet algunos ejemplos de las preguntas utilizadas se entiende por qué salimos mal. Las preguntas de PISA requieren entender y razonar, y a nuestros estudiantes los entrenamos para memorizar. Aunque los temas de estudio para esas edades son prácticamente los mismos en todo el planeta, la diferencia está en cómo se enseña y evalúa. Todos los maestros enseñan lo mismo, pero todos recordamos a unos cuantos grandes maestros que dan una clase diferente. Nos inducen a razonar, con el ejemplo y con los exámenes. La mayoría de los exámenes mexicanos son básicamente memorísticos, pero en estos tiempos de Internet, cualquiera puede obtener una gran cantidad de información en poco tiempo, pero pocos saben interpretarla. Hay mucha información falsa o tendenciosa que necesitamos descartar. Por esto es necesario inducir el razonamiento como parte de la cultura y la enseñanza de las Ciencias se presta para este aprendizaje. Además de lo que se enseña, es crucial cómo se enseña. Podemos motivar el aprendizaje aprovechando la utilidad en la vida diaria de los conocimientos y/o el placer que causa entender como herramientas didácticas.

Nuestros estudiantes estudian para pasar el examen, muy pocos lo hacen por el placer de entender. Necesitamos creatividad en el diseño de las preguntas, como lo demuestran los ejemplos publicados de la prueba PISA. Las preguntas utilizadas por los maestros en la primaria y secundaria, las pruebas del INEE Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación, las del CENEVAL (Centro Nacional para la Evaluación de la Educación Superior) y las de Enlace (de la Secretaría de Educación Pública) son básicamente memorísticas. Nuestros estudiantes están entrenados en este tipo de reactivos, no es sorprendente que no sepan qué hacer cuando se les cambia la jugada. No es que no sepan las cosas, lo que pasa es que no saben que saben. Es necesario entrenarlos en este tipo de preguntas. Necesitamos cambiar el espíritu de las evaluaciones en el país. Debemos proporcionar a los profesores ejemplos de preguntas conceptuales en todos los temas de los programas de estudio.

Debemos aprender de la prueba PISA, dar a conocer ejemplos de la misma a los estudiantes participantes, así como sus respuestas. Esto constituye material de apoyo para los maestros en funciones, quienes deben de enseñar de manera tal que sus estudiantes puedan contestar este tipo de exámenes. En contraste la prueba Enlace publicó en Internet unos cuantos reactivos de la prueba de secundaria, dado que se les comentó que había errores en algunas preguntas, en lugar de corregirlos y revisar preguntas y respuestas, los retiraron de la página de Internet.

Conozco varios intentos de reformas al proceso educativo, todas con objetivos ideales de enseñar a razonar, pero alejadas de los profesores en acción. Si no se les proporciona herramientas, si no se les enseña cómo lograrlo, no es posible esperar que se lleven a cabo. Todas estas reformas requieren preguntas de evaluación diferentes. Ninguna reforma ha tocado los procesos de evaluación. Se dan computadoras en primaria, cuando no se tienen en todas las secundarias, ni se entrena a los profesores en sus aplicaciones a la clase.

La buena noticia es que el portal del INEE tiene tres pruebas PISA en español que pueden consultar profesores y estudiantes [2]. Si los profesores quieren que sus estudiantes salgan bien, necesitan cambiar sus métodos de enseñanza para que sus estudiantes puedan contestar ese tipo de preguntas. Los estudiantes entenderán que es necesario relacionar los conocimientos que tienen en la memoria, en el proceso que llamamos razonar. Ojalá todas las evaluaciones que se aplican en México siguieran este ejemplo de usar preguntas que impliquen razonamientos, y que se den a conocer las respuestas correspondientes. Esto cambiará a la larga, las maneras particulares de enseñar. No creo en las revoluciones, creo en la evolución continua de los procesos. Si se logra definir un conjunto de preguntas conceptuales, que abarquen los temas de los diferentes programas de estudio, le estamos definiendo tanto a profesores como estudiantes, lo que esperamos de ellos; esto es un primer paso para cambiar el proceso de enseñanza – aprendizaje en el país.

El siglo pasado fue testigo de los cambios más radicales en el conocimiento y nivel de vida de la humanidad. Todo indica que este siglo será todavía más rico en resultados, y tenemos que ser parte de los cambios. Nuestros hijos y conciudadanos tienen derecho a la mejor educación posible para sus hijos, necesitan conocer los resultados de las escuelas en la población en que viven. Es

H. G. Riveros

posible que encuentren una escuela de calidad en las cercanías de su domicilio, reduciendo los problemas de tránsito e incrementando el tiempo útil diario para las actividades de sus hijos.

REFERENCIAS

- [1] www.oecd.org, consultada el 30 de julio de 2008.
[2] www.inee.edu.mx, consultada el 30 de julio de 2008.

APÉNDICE

A. Ejemplos de preguntas PISA 2006

1.- Al ver la televisión, Peter ve un coche (A) que va a 45 km/h que es adelantado por otro coche (B) que va a 60 km/h. ¿A qué velocidad le parece que va el coche B a alguien que va viajando en el coche A?

- B. 15 km/h
- C. 45 km/h
- D. 60 km/h
- E. 105 km/h

2.- ¿Qué frase explica por qué hay día y noche en la Tierra?

- A La Tierra gira sobre su eje.
- B El Sol gira sobre su eje.
- C El eje de la Tierra está inclinado.
- D La Tierra gira alrededor del Sol.

Otro coche (B) que va a 60 km/h. ¿A qué velocidad le parece que va el coche B a alguien que va viajando en el coche A?

- A. 0 km/h
- B. 15 km/h
- C. 45 km/h
- D. 60 km/h
- E. 105 km/h

A. 0 km/h

BOOK REVIEWS



Carmen del Pilar Suárez Rodríguez

Departamento de Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Universidad del Valle de México, Campus San Luis Potosí.
San Luis Potosí, S.L.P., México.
E-mail: pilarsuarez@fc.uaslp.mx

Burbuja viajera de la ciencia. La ciencia en verso.

Edén Darío Delgado.
76 pp., editado por Inversiones Cruzal, c.a.
Barquismeto, Lara, Venezuela, 2005.
Deposito legal Lf69720055002787.

“Uno se imagina el conocimiento físico como un gran árbol al que le salen ramas frescas todos los días; algunas envejecen y caen, otras son fuertes y pasan a formar parte del árbol.”

Pregunta

Se presenta un libro de poemas en prosa y verso, donde se hace alusión a hechos científicos y personajes destacados de la Física y la Ciencia. El autor, Físico y Profesor Venezolano nacido en Baragua, en el Estado Lara, comparte imágenes de su pueblo natal, de su crecimiento intelectual y de su formación científica a través de poemas. La Poesía y la ciencia utilizadas como diferentes perspectivas en la observación, descripción e interpretación del mundo físico y la evolución del pensamiento científico. El Dr. Darío Delgado nos comparte 42 poemas expuestos en un orden interesante, inicialmente se pregunta sobre el origen del universo, de la creación y las ideas, sobre el nacimiento de la ciencia en el “*Prologo*”.

La clasificación no explícita se determina a partir del planteamiento de la propia existencia con un poema intitulado “*Soy*”, define al niño como materia prima de la ciencia, con la característica principal de cuestionarlo todo; lo que le permite iniciarse en el despertar científico. Con “*Piaget*” expone el desarrollo de la inteligencia, en “*Iconos*” los elementos básicos de la escuela y sus recursos, “*Apuesta*” nos habla del proceso aprendizaje y clasifica en “*Travesuras*” a la Física.

El método científico y una breve historia de la ciencia se dan en el “*Inicio*”. “*Danza*” refleja la evolución del pensamiento científico, la creación del método y los paradigmas. En esta evolución “*Caminos de la Ciencia*” considera a las piedras fundamentales de la Física y se muestra un tributo a “*Galileo el solitario*”, “*Coulomb y Maxwell*”, a Arquímedes en “*Eureka*”, Descartes es “*Rene*” y Newton se engrandece al ser mencionado en “*La segunda ley de Newton*”.

“*Idea*”, relata la evolución del concepto de materia hasta llegar a la dualidad onda partícula. La aplicación de la Física a procesos industriales y de beneficio social puede observarse en “*Invento*”. Las ventajas de la experimentación en el desarrollo científico y en la

enseñanza de la Física están descritas en “*Experimento*”. “*La reflexión*” ayuda a identificar un fenómeno y los lineamientos para llevar a cabo una interpretación del mismo.

Una “*Burbuja*” es seguida en su recorrido, por instantes es poesía, es verso y es además, objeto de estudio de la ciencia. A continuación se describen metafóricamente fenómenos y conceptos como “*Mareas*”, “*Ondas*”, “*Ebullición*”, “*Temperatura*”, “*Gravedad*”, “*Energía*”, “*Energía y fuerza*”, el calor “*Fluye*” y la transferencia de energía es un “*Viajero*”, energía potencial y gravitacional, fuerzas conservativas y energía mecánica en “*Péndulo y energía*”, “*Conservación y simetría*” con sus principales principios en materia, energía y momento. Fuerza, movimiento, interacciones, sistemas de referencia están descritas en “*Leyes de la mecánica*”. La electricidad y el magnetismo, la interacción radiación materia, la radiactividad, el movimiento en dos dimensiones, la trayectoria también son tomados por el autor.

Burbuja viajera de la ciencia es más que un libro de poesía, aunque si bien es cierto ofrece un momento de recreación, de reflexión, de hermosas descripciones, también puede ser utilizado como material de apoyo en un curso introductorio de Física.

Burbuja

Sobre aguas cristalinas de un riachuelo
una burbuja imitaba la corriente,
en los cauces angostos alza el vuelo,
espera los anchos para nadar paciente.

Desde el fondo, un trocito de raíz salía,
la corriente presurosa se desviaba,
la viajera al cambio atendía
y su propia rotación tomaba.

Su base circular se deformaba
hasta ovalada se podía poner,
alguna ley así lo regulaba
la forma mantenía hasta desaparecer.

Al llegar a un rápido en caída,
sacudida como una araña
que en la pared anida,
Varias burbujitas son montaña.

ANNOUNCEMENTS

Noveno Simposio de Investigación en Educación en Física, SIEF 9

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario, Argentina, 29 y 31 de octubre de 2008

http://www.fceia.unr.edu.ar/fceia/sief9/PAGINA_WEB/index.htm

Los Simposios de Investigación en Educación en Física (SIEF) son eventos bienales promovidos por la Asociación de Profesores de Física de la Argentina – APFA. El propósito general de los mismos es ofrecer un ámbito de comunicación, debate y reflexión sobre la educación en física y la didáctica de las ciencias como campo de investigación.

El Simposio permitirá reunir a investigadores, profesores y todos aquellos interesados en la enseñanza de las ciencias para compartir sus producciones y experiencias. Si bien el eje es la educación en Física, todos los aportes relacionados con la enseñanza de las ciencias naturales o las matemáticas son bienvenidos.

A través de la presentación y discusión de trabajos, desarrollo de mesas redondas y conferencias, y conformación de grupos de discusión, se analizarán y debatirán cuestiones relevantes que contribuyan a mejorar la educación en ciencias en todos los niveles educativos y consolidar el área de investigación en enseñanza de las ciencias.

Las sesiones del Simposio se desarrollarán con las siguientes modalidades:

Comunicaciones orales: presentación y discusión de trabajos agrupados por ejes temáticos afines.

Comunicaciones murales: presentación de trabajos en posters, que estarán expuestos durante todo el evento. Se desarrollarán sesiones de discusión de murales agrupados según ejes temáticos.

Mesas redondas: Sesiones organizadas con la finalidad de debatir temas de actualidad y controversia.

Conferencias a cargo de especialistas invitados.

Presentación de tesis de posgrado, informes de avance, proyectos de trabajo de grupos noveles: Se dispondrá de una sesión especial para estas presentaciones.

Instancias de reflexión para la elaboración de recomendaciones.

ASAMBLEA APFA

Durante el Simposio se realizará la asamblea anual de la Asociación de Profesores de Física de la Argentina.

+++++

PRIMER CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE ENSEÑANZA EN FÍSICA

del 19 al 21 de Noviembre de 2008, ESPOL (Campus Gustavo Galindo) Guayaquil-Ecuador

<http://www.icf.espol.edu.ec/Congreso/index.htm>

El 2008 es un año muy particular pues la ESPOL cumple 50 años (bodas de oro) y por esta razón, a través del ICF, se realizará el **Primer Congreso Internacional sobre la Enseñanza de la Física** del 19 al 21 de noviembre que contará con distinguidos expositores invitados:

- **M.Sc. Ricardo Buzzo Garrao, Chile**
Jefe de Carrera de Pedagogía en Física y Coordinador del Núcleo de Didáctica y Práctica Profesional de la Facultad de Ciencias Básicas y Matemáticas de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- **Dr. Eduardo Moltó Gil, Cuba**
Profesor Principal de Óptica, Didáctica de las Ciencias e Historia de la Física del Departamento de Ciencias Exactas de la Universidad Pedagógica “Enrique José Varona” de La Habana.
- **M.Sc. Florencio Pinela Contreras, Ecuador**
Profesor Principal del Instituto de Ciencias Físicas y Director de la Oficina de Admisiones de la Escuela Superior Politécnica del Litoral de Guayaquil.
- **Dr. César E. Mora Ley, México**
Subdirector Académico del CICATA-Legaria, Coordinador del Posgrado en Física Educativa. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel I y Presidente de *Latin American Physics Education Network* (LAPEN).
- **Dr. Celso Ladera E., Venezuela**
Profesor Principal del Departamento de Física de la Universidad Simón Bolívar de Caracas.
- **Dr. Eric Mazur, U.S.A.**
Es un físico prominente y educador en Harvard University. Mazur es conocido por su trabajo en la óptica experimental ultrarrápida y la física de materia condensada y es un líder nacional e internacional en la educación de ciencias. Diseñó una estrategia instruccional para enseñar la llamada instrucción por pares. Publicó un libro sobre la Instrucción por Pares llamada: Manual del Usuario que proporciona detalles sobre esta estrategia. En el 2006 fue seleccionado como

uno de los 75 físicos americanos más excepcionales por la Asociación Americana de Profesores de Física.

• **Dr. Paul G. Hewitt, U.S.A. (por confirmar)**

Su nombre es sinónimo de Física Conceptual para educadores de física por todas partes. Antes del advenimiento del libro del Profesor Hewitt del mismo nombre, la física se enseñaba tradicionalmente como matemáticas aplicadas adaptada a estudiantes con altas matemáticas y aptitudes para la ciencia. El acercamiento conceptual de Hewitt cambió todo esto. Traduciendo los conceptos centrales de física del lenguaje matemático al lenguaje común, y explicando física en lugar de proclamar física, y a través del empleo extenso de analogías como un instrumento de enseñanza, Hewitt sacó la física de la corriente principal educativa. Su texto ha cambiado el modo que se enseña la física tanto a los estudiantes de ciencias como a los que no siguen ciencias.

En reconocimiento a los logros de Hewitt, la Asociación americana de Profesores de Física lo honró en 1982 con su Premio Millikan, el premio más prestigioso para contribuciones excepcionales a la enseñanza de la física.

Hewitt es en este momento es columnista para The Physics Teacher, la revista mensual de la Asociación Americana de Profesores de Física.

+++++

**VIII TALLER INTERNACIONAL SOBRE
ENSEÑANZA DE LA FÍSICA EN LA
INGENIERÍA EFING'08
1 - 5 Diciembre de 2008
La Habana, Cuba**

<http://www.cujae.edu.cu/eventos/convencion/sitios/efing/index.htm>

El Departamento de Física del Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (ISPJAE), se complace en convocar a los profesores de Física y otras Ciencias Básicas afines a las Ciencias Técnicas así como a investigadores en el campo de la Física Aplicada en la Ingeniería, a participar en el

VIII Taller Internacional sobre la Enseñanza de la Física en la Ingeniería

(EFING'08)

que se celebrará entre los días 1 y 5 de Diciembre del 2008 en el Palacio de las Convenciones en La Habana, Cuba.

Objetivos

- Analizar y fundamentar el papel que desempeñan las tecnologías de la Informática y las Comunicaciones aplicadas a la Física en la formación de ingenieros.

- Debatir y divulgar los trabajos científicos más avanzados en el campo de la Enseñanza de la Física en la Ingeniería y en la Didáctica de la Física para su aprendizaje a distancia y en otras formas semipresenciales.

- Propiciar la concertación de proyectos conjuntos de investigación y desarrollo entre los participantes, así como la firma de cartas de intención y convenios entre las instituciones representadas en el evento.

Temáticas principales

- Nuevas Tecnologías en la enseñanza de la Física.
- Entornos virtuales para el aprendizaje de la Física.
- Didáctica de la Física y didáctica del postgrado en Física Aplicada.
- Diseño curricular en la Física para Ingenieros.
- Nuevas tendencias pedagógicas en la enseñanza de la Física en Ingeniería.
- Interrelación de la Física con otras ciencias básicas y técnicas.
- Laboratorios docentes de Física en Ingeniería.
- Automática y Electrónica en el Proceso de Enseñanza-aprendizaje.
- Taller de Tesis en Maestrías y Doctorados.

Comité organizador

- *Presidente:* Dr. Juan J. Llovera González (ISPJAE, Cuba)
- *Vicepresidentes:*
- Dr. Hilario Falcón Tanda (ISPJAE, Cuba)
- Dr. Juan Antonio Alejo Díaz (ISPJAE, Cuba)
- MSc. Justo Ortega Breto (ISPJAE, Cuba)
- Lic. Carlos Osaba Rodríguez (ISPJAE, Cuba)
- *Secretario Ejecutivo:* Dr. Rolando Serra Toledo (ISPJAE, Cuba)

Formatos para los resúmenes, artículos y posters

Presentación de resúmenes

- Los interesados en la presentación de ponencias deberán enviar su resumen en español e inglés al evento (según las referencias) con un máximo de 250 palabras
- El formato de presentación de los Resúmenes será en letra Arial 10 a simple espacio con las siguientes especificaciones: margen superior primera página 5cm; resto de las páginas; 2,5cm, margen inferior y laterales: 2,5cm.
- El resumen debe incluir información referente a: Título del trabajo, autores, institución, evento, temática, dirección postal y electrónica, teléfono y Fax, todo en letra Arial tamaño 12.
- Tamaño de hoja 8½" x 11" (21,59 cm x 27,94 cm), elaborado con procesador de texto Word, versión 6.0 o posterior.
- Los resúmenes y trabajos deben ser enviados por correo electrónico.
- Debe indicar al final del resumen la modalidad en que desea presentar el trabajo.

Formato de Artículos

- Las ponencias deberán ser en español o inglés con una extensión máxima de 10 cuartillas (incluyendo figuras y tablas).
- Tamaño de hoja 8½" x 11" (21,59 cm x 27,94 cm), elaborado con procesador de texto Word, versión 6.0 o posterior.
- Los trabajos deben ser enviados por correo electrónico

Formato de los carteles (Posters)

- Deben tener como máximo 1m de ancho por 1,50 m de alto. La presentación de un trabajo en esta modalidad no excluye la entrega del mismo en el formato solicitado para los resúmenes y artículos para su publicación en las Memorias del Evento.
- **PREFERIBLEMENTE** deben ser enviados como un anexo (attachment) por correo electrónico a:
 - efing@electronica.ispjae.edu.cu
 - llovera@electronica.cujae.edu.cu

Fechas límites

Envío de resúmenes	Hasta el 30 de Junio 2008
Información de aceptación	Hasta el 15 de Julio 2008
Envío de presentaciones completas	Hasta el 15 de Septiembre 2008
Aceptación final para publicación	Hasta el 15 de Octubre 2008
Realización del EFING 2008	Del 1 al 5 de Diciembre 2008

Información:

Fuera de estas fechas, puede garantizarse su participación en el evento, pero no así la publicación del trabajo y la modalidad en que lo quiere presentar. El comité organizador, en función de la calidad de los trabajos presentados, podrá hacer las gestiones con la Sociedad Cubana de Física, para que valore la inclusión de estos trabajos en las publicaciones de su revista.

Los trabajos recomendados por el comité de arbitraje serán publicados en una de las siguientes revistas:

- Revista Cubana de Física.
- Revista Avanzada Pedagógica.

Cuotas de inscripción

Las cuotas de inscripción para las diferentes categorías se ajustan a las referidas en la promoción de la Convención.

Delegado	180.00 CUC
Estudiante	80.00 CUC
Acompañante	70.00 CUC

Derechos que se adquieren con la cuota de inscripción

Para los delegados:

- Credencial y materiales de trabajo del evento.
- Memorias del evento, en formato electrónico (CD) con su correspondiente código ISBN.

- Participación en todas las actividades del evento.
- Certificado de ponente o participante.
- Brindis de bienvenida y actividad de despedida.
- Otras actividades de tipo cultural ofrecidas por el comité organizador.

Contacto

• Los interesados en participar en el evento pueden dirigir sus comunicaciones o solicitudes de información por cualquiera de las siguientes vías:

- Dirección postal:
 - Dpto. de Física, Fac. de Ingeniería Eléctrica, ISPJAE.
 - Ave. 114 No. 11901, e/ 119 y 127. Apdo. Postal 6028, Marianao.
 - Ciudad de La Habana, CP-19390. Cuba.
 - Teléfonos: (537) 266-3736, (537) 266 3734, Fax: (537) 267-2964, 267-1574
 - E-mail: efing@electronica.ispjae.edu.cu
 - Prof. Dr. Juan José Llovera González
 - (Presidente del comité organizador) llovera@electronica.cujae.edu.cu
 - Dr. Rolando Serra Toledo (Secretario ejecutivo) serra@electronica.cujae.edu.cu

+++++

V Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria 26 al 30 de enero de 2009 Ciudad de La Habana. Cuba

<http://www.fisica.uh.cu/tibero/fisedu/tibero%202009/index.htm>

La Universidad de La Habana y la Sociedad Cubana de Física en colaboración con la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) y la Universidad de Burgos, ambas en España, la Fundación Job de Alemania y el Instituto Politécnico Nacional (IPN) de México convocan la quinta edición del Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria.

El tema central de este evento será:

Experiencias Actuales en la Enseñanza de la Termodinámica.

Profesores de la Fundación Job para la Termodinámica y la Dinámica Química realizarán una presentación de las teorías desarrolladas por ellos. Además tendrá lugar un Foro en el cual se debatirán los principales conceptos y aplicaciones de las teorías mencionadas.

Comité Científico Internacional

- A. Pérez Perdomo. Universidad de La Habana (Cuba)

- C. Carreras Béjar. UNED (España)
- C. Mora Ley. IPN (México)
- E. Moltó Gil. Universidad Pedagógica (Cuba)
- F. Herrmann. Universidad Karlsruhe (Alemania)
- J. Fuentes Betancourt. Universidad de La Habana (Cuba)
- J. Granados Samaniego, UAM-A (México)
- M. Michelini. Universidad de Udine (Italia)
- M. Yuste Llandres. UNED (España)
- N. Arias Ávila. Universidad Distrital de Bogotá (Colombia)
- O. Calzadilla Amaya. Universidad de La Habana (Cuba)
- S. Aguilera Morales. Universidad Católica del Norte. Antofagasta (Chile)
- V. Tricio Gómez. Universidad de Burgos (España)

Temas a tratar en el Taller

1. Experiencias Actuales en la Enseñanza de la Termodinámica.
2. La Física de la Década para la Sostenibilidad y el Desarrollo Sostenible. Energías y Fronteras de la Física.
3. Potencialidades de las TIC's en el Aprendizaje de la Física.
4. Experiencias en el Proceso de Enseñanza-Aprendizaje en las Carreras de Física.
5. El Papel de la Enseñanza Experimental en el Aprendizaje de la Física.
6. La Enseñanza de la Física en la Formación de Profesionales de otras Especialidades.
7. Vías No Formales de Enseñanza de la Física.

Conferencistas Invitados

Prof. Friedrich Herrmann. Universidad Karlsruhe, Alemania. **Confirmado.**

Prof. Marisa Michelini. Universidad de Udine, Italia. **Confirmada.**

Prof. César Mora. IPN, México. **Confirmado.**

Prof. Oscar Álvarez Pomares. Academia de Ciencias de Cuba. **Confirmado**

Prof. Hans Fuchs. Zurich High School, Suiza. **Confirmado**

Prof. Miguel Santamaría. Universidad Nacional de Educación a Distancia, España. **Por confirmar**

Prof. Paloma Fernández Sánchez. Universidad Complutense de Madrid, España. **Por confirmar**

Prof. Cristóbal Fernández Pineda. Universidad Complutense de Madrid, España. **Confirmado**

Prof. Carmen Carreras Béjar. Universidad Nacional de Educación a Distancia. España. **Confirmada**

Mesas Redondas, **se organizarán dos mesas con la participación de especialistas, los temas propuestos son:**

- Futuro de la Profesión de Física y los Planes de Estudio. El Espacio Europeo de Educación Superior y algunas experiencias latinoamericanas.
- Laboratorios Virtuales.

Sesionarán los siguientes grupos de trabajo

- **Foro: Nueva representación de la Termodinámica.** Coordinador: Prof. Nelson Arias Ávila. Universidad Distrital de Bogotá. Colombia.

Mayor información al respecto en:

<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/aktuell/tibero-foro09.html>

- **Energía, Medio Ambiente y Sostenibilidad.** Coordinadora: Profa. Verónica Tricio Gómez. Universidad de Burgos, España.
- **Uso de las TIC en la Enseñanza.** Coordinador: Prof. Juan Fuentes Betancourt. Universidad de La Habana, Cuba.

Opiniones sobre el funcionamiento de los grupos a la dirección: tibero@fisica.uh.cu.

Para información sobre el evento puede contactar a:

En Cuba

Prof. Octavio Calzadilla Amaya
Facultad de Física
Universidad de La Habana
10400, Ciudad de La Habana, Cuba
Teléfono: 537- 878 8956
E-mail: calza@fisica.uh.cu

En España

Prof. Manuel Yuste Llandres
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional de Educación a Distancia
Teléfono: 0034 91 398 7172
Fax:
E-mail: myuste@ccia.uned.es

Prof. Verónica Tricio Gómez.
Facultad de Ciencias Departamento de Física
Universidad de Burgos
Plaza Misael Bañuelos s/n 09001
Burgos, España
Teléfono: 0034 94 725 9527
Fax: 0034947258831
E-mail: vtricio@ubu.es

Inscripciones

La cuota de inscripción será de 120.00 CUC que serán abonados el primer día del evento. La inscripción da derecho a las actividades del Taller y a las Actas del mismo.

Hospedaje

Departamento de Atención a Eventos de la Universidad de La Habana:

Isabel Milán: imilan@universit.urh.cu
eventos@universit.urh.cu

Teléfono: 537-870-4667

Presentación de trabajos.

Los participantes podrán presentar sus trabajos en exposiciones orales y carteles. Las exposiciones orales deben ajustarse a 10 minutos de presentación y 5 de discusión. Para los carteles se dispone un área de 1,00 x 1,00 m².

Fechas importantes:

Envío de un resumen de una cuartilla antes del 15 de noviembre del 2008.

Ficha de preinscripción, antes del 15 de diciembre del 2008.

Envío de los extensos, antes del 15 de diciembre del 2008

Celebración del Evento del 26 al 30 de enero del 2009

Los trabajos pueden ser enviados al buzón: tibero@fisica.uh.cu

Las normas para la escritura de los resúmenes:

<http://www.uh.cu/eventos/TiberoV/resu.htm>

Las normas para la escritura de los extensos se pueden ver en la página WEB de la Revista Cubana de Física:

<http://www.fisica.uh.cu/biblioteca/revcubfi/index.htm>

Más información en:

<http://www.uh.cu/eventos/TiberoV/index.htm>