

ISSN 1870-9095

EDVCATIO PHYSICORVM



LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION

www.journal.lapen.org.mx

Volume I

Number 1

September 2007



A publication sponsored by Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional and the Latin American Physics Education Network



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

Carl Wenning, Illinois State University (USA)

Diane Grayson, Andromeda Science Education (South Africa)

David Sokoloff, University of Oregon (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)

Marisa Micheli, University of Udine (Italy)

Marco Antonio Moreira, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brazil)

Minela 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)

Vivien Talisayon, University of the Philippines (Philippines)

Zdenek Kluber, Technical University (Czech Republic)

EDITORIAL BOARD

Amadeo Sosa, Ministerio de Educación y Cultura Montevideo (Uruguay)

Carola Graziosi, APFA (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,

Sociedad Dominicana de Física (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)

Es un placer presentar a ustedes una nueva revista electrónica internacional, con arbitraje por iguales dedicada a la investigación sobre la enseñanza y aprendizaje de la física, y temas relacionados. La idea de la creación de la revista *Latin-American Journal of Physics Education*, surgió en el Año Mundial de la Física durante la *Reunión Internacional sobre Enseñanza de la Física y la Especialización de Profesores (RIEFEP)* celebrada del 8 al 11 de noviembre de 2005, en la ciudad de Matanzas, Cuba. Finalmente, mediante el apoyo del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional y de la Red Latinoamericana de Física Educativa (LAPEN), surge este primer número que incluye artículos de investigación y revisiones de conceptos de física para la enseñanza en diversos niveles educativos, abarcando desde niveles elementales hasta el posgrado. Ahora, lo que sigue será mantener una publicación constante de libre acceso y buscando contribuciones originales de gran calidad, así como realizar la debida difusión entre los docentes de física de nuestra región hasta llegar a indexar la revista en las mejores bases de datos. Es importante señalar que gracias al apoyo y esfuerzo de varios colegas en el mundo ha sido posible llegar hasta este nacimiento. Se agradece la gran disposición de colaboración de los miembros del comité editorial y del comité consultivo internacional, así como el apoyo de la Comisión Internacional de Educación en Física (ICPE) de la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada (IUPAP), y claro está de los autores de este primer número histórico y a sus futuros lectores. *¡Les invitamos a sumarse a este esfuerzo para mejorar la enseñanza y el aprendizaje de la física en nuestras escuelas!*

Cesar Mora
Editor en Jefe

Circuit happenings



Paul G. Hewitt

City College of San Francisco, San Francisco, CA 94112, USA.

E-mail: PGHewitt@aol.com

(Received 6 August 2007; accepted 23 August 2007)

Abstract

Much of the confusion in electricity is a failure to correctly distinguish between the concepts of voltage, current, energy, power, or a combination of these concepts. By carefully examining what happens in simple circuits, perhaps confusion can be minimized.

Key words: Physics Education, electric circuits.

Resumen

Mucha de la confusión en electricidad es debida a la mala distinción entre los conceptos de voltaje, corriente, energía, potencia, o una combinación de estos conceptos. Mediante una revisión cuidadosa sobre qué sucede en circuitos sencillos, la confusión quizás pueda ser minimizada.

Palabras clave: Física educativa, circuitos eléctricos.

PACS: 01.40.-d, 01.40.Fk, 01.40.Gm, 01.40.Jp.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Figure 1 shows a very simple circuit consisting of a battery and a bulb. The battery is analogous to a water pump that produces sustained water pressure in a pipe or system of pipes. The battery produces an *electric pressure* called *voltage*, that energizes the bulb. The energy is supplied through an *electric field* that permeates the circuit at nearly the speed of light. So for practical purposes, when a switch completing a circuit is closed, voltage across the circuit occurs instantaneously. Similar to a bridge across a river that connects opposite shores, voltage is established *across* the opposite terminals of the battery and *across* the circuit [1].

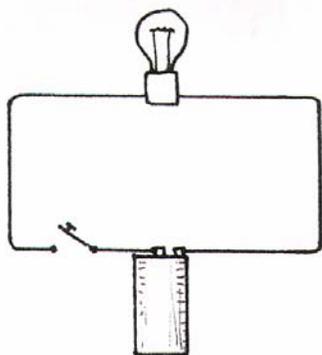


FIGURE 1. Simple electric circuit, a battery and a bulb.

It is important to note that charge flows though *all* parts of the circuit, including the battery itself. Like voltage, current is established in the circuit at nearly the speed of light—practically instantaneous. Loose electrons in the

conducting material are immediately set into motion when voltage is sensed. Although electrons flow in the battery and through the circuit and then through the battery again where they are re-energized, it is a mistake to think they originate in the battery. Free charged particles such as electrons are in every part of any conducting material, and all move at the instant the electric switch is closed. They move in unison, all at once, similar to how the command "forward march" makes each member of a marching band step at the same time. Water provides another analogy: when you turn on your kitchen faucet, water flows through the connecting pipe. The water that fills your glass was already in the pipe, under pressure, and may have left the reservoir weeks ago! Likewise, the electrons that flow in the current through the light bulb are already present in the filament before and during turning on the switch. (When current is alternating, ac, the electrons do not flow through the filament, but are centered in one place as they vibrate to and for 60 times each second. Most of the electrons in the filament of an old light bulb were there when the bulb was first manufactured. In fact, they were in the material making up the filament *before* the bulb was manufactured!) Unlike water pipes that require you to supply water, electric wires are "pipes" that contain their own "water." Electrons are already in the wires of an electric circuit. A battery supplies them with energy. The life of a battery depends on the length of time it shares its chemical energy with bulbs or other circuit devices. Like water pipes that become clogged with overuse and time, batteries build up resistance that further shortens their useful lives.

II. CIRCUITS CONSIDERATIONS

Let's assume the battery supplies 6 volts to the circuit. A 6-volt pressure means that during each second 6 joules of energy from the battery is delivered to each coulomb of charge comprising the current. If the resistance of the bulb is 1 ohm, then in accord with Ohm's law, the flow of charge—the *current*—is 6 amperes ($V/R = 6 \text{ V}/1 \Omega = 6$ amps). Six coulombs of charge flow through the circuit each second. The more current in a bulb, the brighter it glows. Remember that whereas voltage is established *across* a circuit, charge flows *through* a circuit.

Energy is delivered to and dissipated at locations of circuit *resistance*. In the single-bulb circuit, most all the resistance is in the filament of the bulb, where energy is converted to heat and light. The resistance offered by the connecting wires and the battery interior are small enough to neglect compared with the bulb's resistance. For simplicity, we therefore ignore all resistance in the circuit except that of the bulb.

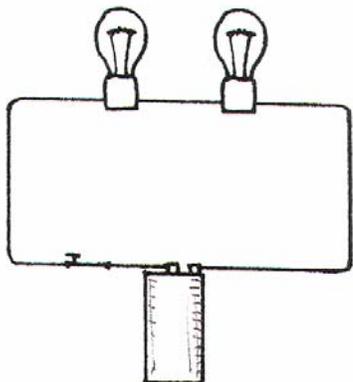


FIGURE 2. Simple series electric circuit, a battery and two bulbs.

What happens in the circuit when we add another identical bulb in series, as shown in Figure 2? Now the circuit has twice as much resistance. The voltage is the same because the battery is the same, and in accord with Ohm's law, twice the resistance for the same voltage means half as much current. So 3 amps flow in each bulb (and in every part of the circuit). In which bulb does the charge first flow? The answer is, both at once. It makes no difference as to which bulb is closer to whatever terminal of the battery. Current is established in all parts of the circuit instantaneously [2].

The 6 volts across the circuit divides among the two bulbs. Since the bulb resistances are the same, 3 volts are impressed across each bulb. This checks with Ohm's law: ($3 \text{ V}/1 \Omega = 3$ amps. Or, for the overall circuit, ($6 \text{ V}/2 \Omega = 3$ amps. So we see that current in the circuit is less and the bulbs are dimmer than the single bulb of the circuit in Figure 1.

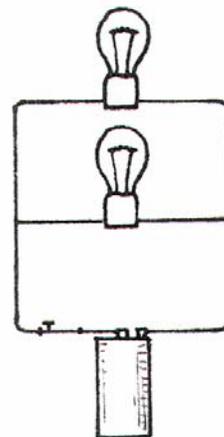


FIGURE 3. Simple parallel electric circuit, a battery and two bulbs.

When the two identical bulbs are connected in parallel, Figure 3, voltage does not divide among them. Think of the two branches as two parallel bridges across the same river. Each bulb is still energized with the full 6 volts, the current in each is still 6 amps, and each bulb glows with the same brightness of the lone bulb in Figure 1. A little thought will show that if the current in each bulb is 6 amps, the current in the battery must be 12 amps. In accord with Ohm's law, the battery supplies twice the current to the circuit because the *equivalent resistance* of the circuit is half that of Figure 1. Similar to an increased number of lanes for toll booths on a highway, more branches in a parallel circuit reduce resistance and allow a greater flow.

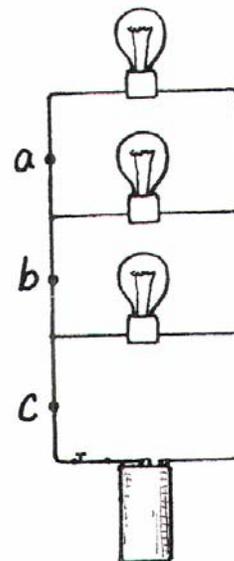


FIGURE 4. Simple parallel electric circuit, a battery and three bulbs.

Adding still another identical bulb in parallel, Figure 4, further reduces the overall circuit resistance, resulting in increased total current. Each bulb draws 6 amps, so the current supplied by the battery (and the current *in* the battery) is 18 amps. This is consistent with Ohm's law; for the same voltage, one-third the resistance results in three times the current. Consider points *a*, *b*, and *c*, in Figure 4.

A little thought will show that 6 amps flows through point *a*, 12 amps through point *b*, and 18 amps through point *c*. It's like buses leaving a terminal that branch into 3 streets. If 18 buses leave the terminal and branch equally along 3 streets, then 6 buses occupy a street. How many return to the terminal? All 18. Likewise with electric current—6 amps in three bulbs means 18 amps in the battery. Can we continue adding bulbs in parallel indefinitely? The answer is no, because the current in the battery increases with each addition, eventually producing an internal-heating problem. Then the internal resistance of the battery is no longer small enough to be negligible.

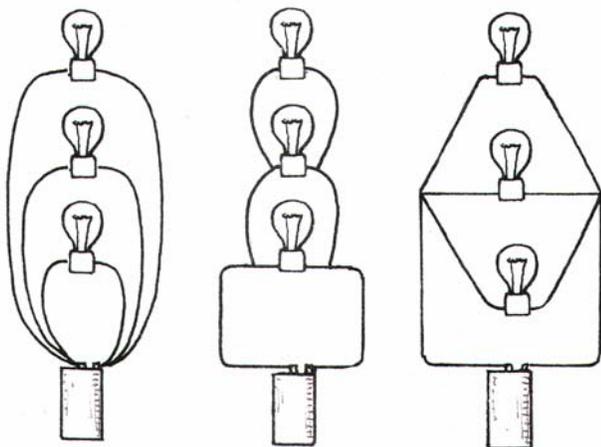


FIGURE 5. Same arrangement of a simple parallel electric circuit, a battery and three bulbs.

Notice that the three circuits in Figure 5 are all the same. Whatever the orientation of the wires, each bulb is connected across the full 6 volts of the battery. The battery "senses" the three circuits as the same [3].

III. ELECTRIC POWER

Consider power in the foregoing circuits. Power is energy dissipated per time. Which circuit dissipates the most energy per second? One way to look at it is to ask which circuit runs the battery down fastest? Another way is to ask which circuit is brightest when viewed from afar, so only the combined amount of light is seen [4]. The brightest light indicates the circuit with the greatest dissipation of power.

First consider the series circuits of Figures 1 and 2. Will light emitted by the two dim bulbs of Figure 2 combine to be as bright as the single bulb of Figure 1? We can let the equation for electrical power guide our thinking: Power = current \times voltage ($P = i \times V$). The

voltage source for both circuits is the same, but the current is less in the two-bulb circuit. So the power of the two-bulb circuit of Figure 2 is less—the combined brightness of the two bulbs is less than the brightness of the single bulb of Figure 1.

Let's ask the same question for the parallel circuits of Figures 3 and 4. The voltage for these circuits is the same, but again, the current is different. Current is greater in the battery when it lights three bulbs than two bulbs, so power dissipated by the battery is greater when lighting three bulbs. Brightness of the three lit bulbs is greater than the brightness of the two bulbs. Correspondingly, a battery that lights three bulbs in parallel will sooner exhaust its supply of chemical energy and go dead faster than when lighting fewer bulbs of the same resistance.

It is erroneous to say that current is "used up" in an electrical circuit. The quantity that is used up (consumed) in a circuit is not current, but *energy*. If current diminishes, it is because the energy per unit of charge (voltage) supplied by chemical action in the battery decreases. Energy is usually dissipated as heat.

IV CONCLUSIONS

In summary, we distinguish between *voltage* and *current*. A battery imparts a voltage across a circuit, producing a current that depends on battery voltage and on the resistance of the circuit. Total current in the circuit is also the current in the battery. In a series circuit, current in every part of the circuit is the same. In a parallel circuit, the sum of the currents in the parallel branches equals the current in the battery. We also distinguish between *energy* and *power*. Electric energy in the bulbs or other devices is energy transformed from chemical energy in the battery. When the supply of energy runs its course, the battery must be recharged or it goes flat—dead. The rate at which electric energy dissipates is power. A powerful battery transforms chemical energy faster than a weak battery.

REFERENCES

- [1] Grayson, D. J., *Concept substitution: A teaching strategy for helping students disentangle related physics concepts*. Am. J. Phys. **72**, 1126 - 1133 (2004).
- [2] Fredette, N. and Lochhead, J., *Student conceptions of simple electric circuits*, Phys. Teach. **19**, 194-198 (1980).
- [3] Fredette, N., Clement, J. and Coll, J., *Student misconceptions of an electric circuit: What do they mean?*, Sci. Teach. **10**, 280-285 (1981).
- [4] Livelybrooks, D., *"Feel" the Difference Between Series and Parallel Circuits*, Phys. Teach. **41**, 102 (2003).

Problem solving and writing I: The point of view of physics



Jorge Barojas^{1,2}

¹*Department of Physics, School of Sciences. UNAM. Circuito Exterior, Ciudad Universitaria. A.P. 70542. C.P. 04510. México, D.F., México.*

²*Member of the Seminar on Hermeneutics, at the Institute of Research in Philology, UNAM.*

E-mail: jorgebarojas@yahoo.com

(Received 6 July 2007; accepted 12 September 2007)

Abstract

In this first paper, of a series of two, we relate the skills of problem solving and writing referring to two types of systems, those called physical and those concerning human learning. Then, the notion of semiotic representation registers is connected to the building of learning cycles. All these elements serve to propose a protocol for problem solving that contains four steps of cognitive nature and another one that is metacognitive. This protocol is applied by interpreting in detail the steps of the solution of a physics problem from the point of view of a physicist. Finally, some implications on science and technology education are discussed.

Key words: Problem solving, Problem-based learning, languages in problem solving.

Resumen

En este primer trabajo, de una serie de dos, relacionamos las habilidades de resolver problemas y de redactar por escrito su solución, refiriéndonos a dos tipos de sistemas, los denominados físicos y los de aprendizaje humano. Luego, conectamos la noción de registro de representación semiótica con la construcción de ciclos de aprendizaje. Esto nos permite proponer un protocolo de solución de problemas que comprende cuatro etapas de naturaleza cognitiva y una metacognitiva. La aplicación de este protocolo se ejemplifica interpretando las distintas etapas de la solución de un problema de física, resuelto desde el punto de vista de un físico. Concluimos con algunas implicaciones en educación en ciencia y tecnología.

Palabras clave: Resolución de problemas, aprendizaje basado en problemas, lenguaje en la solución de problemas.

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

ISSN 1870-9095

I. PROBLEM SOLVING AND WRITING AS CREATIVE DESIGNS FOR LEARNING PURPOSES

Educational programs try to build knowledge and also induce and monitor the development of skills, attitudes and values. In order to learn something we explore, provoke and transfer understanding concerning different types of systems. Wilson [1] considers four types of systems: natural or physical, artificially designed, for human activities, and socio-cultural. The first and second ones will be denoted as physical systems and the third and fourth ones as human learning systems [2]. In physical systems the components and interactions are rather well described in terms of organized structures, the parameters defining the system are known or can be determined with good precision because calculations and experiments can be performed, and we can estimate when the solutions have been obtained and with what kind of accuracy.

Problems in systems connected with education, training, production and management can not be treated as physical problems even if they concern physical situations. We will refer to them as human learning systems if the main aim is to learn how these systems work in order to improve their functioning by looking for the solution of specific problems. They imply planning, development and evaluation of different sorts of transformation activities in human organizations where learning communities are in operation. In these cases the practical solutions are the best possible ones under certain given conditions although it is understood that answers are rather rough and might change depending on the evolution of the context. Human learning systems can be understood in a cognitive space defined by the intersection of two intellectual domains: the building of knowledge and the organization of learning.

Problem solving and writing are different in academic and industrial contexts depending whether they concern physical systems or human learning systems. In any case,

the most important outcomes are documents containing plans, procedures, results, recommendations... and these require an appropriate shaping of written texts that convey messages. Those messages involve chains of associations explicitly formulated and organized into data, information or knowledge that must be communicated and interpreted to produce some learning and understanding.

Problem solving in physical systems uses expressions written in natural languages as well as a great variety of symbolic representations; for instance, curves, graphs, diagrams, pictures, tables, equations, schemes, models, codes and even data coming out from experiments, computer simulations and calculations, as well as multimedia applications. Problem solving in human learning systems is much more qualitative in its descriptions and representations.

Depending on the type of system, the final written documents are presented in different forms and styles [3].

While solutions to problems in science are communicated in straightforward, precise and rigorous forms, narratives concerning interpretations of those solutions take advantage of the suggestive power of words and rather seldom use other forms of representations different from texts. Nevertheless, as any craft to be learned, problem solving and writing require practice as well as reflection on the experiences and works of the masters in the field. Also we do understand much better how children learn, what difficulties they have, and how they approach problem solving and writing [4,5].

Here we will refer neither to how to write nor to how to get training in problem solving. We are not concerned with the acquisition of the craftsmanship required to become a writer or a problem solver. We focus on the connections among writing, problem solving and creative design, and on some of their implications from the perspective of science and Hermeneutics: the study and interpretation of texts [6] (see Fig. 1).

- In the past writing was considered as a problem to be solved with three elements: an initial state to start with, a final state to which one has to arrive, and a procedure to go from one state to the other.
- **Assume that problem solving is like writing**, in the sense that it implies two creative processes: the design of a communication and its interpretation.
- Then, writing the solution of a problem means to communicate and interpret the narrative of the reasoning process leading to the solution.

Figure 1. Relationships among writing, problem solving and creative design.

II. LANGUAGES IN PROBLEM SOLVING

Here we consider that the solver of a science and technology problem behaves as a creative thinker with expertise in three types of languages: the natural language of everyday talking, the technical language of scientific disciplines with appropriate definitions of abstract terms and specific meanings according to rather well prescribed conditions of use, and, quite often the formal language of mathematics in which complex symbols usually represent difficult and complicated ideas that follow certain rules of operation under precise conceptual frameworks. The solver designs the scaffolding story of the solution and builds a discourse like a language producer managing linguistic resources (vocabulary, styles, structures...). In this sense, problem solvers behave as writers creating documents although very often they produce texts containing combinations of the three previously considered languages: natural, technical and mathematical.

Problem solvers usually follow certain procedures in order to generate ideas, create plans, draft texts, and review their works. In what follows we shall consider that problem solver prepare their written documents by working in two dimensions: (1) the cognitive dimension where the conceptual design used to solve the problem is formulated, applied and communicated, and (2) the

metacognitive dimension where the author reflects on previous thoughts and actions as well as on their consequences.

A. Communication languages and semiotic representation registers.

Teaching and learning take place through written and verbal communications. Furthermore, the learning process very often starts and ends by using natural languages although in more advanced stages of science and engineering learning, technical and formal languages are used in all the documents written by authors who are quite familiar with such languages. For instance, written forms are usually employed to convey definitions, declare properties or present methods of solution assuming that the readers can interpret those texts. However, discussions, questions and answers involve written and verbal communications, but discursive practices concentrate on verbal expressions that leave no printed record of its existence. Sometimes we just observe their consequences leaving the door open to different interpretations.

Keeping track and understanding the mental representations that are conveyed through communication processes are ways of visualizing how discourses are

organized and delivered under learning conditions. In what follows we comment more on the idea of representation registers and then connect the use of different languages to the cognitive activities employed to operate with those registers in the process of problem solving.

According to Duval [7], a semiotic representation register is a particular form of a mental register composed by any set of signs or symbols that describes the objects or events defining a given system. It serves to make explicit and to communicate to others the characteristic qualities of those objects. In mathematics we can identify semiotic representation registers of different nature: symbolic, algebraic, geometric...; therefore, conceptualization of mathematical ideas is the consequence of articulating representations belonging to different registers.

The generation of semiotic representations provides a means of tracking the corresponding cognitive activity that is responsible for its appearance because such representations are expressed in language forms, although different interpretations might be provoked. In many aspects, these characteristics of learning mathematics can be applied to devise practical applications of problem solving in natural sciences such as chemistry and physics as well as in engineering. Without any intention of proving it, we propose that to communicate the solution of a problem is equivalent to describing a discursive practice undertaken through cognitive activities involving semiotic representation registers.

Duval distinguishes three conceptual activities serving to handle semiotic representation registers [7]: formation, treatment and conversion. Formation activity is accomplished when a register exists where certain signs or symbols are used to describe an object and therefore that such description can be operated and modified. In the treatment activity there are explicit rules indicating how and when those symbols must be operated. Finally, the conversion activity implies the existence of certain signs that can be identified in two different representation registers and a transition occurs between them, although there might be no explicit rule controlling such an articulated transformation.

B. Learning cycles and a problem solving protocol

The semiotic representation registers that go through the conceptual activities of formation, treatment and conversion integrate learning cycles [8] which involve four stages (S) to be worked out in the context of problem solving in a physical system:

(S₁) everyday natural language is introduced by means of words in order to make interpretations or to establish consequences about the statement of the problem,

(S₂) the learners' worldviews are presented in the technical language of a scientific or technological discipline by analyzing a problematic situation in abstract terms serving to describe possible scenarios that might lead to the solution of the problem,

(S₃) theoretical model structures are applied through the use of formal languages that lead to the presentation of a design of the solution, and

(S₄) changes among different representation registers expressed in any of the previous languages are produced when descriptions, calculations and predictions serve to implement the solution of the problem.

The transitions between these four stages define the conceptual activities that involve semiotic representation registers: formation corresponds to S₁ going into S₂, treatment means S₂ going into S₃ and conversion refers to S₃ going into S₄. Associated to these steps S₁ to S₄ we propose a problem solving protocol called TADIR, as a way of traveling through the learning cycle in which semiotic representation registers are formulated, treated and converted [9]. In this way the solver of a problem communicates thoughts, manipulates symbols, goes through representations by using different languages, and eventually makes some calculations or performs experiments to get and interpret the solution. The name of this protocol, TADIR, comes from the initials of the steps summarized in Table I.

Table I. Steps of the TADIR problem solving protocol applied to a physical system

STEPS	DESCRIPTION
T: Translation	If the statement describing the problem situation is formulated in everyday natural language, then such a statement needs to be reformulated in the technical language of a scientific or technological discipline by using abstract notions and conceptual relationships. In this reformulation the objects and events characterizing the physical system under consideration are identified.
A: Analysis	All the assumptions required to interpret the problematic situation concerning the physical system and to build the solution of the problem are explicitly described by taking into account models and theories of relevance. Although this description is mainly made in terms of a technical language it also might imply the use of formal languages. The general characteristics of possible answers are also considered.

D: Design	A scheme or conceptual diagram showing the line of reasoning expected to lead toward the solution is proposed mostly in terms of a formal language. The main components of this scheme can be related to the following types of knowledge: (1) the basic concepts serving to define and solve the problem, (2) the conceptual relationships required to describe the conditions defining the system, and (3) the ancillary calculations useful in answering the questions asked in the statement of the problem. A convenient procedure to arrive at such a scheme consists of preparing a narrative of the solution by organizing a short discourse in a verbal form describing its components then writing it in natural and technical languages and finally making a diagrammatic scheme that represents how it works.
I: Implementation	Appropriate criteria, definitions, information and procedures are applied in order to follow the Design, and if required, experiments and calculations are performed to obtain the solution. By devising the procedure to get the solution of the problem, quite often the formal path depicted in the Design step is expressed in natural language, but enriched by the transitions already accomplished among the natural, technical and formal languages.
R: Review	All the previous steps are considered again by applying metacognitive procedures in order to detect possible conceptual errors, false or unnecessary assumptions, improper reasoning, wrong calculations, results obtained under different conditions, and confrontation with predicted answers.

III. THE POINT OF VIEW OF A PHYSICIST SOLVING A PHYSICS PROBLEM

The problem to be solved is the following: *What fraction of the total volume of an iceberg remains over the surface*

of water? We begin by presenting in Fig. 2 a typical answer obtained just by playing the game of plugging equations and numbers, as in high school physics lectures or textbooks.

(I)	<u>Basic equations</u>	
	Weight of the iceberg:	$W = (\rho_I V)g$ (1)
	Buoyant force:	$B = (\rho_W V_s)g$ (2)
	Total Volume:	$V = V_f + V_s$ (3)
	Buoyancy condition	$W = B$ (4)
(II)	<u>Algebraic and arithmetic operations</u>	
	$\rho_I(V_f + V_s) = \rho_W V_s$	(5)
	$V_f / V_s = (\rho_W - \rho_I) / \rho_I$	(6)
	$V_f / V_s = (1000 - 917) / 917 = 83 / 917 = 0.0905$	(7)
	$V_f / V_s \approx 9 \%$	(8)

Figure 2. A formal solution to the iceberg buoyancy problem

For anyone foreign to physics this text is written in a strange language also it is full of nonsense if you do not understand and know how to apply Archimedes’ Principle. In what follows we shall see how the TADIR protocol makes these issues clearer.

A. The cognitive dimension of the solution of a physics problem

TRANSLATION: using the language of physics the text of the problem is interpreted and the objects and events that define its context are described.

The physical system is shown in Fig. 3. It is composed by one *object* (the iceberg) surrounded by air and water, all of them under the action of the force of gravity. The *event* under consideration is the floating of the iceberg.

The physical situation is then described in the following terms:

The iceberg is a physical system characterized by a mass *M* and a volume *V*.

There is a part of the iceberg that is over the water surface and floats (*V_f*), and another part that is surrounded by water and sinks (*V_s*).

Two forces act on the iceberg: the downward weight (**W**) applied at the center of gravity, and the upward buoyant force (**B**) applied at the center of buoyancy.

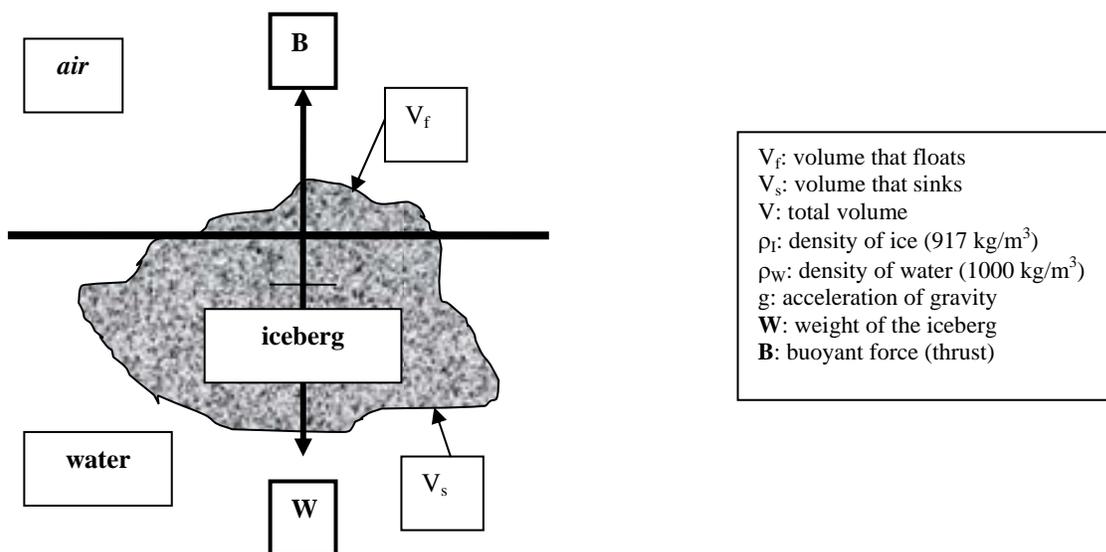


Figure 3. Forces, volumes and notation for the iceberg problem

ANALYSIS: assumptions are made explicit by using models and theories of importance in the discipline and an expected answer is suggested.

A₁: The total volume of the iceberg is constant: $V = V_f + V_s$, because the volumes of the sunk part (V_s) and the floating part (V_f) are constant. We consider that the ice does not melt and there are no changes in the meteorological conditions.

A₂: The densities of ice (ρ_I) and water (ρ_W) are constant; both components of the physical system are homogeneous and do not suffer any transformation.

A₃: We do not take into account the composition of seawater and consider $\rho_W = 1000 \text{ kg/m}^3$ instead of $\rho_{SW} = 1024 \text{ kg/m}^3$, where $_{SW}$ means salted water.

A₄: The iceberg floats on water in a region where the surface is flat compared to the curvature of Earth; therefore, the acceleration of gravity (g) is constant.

A₅: The buoyancy of the iceberg is due to the static equilibrium of two forces: the weight of the iceberg \mathbf{W} and the buoyant force \mathbf{B} produced by the water surrounding the iceberg. This condition implies that the magnitudes of these vectors are equal: $W = B$, where $W = |\mathbf{W}|$ and $B = |\mathbf{B}|$.

A₆: The center of buoyancy and the center of gravity are along the same vertical line; there is no tilting and no restoration torque needs to be applied to maintain the iceberg in the same orientation with respect to that vertical line.

A₇: The conditions for the application of Archimedes' Principle are satisfied: "a body wholly or partially immersed in a fluid will be buoyed up by a thrust force (\mathbf{B}) equal to the weight of the fluid (V_s) that it displaces", such that $B = (\rho_W V_s)g$.

Expected answer: the problem asks for the fraction of the total volume (V) that floats (V_f), but available data only allow us to express the ratio between the volumes V_f/V_s . This ratio is a number without dimensions and is usually given as a percentage.

DESIGN: a diagram describing the main components of the solution is considered.

The Design step, like flux diagrams in programming and conceptual maps in cognitive psychology only provide rough approximations. They are not unique diagrammatic representations of possible paths towards the solution of the problem. The solution to this problem is given in Figs. 4 and 5. The complete design of the solution integrates the three kinds of knowledge used to solve the problem as indicated in Fig. 4 (basic ideas, conceptual relationships and ancillary calculations).

The path describing one possible solution is depicted graphically by the Design in Fig. 5, where assumptions A1 to A7 are explicitly taken into account.

IMPLEMENTATION: by following the design the answer to the problem is found (see Fig. 6).

Although Figs. 2 and 6 contain the same number of equations (1) to (8), Fig. 6 comes after the application of the first three steps of TADIR: Translation (Fig. 3), Analysis (assumptions A₁ to A₇ and description of the expected answer) and Design (Figs. 4 and 5). This shows why and how the Implementation step requires the previous three steps (TAD) as a sort of a prerequisite to get the solution.

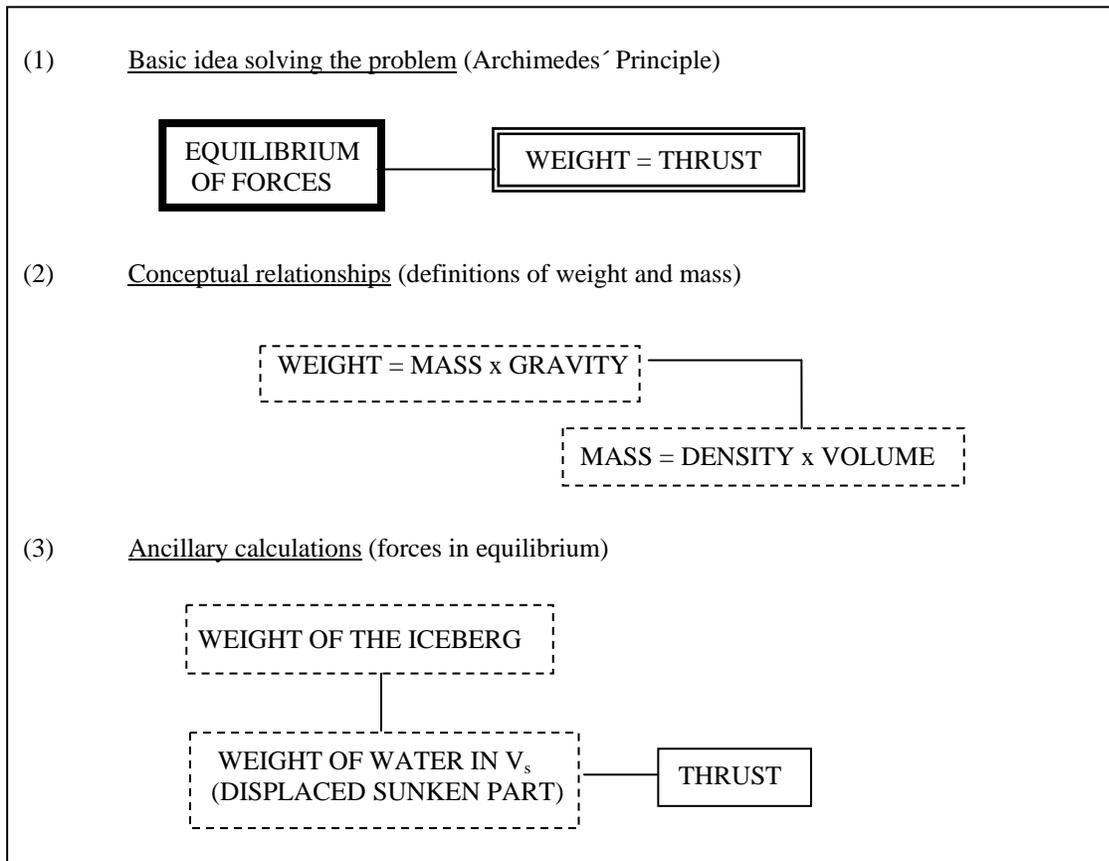


Figure 4. Elements of the design for the solution of the buoyancy problem.

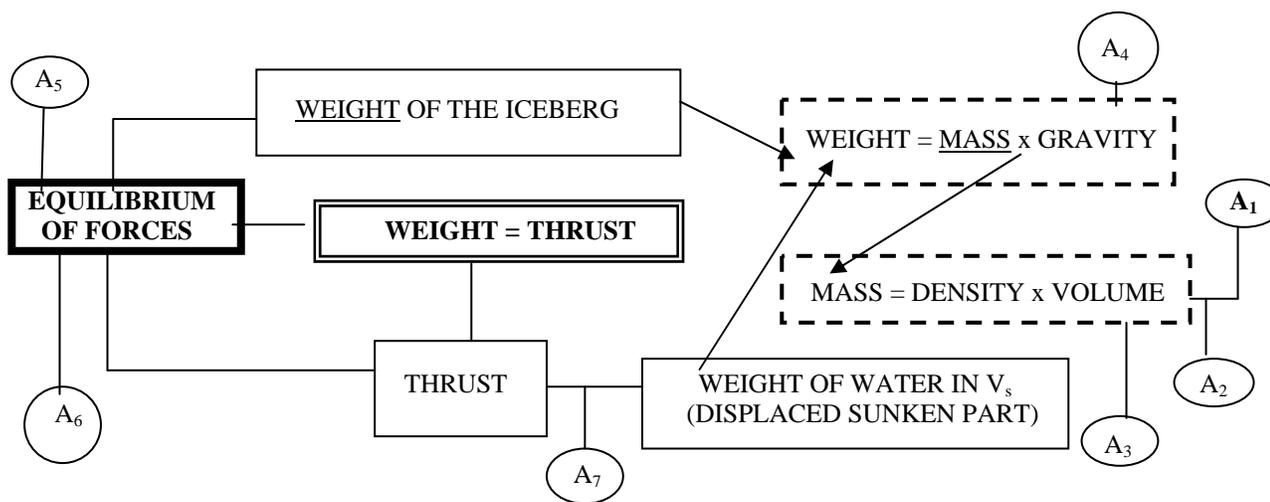


Figure 5. Design of the complete solution of the buoyancy problem.

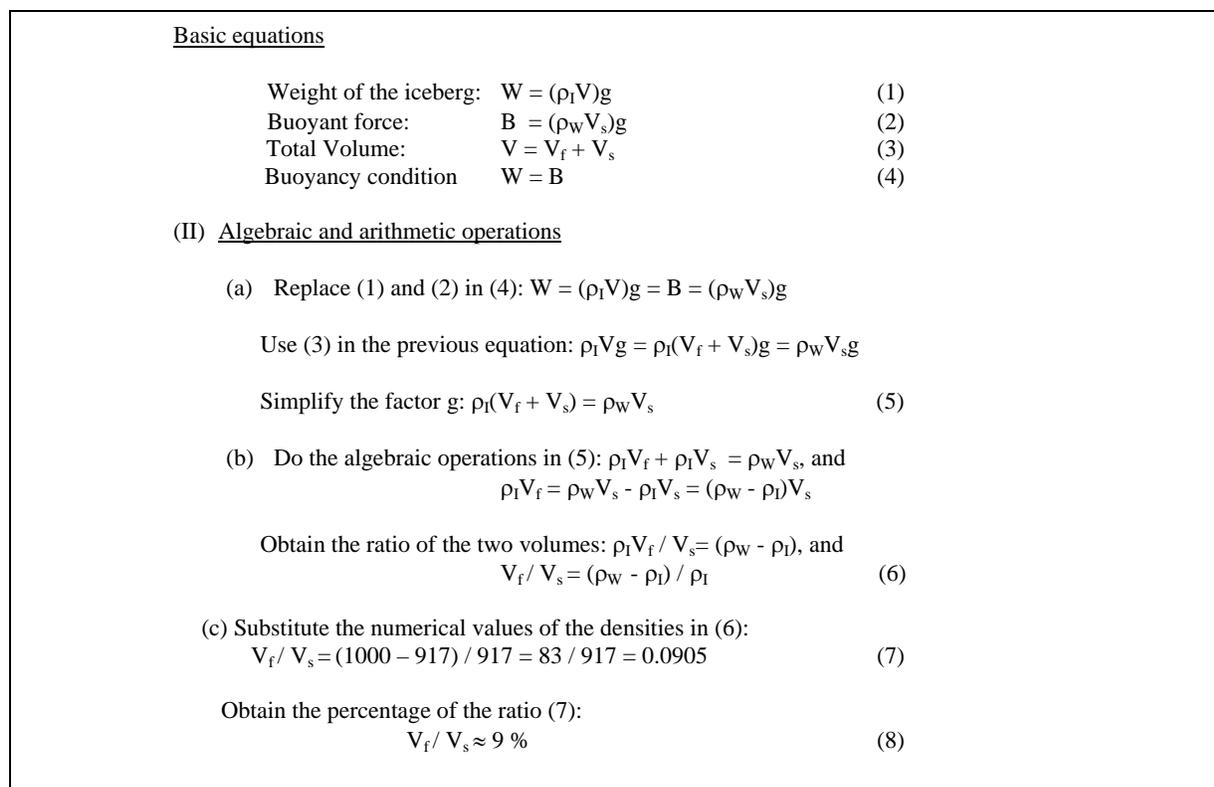


Figure 6. Details of the complete solution of the buoyancy problem.

Equations (1) to (8) in Fig. 6 correspond to processes of different nature: while process I (Basic equations) deal with physical concepts and definitions belonging to the codified knowledge of the discipline, process II (Algebraic and arithmetic operations) implies routine work required for handling the equations and getting the solution. We could think that the problem solving process is already finished because the result obtained in equation (8) answers the question addressed by the problem. However, the TADIR methodology includes one last step (the Review: R) associated with metacognition [10].

B. The metacognitive dimension of the solution of a physics problem.

The metacognitive dimension of TADIR corresponds to the Review step (R) and can be used as a test in two ways: (1) to scrutinize the practical scaffoldings applied for chaining ideas while unfolding the solution procedure, and (2) to examine how the readers understand the discourse showing how the solution was obtained. Both ways are quite related to the issue of interpretation of the text of the solution provided by the physicist because we can present the results of our reflections on what has been done in problem solving in many different ways.

This metacognitive step has four components, which are identified by a sub index indicating the capital letter of the previous four cognitive steps (TADI) to which it is

associated. In what follows we just present one of the many possibilities of interpreting this review step (R) for the buoyancy problem.

R_T: Inspect the original statement of the problem, examine if the elements given in the *Translation* serve to obtain correct answers to the problem, and check if the solution can be meaningfully interpreted in natural everyday language.

Going back to the statement of the problem we now judge if the answer given in equation (8) of Fig. 6 responds to what has been asked. This solution indicates that less than one tenth of the total volume of the iceberg is floating and nine tenths are under water. Unless we give the value of the total volume of the iceberg (V) we have no idea of the corresponding values of the volumes of the part of the iceberg that floats (V_f) and the one sunken (V_s); we are only able to calculate their ratio V_f/V_s.

We can regard other aspects of the result, such as order of magnitude, units, and values of certain quantities under limiting cases. For instance, we might wonder what happens in equation (6) when the densities of water and ice are equal (ρ_w = ρ_I), which implies that the ratio of volumes V_f/V_s = 0 and no part of the iceberg is floating (V_f = 0 and V_s = V). Using these values for the volumes in equations (1) and (2) we will find that again B = W, but in this case the buoyancy problem is meaningless.

R_A: Consider if all the assumptions made in the *Analysis* have been appropriately employed, look for the implications of modifying them or ponder the

consequences of introducing different ones. We might also think about any differences between the expected answer and the solution obtained after applying the first four steps of the protocol (TADI).

The first four assumptions ($A_1 - A_4$) refer to the interacting bodies: the iceberg, the air surrounding the floating part, the water surrounding the sunken part, and Earth (responsible for the gravitational attraction field due to which physical bodies have weight). The other assumptions ($A_5 - A_7$) deal with buoyancy conditions.

If assumptions A_1 and A_2 are not maintained, we must know the variations of volumes and densities. However, if in A_3 we take into account salted water instead of pure water ($\rho_w \rightarrow \rho_{sw} = 1024 \text{ kg/m}^3$), then the ratio of volumes will be different and in equation (6) we will obtain $V_f / V_s = (1024 - 917) / 917 = 107 / 917 = 0.1167$, which corresponds to a percentage $V_f / V_s \approx 12 \%$ instead of the 9 % obtained previously, meaning that the iceberg sinks more in pure water than in salted water.

Although the acceleration of gravity g does not appear in equation (6), the assumption A_4 is still applicable; under these conditions the direction of the force of gravity is always perpendicular to the surface of the iceberg. The curvature of Earth does not matter due to the relatively small size of the iceberg.

A treatment of the problem at the level of complexity here considered implies that assumptions A_5 and A_6 are not modified: the iceberg is in stable equilibrium because weight and thrust are equal in magnitude, opposite in direction and applied on the same vertical line. Also assumption A_7 is basic, because what this assumption means is that the conditions for applying Archimedes' Principle exist.

In this example we just applied Archimedes' Principle, we are not concerned with instruction procedures or learning activities designed to promote its understanding. This Principle is based on the fact that the buoyant force is produced by differences in pressure of the water surrounding the iceberg. As the pressure under water increases with depth, the pressure on the top of the part of the iceberg that sinks is lower compared to the pressure at the bottom of that same part. This is why the buoyant force goes up, against the weight that goes down.

R_D : Be critical about other paths or procedures applied in the *Design* in order to obtain the solution under two extreme conditions: (1) the conceptual structure of the Design remains the same although certain simplifications or more direct paths towards the solution are introduced or (2) something completely different is taken into account and a new Design is implemented for instance when the solution to a given problem is taken as a first level approach to solve a more difficult problem in which the previous physical system is just a part of a more complex system.

If assumptions A_5 and A_6 do not apply (the forces B and W are not on the same vertical line), then the left hand side of the Design in Fig. 5 must be modified. Usually the center of gravity where the weight W of the iceberg is applied does not change. This cannot be the case with the

center of buoyancy where thrust B is applied (the center of gravity of volume V_s when it is full of water).

If for any reason the center of buoyancy is on a line different from the vertical that goes through the center of gravity of the complete iceberg, then a torque is produced. Depending on the magnitude of this torque the iceberg might change its orientation, oscillate for a while and then recover its vertical equilibrium. It could also happen that the iceberg leans to one side, turns over and then sinks completely.

R_I : Check that all the mathematical operations required to obtain the solution are correct and that the *Implementation* has been done accurately and completely.

The review of this step relates to procedure II in Fig. 6 (Algebraic and arithmetic operations). Therefore, we expect possible modifications in the calculations only if one or more of the previous steps (Translation, Analysis and Design) are changed. However, under realistic conditions the problem is much more complex and will require the application of advanced knowledge in hydrostatics at the level of naval engineering. In such a case the interpretation will require the knowledge of a highly qualified expert.

IV. IMPLICATIONS IN SCIENCE AND TECHNOLOGY EDUCATION

In science and technology education, problem solvers and writers must attain productivity, functionality, ergonomics, and esthetics. Furthermore, we might request written products with the following qualities: scholar accuracy, technical soundness and pedagogical effectiveness [11]. Deliberate problem solving according to a given procedure, like TADIR or any other one, must neither obstruct creativity nor impede discoveries. What has been said of problem solving in Physics could be extended to other disciplines in natural science, mathematics and engineering.

For many centuries, communications were made from the mind of the author to the surface of printed pages in books and journals. Nowadays, mainly due to the progress in Information and Communication Technology (ICT), there is another surface: the computer screen [12,13]. Under these conditions, communications acquire the third dimension of electronic networks, the context where new and powerful scenarios for e-learning are available. The consequence is a kind of universal access to a broader and deeper universe that goes beyond the printed press [14,15,16].

It is in the previous contexts that the TADIR problem solving protocol is a useful instrument to interpret the solution of problems in physical systems. In the sequel of this paper (part II) we will see the solution of the buoyancy problem here considered but from the perspective of a writer. Also we will present the TADIR protocol from the perspective of Hermeneutics and apply it to a problem in a human learning system.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author acknowledges information coming from the research projects on mathematics education by Nahina Dehesa.

REFERENCES

- [1] Wilson, B. (*Systems: Concepts, Methodologies and Applications*, John Wiley, New York, 1990).
- [2] Barojas, J., *Teacher training as collaborative problem solving*, *Educational Technology and Society* **6**, 1-10 (2003).
- [3] Sharples, M. (*How we write*, Routledge, London, 1992).
- [4] Karmiloff-Smith, A. (*Beyond Modularity: A Developmental Perspective on Cognitive Science*, MIT Press, Cambridge, 1992).
- [5] Driver, R., Guesne, N. and Tiberghien, A. (*Children's Ideas in Science*, Taylor and Francis, London, 1985).
- [6] Gadamer, H-G. (*Truth and Method*, Sheed and Ward, London, 1996).
- [7] Duval, R., *Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée (Registers of semiotic representations and cognitive functioning of thinking)*, *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives* **5**, IREM Strasbourg (1993).
- [8] Barojas, J. and Dehesa, N., *Mathematics for Social Scientists: Learning Cycles and Teaching Strategies*, *Industry and Higher Education* **15**, 269-277 (2001).
- [9] Barojas, J. and Pérez y Pérez, R., *Physics and Creativity: Problem Solving and Learning Contexts*, *Industry and Higher Education* **15**, 431-439 (2001).
- [10] Schoenfeld, A. (Learning to Think Mathematically: Problem Solving, Metacognition, and Sense Making in Mathematics, in Grouws, D. A. (Ed.), *Handbook of Research on Mathematics Teaching and Learning*, New York, 334-370, 1992).
- [11] Stephenson, R. S. (The Open Course Model: Collaborative development of Online Content, in Santana, G. A. and Uskov, V. (Eds.) *Computers and Advanced Technology in Education*, IASTED ACTA Press, Zurich 150-153, 2002).
- [12] Jonassen, D., Peck, H. K. L. and Wilson, B. G. (*Learning with technology: A Constructivist Perspective*, Englewood Cliffs, Merrill-Prentice Hall, New Jersey, 1999).
- [13] Teasley, S. D. and Roschelle, J. (*Computers as cognitive tools*, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, 1993).
- [14] Forcier, R. C., (*The Computer as an Educational Tool: Productivity and Problem Solving*, Merrill - Prentice Hall, New Jersey, 1999).
- [15] Novak, G. M., Patterson, E. T. (Gavrin, A. G. and Christian, W., *Just in Time Teaching. Blending Active Learning with Web Technology*, Prentice Hall, New Jersey, 1999).
- [16] Linn, M.C. and Hsi, S. (*Computers, Teacher, Peers: Science learning partners*, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, 2000).

Periodic motions: How their period changes with amplitude of the oscillations and the friction?



H. G. Riveros and E. Cabrera Bravo

Instituto de Física-UNAM, Ciudad Universitaria, Apartado Postal 20-364, México 04510, D. F.

E-mail: riveros@fisica.unam.mx

(Received 4 August 2007; accepted 27 August 2007)

Abstract

The pendulum is a classical experiment, easy to perform and produces data with very simple equipment. The change in the period with the amplitude appears even with small amplitudes if you have some precision in the period. To measure amplitudes larger than 90° we need to change the cord for a rigid rod. We found that for a cylindrical magnet hanging horizontally in the Earth magnetic field, the movement equation is similar to that of a pendulum. We measured amplitudes and times so we can fit a numerical solution to the equation. The initial amplitude is near to 162° and we found that the change in the period comes mainly from the non-linear terms in the equation, and that the friction (either proportional to the angular velocity or its square) only reduces the amplitude with time. With periods from 9 to 4 seconds, the measurements with a protractor can be made manually for many oscillations. For the numerical calculations Δt needs to be 0.0001 seconds to conserve the energy.

Key words: Laboratory experiments and apparatus, Numerical simulation studies, Rotational dynamics.

Resumen

El péndulo es un experimento clásico, fácil de realizar y proporciona datos con equipo muy simple. El cambio en el período con la amplitud se nota aún con amplitudes pequeñas si se mide el período con cierta precisión. Medir amplitudes mayores de 90° requiere utilizar una barra rígida en lugar de una cuerda. Encontramos que para un imán cilíndrico colgado horizontalmente en el campo magnético terrestre, la ecuación de movimiento es similar a la de un péndulo. Medimos amplitudes y tiempos para ajustar una solución numérica. La amplitud inicial es cercana a 162° y encontramos que el cambio en el período proviene de la no-linealidad de la ecuación, y que la fricción (proporcional a la velocidad o a su cuadrado) solo cambia la amplitud con el tiempo. Con períodos de 9 a 4 segundos el medir con un transportador se puede hacer manualmente para muchas oscilaciones. Para el cálculo numérico se necesita que Δt sea 0.0001 segundos para que se conserve la energía.

Palabras clave: Aparatos y experimentos de laboratorio, estudios de simulación numérica, dinámica rotacional.

PACS: 01.50.Pa, 75.40.Mg, 45.20.d

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

The periodic motion exhibited by a simple pendulum is harmonic only for small angle oscillations [1]. Beyond this limit, the equation of motion is nonlinear. We use data from a very simple experiment, to illustrate how to solve numerically those nonlinear equations. Many of the problems to be solved by our students in real life required numerical solutions, so we need to teach them practical hints about the size of the required time interval or fitting parameters graphically. We found that the change in the period comes mainly from the non-linear terms in the equation, and that the friction (either proportional to the angular velocity or its square) only reduces the amplitude with time. We will mention some of the previous work on

the topic, and then the analytical solutions to the harmonic oscillator including a friction term proportional to the speed, the pendulum with a period amplitude dependent, the torsion pendulum with the same solution as the harmonic oscillator and a torsion pendulum made with a horizontal magnet in the Earth magnetic field. The measured data will come from this last system.

This paper is organized as follows. In Sect. II we present the basic theory of the harmonic oscillator, pendulum, torsion pendulum, and a magnet in a magnetic field. Also we describe our experimental setting and present some of our results. By using numerical methods in Sect. III we take into account the friction. Finally, in Sect. IV we discuss our main results.

II. THEORY

Although an integral expression exists for the period of the nonlinear pendulum, it is usually not discussed in introductory physics classes because it is not possible to evaluate the integral exactly in terms of elementary functions [2]. Simple approximate expression has been derived for the dependence of the period of a simple pendulum on the amplitude [3,4]. There are several measurements with enough precision to detect the change in the period with the amplitude [5,6], and with angular amplitudes [7,8] near 70°, even the Fourier transform has been fitted [9] and amplitudes near 160° has been measured [10] for a rigid rod pendulum. An oscillating magnet in the magnetic field of a coil has been measured [11] for a few oscillations.

A. Harmonic oscillator

The classical equation for a harmonic motion, a mass m supported by a spring of elastic constant k , is:

$$m d^2 x / dt^2 = -kx, \tag{1}$$

with a solution:

$$x = A \sin(\omega t + \beta), \tag{2}$$

where A is the amplitude of the periodic movement, the angular frequency $\omega = (k/m)^{1/2}$ and β the initial angular phase. The period $T = 2\pi(m/k)^{1/2}$ and amplitude A are constants. A more realistic model introduces a friction force proportional to the velocity (λv) so the equation is:

$$m d^2 x / dt^2 = -\lambda dx / dt - kx, \tag{3}$$

where λ is the friction coefficient. The analytical solution is:

$$x = A e^{-\gamma t} \sin(\omega' t + \beta), \tag{4}$$

where $\gamma = \lambda/2m$, so the equation predicts that the amplitude decays exponentially with the time and the angular frequency ω' is given by [1]:

$$\omega' = (\omega^2 - \gamma^2)^{1/2}, \tag{5}$$

where ω is the calculated frequency without friction.

The time constant $\tau = 1/\gamma$ measures how fast the amplitude decays, if $t = \tau$ the amplitude decays to $A/e = 0.37A$. If $\omega = 1$ and $\tau = 100$ s, then $\gamma = 0.01$ and we need to measure ω' with 5 digits to detect the change in the period. The decaying amplitude allows an easy measurement of the friction coefficient.

B. Pendulum

Applying Newton's Second Law to the movement of a pendulum on an inextensible cord, a punctual mass and without friction we obtain:

$$l(d^2\theta/dt^2) = -g \sin \theta, \tag{6}$$

where θ is the angle from the vertical, l is length of the pendulum and g the acceleration of gravity.

In the approximation valid for small amplitudes ($\sin \theta \approx \theta$), the equation becomes that of a harmonic oscillator ($d^2\theta/dt^2 = -g\theta/l$) with a constant period $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, independent of the amplitude of the movement. Analytically the equation produces a solution in a series: $T = T_0 (1 + (1^2/2^2)* \text{sen}^2(\theta_0/2) + (1^2/2^2)*(3^2/4^2)*\text{sen}^4(\theta_0/2) + \dots)$ where θ_0 is the amplitude and T_0 is the period for the harmonic oscillator ($2\pi(l/g)^{1/2}$) [12]. Table I shows the calculated values T/T_0 for values from 1° to 25° for the amplitude of the movement for 1 and 2 terms of the series.

TABLE I. Period T (normalized to T_0) as a function of the amplitude of the oscillation for 1 and 2 terms of the series.

Angle °	T/T ₀ 1term	T/T ₀ 2terms
1	1.000019	1.000019
2	1.000076	1.000076
3	1.000171	1.000171
4	1.000304	1.000305
5	1.000476	1.000476
6	1.000685	1.000686
7	1.000932	1.000934
8	1.001216	1.001220
9	1.001539	1.001544
10	1.001899	1.001907
11	1.002297	1.002308
12	1.002732	1.002748
13	1.003204	1.003227
14	1.003713	1.003744
15	1.004259	1.004300
16	1.004842	1.004895
17	1.005462	1.005529
18	1.006118	1.006202
19	1.006810	1.006915
20	1.007538	1.007666
21	1.008302	1.008458
22	1.009102	1.009288
23	1.009937	1.010159
24	1.010807	1.011070
25	1.011712	1.012020

To measure those small changes we need precision on the measurements, with 0.1% (three digits) we should see the change in the period from 8° of amplitude, but for 1% (two digits) is from 23°-24°. Usually the students uses amplitudes near 30° and measure with three digits, they detect the change neglecting it because the book says that the period is a constant!

C. Torsion Pendulum

For a wire supporting an object with an inertia moment I , the applied torque τ is proportional to the torsion angle θ ($\tau = -k\theta$) where k is the torsion elastic constant.

In this case the equation for the movement is:

$$I(d^2\theta/dt^2) = -k\theta, \tag{7}$$

corresponding to an harmonic oscillator, with a period $T = 2\pi\sqrt{I/k}$ independent of the amplitude. Usually a copper wire can be twisted several turns within the elastic region. With a cooper wire, it is easy to test this result, the period is a constant.

D. Magnet in a Magnetic Field

For a cylindrical magnet (with a magnetic dipole moment M) supported by a long thin cord, when we can neglect the torque coming from the cord compared with the torque provided by the Earth magnetic field B ($\tau = M \times B$). Then:

$$I(d^2\theta/dt^2) = -MB \sin \theta, \tag{8}$$

with a constant period $T = 2\pi\sqrt{I/MB}$ for small values for the amplitude. Theoretically the series solution for the pendulum may be applied here and the maximum amplitude is near 180° . For a pendulum with a cord the maximum amplitude is 90° , so it provides a better experiment to verify the change in the period with the amplitude of oscillation.

We made the experiment using 12 small cylindrical magnets together forming a long magnet. It hangs horizontally from a thin cord trapped between the 6 and 7 magnets (Fig.1). Then we have really a compass oriented in the north-south direction, with a protractor aligned with the supported cord below the magnet it is easy to measure the maximum amplitude of many oscillations. The periods change from 9 to 4 seconds giving enough time to write the amplitude and its time. The period for each oscillation is the difference in time between two consecutive measurements. Table II shows the measured values for the amplitude, its time and the calculated period. Friction reduces the measured amplitudes.

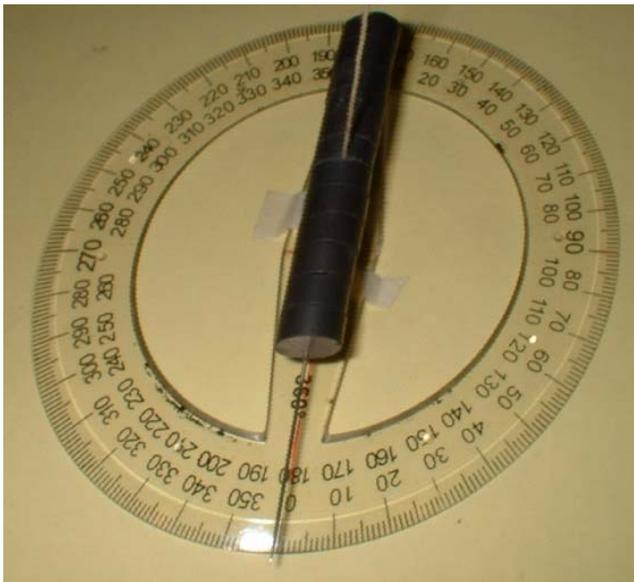


FIGURE 1. Hanging magnet above protractor.

TABLE II. Amplitude of oscillation for a horizontal magnet moving in the Earth magnetic field. The period is the difference in time between two consecutive maximum amplitudes. Uncertainties are $\pm 1^\circ$ $y \pm 0.1$ s for the amplitude and time. The chronometer gives a resolution of 0.01 s, but operated manually the repeatability of the operating finger is about 0.1 s. The measured period is too noisy, so we used a moving average over 3 periods for Figure 2 and estimated a maximum error of 1 s for fitting purposes.

Ángle °	Time s	Period s	Ángle °	Time s	Period s
162	7.53	—	88	203.49	5.50
155	16.20	8.67	88	209.34	5.85
150	24.16	7.96	87	213.88	4.54
146	31.66	7.50	86	220.64	6.76
142	38.97	7.31	85	224.35	3.71
139	46.10	7.13	84	228.50	4.15
136	52.89	6.79	83	233.44	4.94
133	58.45	5.56	82	239.84	6.40
131	65.95	7.50	81	245.02	5.18
128	72.44	6.49	80	250.18	5.16
125	78.77	6.33	79	255.45	5.27
122	84.99	6.22	78	260.30	4.85
121	91.15	6.16	76	265.20	4.90
119	97.25	6.10	75	270.63	5.43
116	103.48	6.23	74	275.4	4.77
115	109.67	6.19	73	280.79	5.39
114	115.57	5.90	72	285.6	4.81
110	121.18	5.61	71	290.55	4.95
109	126.75	5.57	70	295.21	4.66
107	132.55	5.80	70	300.42	5.21
106	138.55	6.00	69	305.79	5.37
104	143.91	5.36	68	310.32	4.53
102	149.92	6.01	67	315.00	4.68
101	154.76	4.84	66	320.14	5.14
99	160.31	5.55	65	325.63	5.49
98	165.95	5.64	64	330.08	4.45
97	171.48	5.53	64	335.96	5.88
95	176.85	5.37	63	339.5	3.54
94	182.73	5.88	62	344.87	5.37
92	187.49	4.76	61	349.81	4.94
91	192.81	5.32	60	354.79	4.98
90	197.99	5.18	59	359.40	4.61

From Figure 2 we see that we need up to 16 terms to obtain agreement between the experimental and calculated values without any friction. But we see the friction on the decaying values for the amplitude. The analytical solution for a harmonic oscillator (with a period independent of the amplitude) with a friction force proportional to the velocity of the movement ($f_f = -\lambda v$) is given by Eq. (4), the equation predicts that the amplitude decays exponentially with time. Figure 3 shows an exponential curve fitted to the data with $\gamma = 0.0027 \text{ second}^{-1}$, a small change in γ produces a better fit on the beginning or on the end of the data. To improve the model we need either a γ changing with the speed or a

friction force proportional to the square of the velocity (or other exponent near to 2). The friction parameter is wrong because the theory assumes that the period is independent of the amplitude, approximation not valid for the large amplitudes measured.

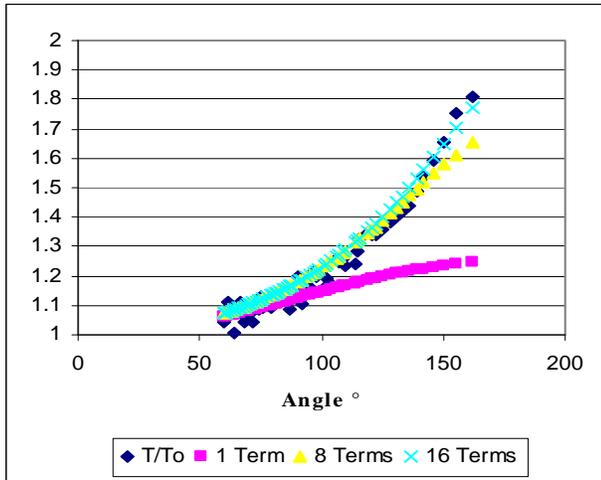


FIGURE 2. Measured values for T/T_0 and calculated values for the series obtained without the approximation $\sin \theta = \theta$

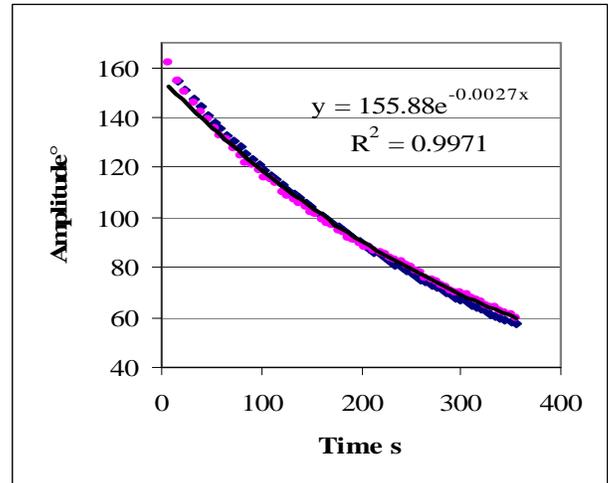


FIGURE 3. Measured and fitted decaying amplitude of the oscillation. Experimental values as points and fitted equation the line.

III. FRICTION

We can make a numerical calculation to take into account the friction, either as a force proportional to the velocity or to the square of the velocity.

Equation (8) gives the torque from the Earth magnetic field B , for small amplitudes ($\sin \theta \approx \theta$) the period is $T = 2\pi\sqrt{I/MB}$.

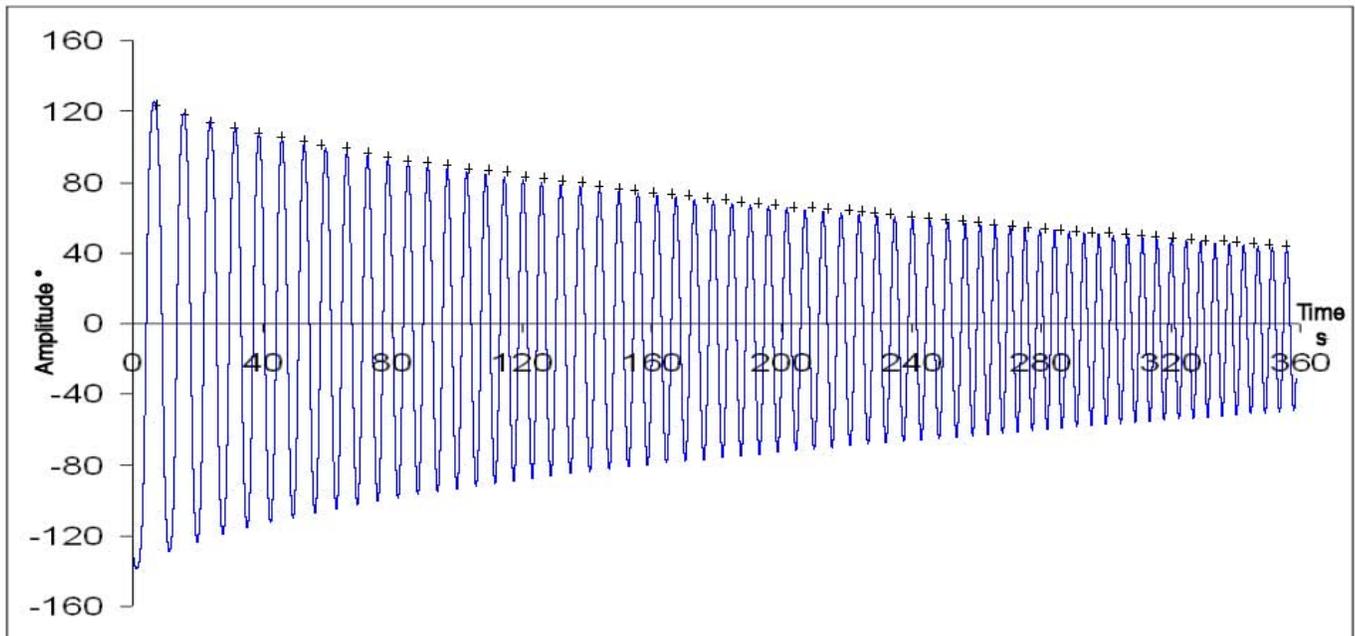


FIGURE 4. Calculated oscillations and maximum amplitude measured (+) for a friction force proportional to the angular velocity.

Assuming a friction proportional to the angular speed ω or to its square:

$$I(d^2\theta/dt^2) = -\lambda(d\theta/dt) - MB \sin\theta, \quad (9)$$

where λ is the constant of proportionality for the friction force. Then:

$$d^2\theta/dt^2 = -(\lambda/I)*(d\theta/dt) - (MB/I)*\sin \theta = \alpha. \quad (10)$$

To solve Eq. (10) numerically we need to fit values for the initial angle and angular velocity, and the values for λ/I and MB/I . The time increment Δt needs to be small compared with the period. The calculated solution should be indepen-

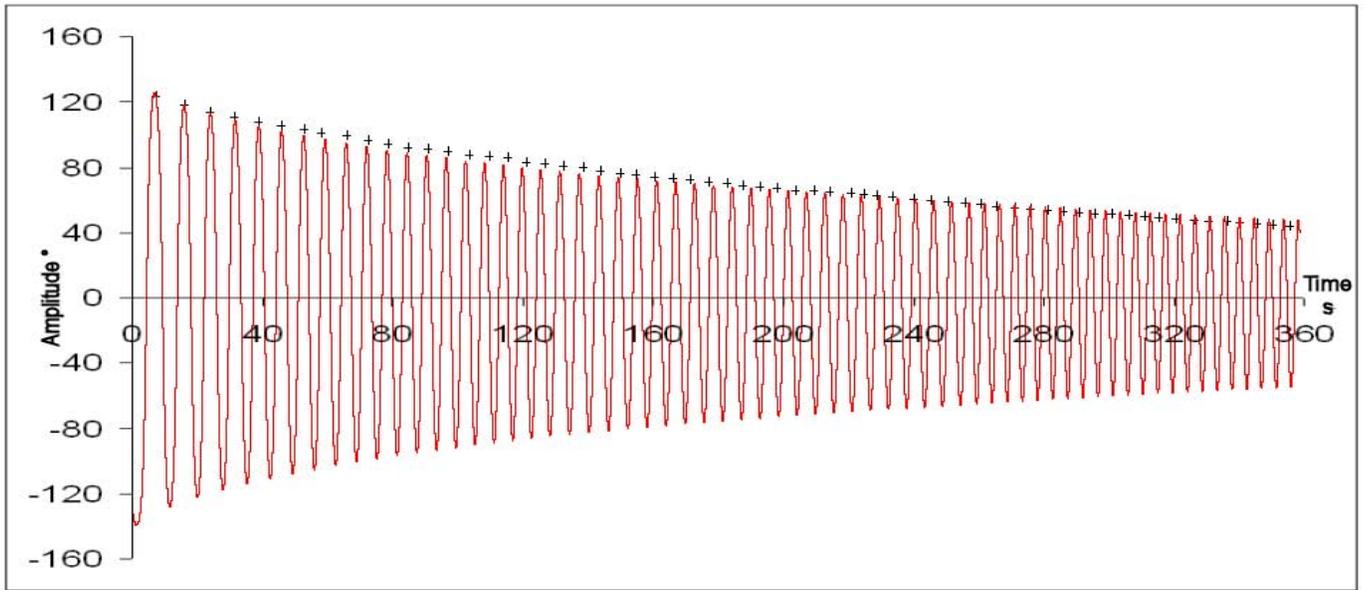


FIGURE 5. Calculated oscillations and maximum amplitude measured (+) for a friction force proportional to the square of the angular velocity.

dent of this value, reducing more than needed only increases the computer time.

The initial values are used to calculate the first value for α , then $(\omega = d\theta/dt)$ the increment in angular velocity is

$$\Delta\omega = a\Delta t, \quad (11)$$

$$\omega_f = \Delta\omega + \omega_i. \quad (12)$$

The increment in the angle θ is:

$$\Delta\theta = (\omega_i + \omega_f) * \Delta t / 2, \quad (13)$$

$$\theta_f = \Delta\theta + \theta_i. \quad (14)$$

Using the calculated values, we can calculate the next value for the acceleration a making the same calculations for the next time interval. When calculating the friction force proportional to ω^2 is convenient to multiply ω by its magnitude so the product keeps the sign of ω , so the friction force is against the ω direction.

From the harmonic oscillator equation we obtain that $MB/I = 4*\pi^2/T_0^2$ where T_0 is the measured period for small amplitude oscillations.

Figures 4 and 5 show the agreement in amplitude and the period for the numerical calculation with an initial angle θ of -153° and initial angular velocity $\omega = -0.63 \text{ s}^{-1}$, $\lambda/I = 0.0046 \text{ s}^{-2}$ and $MB/I = 1.97 \text{ s}^{-2}$ ($T_0 = 4.48 \text{ s}$) for friction proportional to angular speed. For a friction proportional to the square of ω , only changes $\lambda/I = 0.0024 \text{ s}^{-2}$ and $MB/I = 1.93 \text{ s}^{-2}$ ($T_0 = 4.52 \text{ s}$). We try several Δt for the numerical calculations, each time reducing in half, until $\Delta t = 0.0001 \text{ s}$ the amplitude for zero friction becomes constant and the period becomes independent of Δt .

Figure 4 shows agreement with the amplitude of the decaying oscillation and the period agreed up to 27 oscillations. Later the deviations are larger than the estimated 1 second uncertain.

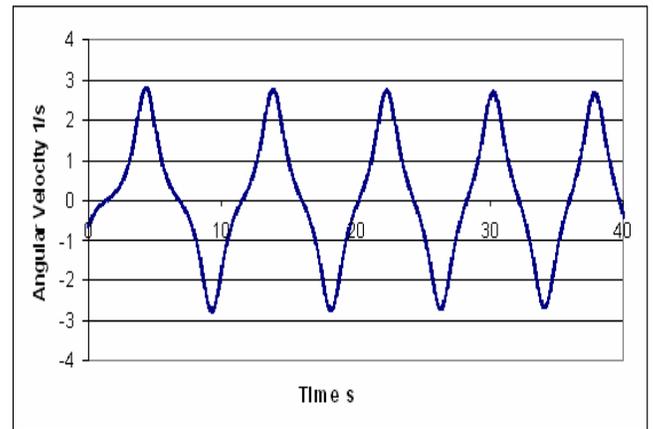


FIGURE 6. Initial cycles for the angular velocity ω showing a non-harmonic movement.

Figure 5 shows systematic deviation from the decaying amplitude and deviations also for the period. So the linear friction is a better approximation but it need some else to fit also the experimental change in period after 27 oscillations.

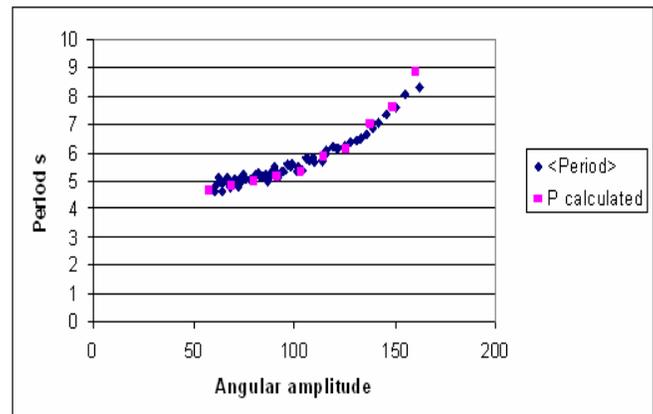


FIGURE 7. Moving average of three measured periods and calculated values for the period without friction.

The non-harmonic character of the movement is shown in Figure 6 with the angular velocity ω for a few initial cycles. Using the same numerical calculation with $\lambda/I = 0$ (without friction) we may calculate the period as a function of the amplitude.

Figure 7 shows the comparison between the moving average of three measured periods and the calculated values. Also shows that only for the maximum measured amplitude, the friction changes the period of the movement.

IV. CONCLUSIONS

The periodic movement of a horizontal magnet in the Earth magnetic field provides easy data for the amplitude and time measurements, which can be used to fit numerically the parameters of the equation related to the dipolar magnetic moment, inertia moment and friction. The friction changes the amplitude, but with slight effect in the period. For students at college level the data is a good example to show the power of numerical calculations and the need for moving averages. If a reader desires to exercise fitting parameters we can provide a program to fit a friction linear or quadratic for a time T , Δt , initial angle and angular velocity, period and friction coefficient.

REFERENCES

- [1] Serway R. A. and Beichner R. J. (*Physics for Scientists and Engineers*, Harcourt Brace, 5th ed. Orlando, FL, 2000).
- [2] Thornton S. T. and Marion J. B. (*Classical Dynamics of Particles and Systems*, Brooks/Cole 5th ed. New York, 2004).
- [3] Lima F. M. S. and Arun P., *Am. J. Phys.* **74**, 892-895 (2006).
- [4] Ganley W. P., *Am. J. Phys.* **53**, 73-76 (1985).
- [5] Smith M. K., *Am. J. Phys.* **32**, 632-633 (1964).
- [6] Li, S. and Feng, S., *Am. J. Phys.* **35**, 1071-1073 (1977).
- [7] Schery, S. D., *Am. J. Phys.* **44**, 666 (1976).
- [8] Fulcher, L. P. and Davis, B. F., *Am. J. Phys.* **44**, 51 (1976).
- [9] Zilio S. C, *Am. J. Phys.* **50**, 450-452 (1982).
- [10] Hall, D. E. and Shea, M. D., *Am. J. Phys.* **45**, 355-357 (1977).
- [11] Bisquert, J., Hurtado, E., Mafé, S. and Piña, J., *Am. J. Phys.* **58**, 838-843 (1990).
- [12] Kittel, C, Knight, W. D. and Ruderman, M. A. (*Mechanics: Berkeley Physics Course Vol. 1*, McGraw Hill Book C., 1th edition, NY, 1962).

Estrategia EE (Excel-Euler) en la enseñanza de la Física



Ricardo Buzzo Garrao

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

E-mail: rbuzzo@ucv.cl

(Recibido el 18 de Julio de 2007; aceptado el 12 de Agosto de 2007)

Resumen

Este trabajo pretende mostrar los beneficios en la enseñanza de ciertos tópicos de Física, del uso en conjunto de dos herramientas: un método numérico como el algoritmo de Euler y un programa utilitario como la planilla electrónica Excel. Permite abordar en cursos básicos de Física, interesantes problemas que comúnmente no se tratan por no disponer de las herramientas matemáticas adecuadas. A través de esta metodología se postula la ventaja de tener posibilidad de acceder con facilidad a soluciones que permitan visualizar la evolución temporal de los sistemas estudiados, tratando así de lograr una conceptualización numérica y gráfica.

Palabras clave: Enseñanza de la mecánica, Preconcepciones en Física, Métodos numéricos y planillas electrónicas.

Abstract

This work intends to show the benefits, in the teaching of some topics in Physics, of the joint use of two tools: a numerical method like Euler's algorithm, and a spreadsheet program, like Excel™. This approach makes it possible to study interesting problems that are not usually considered in introductory physics courses because the necessary mathematical tools are not available. By using this methodology we have the advantage of easily accessing solutions that allow visualizing the temporal evolution of the systems under study, thus making possible a numerical and graphical conceptualization.

Key words: Teaching mechanics, Preconceptions in Physics, Numerical methods and electronic tables.

PACS: 45.10-b, 02.70-c, 01.40.Ha, 01.40.Fk, 01.40.gb, 01.50.H, 02.60.Cb.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Una crítica común que se hace a la enseñanza de la Física en la enseñanza media y en cursos básicos de la universidad, es que en ellos se tratan temas demasiado modelados, llenos de restricciones y alejados de los problemas reales que son los que más interesan a los alumnos.

Esto forma en el estudiante la percepción que la Física es una disciplina alejada de las situaciones que se dan en el mundo que los rodea.

¿Por qué esta limitante? La respuesta está en la falta de herramientas matemáticas para el tratamiento analítico de problemas del mundo real.

Problemas como el movimiento de un cuerpo en un medio viscoso o el estudio de oscilaciones amortiguadas y forzadas, exigen de matemáticas que no posee el alumno en los momentos aludidos por nuestro estudio.

Nuestro trabajo postula que esta dificultad queda superada a través del uso de un sencillo método numérico como es el algoritmo de Euler el cual puede ser desarrollado fácilmente utilizando la planilla electrónica Excel.

Adicionalmente creemos que la metodología propuesta puede servir de ayuda a la remoción de preconcepciones tan presentes en el aprendizaje de Física, a través de la visualización de la evolución temporal de los sistemas estudiados

Nuestra propuesta está estructurada de la siguiente manera: primero presentamos algunas propiedades del método numérico utilizado, luego una justificación del por qué usar Excel y finalmente mostramos algunos ejemplos en los cuales queda en evidencia la utilidad del uso de la estrategia EE en la enseñanza de la Física.

II. EL ALGORITMO DE EULER

Normalmente resolver un problema en Física significa encontrar la solución de una ecuación diferencial.

La técnica estándar para la solución numérica de ecuaciones diferenciales implica la transformación de una ecuación diferencial en una ecuación de diferencias finitas. Esto se puede hacer mediante muchos métodos numéricos de los cuales hemos elegido el algoritmo de Euler fundamentalmente por su simplicidad aunque conscientes

de que no es el método más eficiente en cuanto al arrastre de errores de cálculo y redondeo.

Fundamentalmente el algoritmo de Euler cambia el análisis de una curva (un problema difícil) en el análisis de muchas rectas (muchos problemas fáciles). Por eso es que este método es también llamado de pendiente constante [1].

Los problemas tratados en clases de cursos básicos de Física se modelan de tal forma que la aceleración presente sea constante.

Sin embargo en situaciones reales, tendremos aceleraciones explícitamente dependientes del tiempo $a(t)$, de la posición $a(x)$, de la velocidad $a(v)$ o en caso más general $a(t,x,v)$.

Cualquiera sea el caso, si aplicamos el algoritmo de Euler, el método será el siguiente:

- 1) Dividir el intervalo de tiempo estudiado en N partes lo que definirá lo que llamaremos paso de tiempo DT . Mientras más grande sea N la aproximación numérica se acercará más a la solución analítica del problema.
- 2) Identificar la estructura de la aceleración.
- 3) Considerando las condiciones iniciales establecer los valores iniciales para trabajar.
- 4) Avanzando en el tiempo de acuerdo al paso de tiempo DT usamos como algoritmo,

$$v_{actual} = v_{anterior} + a_{anterior} * DT, \quad (1)$$

$$x_{actual} = x_{anterior} + v_{actual} * DT. \quad (2)$$

- 5) Efectuar un proceso iterativo hasta llegar al final del intervalo de tiempo estudiado.

III. ¿POR QUÉ EXCEL?

Hace ya bastante tiempo se ha planteado el uso de métodos numéricos en la enseñanza de la Física [1,2,3].

Sin embargo, estas propuestas contemplaban para el proceso iterativo, el uso de programación a través de un lenguaje computacional.

Esto presenta como dificultad de aplicación, el hecho de que el profesor debe saber programar y el colegio o universidad donde se aplique debe tener el compilador correspondiente al lenguaje usado.

También se puede desarrollar el algoritmo de Euler usando un software como MATHEMATICA, pero con la dificultad de alto costo de todos estos paquetes computacionales.

En EXCEL, los procesos iterativos se pueden hacer con mucha facilidad utilizando la copia de procedimientos y el algebra básica necesaria para el algoritmo. Por lo tanto el profesor y los alumnos no necesitan saber programar para trabajar.

Además, casi todo computador que usa sistema operativo WINDOWS, tiene el paquete utilitario OFFICE, con lo cual EXCEL resulta de muy fácil accesibilidad. De hecho en Chile a través del programa ENLACES del Ministerio de Educación, casi el 100% de los colegios tienen computadores con EXCEL.

IV. EULER Y EXCEL EN ACCIÓN

A. Oscilador amortiguado forzado

Un problema importante con muchas aplicaciones en la vida real es aquel de las vibraciones de un oscilador, que resultan cuando aplicamos una fuerza oscilatoria externa a una partícula sometida a una fuerza elástica.

Sea $F = F_0 \cos \omega_f t$ la fuerza oscilante aplicada, siendo ω_f su frecuencia angular. Suponiendo que la partícula está sometida a una fuerza elástica $-kx$ y a una fuerza de amortiguamiento $-bv$, su ecuación de movimiento será:

$$ma = -kx - bv + F_0 \cos \omega_f t, \quad (3)$$

de donde

$$a = -(k/m)x - (b/m)v + (F_0/m) \cos \omega_f t. \quad (4)$$

Se trata de determinar a partir de esta ecuación, x , v , a , en cualquier instante.

Datos de entrada: $k, m, b, F_0, \omega_f, x_0, v_0, DT$.

Rutina: Tomar valores iniciales de v y x , y con ellos valorizar a .

$$v_{actual} = v_{anterior} + a_{anterior} * DT, \quad (5)$$

$$x_{actual} = x_{anterior} + v_{actual} * DT, \quad (6)$$

$$t_{actual} = t_{anterior} + DT. \quad (7)$$

Repetir el proceso múltiples veces.

La planilla adopta una apariencia como la mostrada a continuación:

TABLA I. Oscilador amortiguado forzado

tiempo	Aceleración	Velocidad	Posición
0.00	0.40	6.00	0.00
0.20	-0.34	6.08	1.22
0.40	-1.08	6.01	2.42
0.60	-1.79	5.79	3.58
0.80	-2.46	5.44	4.66
1.00	-3.06	4.95	5.65
1.20	-3.59	4.33	6.52
1.40	-4.04	3.61	7.24
1.60	-4.39	2.81	7.80
1.80	-4.64	1.93	8.19
2.00	-4.77	1.00	8.39
2.20	-4.80	0.05	8.40
2.40	-4.71	-0.91	8.22
2.60	-4.51	-1.85	7.85
2.80	-4.21	-2.76	7.30
3.00	-3.81	-3.60	6.58
3.20	-3.33	-4.36	5.70
3.40	-2.77	-5.03	4.70
3.60	-2.15	-5.58	3.58
3.80	-1.48	-6.01	2.38
4.00	-0.78	-6.31	1.12

Con ella se puede hacer análisis de datos o construir gráficos como los indicados:

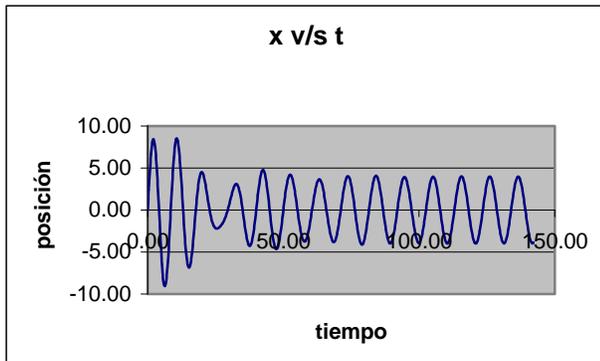


FIGURA 1. Oscilador amortiguado forzado. Gráfico posición v/s tiempo.

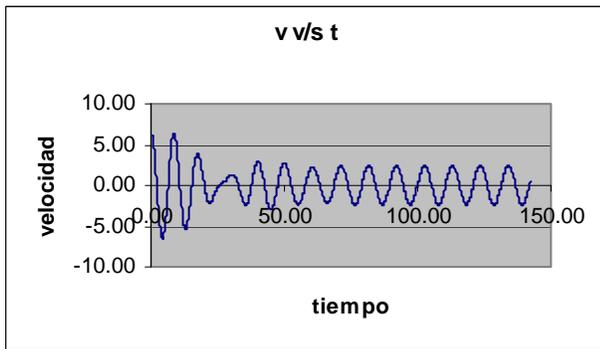


FIGURA 2. Oscilador amortiguado forzado. Gráfico velocidad v/s tiempo.

Dadas las propiedades de Excel, se pueden tratar diferentes situaciones variando solo los datos de entrada, con recálculo automático. Además, al estudiar el sistema desde $t=0$, es posible visualizar la etapa transiente (fase que va desde $t=0$ hasta que se alcanza el régimen estacionario), cosa que no hacen la mayoría de los libros que solo abordan la etapa estacionaria.

B. Proyectil con roce

Este problema es el que muestra con mayor evidencia, la fortaleza de la metodología usada ya que si uno utiliza el modelo $-bv^2$ para el roce del aire, la solución analítica de este problema es muy difícil, a cualquier nivel [4]. Sin embargo usando Euler el tratamiento del problema es el mismo que para otros.

En este caso si en cualquier instante, la velocidad del proyectil forma un ángulo θ con la horizontal las ecuaciones de movimiento serán:

$$ma_x = -bv^2 \cos \theta, \tag{8}$$

$$ma_y = -mg - bv^2 \text{sen} \theta, \tag{9}$$

y como $v_x = v \cos \theta$ y $v_y = v \text{sen} \theta$, la estructura de las componentes de la aceleración es:

$$a_x = -(b/m)vv_x, \tag{10}$$

$$a_y = -g - (b/m)vv_y. \tag{11}$$

Datos de entrada: $m, b, v_0, \theta_0, x_0, y_0$.

$$v_{x,actual} = v_{x,anterior} + a_{x,anterior} * DT, \tag{12}$$

$$v_{y,actual} = v_{y,anterior} + a_{y,anterior} * DT, \tag{13}$$

$$x_{actual} = x_{anterior} + v_{x,actual} * DT, \tag{14}$$

$$y_{actual} = y_{anterior} + v_{y,actual} * DT, \tag{15}$$

$$t_{actual} = t_{anterior} + DT. \tag{16}$$

Repetir el proceso múltiples veces.

TABLA II. Proyectil con roce. Datos de entrada: $v_0=30$ [m/s], $\theta_0=37^\circ, b=0.1$ [Ns²/m²], $g=10$ [m/s²], $m=5$ [kg], $DT=0.01$ [s].

t(s)	a _x (m/s ²)	v _x (m/s)	x(m)	a _y (m/s ²)	v _y (m/s)	y(m)
0.00	-14.38	23.96	0.00	-20.83	18.05	0.00
0.01	-14.17	23.82	0.24	-20.62	17.85	0.18
0.02	-13.98	23.67	0.47	-20.42	17.64	0.35
0.03	-13.79	23.53	0.71	-20.21	17.44	0.53
0.04	-13.60	23.40	0.94	-20.02	17.23	0.70
0.05	-13.41	23.26	1.18	-19.82	17.03	0.87
0.06	-13.23	23.13	1.41	-19.63	16.84	1.04
0.07	-13.05	22.99	1.64	-19.45	16.64	1.21
0.08	-12.88	22.86	1.87	-19.26	16.44	1.37
0.09	-12.71	22.73	2.09	-19.08	16.25	1.53
0.10	-12.54	22.61	2.32	-18.91	16.06	1.69
0.11	-12.37	22.48	2.54	-18.74	15.87	1.85
0.12	-12.21	22.36	2.77	-18.57	15.68	2.01
0.13	-12.05	22.24	2.99	-18.40	15.50	2.16
0.14	-11.90	22.12	3.21	-18.24	15.31	2.32
0.15	-11.75	22.00	3.43	-18.08	15.13	2.47
0.16	-11.60	21.88	3.65	-17.92	14.95	2.62
0.17	-11.45	21.76	3.87	-17.77	14.77	2.77
0.18	-11.30	21.65	4.08	-17.62	14.59	2.91
0.19	-11.16	21.54	4.30	-17.47	14.42	3.06
0.20	-11.02	21.42	4.51	-17.33	14.24	3.20
0.21	-10.89	21.31	4.73	-17.19	14.07	3.34
0.22	-10.75	21.20	4.94	-17.05	13.90	3.48
0.23	-10.62	21.10	5.15	-16.91	13.73	3.62
0.24	-10.49	20.99	5.36	-16.78	13.56	3.75
0.25	-10.36	20.89	5.57	-16.64	13.39	3.89

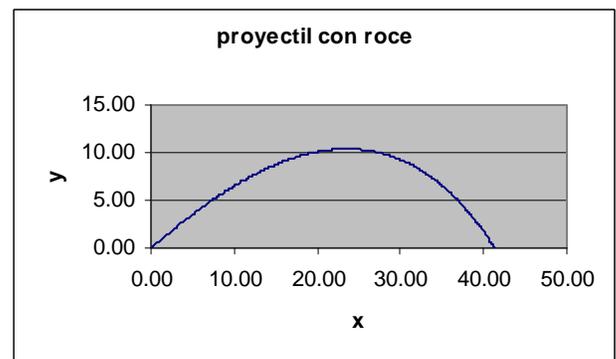


FIGURA 3. Proyectil con roce. Gráfico y v/s x.

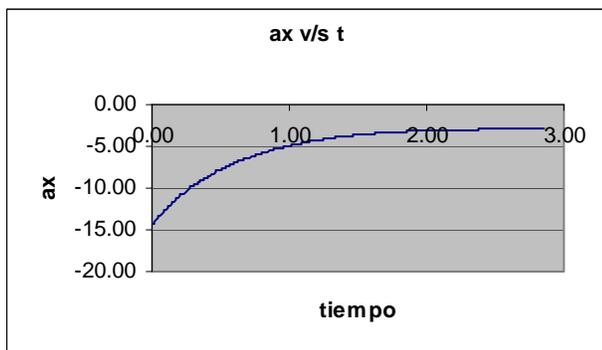


FIGURA 4. Proyectil con roce. Gráfico componente x de la aceleración v/s tiempo.

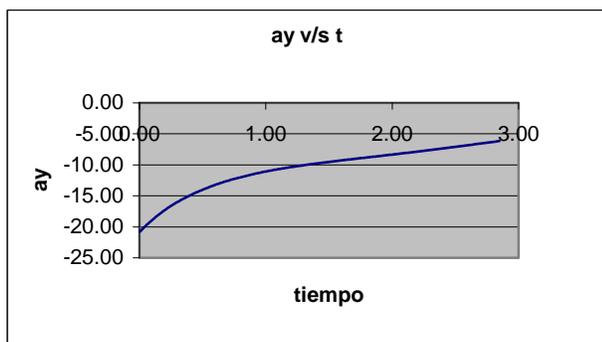


FIGURA 5. Proyectil con roce. Gráfico componente y de la aceleración v/s tiempo.

III. ¿CÓMO PUEDE AYUDAR ESTA METODOLOGÍA A LA REMOCIÓN DE PRECONCEPTOS?

En el desarrollo del curso Física General Mecánica de prestación de servicio a los primeros años de las carreras de Ingeniería o sea un curso de nivel introductorio, se decidió realizar un problema en el cual estuviera presente una fuerza constante, una fuerza elástica y una fuerza de roce. El problema elegido fue el siguiente:

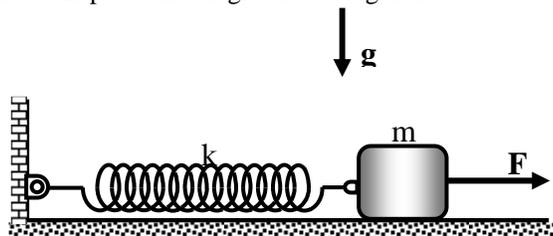


FIGURA 6. Masa sometida a una fuerza elástica, fuerza de roce y fuerza constante en la dirección horizontal.

m está en reposo y el resorte está inextendido. De pronto se aplica una fuerza F horizontal constante. Determinar la distancia máxima que recorre m y la máxima velocidad que alcanza. $k=100$ N/m, $m=2$ kg, $\mu=0.3$, $F=90$ N.

Realizada la pauta de corrección, nos pareció un problema tradicional, sin mayores problemas, pero al momento de ver las soluciones de los alumnos, surgían algunas ideas erradas coincidentes como las siguientes: 1) Existiendo una fuerza F constante sobre el cuerpo, éste no se detendrá jamás. 2) El cuerpo se detiene cuando la fuerza

neta es cero. 3) La mayoría no sabía como calcular la velocidad máxima.

Consultando con otros colegas, respecto a una posible causa para que se repitiera con tanta insistencia la situación recién planteada, vimos que una posible explicación estaría en el hecho de que el método de balance de energía acostumbra a usar puntos extremos entre los cuales se hace el balance, sin considerar la evolución temporal de lo que sucede entre esos dos puntos. El estudiante en los niveles introductorios queda preparado en gran parte para solucionar un problema, cuando es capaz de formarse en la mente una película con la situación planteada, o sea cuando es capaz imaginarse una solución cualitativa del problema a través de la evolución temporal del sistema.

Gran parte de los preconcepciones en Física, se generan justamente en que el alumno imagina para un sistema, un desarrollo temporal diferente al real. De ahí la importancia de que el alumno sea capaz de conocer la solución que permita conocer el estado de un sistema instante a instante. Si aplicamos la estrategia Excel-Euler al problema planteado, la estructura de la aceleración será:

$$a = (F / m) - (k / m)x - \mu g , \tag{17}$$

generando la siguiente tabla donde el alumno podrá ver la distancia máxima recorrida y la máxima velocidad alcanzada.

TABLA II. Oscilador amortiguado. Datos de entrada: $F=90$ [N], $m=2$ [kg], $k=100$ [N/m], $\mu=0.3$, $x_0=0$ [m], $v_0=0$ [m/s], $DT=0.005$ [s].

$t(s)$	$a(m/s^2)$	$v(m/s)$	$x(m)$
0.000	42.060	0.000	0.000
0.005	42.007	0.210	0.001
0.010	41.902	0.420	0.003
0.015	41.745	0.630	0.006
0.020	41.535	0.839	0.010
0.025	41.274	1.046	0.016
0.030	40.961	1.253	0.022
0.035	40.596	1.457	0.029
0.040	40.181	1.660	0.038
0.045	39.716	1.861	0.047
0.050	39.201	2.060	0.057
0.055	38.637	2.256	0.068
0.060	38.025	2.449	0.081
0.065	37.365	2.639	0.094
0.070	36.658	2.826	0.108
0.075	35.906	3.009	0.123
0.080	35.109	3.189	0.139
0.085	34.268	3.364	0.156
0.090	33.384	3.536	0.174
0.095	32.458	3.703	0.192
0.100	31.492	3.865	0.211
0.105	30.486	4.022	0.231
0.110	29.442	4.175	0.252

Generando los siguientes gráficos:

IV. CONCLUSIÓN

Basado en los buenos resultados obtenidos en la aplicación de esta metodología por varios años en la asignatura Informática Educativa aplicada a la Enseñanza de la Física, en la formación de profesores de Física en el Instituto de Física de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, como también en talleres de capacitación de profesores [5], creo que la estrategia EE es un real aporte para lograr aprendizaje en Física, permitiendo abordar problemas reales a cualquier nivel y ayudando a la remoción de preconceptos a través de la conceptualización numérica y gráfica.

REFERENCIAS

- [1] Gould, H. and Tobochnik, J. (*Computer Simulation Methods*, Addison-Wesley, 1988).
- [2] Buzzo, R., *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **9**, 143-146, (1992).
- [3] <http://www.sc.ehu.es/sWEB/fisica/default.htm>, Agosto 2007.
- [4] Parker, G., *Projectile motion with air resistance quadratic in the speed*, *Am. J. Phys.* **45**, (1977).
- [5] Buzzo, R., *Taller "Física con Microcomputador, una nueva forma de hacer y enseñar Física"*, REFIX, Salta, Argentina, (1995).

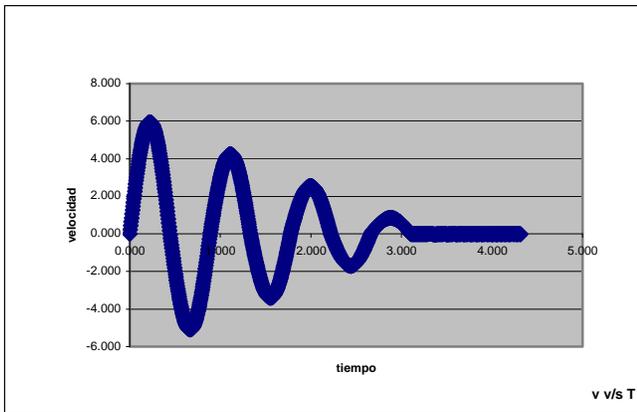


FIGURA 7. Gráfico velocidad v/s tiempo.

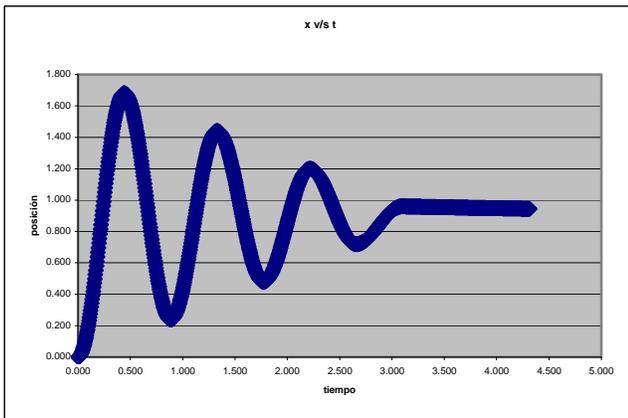


FIGURA 8. Gráfico posición v/s tiempo.

Six Lessons From The Physics Education Reform Effort



Richard Hake

Indiana University, Bloomington, Indiana 47405, USA, Emeritus.

E-mail: rrhake@earthlink.net

(Received 3 September; accepted 19 September 2007)

Abstract

In a 1998 meta-analysis I showed that “interactive engagement” (IE) courses could yield average normalized pre-to-posttest gains $\langle g \rangle$ in conceptual understanding of Newtonian mechanics that were about two standard deviations greater than traditional (T) courses. Then in 2002 I wrote a paper based on my meta-analysis entitled “Lessons From the Physics Education Reform Effort.” There, among other things, I offered six lessons on “interactive engagement” that I had hoped might stimulate more effective high school and university education. Today five years later, it may be worthwhile to review and update those lessons with an eye to the present status of education reform in physics and other disciplines.

Key words: Physics Education, evaluation, interactive engagement.

Resumen

En un meta-análisis de 1998 mostré que los cursos de “compromiso interactivo” (IE) podrían producir una ganancia $\langle g \rangle$ normalizada desde la *pre-prueba* hasta la *post prueba* en el entendimiento conceptual de la mecánica Newtoniana que fueron alrededor de dos desviaciones estándar más grande que en los cursos tradicionales (T). Posteriormente en 2002 escribí un artículo basado en mi meta-análisis titulado “Lecciones desde el esfuerzo de reforma de Educación en Física”. Hoy, entre otras cosas, ofrezco seis lecciones de “compromiso interactivo” que espero pueda estimular más efectivamente la educación en la escuela preparatoria y en la universidad. Hoy cinco años después, podría ser importante el revisar y actualizar esas lecciones con un punto de vista del estado presente de la reforma educativa en física y en otras disciplinas.

Palabras clave: Física Educativa, evaluación, compromiso interactivo.

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

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

In a meta-analysis titled “Interactive-engagement vs traditional methods: A six thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses” [1,2], I showed that interactive engagement (IE) courses could yield average normalized pre-to-posttest gains $\langle g \rangle$ in conceptual understanding of Newtonian mechanics that were about two standard deviations greater than traditional (T) courses. Here:

a) The average normalized gain $\langle g \rangle$ is the average *actual* gain [$\langle \% \text{post} \rangle - \langle \% \text{pre} \rangle$] divided by the *maximum possible average gain* [$100\% - \langle \% \text{pre} \rangle$], where the angle brackets indicate the class averages.

b) The conceptual tests of Newtonian Mechanics were either the Force Concept Inventory (FCI) [3] or its precursor the Mechanics Diagnostic (MD) [4,5]; in both cases developed by disciplinary experts through arduous qualitative and quantitative research, and widely recognized as valid and consistently reliable.

c) IE courses were *operationally* defined as those designed at least in part to promote conceptual understanding through *continual* interactive engagement of students in heads-on (always) and hands-on (usually) activities which yield *immediate* feedback through discussion with peers and/or instructors.

d) T courses were *operationally* defined as those reported by instructors to make little or no use of IE methods, relying primarily on passive-student lectures, recipe labs, and algorithmic problem exams.

In a later paper “Lessons from the physics education reform effort” [6] I offered fourteen lessons, six on interactive engagement and eight on implementation, that I hoped might stimulate more effective high-school and university education. Today, five years later, it may be worthwhile to review, update, and add to those lessons with an eye to the present status of education reform in physics and other disciplines. In the present paper I shall discuss only the six lessons on interactive engagement.

These lessons are derived from my own interpretation of the physics education reform movement as it has developed over the past few decades, and are, therefore, somewhat subjective and incomplete. They are meant to stimulate discussion rather than present any definitive final analysis.

I. LESSON 1: The use of Interactive Engagement (IE) strategies can increase the effectiveness of conceptually difficult courses well beyond that obtained by traditional (T) methods.

Education research in chemistry [7]; engineering [8,9]; and introductory science education generally [10], although neither as extensive nor as systematic as that in physics [11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22] is consistent with the latter in suggesting that, in conceptually difficult areas, Interactive Engagement (IE) methods are more effective than traditional T passive-student methods in enhancing students' understanding. Furthermore, there is some preliminary evidence that learning in IE physics courses is substantially retained 1 to 3 years after the courses have ended [22a,23,24].

I see no reason to doubt that enhanced understanding and retention would result from greater use of IE methods in other science, and even non-science, areas, but substantive research on this issue is sorely needed – see e.g., “The Physics Education Reform Effort: A Possible Model for Higher Education?” [16].

Pre/post testing in biology [25,26]; and mathematics [27] is just getting started; while pre/post test results in astronomy [28] and geoscience [29], have not, at this early stage, shown clear-cut correlations between pre-to-posttest gain and pedagogical method, as has been shown in physics.

II. LESSON 2: The use of IE and/or high-tech methods, by themselves, does not ensure superior student learning.

The data shown in Fig. 1 of “Interactive-engagement vs traditional methods: A six thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses” [1], indicate that seven of the IE courses (717 students) achieved $\langle g \rangle$'s close to those of the T courses. Five of those made extensive use of high-tech microcomputer-based labs [30,31]. Case histories of the seven low- $\langle g \rangle$ courses [2] suggest that implementation problems occurred.

It should be emphasized that, although high technology is, by itself, no panacea, it can be very advantageous when it promotes interactive engagement, as in:

- (a) computerized classroom communication systems (see, e.g., Bruff, D. [32] and Hake [33].
- (b) *properly implemented* microcomputer-based labs [30].
- (c) computer-implemented tutorials [34];
- (e) *Just-in-time teaching* [35,36].

III. LESSON 3: High-quality standardized tests of the cognitive and affective impact of courses are essential to gauge the relative effectiveness of non-traditional educational methods.

So great is the inertia of the educational establishment that three decades of physics education research [11] demonstrating the futility of the passive-student lecture in introductory courses was ignored until Halloun and Hestenes [4,5] devised the *Mechanics Diagnostic* (MD) test of conceptual understanding of Newtonian mechanics.

Among many other virtues, the MD and the subsequent *Force Concept Inventory* (FCI) [3] tests have two major advantages: (a) the multiple-choice format facilitates relatively easy administration of the tests to thousands of students; (b) the questions probe for a conceptual understanding of the basic concepts of Newtonian mechanics in a way that is understandable to the novice who has never taken a physics course, yet at the same time are rigorous enough for the initiate.

Thus the questions can be given as an introductory course pretest in pre/post tests to directly determine course-induced gain in conceptual understanding. In my opinion such *direct* gain measurements of higher-order student learning are far superior to the *indirect* (and therefore in my view problematic) gauges have been developed; e.g., Reformed Teaching Observation Protocol (RTOP), National Survey Of Student Engagement (NSSE), Student Assessment of Learning Gains (SALG), and Knowledge Surveys (KS's) [37]. (For a discussion and references for all but the last see [38]).

BUT WAIT!

1. Can multiple choice tests gauge higher level cognitive outcomes such as the conceptual understanding of Newtonian mechanics? Wilson & Bertenthal [39] think so, writing (p. 94):

“Performance assessment is an approach that offers great potential for assessing complex thinking and learning abilities, but multiple choice items also have their strengths. For example, although many people recognize that multiple-choice items are an efficient and effective way of determining how well students have acquired basic content knowledge, many do not recognize that they can also be used to measure complex cognitive processes. For example, the *Force Concept Inventory* [3] (...) is an assessment that uses multiple-choice items to tap into higher-level cognitive processes”.

2. Considering the canonical arguments regarding the invalidity of pre/post testing evidence, should not all pre-to-post test gains cited above be viewed with grave suspicion? The dour appraisal of pre/post testing by Cronbach & Furby [40] has echoed down through the literature to present day texts on assessment such as that by Suskie [41]. In my opinion, such pre/post paranoia and its attendant rejection of pre/post testing in evaluation, as used so successfully in physics education reform

[11,12,13,17,18,1,2,14,17,18,21] is one reason for the glacial progress of educational research [42] and reform [43].

Fortunately formative pre/post testing is gradually gaining a foothold in undergraduate astronomy, biology, chemistry, economics, geoscience, and engineering, in addition to physics. For references see Hake [44,45,46].

Regarding tests of *affective* impact:

(a) administration of the *Maryland Physics EXpectations* (MPEX) survey to 1500 students in introductory calculus-based physics courses in six colleges and universities showed "a large gap between the expectations of experts and novices and a tendency for student expectations to *deteriorate* rather than improve as a result of introductory calculus-based physics" [47]. Here the term "expectations" is used to mean a combination of students' *epistemological* beliefs about learning and understanding physics and students' *expectations* about their physics course [48]. Elby [49] has recently conducted classes designed to help students develop more sophisticated beliefs about knowledge and learning as measured by MPEX.

(b) The Arizona State University "Views About Sciences Survey" (VASS) [50], (available for physics, chemistry, biology, and mathematics at <http://modeling.la.asu.edu/R&E/Research.html>) indicates that students have views about physics that (i) often diverge from physicists' views; (ii) can be grouped into four distinct profiles: expert, high transitional, low transitional, and folk; (iii) are similar in college and high school; and (iv) *correlate significantly with normalized gain g on the FCI*. It may well be that students' attitudes and understanding of science and education are irreversibly imprinted in the early years (but see [49]). If so, corrective measures await a badly needed shift of K–12 education away from rote memorization and drill (often encouraged by state-mandated standardized tests) to the enhancement of understanding and critical thinking [50a].

(c) The "Colorado Learning Attitudes about Science Survey" [51], according to the abstract: "(...) serves as the foundation for an extensive study of how student beliefs impact and are impacted by their educational experiences. For example, this survey measures the following: that most teaching practices cause substantial drops in student scores; that a student's likelihood of becoming a physics major correlates with their "Personal Interest" score; and that, for a majority of student populations, women's scores in some categories, including "Personal Interest" and "Real World Connections," are significantly different from men's scores".

IV. LESSON 4: Education Research and Development (R&D) by disciplinary experts

(DE's), and of the same quality and nature as traditional science/engineering R&D, is needed to develop potentially effective educational methods within each discipline. But the DE's should take advantage of the insights of (a) DE's doing education R&D in other disciplines, (b) cognitive scientists, (c) faculty and graduates of education schools, and (d) classroom teachers.

Redish [12] has marshaled the arguments for the involvement of physicists in physics departments, not just faculty of education schools, in physics education research. Similar arguments may apply to other disciplines. For physics, Redish gave these arguments.

- (a) physicists have good access to physics courses and students on which to test new curricula;
- (b) physicists and their departments directly benefit from physics education research;
- (c) education schools have limited funds for disciplinary education research; and
- (d) understanding what's going on in physics classes requires deep rethinking of physics and the cognitive psychology of understanding physics.

One might add that the researchers themselves must be excellent physics teachers with both content and "pedagogical content" knowledge [51,52] of a depth unlikely to be found among non-physicists.

The education of disciplinary experts in education research requires PhD programs at least as rigorous as those for experts in traditional research. The programs should include, in addition to the standard disciplinary graduate courses, some exposure to: the history and philosophy of education, computer science, statistics, political science, social science, economics, engineering, and, most importantly, cognitive science (*i.e.*, philosophy, psychology, artificial intelligence, linguistics, anthropology, and neuroscience). In my opinion, all scientific disciplines should consider offering PhD programs in education research.

As far as I know, physics leads the way in preparing future educational researchers and in researching undergraduate student learning – see e.g. Stockstad [53]. For links to over 50 U.S. Physics Education Research (PER) groups (many of them offering Ph.D.'s), over 200 PER papers published in the *American Journal of Physics* since 1972, and tests of cognitive and affective conditions see, respectively: Meltzer [54,55], and NCSU 2005 [56]. The very active PER discussion list PhysLrnR <http://listserv.boisestate.edu/archives/physlrnr.html> logged over 1100 posts in 2006. To access the archives of PhysLrnR one needs to subscribe, but that takes only a few minutes by clicking on <http://listserv.boisestate.edu/archives/physlrnr.html> and then clicking on "Join or leave the list (or change settings)." If you're busy, then subscribe using the "NOMAIL" option under "Miscellaneous." Then, as a subscriber, you may access the archives and/or post messages at any time, while receiving NO MAIL from the list!

V. LESSON 5: The development of effective educational methods within each discipline requires a redesign process of continuous long-term classroom use, feedback, assessment, research analysis, and revision.

Wilson and Daviss [57] suggest that the "redesign process," used so successfully to advance technology in aviation, railroads, automobiles, and computers can be adapted to K–12 education reform through "System Redesign Schools." Redesign processes in the reform of introductory undergraduate physics education have been undertaken and described by McDermott [58] and by Hake [1]. In my opinion, "redesign" at both the K–12 and undergraduate levels can be greatly assisted by the promising "Scholarship of Teaching & Learning" movement - see e.g., Carnegie Academy [59] and IJ-SOTL [60].

VI. LESSON 6: Although non-traditional IE methods appear to be much more effective than T methods, there is need for more research to develop better strategies for enhancing student learning.

On a test as elemental as the FCI, it would seem that reasonably effective courses should yield normalized gains g 's above 0.8, but thus far very few above 0.7 have, to my knowledge, been reported. This and the poor showing on the pre/post MPEX test of student understanding of the nature of science and education [47] indicate that more work needs to be done to improve IE methods. It would seem that understanding of science might be improved by:

- (a) students' apprenticeship research experiences [61,62];
- (b) epistemologically oriented teachers, materials, and class activities [48,49,63,64,65];
- (c) enrollment in courses featuring interactive engagement among students and disciplinary experts from different fields, all in the same classroom at the same time [66];
- (d) further investigation of the connection between critical thinking ability and normalized gain on conceptual tests (see e.g., Coletta & Phillips [67]; Coletta, Phillips, & Steinert [68,69]);
- (e) better communication between educational researchers and cognitive scientists - see e.g. "Cognitive Science and Physics Education Research: 'What we've got here is a failure to communicate'" [70].
- (f) multifaceted assessments - see e.g. Etkina *et al.* [71] - to gauge the effectiveness of introductory courses in promoting students' capacities [2] in areas other than conceptual understanding: e.g., students':
 - (i) satisfaction with and interest in physics;
 - (ii) understanding of the nature, methods, and limitations of science;
 - (iii) understanding of the processes of scientific

- inquiry such as experimental design, control of variables dimensional analysis, order-of-magnitude estimation, thought experiments, hypothetical reasoning, graphing, and error analysis;
- (iv) ability to articulate their knowledge and learning processes;
- (v) ability to collaborate and work in groups;
- (vi) communication skills;
- (vii) ability to solve real-world problems;
- (viii) understanding of the history of science and the relationship of science to society and other disciplines;
- (ix) understanding of, or at least appreciation for, "modern" physics;
- (x) ability to participate in authentic research.

In my opinion, more support should be given by universities, foundations, and governments to the development of a *science of education* spearheaded by *disciplinary* education researchers working in concert with cognitive scientists and education specialists. In the words of cognitive psychologists Anderson *et al.* [72],

"The time has come to abandon philosophies of education and turn to a *Science of Education* (...) If progress is to be made to a more scientific approach, traditional philosophies (...) (such as radical constructivism) (...) will be found to be like the doctrines of folk medicine. They contain some elements of truth and some elements of misinformation (...) only when a science of education develops that sorts truth from fancy—as it is beginning to develop now—will dramatic improvements in educational practice be seen".

However, it should be emphasized that the development of better strategies for the enhancement of student learning through a *Science of Education* will not improve the educational system unless

- (a) university and K–12 teachers are educated to effectively implement those strategies, and
- (b) universities start to think of education in terms of *student learning* rather than the *delivery of instruction* - see e.g., "From Teaching to Learning: A New Paradigm for Undergraduate Education" [73], and "The Physics Education Reform Effort: A Possible Model for Higher Education?" [16].

ACKNOWLEDGEMENT

I thank (a) Josip Slisko of the University of Puebla, Mexico, for informing me of the new journal *Latin-American Journal of Physics Education* (LAJPE) <<http://www.journal.lapen.org.mx/>>, and suggesting that I contribute this article; and (b) LAJPE editor César Mora for his helpfulness.

REFERENCES

- [1] Hake, R. R., *Interactive-engagement vs traditional methods: A six thousand-student survey of mechanics test*

- data for introductory physics courses, *Am. J. Phys.* **66**, 64-74 (1998); online at <http://www.physics.indiana.edu/~sdi/ajpv3i.pdf>.
- [2] Hake, R. R., *Interactive-engagement methods in introductory mechanics courses*, 1998) online at <http://www.physics.indiana.edu/~sdi/IEM-2b.pdf> a crucial companion paper to Hake [1].
- [3] Hestenes, D., M. Wells, & Swackhamer, G., *Force Concept Inventory*, *Phys. Teach.* **30**, 141-158 (1992); online (except for the test itself) at <http://modeling.asu.edu/R&E/Research.html>. The 1995 revision by Halloun, Hake, Mosca, & Hestenes is online (password protected) at the same URL, and is available in Chinese, Czech, English, Finnish, French, German, Greek, Italian, Malaysian, Persian, Portuguese, Russian, Spanish, Swedish, & Turkish.
- [4] Halloun, I. & Hestenes, D., *The initial knowledge state of college physics students*, *Am. J. Phys.* **53**, 1043-1055 (1985); online at <http://modeling.asu.edu/R&E/Research.html>. Contains the "Mechanics Diagnostic" test, precursor to the "Force Concept Inventory".
- [5] Halloun, I. & Hestenes, D., *Common sense concepts about motion*, *Am. J. Phys.* **53**, 1056-1065 (1985); online at <http://modeling.asu.edu/R&E/Research.html>.
- [6] Hake, R. R., *Lessons from the physics education reform effort*, *Ecology and Society* **5**, 28 (2002); online (ONLY) at <http://www.ecologyandsociety.org/vol5/iss2/art28/>. Ecology and Society (formerly Conservation Ecology) is a free online "peer-reviewed journal of integrative science and fundamental policy research" with about 11,000 subscribers in about 108 countries. See also [15].
- [7] Krause, S., Birk, J. Bauer, R., Jenkins, B. & Pavelich, M. J. *Development, Testing, and Application of a Chemistry Concept Inventory*, 34th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, 20-23 October (2004); online at <http://fie.engrng.pitt.edu/fie2004/papers/1213.pdf>.
- [8] Froyd, J., Layne, J. & Watson, K. *Issues Regarding Change in Engineering Education*, 2006 Frontiers in Education Conference (FIE 2006), 2006; online at <http://fie.engrng.pitt.edu/fie2006/papers/1645.pdf>.
- [9] Evans, D. L., Gray, G. L., Krause, S., Martin, J. Midkiff, C., Notaros, B. M., Pavelich, M., Rancour, D., Reed-Rhoads, T., Steif, P., Streveler, R. & Wage, K. , *Progress On Concept Inventory Assessment Tools*, 33rd ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, November 5-8 (2003); Boulder, CO; online at <http://fie.engrng.pitt.edu/fie2003/papers/1346.pdf>.
- [10] Handelsman, J., D. Ebert-May, R. Beichner, P., Bruns, A., Chang, R., DeHaan, J., Gentile, S., Lauffer, J., Stewart, Tilghman, S. M. & Wood, W. B., *Scientific Teaching*, *Science* **304** , 521-522 (2004), April; online at <http://www.plantpath.wisc.edu/fac/joh/scientificteaching.pdf> (100 kB). See also the supporting material at <http://scientificteaching.wisc.edu/resources.htm> [URL's are specified for some, but (unfortunately) not all, online materials].
- [11] McDermott, L. C. & Redish, E. F., *RL-PERI: Resource letter on physics education research*, *Am. J. Phys.* **67**, 755-767 (1999); online at <http://www.physics.umd.edu/rgroups/ripe/perg/cpt.html>.
- [12] Redish, E., *Millikan Award Lecture Building a Science of Teaching Physics*, *Am. J. Phys.* **67**, 562-573 (1999); online at <http://www.physics.umd.edu/rgroups/ripe/perg/cpt.html>.
- [13] Thacker, B. A. *Recent advances in classroom physics*, *Rep. Prog. Phys.* **66**, 1833-1864 (2003); online at <http://www.iop.org/EJ/abstract/0034-4885/66/10/R07>.
- [14] Heron, P. R. L. & Meltzer, D. E., *The future of physics education research: Intellectual challenges and practical concerns*, *Am. J. Phys.* **73**, 459-462 (2005); online at <http://www.physicseducation.net/docs/Heron-Meltzer.pdf>.
- [15] Hake, R. R., *Assessment of Physics Teaching Methods*, Proceedings of the UNESCO ASPEN Workshop on Active Learning in Physics, Univ. of Peradeniya, Sri Lanka, 2-4 Dec., (2002); online at <http://www.physics.indiana.edu/~hake/Hake-SriLanka-Assessb.pdf>. [UNESCO = United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization; ASPEN = ASian Physics Education Network.] See Section 5 for suggestions on the administration and reporting of diagnostic pre/post tests.
- [16] Hake, R. R., *The Physics Education Reform Effort: A Possible Model for Higher Education?*, (2005); online at <http://www.physics.indiana.edu/~hake/NTLF42.pdf>. This is a slightly edited version of an article that was (a) published in the National Teaching and Learning Forum **15**(1), December, online to subscribers at <http://www.ntlf.com/FTPSite/issues/v15n1/physics.htm>, and (b) disseminated by the *Tomorrow's Professor* list <http://ctl.stanford.edu/Tomprof/postings.html> as Msg. 698 on 14 Feb 2006. For an executive summary see Hake [17].
- [17] Hake, R. R., *A Possible Model For Higher Education: The Physics Reform Effort* (Author's Executive Summary),” *Spark* (American Astronomical Society Newsletter), June (2006), online at <http://www.aas.org/education/spark/SparkJune06.pdf>. Scroll down about 4/5 of the way to the end of the newsletter.
- [18] Hake, R. R., *Possible Palliatives for the Paralyzing Pre/Post Paranoia that Plagues Some PEP's*, *Journal of MultiDisciplinary Evaluation*, Number 6, November, (2006), online at http://evaluation.wmich.edu/jmde/JMDE_Num006.html
- [19] Hake, R. R., *Should We Measure Change? Yes!*, (2007) online at <http://www.physics.indiana.edu/~hake/MeasChangeS.pdf> > or as ref. [50] at <http://www.physics.indiana.edu/~hake>. To appear as a chapter in Hake, R. R. *Evaluation of Teaching and Student Learning in Higher Education*, in preparation.
- [20] Hake, R. R. *Design-Based Research in Physics Education Research: A Review*, in Kelly, A. E., Lesh, R. A. & Baek, J. Y. (in press), *Handbook of Design Research Methods in Mathematics, Science, and Technology*

- Education, Lawrence Erlbaum 2007; online at <http://www.physics.indiana.edu/~hake/DBR-Physics3.pdf>, or as ref. [45] at <http://www.physics.indiana.edu/~hake>.
- [21] Wieman, C. & Perkins, K., *Transforming Physics Education*, Phys. Today **58**, 36-41 (2005); online at <http://www.colorado.edu/physics/EducationIssues/papers/PhysicsTodayFinal.pdf>. Carl Wieman was awarded the 2001 Nobel prize in physics.
- [22] Wieman, C., *Engaging Students with Active Thinking*, Peer Review (a publication <http://www.aacu.org/peerreview/index.cfm>) of the Association of American Colleges and Universities <http://www.aacu.org/>), Winter, (2005); online at http://findarticles.com/p/articles/mi_qa4115/is_200501/ai_n13634587/print.
- [22a] Chabay, R. W., *Qualitative understanding and retention*, AAPT Announcer **27**, 96 (1997).
- [23] Francis, G. E., Adams, J. P. and Noonan, E. J., *Do they stay fixed?*, Physics Teacher **36**, 488-491 (1998); online to subscribers at <http://scitation.aip.org/dbt/dbt.jsp?KEY=PHTEAH&Volume=36&Issue=8>.
- [24] Bernhard, J., *Does active engagement curricula give long-lived conceptual understanding?* Pages 749-752 in R. Pinto and S. Surinach, editors. *Physics teacher education beyond 2000*. Elsevier, Paris, France, 2001; online at http://staffwww.itn.liu.se/~jonbe/fou/didaktik/papers/girep2000_active.pdf.
- [25] Klymkowsky, M. W., Garvin-Doxas, K. & Zeilik, M., *Bioliteracy and Teaching Efficiency: What Biologists Can Learn from Physicists*, Cell Biology Education **2**, 155-161 (2003); online at <http://www.lifescied.org/cgi/reprint/2/3/155>.
- [26] Klymkowsky, M. W. *Background on the BCI*, (2007); online at <http://bioliteracy.net>, click on "Background on the BCI" (Biology Concept Inventory) in the left column.
- [27] Epstein, J., *The Calculus Concept Inventory*, abstract online at 2006 Conference on Research in Undergraduate Mathematics Education, (2006); <http://cresmet.asu.edu/crume2006/Abstracts.html>, scroll down about one third of the way to the bottom.
- [28] Brogt, E., D. Sabers, E. E. Prather, G. L. Deming, Hufnagel, B. and Slater, T. F., *Analysis of the Astronomy Diagnostic Test*, Astronomy Education Review **1**, (2007); online at <http://aer.noao.edu/cgi-bin/article.pl?id=239>.
- [29] Libarkin, J. C. & Anderson, S. W., *Assessment of Learning in Entry-Level Geoscience Courses; Results from the Geoscience Concept Inventory*, Journal of Geoscience Education **53**, 394-401 (2005); online at http://www.nagt.org/files/nagt/jge/abstracts/Libarkin_v53_p394.pdf.
- [30] Thornton, R. K., and Sokoloff, D. R., *Learning motion concepts using real-time microcomputer-based laboratory tools*, Am. J. Phys. **58**, 858-867 (1990); online to subscribers at <http://scitation.aip.org/dbt/dbt.jsp?KEY=AJPIAS&Volume=58&Issue=9>.
- [31] Thornton, R. K. and Sokoloff, D. R., *Assessing student learning of Newton's laws: the force and motion conceptual evaluation and the evaluation of active learning laboratory and lecture curricula*, Am. J. Phys. **66**, 338-351 (1998); online to subscribers at <http://scitation.aip.org/dbt/dbt.jsp?KEY=AJPIAS&Volume=66&Issue=4>.
- [32] Bruff, D., *Classroom Response System Bibliography*, Vanderbilt Center for Teaching, 2007; online at http://www.vanderbilt.edu/cft/resources/teaching_resources/technology/crs_biblio.htm.
- [33] Hake, R. R., *Re: Review article on electronic instructional polling?*, (2007); online at <http://listserv.nd.edu/cgi-bin/wa?A2=ind0706&L=Pod&P=R9979&I=3>. Post of 16 Jun 2007 17:04:56 -0700 to AERA-J, AERA-L, Phys-L, PhysLrnR, and POD.
- [34] Reif, F., and Scott, L. A., *Teaching scientific thinking skills: students and computers coaching each other*, Am. J. Phys. **67**, 819-831 (1999); online at <http://www.pals.gen.umn.edu/pdf/files/ajp.pdf>. See also <http://www.pals.gen.umn.edu/index.html>.
- [35] Novak, G., Patterson, E., Gavrin, A. and Christian, W. *Just-in-Time Teaching: Blending Active Learning and Web Technology*, Prentice-Hall, 1999; for an overview see <http://webphysics.iupui.edu/jitt/jitt.html>.
- [36] Gavrin, A. D., *Just in time teaching in physics and beyond: the WebScience Project at IUPUI*, AAPT Announcer **31**, 75 2001; available online at: <http://webphysics.iupui.edu/webscience/webscience.html>
- [37] Nuhfer, E. & Knipp, D. *The Knowledge Survey: A Tool for All Reasons*, To Improve the Academy **21**, 59-78 (2003); online at http://www.isu.edu/ctl/facultydev/KnowS_files/KnowS.htm.
- [38] Hake, R. R., *Re: Measuring Teaching Performance*, POD post of 13 May (2005); online at <http://listserv.nd.edu/cgi-bin/wa?A2=ind0505&L=pod&P=R9303&I=3>.
- [39] Wilson, M. R. & Bertenthal, M. W. eds., *Systems for State Science Assessment*, Nat. Acad. Press, 2005; online at http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=11312.
- [40] Cronbach, L. J., & Furby, L., *How we should measure 'change'—or should we?* Psychological Bulletin **74**, 68–80 (1970).
- [41] Suskie, L., *Assessing Student Learning: A Common Sense Guide*. Anker Publishing, 2004. Anker information is at <http://tinyurl.com/3e38yy>.
- [42] Lagemann, E. C., *An Elusive Science: The Troubling History of Educational Research*. University of Chicago Press, 2000 - information at <http://www.press.uchicago.edu/cgi-bin/hfs.cgi/00/13993.ctl>.
- [43] Bok, D., *Our Underachieving Colleges: A Candid Look at How Much Students Learn and Why They Should Be Learning More*. Princeton University Press, 2005; information including the preface and Chapter 1 is online at <http://press.princeton.edu/titles/8125.html>. See also Sect. 5 of [74]: "University Leaders Bemoan the Inertia of Higher Education: Why Is It So Slow To Recognize the

Value of Interactive Engagement Methods in Promoting Higher-Level Learning?"

[44] Hake, R. R., *Re: Measuring Content Knowledge*, POD posts of 14 & 15 Mar (2004); online at <http://listserv.nd.edu/cgi-bin/wa?A2=ind0403&L=pod&P=R13279&I=-3> and

<http://listserv.nd.edu/cgi-bin/wa?A2=ind0403&L=pod&P=R13963&I=-3>

[45] Hake, R. R., *Pre/post Tests For College Biology*, (2007); online at <http://listserv.nd.edu/cgi-bin/wa?A2=ind0709&L=pod&O=A&P=8765>. Post of 8 Sep 2007 22:01:17-0700 to AP-Bio, Biopi-L, Biolab (rejected), PhysLrnR, & STLHE-L.

[46] Hake, R. R. *Pre/post Tests For College Chemistry*, (2007); online at <http://listserv.nd.edu/cgi-bin/wa?A2=ind0709&L=pod&O=A&P=9031>. Post of 9 Sep 2007 18:59:09-0700 to AERA-C, AERA-J, AERA-L, AERA-C, AP-Chem, PhysLrnR, & STLHE-L.

[47] Redish, E. F., Saul, J. M. and Steinberg, R. N., *Student expectations in introductory physics*, Am. J. Phys. **66**, 212-224, (1998); online at <http://www.physics.umd.edu/rgroups/ripe/talks/ExpPreF.PDF>.

[48] Elby, A., *Another reason that physics students learn by rote*, Physics Education Research (Supplement to American Journal of Physics) **67**, S52-S57 (1999); online at http://www2.physics.umd.edu/~elby/papers/Elby_Expectations_1999.pdf.

[49] Elby, A., *Helping physics students learn how to learn*. Physics Education Research (Supplement to American Journal of Physics) **69**, S54-S64 (2001); online at http://www2.physics.umd.edu/~elby/papers/epist1/epist_curric.htm.

[50] Halloun, I., and Hestenes, D., *Interpreting VASS dimensions and profiles*, Science & Education **7**, 553-577 (1998); online (password protected) at <http://modeling.la.asu.edu/R&E/Research.html>.

[50a] Mahajan, S. & Hake, R. R. *Is it time for a physics counterpart of the Benzet/Berman math experiment of the 1930's?*, Physics Education Research Conference 2000: Teacher Education, (2000) online at <http://arxiv.org/abs/physics/0512202>.

[51] Shulman, L. *Those who understand: knowledge growth in teaching*, Educational Researcher **15**, 4-14 (1986); online to subscribers at <http://edr.sagepub.com/cgi/reprint/15/2/4>.

[51a] Adams, W. K., Perkins, K. K., Podolefsky, N. S., Dubson, M., Finkelstein, N. D. & Wieman, C. E., *New instrument for measuring student beliefs about physics and learning physics: The Colorado Learning Attitudes about Science Survey*, Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res. **2**, (2006); online at <http://tinyurl.com/2k2acg>.

[52] Shulman, L., *Knowledge and teaching: foundations of the new reform*, Harvard Educational Review **57**, 1-22 (1987).

[53] Stokstad, E., *Reintroducing the Intro Course*, Science **293**, 1608-1610 (2001), 31 August. Stokstad wrote: "Physicists are out in front in measuring how well students learn the basics, as science educators incorporate hands-on

activities in hopes of making the introductory course a beginning rather than a finale."

[54] Meltzer, D., *Physics Education Links*, (2002); online at <http://www.physicseducation.net/links/index.html>.

[55] Meltzer, D. *Listing of Physics Education Research papers published in the American Journal of Physics since 1972*, (2005) online at <http://tinyurl.com/2u6vaf>.

[56] NCSU (Assessment Instrument Information Page, Physics Education R & D Group, North Carolina State University, 2005); online at <http://www.ncsu.edu/per/TestInfo.html>.

[57] Wilson, K. G., and Daviss, B., *Redesigning education*. Henry Holt, (1994). For information see <http://www.physics.mps.ohio-state.edu/~kgw/RE.html>.

[58] McDermott, L. C., *Millikan lecture 1990: What we teach and what is learned: closing the gap*, Am. J. Phys. **59**, 301-315 (1991); online to subscribers at <http://scitation.aip.org/dbt/dbt.jsp?KEY=AJPIAS&Volume=59&Issue=4>.

[59] Carnegie Academy, *Scholarship of teaching and learning*, (2007); online at: <http://www.carnegiefoundation.org/programs/index.asp?key=21>.

[60] IJ-SOTL, *International Journal for the Scholarship of Teaching & Learning*, (2007); – see <http://www.georgiasouthern.edu/ijstol/>.

[61] Collins, A., J., Brown, S. and Newman, S. (Cognitive apprenticeship: teaching students the craft of reading, writing, and mathematics," pp. 453-494, in L. B. Resnick, editor. *Knowing, learning, and instruction: essays in honor of Robert Glaser*. Lawrence Erlbaum, 1989).

[62] Brown, J. S., Collins, A. and Duguid, P., *Situated cognition and the culture of learning*, Educational Researcher **18**, 34-41 (1989); eventually to be online to subscribers at <http://rer.sagepub.com/archive/>.

[63] May, D. B. & Etkina, E., *College Physics Students' Epistemological Self-Reflection and Its Relationship to Conceptual Learning*, Am. J. Phys. **70**, 1249-1258 (2002); online at <http://scitation.aip.org/dbt/dbt.jsp?KEY=AJPIAS&Volume=70&Issue=12>.

[64] Hammer, D. & Elby, A., *Tapping students' epistemological resources*, Journal of the Learning Sciences **12**, 53-91 (2003). Preprint on line at <http://www2.physics.umd.edu/%7Edavidham/tapping.pdf>.

[65] Lising, L. & Elby, A., *The impact of epistemology on learning: A case study from introductory physics*, Am. J. Phys. **73**, 372-382 (2005); online at <http://scitation.aip.org/dbt/dbt.jsp?KEY=AJPIAS&Volume=73&Issue=4>.

[66] Benbasat, J. A., & Gass, C. L., *Reflections on integration, interaction, and community: the Science One program and beyond*, Conservation Ecology **5**, 26 (2001); online (ONLY) at <http://www.consecol.org/Journal/vol5/iss2/art26>.

[67] Coletta, V. P. and Phillips, J. A., *Interpreting FCI Scores: Normalized Gain, Preinstruction Scores, & Scientific Reasoning Ability*, Am. J. Phys. **73**, 1172-1182 (2005); online at <http://tinyurl.com/e5k7m>.

- [68] Coletta, V. P., Phillips, J. A. & Steinert, J. J., *Why You Should Measure Your Students' Reasoning Ability*, Phys. Teach. **45**, 235-238 (2007); online at <http://tinyurl.com/2gn9aa>.
- [69] Coletta, V. P., Phillips, J. A. & Steinert, J. J., *Interpreting force concept inventory scores: Normalized gain and SAT scores*, Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res. **3**, 100-106 (2007); online at <http://prst-per.aps.org/abstract/PRSTPER/v3/i1/e010106>.
- [70] Hake, R. R., *Cognitive Science and Physics Education Research: 'What we've got here is a failure to communicate*, submitted to the Physics Education Research Conference (PERC 2007), August (2007), Greensboro, NC; soon to be online at <http://www.physics.indiana.edu/~hake/FailureCommunicate3.pdf>.
- [71] Etkina E., Van Heuvelen, A., White-Brahmia, S., Brookes, D. T., Gentile, M., Murthy, S. Rosengrant, D. & Warren, A., *Scientific abilities and their assessment*, Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res. **2**, 020-103 (2006); online at <http://prst-per.aps.org/pdf/PRSTPER/v2/i2/e020103>.
- [72] Anderson, J. R., Reder, L. M. and Simon, H. A. (“Radical constructivism and cognitive psychology,” pp. 227-278 in D. Ravitch, editor. *Brookings papers on education policy—1998*. Brookings Institution Press, 1998); online at http://act-r.psy.cmu.edu/papers/145/98_jra_lmr_has.pdf.
- [73] Barr, R. B. & Tagg, J. *From Teaching to Learning: A New Paradigm for Undergraduate Education*, Change **27**, 13-25 (1995), November/December. Reprinted in D. Dezure, *Learning from Change: Landmarks in Teaching and Learning in Higher Education from Change 1969-1999*. American Association for Higher Education, pp. 198-200. Also online at <http://tinyurl.com/8g6r4>.
- [74] Hake, R. R., *Can Scientific Research Enhance the Art of Teaching?* invited talk, AAPT Greensboro meeting, 31 July, 2007; online at <http://www.physics.indiana.edu/~hake/Sci&Art3.pdf> (1.2 MB), or as ref. 50 at <http://www.physics.indiana.edu/~hake/>.

Tutoriales para Física Introductoria: Una experiencia exitosa de Aprendizaje Activo de la Física



Julio Benegas

Departamento de Física/IMASL, Fac. Cs. Fís. Mat. y Naturales, Univ. Nacional de San Luis/CONICET, Argentina

E-mail: jbenegas@unsl.edu.ar

(Recibido el 30 de Julio de 2007; aceptado el 17 de Septiembre de 2007)

Resumen

Se relatan dos experiencias locales de aplicación y desarrollo de metodologías de enseñanza activa en cursos de física del 11° año de instrucción. La metodología de aprendizaje activo utilizada en ambos casos es Tutoriales para Física Introductoria, desarrollado por Lillian McDermott y su Physics Education Group en la Universidad de Washington en Seattle, USA. Esta metodología, una de las muy pocas que hasta el momento han sido traducidas al español [1]. Está basada en un extenso trabajo desarrollado en las últimas dos décadas sobre las dificultades características de aprendizaje de los diversos temas de la física general y el consecuente desarrollo de actividades (Tutoriales). La evaluación de la instrucción se ha realizado mediante la aplicación de diagnósticos de respuestas múltiples al inicio (pre-test) y al final de la instrucción (post-test). Este procedimiento permite valorar el efecto del uso de Tutoriales, y su comparación con el resultado de otras estrategias didácticas, tanto locales como aquellas realizadas en otros sistemas educativos. Se muestran aquí los excelentes resultados de la aplicación de Tutoriales, aún comparando con poblaciones de formación superior y/o de sistemas educativos más desarrollados. Se destaca que el mejor aprendizaje se logra en general en toda la clase, independientemente del sexo y nivel de rendimiento.

Palabras clave: Errores conceptuales sobre fuerza, Física Educativa, enseñanza de la mecánica, métodos y estrategias de aprendizaje.

Abstract

In this work are reported two experiences of the application of Tutorials in Introductory Physics, developed in the University of Washington at Seattle by Prof. Lillian McDermott and the Physics Education Group. This methodology, the first translated to Spanish [1] it is based on the results of more than 20 years of Physics Education Research (PER) on the main learning difficulties of different subjects of basic physics and the corresponding curriculum development. The evaluation has been realized by comparison of the performance of groups subjected to different teaching approaches. The measuring instruments have been in all cases single response, multiple choice test also developed upon the results of PER. Excellent results are obtained in both applications, even when performance is compared with student populations of more demanding and advanced educational systems. It is noted that higher learning's are obtained in the whole class, independently of student performance and sex.

Key words: Misconceptions in force, Physics Education, teaching of mechanics, methods and strategies of learning.

PACS: 01.30.Os, 01.40.-d, 45.20.d-, 01.40.gb

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La realidad socioeducativa en muchos sistemas educativos, incluyendo el español y los de diversos países latinoamericanos, indica que existe un muy bajo nivel de logro de los estudiantes de ciencias que ingresan en la universidad, tanto en Matemáticas como en otras disciplinas científicas como la Física. Por ejemplo en un estudio realizado durante el curso 1996-97 en las universidades de Alcalá y de Burgos [2], se encontró que en la asignatura de Física de los Procesos Biológicos del primer curso de la licenciatura en CC. Biológicas de la

Universidad de Alcalá, se presentaban al examen final ordinario un 66% de los matriculados, aprobando un 51% de los presentados, es decir, una tercera parte de los matriculados. Después de las dos convocatorias de ese año seguía quedando pendiente un 55% de los alumnos matriculados. En la asignatura de Física General de la licenciatura en CC. Químicas de la Universidad de Burgos, se presentaron al examen final ordinario el 48% de los matriculados, aprobando un 39% de los presentados, es decir, un 19% de los matriculados. En este caso, después de las dos convocatorias de ese curso quedaba pendiente un 70% de los alumnos matriculados. Incluso para los

alumnos de Física Médica de la licenciatura en Medicina de la Universidad de Alcalá que, de acuerdo con la calificación de acceso a la universidad, tienen de los más altos rendimientos académicos, el porcentaje de alumnos pendientes de aprobar la asignatura después de las dos convocatorias del curso 1996/1997, era del 36% sobre los alumnos matriculados. En los países latinoamericanos, tanto los escasos estudios sistemáticos [3] como la experiencia cotidiana alertan que la situación es similar, manteniéndose, cuando no empeorando el rendimiento de los alumnos ingresantes a la universidad, como tan a menudo lo reflejan los medios informativos [4].

Esta realidad es, para muchos de nosotros, paradójica, puesto que la comprensión de los problemas de enseñanza/aprendizaje de la Física en el nivel universitario ha experimentado en los últimos 25 años un desarrollo muy importante. En este período se han logrado enormes avances en la comprensión de las dificultades de aprendizaje de los temas principales de la llamada “Física Básica” y en el desarrollo de currículo adecuado para superar dichas dificultades [5,6,7,8,9,10]. Los resultados de los estudios sobre concepciones alternativas [11,12] han sido tomados como base para el desarrollo de metodologías de enseñanza activa en la universidad y para la confección de diagnósticos especializados (una muy buena descripción se puede encontrar en Redish [13]). Esta aproximación didáctica, denominada en general como enseñanza para el aprendizaje activo (active learning), ha demostrado en numerosas investigaciones y aplicaciones experimentales ser más efectiva que la instrucción tradicional [9,10,14].

A pesar de estos resultados, la experiencia cotidiana en los distintas instituciones y sistemas educativos nos dice que la práctica real de nuestras aulas en la escuela secundaria y en el nivel universitario básico ha cambiado poco o nada [15]. En España, por ejemplo, el informe del Plan Nacional de Evaluación de las Universidades indica que la clase magistral sigue siendo la predominante, aun cuando esta metodología ha sido probada como muy ineficiente para producir aprendizajes significativos. Es claro que en los países latinoamericanos la situación es similar.

Los excelentes resultados de la investigación en aprendizaje de la física, con el consecuente desarrollo de muy exitosas estrategias de enseñanza, son fruto de diversas circunstancias que rodean la educación de las ciencias en la actualidad y que nacen del paradigma de “física para todos” (una parte de “ciencia para todos”) que reclama una sociedad basada en el desarrollo tecnológico. En primer lugar debió considerarse que las clases de física debían dejar de ser para unos pocos “elegidos” (es decir aquella pequeña fracción de la población con intereses y aptitudes especiales para la física) para convertirse en clases multitudinarias, donde la enorme mayoría de estudiantes no tienen a física como eje de sus carreras. Después de experiencias con una importante motivación y asignación de recursos humanos y materiales, que no fueron exitosas en las décadas del 60 y del 70, finalmente alrededor de 1980 se comenzó con una aproximación diferente, poniendo esta vez al estudiante y a su proceso de

aprendizaje en el centro del proceso de enseñanza. Se comprendió que el estudiante debía construir su propio proceso de aprendizaje, partiendo de un estado inicial de conocimientos proveniente de sus experiencias de vida, el cual debe ser modificado por la instrucción para llegar al estado final deseado de comprensión de la disciplina. Comenzaron en ese tiempo los estudios de dificultades características de aprendizaje, sobre todo lo que se entiende como concepciones alternativas, o concepciones de sentido común [9]. Por estas entendemos aquellas explicaciones que se tienen sobre cómo funcionan las cosas en el mundo físico (o real), pero que se contraponen a las explicaciones actualmente aceptadas como correctas por los expertos de la disciplina. Algunos estudios muestran que estas concepciones alternativas constituyen una red de creencias, verdaderas teorías alternativas, que se contraponen a las estructuras científicas aceptadas, y que por lo tanto se constituyen en importantes barreras u obstáculos para el aprendizaje. McDermott [15] y DiSessa [16], entre otros, encuentran que estas estructuras de conocimiento alternativas se conforman con débiles patrones de asociación, formando estructuras difusas, a veces inclusive contradictorias entre sí y dependientes del contexto de aplicación.

Para poder atacar este problema desde una base científica, a partir del año 1980 se han llevado a cabo estudios de concepciones alternativas y de dificultades características en la mayoría de los temas importantes de la física [9]. Los resultados de estos estudios han sido tomados como base para el desarrollo de metodologías de enseñanza activa y para la confección de diagnósticos especializados [12].

En este punto resulta importante precisar que se entiende por enseñanza tradicional y por enseñanza activa. La enseñanza tradicional de la física (y de otras ciencias) supone esencialmente que el alumno por repetición aprenderá cada uno de los conceptos de la disciplina y formará con ellos la estructura conceptual de la ciencia. La instrucción es generalmente deductiva, con el docente irradiando conocimientos, mientras que el alumno debe recibirlos y asimilarlos, en una actitud esencialmente pasiva.

En su reconocido libro sobre enseñanza de la física, Arons [17] escribió: “...debo puntualizar ahora la siguiente verdad no deseada: tanto como rechazamos las implicancias, la investigación (en aprendizaje de la física) está mostrando que la simple exposición de ideas abstractas y desarrollos matemáticos (tan atractivos y lúcidos como podemos hacerlos) a oyentes pasivos conduce a resultados patéticamente bajos de aprendizaje y comprensión, excepto en aquel pequeño porcentaje de estudiantes especialmente dotados para la disciplina...”.

Este comentario ha sido comprobado en varias ocasiones por investigadores de la educación de la física. Al respecto McDermott [8] expone seis generalizaciones en enseñanza-aprendizaje que sintetizan los resultados de estas investigaciones:

- La facilidad para resolver problemas cuantitativos estándares no es un criterio adecuado para evaluar el entendimiento práctico.

- Frecuentemente las conexiones entre conceptos, representaciones formales y el mundo real son inexistentes después de instrucción tradicional.
- Ciertas concepciones erróneas no son superadas con una instrucción tradicional. El acceder a niveles más avanzados de instrucción no necesariamente incrementa en nivel de entendimiento de los conceptos básicos.
- La instrucción tradicional no promueve una estructura conceptual coherente.
- El incremento en la capacidad de análisis y razonamiento no es el resultado de una instrucción tradicional.
- Para la mayoría de los estudiantes la enseñanza basada en la exposición de contenidos es un modo ineficiente de instrucción. Para superar estos problemas los métodos de enseñanza activa ponen énfasis en el rol que el alumno debe tener en el proceso de construcción de su propio conocimiento. En esta aproximación didáctica el docente se transforma en un guía que ofrece al alumno material científicamente desarrollado para que resuelva sus dificultades de aprendizaje. Esto se hace teniendo en cuenta su situación inicial de conocimientos y diseñando, a partir de allí, un camino por el cual resuelva las inconsistencias y contradicciones entre sus creencias previas y el marco conceptual aceptado por los expertos de la disciplina.

En consonancia con las seis generalizaciones expuestas más arriba respecto del aprendizaje, McDermott [8] resume las siguientes generalizaciones (basadas también en la investigación en educación de la física) que debieran guiar el proceso de enseñanza:

- Para evaluar el aprendizaje son esenciales preguntas que requieran de un razonamiento cualitativo y de explicaciones verbales. Este tipo de preguntas constituyen a su vez una estrategia efectiva para el aprendizaje.
- Los estudiantes necesitan una práctica sostenida para interpretar el formalismo físico y relacionarlo con el mundo real.
- Dificultades conceptuales persistentes deben ser explícitamente atacadas en múltiples contextos.
- Los estudiantes deben participar en el proceso de construcción de modelos cualitativos y en la aplicación de estos modelos para predecir y explicar los fenómenos del mundo real.
- El razonamiento científico debe ser expresamente cultivado.
- Los estudiantes deben estar intelectualmente activos en el proceso de aprendizaje para desarrollar una comprensión funcional.

Estas conclusiones y principios de acción se enmarcan en una visión de la investigación de aprendizaje y enseñanza de la física que McDermott [8] define como ciencia empírica aplicada. Redish [13], en su disertación de aceptación del Premio Millikan, otorgado por la *Asociación Americana de Profesores de Física* (AAPT) por “sus notables y creativas contribuciones a la enseñanza de la física”, propone que para seguir avanzando las investigaciones deben tener una base teórica que enmarque

el trabajo de los distintos grupos y permita, por acumulación, la existencia de una reconocida base de conocimiento científico colectivo que caracterice a la enseñanza de la física como una ciencia y no como un arte. En su propuesta estos principios son:

1. El principio constructivista. Los individuos construyen su conocimiento procesando la información que ellos reciben construyendo patrones de asociación con sus conocimientos previos.
2. El principio contextual. Esta construcción individual depende del contexto, incluyendo los estados mentales del individuo.
3. El principio de cambio. Producir un cambio significativo en un patrón bien establecido es muy difícil, pero puede ser facilitado por una variedad de mecanismos o metodologías conocidas.
4. El principio de la función de distribución. Los individuos muestran una limitada, pero significativa variación en sus estilos de aprendizajes a los largo de un número de dimensiones.
5. El principio de aprendizaje social. Para la mayoría de los individuos el aprendizaje es más efectivo a través de las interacciones sociales. El último principio está basado en que la interacción entre pares actúa como herramienta de enorme valor pedagógico. Al discutir con su compañero más cercano y/o en pequeños grupos, los estudiantes se ven forzados a emitir sus razonamientos, los cuales son analizados críticamente por sus compañeros, y si la explicación no es clara y aceptada, generalmente es reelaborada socialmente hasta lograr el consenso necesario. Controlado por el profesor este mecanismo se ha probado de una enorme riqueza.

Estos cinco principios, basados en el constructivismo y en los trabajos de Vigotsky sobre la influencia del medio en el aprendizaje, son particularmente difíciles de aceptar por la comunidad de físicos profesionales, que fueron educados de una manera tradicional y que conforman esa ínfima minoría de la población que está especialmente dotada para el estudio de la disciplina. Para este selecto grupo se ha demostrado, además, que es más conveniente (y disfrutan de) el aprendizaje individual que el colectivo.

Las experiencias y el marco teórico descrito más arriba deberían ser básicos a la hora de programar la enseñanza de un curso de física. No solamente guían en la selección de temas y actividades, sino también que fijan el marco y las condiciones en que dos o más metodologías específicas pueden ser utilizadas complementaria y cooperativamente en un dado curso. Bajo estas premisas de la aprendizaje activo se están llevando adelante modificaciones curriculares y metodológicas tanto a nivel universitario como de escuela secundaria (Preparatoria). Describiremos aquí dos experiencias de aplicación de la metodología *Tutoriales para Física Introductoria* [1] en la escuela secundaria. El denominador común de estas experiencias es que se realizan en un ambiente didáctico muy controlado, en lo que pretendemos sea un círculo virtuoso de programación didáctica, instrumentación y evaluación.

II. TUTORIALES PARA FÍSICA INTRODUCTORIA: UNA ESTRATEGIA DIDÁCTICA FLEXIBLE PARA EL APRENDIZAJE ACTIVO

La metodología de Tutoriales para Física Introductoria ha sido desarrollada por el Grupo de Educación de la Física que dirige Lillian McDermott para los cursos introductorios de física que se dictan en la Universidad de Washington en Seattle (USA). Está basada en un extenso trabajo desarrollado en las últimas dos décadas sobre las dificultades características de aprendizaje de los diversos temas de la física general y el consecuente desarrollo de actividades (Tutoriales) para ayudar a los alumnos a vencer los distintos obstáculos de aprendizaje. Han sido el fruto de un enorme trabajo de investigación sobre las dificultades características de aprendizaje de cada uno de los temas, y del desarrollo científico de material curricular para la superación de estas dificultades [15].

Tutoriales están diseñados para desarrollar la comprensión conceptual de los temas de física básica, así como el razonamiento cualitativo y utilizan como estrategia de aprendizaje el conflicto cognitivo, tendiendo puentes entre lo que el alumno cree o sabe y el conocimiento científico que se quiere incorporar. La estrategia ha sido descrita por McDermott como de obtener información/confrontarla con lo que se cree/resolver discrepancias (elicit/confront/resolve).

Es una de las metodologías de aprendizaje activo más flexible, en el sentido que puede ser utilizada tanto para la introducción de conceptos, en reemplazo o reforzando la clase "teórica", o en algunos casos como práctico de laboratorio, así como una actividad de aprendizaje independiente y complementaria. Esto, sumado a casi ausencia de sofisticado material de laboratorio, lo hace adaptable a prácticamente cualquier circunstancia de instrucción.

La metodología didáctica consta de unas hojas de trabajo (el Tutorial propiamente dicho), de problemas para la casa (Ejercicios Complementarios) y de un Pre-test. El Tutorial consiste en una guía de actividades que los estudiantes, trabajando en grupos de 3 o 4 alumnos, desarrollan para construir los conceptos, partiendo de nociones que no entran en conflicto con sus concepciones previas. Las conclusiones a que son guiados sí pueden ser conflictivas para dichas preconcepciones, pero de este conflicto, discutido con sus pares en el grupo, y eventualmente con el docente, surge el conocimiento científico del tema tratado.

A. Secuencia didáctica de tutoriales

La aplicación de Tutoriales requiere de la realización de las siguientes actividades:

- la aplicación de un "pre- test de Tutorial", que los alumnos responden en una clase previa en alrededor de 10 a 15 minutos. Consiste normalmente de 2 o 3 preguntas cualitativas sobre el concepto(s) del Tutorial y tienen un doble objetivo: alertar a los estudiantes sobre los temas a estudiar, y proveer a los docentes de

información sobre los principales problemas de aprendizaje que los alumnos tienen sobre ese tema.

- Reunión de los docentes para analizar los resultados de los pre-tests y REALIZAR el propio Tutorial, en la misma forma que lo harán luego los alumnos. Los docentes, además de familiarizarse con el material, pueden identificar las preguntas con que guiarán, de manera socrática, la actividad de los alumnos. Este paso es esencial para el éxito de la estrategia didáctica.
- Los estudiantes realizan el Tutorial en clase, trabajando en pequeños grupos cooperativos. Toma entre 50 minutos (Seattle y otras universidades) hasta 2 horas (San Luis, universidad y escuela secundaria).
- Ejercicios complementarios, para realizar luego de la clase en forma individual, para afianzar los conceptos trabajados en el Tutorial. Es conveniente que tengan algún tipo de evaluación, y que sus resultados sean puestos a disposición de los alumnos para garantizar rol en el aprendizaje.
- En la evaluación del curso debería incluirse al menos un problema del tipo de Tutorial.

B. Ejemplos de aplicación de tutoriales en la escuela secundaria

B.1 La enseñanza de la mecánica clásica

Como ejemplos de aplicación nos referiremos a dos experiencias realizadas en distintas escuelas secundarias de San Luis, Argentina, en el 11° año de instrucción (alumnos de 16/17 años). La primera es de implementación en el curso de mecánica clásica. En este caso el concepto fundamental a comprender es el de fuerza, y las leyes que relacionan las fuerzas sobre un objeto y el movimiento resultante, incluyendo los conceptos de energía mecánica y de cantidad de movimiento, temas en los cuales existe una amplia literatura sobre las concepciones previas y dificultades de aprendizaje con que los estudiantes arriban al aula. Para una racional y efectiva planificación didáctica es siempre necesario que el docente conozca estas preconcepciones, su distribución y la importancia relativa de las mismas en la población estudiantil. En este caso es muy conveniente la utilización de diagnósticos surgidos de la investigación en enseñanza de la física, como el *Force Concept Inventory* (FCI), propuesto por Hestenes y colaboradores [12]. El FCI es un diagnóstico de 30 preguntas que propone como distractores un total de 28 preconceptos no newtonianos distribuidos entre seis dimensiones propuestas para el concepto fuerza. El análisis de las opciones incorrectas de cada una de las 30 preguntas brinda entonces una detallada distribución de los preconceptos en la población estudiantil, de su importancia absoluta y también de su importancia relativa.

El diagnóstico fue administrado al comienzo del año escolar (pre-test) de manera que sus resultados pudieran ser utilizados por el docente para programar las diversas actividades estudiantiles. Los resultados pueden resumirse diciendo que en la población analizada las principales dificultades a ser atacadas por la instrucción se refieren a:

La noción de fuerza como un ímpetu asociado al movimiento. Esta idea alternativa al concepto newtoniano de fuerza está fuertemente arraigado en los alumnos, adoptando distintas formas de acuerdo a la situación física presentada.

La idea de que objetos más pesados o más activos ejercen fuerzas dominantes cuando interaccionan con otros, que seguramente impondrá enorme resistencia a la asimilación del principio de acción y reacción.

Las diversas formas de concatenación de influencias, que interfieren con el correcto uso del principio de superposición de fuerzas enunciado en la 2da. Ley de Newton.

Las persistentes dificultades (a pesar de la instrucción del año anterior) para distinguir entre las variables cinemáticas, particularmente velocidad y aceleración, fundamentales para lograr un correcto esquema newtoniano de pensamiento.

Para afrontar estos problemas, el docente programó actividades basadas en metodologías de enseñanza surgidas en la última década de la investigación en enseñanza de la física. Estas actividades tuvieron como objetivo que los estudiantes confrontaran sus concepciones alternativas con el resultado de diversas experiencias, discutieran las mismas con sus compañeros (eventualmente con el docente) y resolvieran las inconsistencias. Se trató de seguir las generalizaciones enunciadas por McDermott [8], en el marco de los principios constructivistas y de aprendizaje grupal de Redish [13] citados al principio.

En la programación didáctica de este curso, además de los "Tutoriales para Física Introductoria", se utilizaron los Problemas Ricos en Contexto, desarrollados en la Universidad de Minnesota por Heller y Heller [13]. Se tuvo en cuenta en esta elección que la variabilidad de las respuestas frente al contexto requiere que la instrucción cuente con actividades en las que los alumnos puedan ver y vivenciar situaciones reales donde intervengan los conceptos objetos del aprendizaje. Los alumnos trabajaron en pequeños grupos cooperativos, tanto en el laboratorio como en resolución de problemas.

Los resultados obtenidos en el primer año de implementación se muestran en la Figura 2 donde se compara, para las 30 preguntas del FCI, el rendimiento post instrucción de los alumnos de secundaria con los de un curso de física para alumnos de ingeniería, en que se cubrió casi el mismo temario de mecánica clásica. Se observa que en casi todas las preguntas los alumnos de la escuela tuvieron mejor desempeño que los de 1er. año de la universidad, sobre todo si tenemos en cuenta que en la población de la escuela el post test consignado en la Figura 1 lo tomaron todos los alumnos, mientras que en el curso universitario lo tomaron solo los alumnos que tuvieron éxito en la materia (alrededor de la mitad de los que comenzaron a cursar y que tomaron el mismo diagnóstico como pretest).

Las dos últimas barras a la derecha de la figura indican los valores medios de todo el diagnóstico para cada población. El promedio de los alumnos de ingeniería fue de 39%, mientras que el desempeño promedio global de

los alumnos de 2do. Año Polimodal fue de 49%, es decir alrededor de un 25% superior a los alumnos de la universidad.

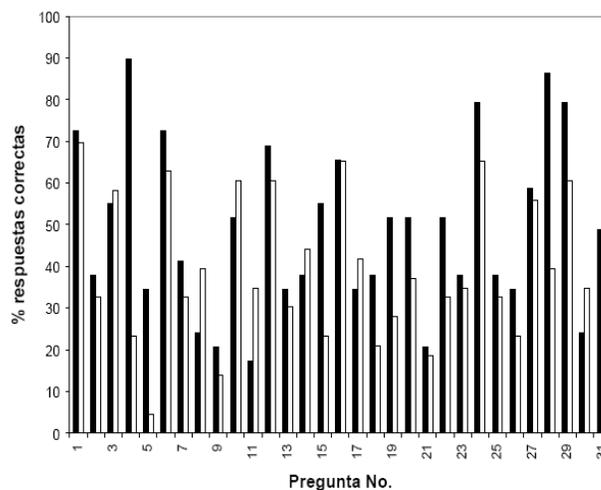


FIGURA 1. Resultados post instrucción del FCI. Las barras oscuras llenas representan el rendimiento (para cada una de las 30 preguntas) de los alumnos de 2do. Año Polimodal. Las barras claras representan el rendimiento de los alumnos universitarios de un curso de ingeniería de 1er. año de la UNSL. Las dos barras últimas a la derecha (item 31) indican el promedio para cada población del total del diagnóstico.

B.2 La enseñanza de circuitos eléctricos simples

Este trabajo consistió en una evaluación del aprendizaje logrado en el tema de circuitos eléctricos simples mediante la aplicación, también en el nivel 11° de enseñanza, de los "Tutoriales" "Corriente y resistencia" y "Diferencia de Potencial". Este rendimiento fue comparado con el logrado por la instrucción tradicional que se venía desarrollando hasta ahora. Ambas instrucciones, tanto la Experimental como la de Tradicional, han cubierto el mismo temario y en el mismo tiempo de instrucción. Los resultados después de la instrucción [19] han mostrado una importante diferencia en aprendizaje entre los alumnos que siguieron la enseñanza mediante Tutoriales, respecto a aquellos que siguieron la estrategia tradicional de instrucción. En esta experiencia nos propusimos además evaluar el conocimiento conceptual remanente un año después de la instrucción. Esto nos permitiría observar si realmente hubo un aprendizaje perdurable y no la simple memorización de algún algoritmo o procedimiento que luego se diluye en el tiempo [19]. Para ello se analizaron los resultados de la aplicación del test de respuestas múltiples DIRECT [20] en dos colegios donde se realizó la experiencia: uno es una escuela estatal mixta, mientras que el otro colegio es privado y solo de mujeres. Para comparación utilizaremos los resultados alcanzados por la instrucción tradicional, llevada a cabo en otra división del mismo colegio estatal.

El instrumento de medición utilizado, "Determining Interpreting Resistive Electric Circuits Concepts Test" (DIRECT), ha sido desarrollado en la Universidad de North Carolina por el grupo de investigación en enseñanza de la Física liderado por el Prof. R. Beichner [20].

DIRECT es un diagnóstico de 29 preguntas de respuestas de opción múltiple. Cada pregunta tiene 5 opciones de respuesta, con distractores basados en lo que la investigación en concepciones previas de circuitos eléctricos ha mostrado que son las dificultades de aprendizaje más importantes en este tema.

En la Figura 2 se puede apreciar que en la población de control la instrucción no ha provocado una modificación de los conocimientos conceptuales en la gran mayoría de los estudiantes. Observamos que en promedio, esta población ha vuelto al estado inicial. Sólo un pequeño número de alumnos (menos del 10%) de la población de control mejoró su rendimiento de manera significativa, mientras que el resto mejoró poco su rendimiento o permaneció de manera similar a lo obtenido antes de la instrucción. Notamos que también alrededor del 10% disminuye su rendimiento de manera notable. En contraposición, en la Figura 3 se puede observar una mejora sustancial en el conocimiento conceptual de la gran mayoría de los alumnos.

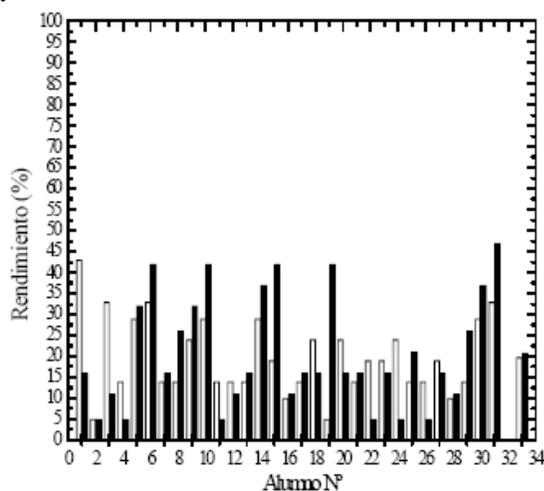


FIGURA II. Rendimiento (%) en los ítems del test DIRECT de los alumnos de la población de Control. Pre-test (barras blancas) y el Post-Test II (barras negras). Las dos últimas barras muestran el rendimiento medio pre y post instrucción de toda la clase.

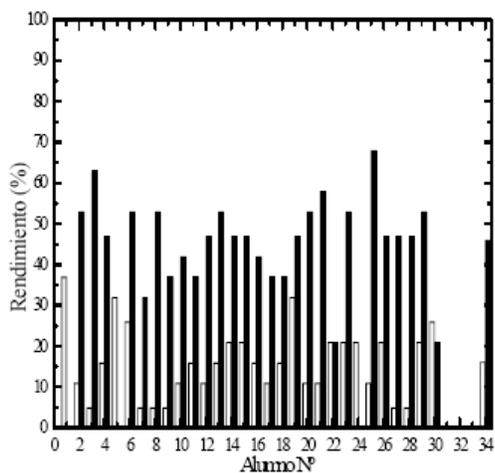


FIGURA III. Rendimiento (%) en los ítems del test DIRECT de la Población B. Pre-test (barras blancas) y el Post-test II (barras negras). Las dos últimas barras muestran el rendimiento medio pre y post instrucción de toda la clase.

Para remarcar estas diferencias en el aprendizaje conceptual de los alumnos de distinto rendimiento se ha construido la Tabla I que muestra los cuartiles según la ganancia (Post-test II–Pre-test) por alumno en cada una de estas poblaciones.

TABLA I. Cuartiles de ganancia porcentual de cada población después de la instrucción.

Ganancia %	Población A	Población B	Población C
> 30	4%	59%	73%
15 - 30	6%	33%	18%
0 - 15	58%	4%	5%
< 0	32%	4%	5%

Se observa en la población Control (A) que el mayor porcentaje de alumnos se encuentra en el cuartil medio inferior, es decir con ganancia entre 0 y 15%. Mientras que en ambas poblaciones experimentales el mayor porcentaje de alumnos se encuentra en el cuartil de ganancia superior al 30%.

III. CONCLUSIONES

De los resultados mostrados, y de aquellos que aparecen en la literatura, es claro que la utilización de “Tutoriales para Física Introductoria” genera aprendizajes significativos muy superiores a los logrados con la instrucción tradicional. De las experiencias aquí informadas deseamos destacar los siguientes aspectos:

- 1- Marco conceptual de la instrucción: adoptando un esquema teórico como el propuesto por McDermott [8] y Redish [13], el docente puede diseñar coherentemente un currículo global para su asignatura. El marco le ayudará a seleccionar contenidos, la secuencia de los mismos y las estrategias didácticas que puedan ser utilizadas en forma conjunta y cooperativa. Por ejemplo “Tutoriales para Física Introductoria” pueden, según las características del curso en cuestión, ser complementados con otras estrategias didácticas como “Instrucción por Pares” (Mazur [21]) en las clases teóricas, o “Cooperative Problem Solving” (Heller y Heller [18]), para el análisis conceptual y resolución de problemas. También se puede incluir material de “Physics by Inquire” [22].
- 2- Versatilidad y flexibilidad de “Tutoriales”: esta estrategia permite, con muy poco equipamiento (la mayoría de los Tutoriales son solo de lápiz y papel), adaptar su uso para casi cualquier programación didáctica. Sumado a la disponibilidad en español, lo convierte en una de las estrategias de aprendizaje activo más conveniente de la actualidad.
- 3- Utilización de diagnósticos surgidos de la investigación en enseñanza de la Física: la valía de estos diagnósticos, tanto para determinar el estado inicial de conocimientos de una clase, como para evaluar resultados absolutos y relativos de la instrucción ha sido demostrada en numerosas oportunidades. Su utilización como diagnósticos de pre y post instrucción permite además calcular la ganancia intrínseca o reducida, y comparar el

grado de logro de estudiantes que pueden estar en condiciones de enseñanza bastante diferentes.

4- Resultados obtenidos por instrucción, es claro que siguiendo metodologías de enseñanza que favorecen el aprendizaje activo se obtienen niveles de logro claramente superiores a los de las clases tradicionales, aún cuando estas últimas sean llevadas a cabo por experimentados profesores y con alumnos más avanzados.

REFERENCIAS

- [1] McDermott L.C., Shaffer P.S. (*Tutoriales para Física Introductoria*, Prentice Hall, Buenos Aires, 2001).
- [2] Pérez de Landazábal, M. C., Bilbao, F., Otero, J. y Caballero, C., *Formación inicial y rendimiento en Física del primer curso universitario*, Revista de Educación **329**, 331-347 (2002).
- [3] Benegas J., Villegas M., Macías A., Nappa N. Pandiella S., Seballos S., Ahumada W. Espejo R., Hidalgo M.A., Otero J., P.Landazábal M.C., Ruiz H. Slisko J., Alarcón H. y Zavala G., *Identifying Relevant Prior Knowledge and Skills in Introductory College Physics Courses*, Reunión GIREP 2006, Amsterdam, Holanda (2006).
- [4] Clarín, *Mas aplazos en el ingreso a Medicina en La Plata*, disponible en <http://www.unt.edu.ar/prensa/pag.asp?funcion=Home.Noticias.LeerNota&IdNota=7898>, consultado en Sept. 2007.
- [5] Furió, C. y Guisasola, J., *Construcción del concepto de potencial eléctrico mediante el aprendizaje por investigación*, Revista de Enseñanza de la Física **11**, 25-37 (1998).
- [6] Driver, R., *Un enfoque constructivista para el desarrollo del currículo en ciencias*, Enseñanza de las Ciencias **6**, 109-120 (1988).
- [7] Pozo, J. I., *Más allá del cambio conceptual: el aprendizaje de la ciencia como cambio representacional*, Enseñanza de las Ciencias **17**, 513-520 (1999).
- [8] McDermott, L. C., Oersted Medal Lecture 2001: *Physics education research: The key to student learning*, Am. J. Phys. **69**, 1127 (2001).
- [9] McDermott L. C. y Redish, E. F., *Resource Letter: PER-1: Physics Education Research*, Am. J. Phys. **67**, 755-767 (1999).
- [10] Guisasola, J., Zubimendi, J. L., Almuñí, J. M. y Ceberio, M., *Propuesta de Enseñanza en Cursos Introductorios de Física en la Universidad, Basada en la Investigación Didáctica: Siete Años de Experiencia y Resultados*, Enseñanza de las Ciencias **25**, 91-106 (2007).
- [11] Duit, R., *Students' and teachers' conceptions and Science Education*, Disponible en <http://www.ipn.unikiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>. Institute for Science Education. Alemania: University of Kiel, (2004).
- [12] Hestenes D., Wells M. y Swackhamer G., Force Concept Inventory, Phys. Teach. **30**, 141-58 (1992).
- [13] Redish, E., *Millikan Award Lecture Building a Science of Teaching Physics*, Am. J. Phys. **67**, 562-573 (1999).
- [14] Powell, K., *Spare me the lectura*, Nature **425**, 234-236 (2003). Disponible en www.nature.com/nature.
- [15] McDermott, L.C., *Guest comment: How we teach and how students learn: A mismatch*, Am. J. of Phys. **61**, 295-298 (1993). En español en McDermott, L. C., *Cómo enseñamos y cómo aprenden los estudiantes. ¿Un desajuste?, (Primera parte)*. Revista de Enseñanza de la Física **6**, 19-32 (1993).
- [16] diSessa A. et al. (*Toward a Scientific Practice of Science Education*, Lawrence Erlbaum Ass., Hillsdale, NJ, 1990).
- [17] Arons, A., *A Guide to Introductory Physics Teaching* (Wiley, New York, 1990).
- [18] Heller P. y Heller K. (*Cooperative Group Problem Solving in Physics*, University of Minnesota, Illinois 1999).
- [19] Sirur Flores y Benegas J., *Aprendizaje de circuitos eléctricos en el Nivel Polimodal: resultados de distintas aproximaciones didácticas*, Aceptada su publicación en Enseñanza de las Ciencias, (2006).
- [20] Engelhardt, P. V., and Beichner, R. J., *Students' understanding of direct current resistive electrical circuits*, Am. J. Phys. **72**, 98-115 (2004).
- [21] Mazur E. (*Peer's Instruction*, Prentice Hall, NJ, 1997).
- [22] McDermott L.C., Shaffer P.S. and Rosenquist, M. (*Physics by Inquire*, John Wiley and Sons, New York 1996).

La enseñanza de la Física a través de habilidades investigativas: una experiencia



Josefina Barrera Kalhil

Universidade do Estado do Amazonas, Escola Normal Superior, Djalma Batista 2470, Manaus, AM, Brasil.

E-mail: josefinabk@yahoo.com

(Recibido el 23 de Julio de 2007; aceptado el 12 de Septiembre de 2007)

Resumen

La formación de habilidades investigativas en los estudiantes de Ciencias Técnicas es un tema que ha sido tratado limitadamente en algunos tipos de clases como son la conferencia y los laboratorios, pero la concepción de las mismas para su contribución a todo el proceso de enseñanza aprendizaje y a las carreras de Ingeniería no ha sido abordado por ningún investigador cubano, y es pues el objetivo central de este trabajo. El proceso de enseñanza aprendizaje constituye uno de los eslabones fundamentales en cualquier nivel de enseñanza y se pone de manifiesto que en él tienen que estar presentes no sólo los aspectos referidos al conocimiento sino también los factores psicológicos, pedagógicos, antropológicos de comunicación y holísticos que hacen del mismo toda una ciencia. Enseñanza y aprendizaje constituye una unidad dialéctica que está presente en el pregrado y en el postgrado por lo que presentamos un nuevo enfoque de su utilización. En el mismo se utilizan las teorías psicopedagógicas más actuales que justifican el por qué de este trabajo en el que se intenta romper con los esquemas tradicionales del sistema de clases para convertir el proceso de aprendizaje en un proceso investigativo donde el estudiante, además de resolver determinados problemas relacionados con su entorno y que respondan a las exigencias de los objetivos de la disciplina, desarrolle habilidades investigativas que le servirán en su futuro trabajo profesional.

Palabras clave: Enseñanza por investigación, investigación acción, Educación en Física.

Abstract

Investigative skills training in technical science students is a subject that has been limited treated in some kinds of classes, such as the conference and the labs work. But its conception for the contribution to the whole teaching learning process and the engineering careers has not been approached by any cuban researcher, then, that is the main objective of this work. Teaching-learning process constitutes one of the fundamental links at any teaching level, and it becomes manifest that not only the aspects referred to knowledge have to be present in it, but also the psychological, pedagogical, anthropological factors, as well as the communication and the holistic aspects, which make a whole science of it. Teaching and learning constitutes a dialectic unit which is present in the pre grade as well as in the post grade, hence we are presenting a new approach of its use. The most current psychological theories are used in it, because they justify why this work, in which it is intended to break the traditional schemes of the system of classes, in order to convert the learning process into an investigate process, where the students, apart of being able to solve certain problems related with their environment and responding to the demands of objectives of the discipline, might be also able to develop investigative skills, which will be useful for their future professional work.

Key words: Teaching by investigation, action investigation, Physics Education.

PACS: 01.40.-d, 01.50.My, 01.50.Pa

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Muchas veces pensar en la enseñanza de la Física, es remontarse a la época de Galileo, Arquímedes, Newton y avanzando mucho más llegamos al siglo XX con el otorgamiento de los primeros premios Nobel de Física y aparecen nombres como Roentgen, los esposos Curie, Becquerel, Marconi, Planck, Albert Einstein y cerramos el siglo XX con nombres como Taylor, Steven Chu, Alferov prácticamente desconocidos para muchos, pero que son merecedores también de este reconocimiento. Nuestra reflexión está dada específicamente por la necesidad de que si es importante hablar de estos científicos, también

sería muy interesante que el trabajo de los docentes que se dedican a enseñar Física fuera reconocido de la misma manera, pues los trabajos no tendrían el valor que merecen siempre y cuando los procesos de enseñanza aprendizaje no fortalezcan los conocimientos elaborados por ellos, entonces cabe preguntarnos, ¿la enseñanza de la Física necesita o no, nuevas manera de enseñar y aprender? Esta preocupación que no es nueva y durante muchos años ha sido motivo de investigación para la autora, es el motivo del mismo ante la creencia que defendemos y pretendemos mostrar de una manera simplificada de que la enseñanza como investigación tiene que abrirse paso en el nuevo

milenio, ante la realidad del gran desarrollo de la Ciencia y la Tecnología.

Para muchos, la pedagogía y, particularmente la enseñanza de la Física está limitada al conocimiento de leyes y fórmulas que con el pasar del curso, los alumnos olvidan y la mayoría de ellos no le ven ninguna utilidad práctica.

Por eso es necesario desarrollar la enseñanza como investigación, pero para eso se necesitan estrategias para enseñar a aprender (1). Nuestro trabajo está organizado de la siguiente manera, en la Sección II se presenta la concepción de enseñanza por investigación, en la Sección III se describen los resultados de esta técnica de enseñanza y finalmente en la Sección IV presentamos nuestras conclusiones.

II. ENSEÑANZA POR INVESTIGACIÓN

La adecuación de la enseñanza al sujeto que aprende ha sido objeto de atención por todos los educadores y expresada de modo permanente en la literatura educativa desde aquella “escuela a la medida” propugnada por el movimiento pedagógico conocido como “Nueva Escuela”, hasta las tendencias más contemporáneas (2).

Adaptar la enseñanza a las condiciones del estudiante, implica, en la actualidad, mayores exigencias motivadas entre otras razones por ser los volúmenes de información a que está sometida la sociedad contemporánea y los vertiginosos avances de la ciencia y la técnica y la posibilidad del propio estudiante de dirigir su propio aprendizaje orientado por el profesor.

El estudio realizado sobre este tema, nos lleva a analizar que el proceso está condicionado por dos factores esencialmente [3]:

- Las condiciones internas o el desarrollo intelectual del sujeto.

- Las condiciones externas o el contexto de aprendizaje. Para implantar la enseñanza de la Física como investigación, hay que hacer un nuevo replanteamiento de las relaciones profesor-estudiante-conocimientos, donde el alumno se haga cada vez más independiente, más responsable de su propio proceso de aprendizaje a partir de la creación de condiciones muy peculiares de aprendizaje donde se consideren variables tanto personales, como estratégicas y de tareas, hasta convertirse en verdaderos recursos “personalizados”, aunque no exentos de fuertes componentes sociales y humanísticos, lo cual constituye un reto para la educación contemporánea.

Es necesario, pues crear estrategias de aprendizaje autónomas que permitan alcanzar el objetivo de “aprender a aprender”. Para que las estrategias de aprendizaje se asimilen y puedan transferirse y generalizarse es preciso que se enseñen y se instrumenten a través de las diferentes áreas curriculares, si no se seguirán produciendo los mismos fracasos que hasta ahora se han venido obteniendo [4].

Una estrategia para el proceso de enseñanza aprendizaje como investigación, necesita de un análisis de los

diferentes significados dados al término en la literatura científica, tanto desde el punto de vista de la enseñanza (instruccional) como del aprendizaje, consideramos que éstas comprenden, además del plan de acción, la propia acción y su valoración.

Sobre las estrategias de enseñanza podemos citar las siguientes:

- “La habilidad, el arte para dirigir un asunto” [5].
- “El conjunto de elementos teóricos, práctico y actitudinales donde se concretan las acciones docentes para llevar a cabo el proceso educativo” [6].
- “Estrategias de enseñanza, son los procedimientos o recursos utilizados por el agente de enseñanza para promover aprendizajes significativos” [7].

Si hablamos de enseñanza aprendizaje tenemos que analizar también la estrategia de aprendizaje definidas por diferentes autores como:

- “Son acciones específicas tomadas por el estudiante para hacer el aprendizaje más fácil, rápido, disfrutable, auto dirigido, y transferible a nuevas situaciones” [8].
- “Las estrategias comprenden el plan diseñado deliberadamente con el objetivo de alcanzar una meta determinada, a través de un conjunto de acciones (que puede ser más o menos amplio, más o menos complejo) que se ejecuta de manera controlada” [9].
- “Las estrategias de aprendizaje comprenden todo el conjunto de procesos, acciones y actividades que los aprendices pueden desplegar intencionalmente para apoyar y mejorar su aprendizaje. Están pues conformadas por aquellos conocimientos, procedimientos que los/las estudiantes van dominando a lo largo de su actividad e historia escolar y que les permite enfrentar su aprendizaje de manera eficaz” [10].
- “Las estrategias de aprendizaje son procesos de toma de decisiones (conscientes e intencionales) en los cuales el alumno elige y recupera, de manera coordinada, los conocimientos que necesita para cumplimentar una determinada demanda u objetivo, dependiendo de las características de la situación educativa en que se produce la acción” [11].

Resulta evidente que en todas las definiciones se destaca la importancia y algunas de las funciones de las estrategias tanto de enseñanza como de aprendizaje. Sin duda, en el segundo grupo se enfatiza el carácter planificado, sistémico y controlado del proceso de estructuración, ejecución y valoración de las estrategias de aprendizaje.

Según Cárdenas [12], las estrategias de aprendizaje pueden caracterizarse, en sentido general, destacando que:

- Son acciones específicas, o sistemas de acciones, determinadas por el alumno.
- Están dirigidas al logro de un objetivo o solución de un problema determinado.
- Apoyan el aprendizaje de forma directa e indirecta.
- Presuponen la planificación y control de la ejecución.
- Implican el uso selectivo de los propios recursos y capacidades, lo que se relaciona con cierto nivel de desarrollo de las potencialidades metacognitivas de los sujetos.

- Involucran a toda la personalidad y no sólo su esfera cognitiva.
- Son flexibles.
- Son a menudo conscientes.
- No son siempre observables.
- Pueden enseñarse y resulta esencial el papel del profesor en este proceso.

Tal como ocurre con la definición de estrategia, que existen varios enfoques sobre las mismas, lógicamente también se presentan discrepancias a la hora de clasificarlas.

Beltrán [13] presenta una clasificación de las estrategias para el desarrollo de habilidades y capacidades cognitivas, que seleccionamos para este trabajo por sus implicaciones para el proceso de enseñanza/aprendizaje.

Las estrategias metacognitivas han ido ganando el interés de investigadores y educadores ya que garantizan la regulación del proceso de aprendizaje sobre la base de la reflexión y el control de las acciones de aprendizaje. Así, la metacognición se define como:

- Conciencia mental y regulación del pensamiento propio, incluyendo la actividad mental de los tipos cognitivo, afectivo y psicomotor [14].
- Procesos ejecutivos de orden superior que se utilizan en la PLANEACIÓN de lo que se hará, en el MONITOREO de lo que uno está llevando a cabo y en la EVALUACIÓN de lo realizado [15].

En este sentido, según Wellman [16], los elementos del conocimiento que conforman la metacognición son:

- Su existencia. Debe haber una conciencia por parte del sujeto en tanto que sus eventos cognitivos existen de forma diferenciada de los eventos externos.
- Su percepción como procesos diferenciados. Debe existir una conciencia sobre la diferencia entre los distintos actos mentales.
- Su integración. Debe ver los procesos diferenciados como partes de un todo integrado.
- Sus variables. Es necesario tener la idea de que hay variables –personales, de tarea, de estrategias, entre otras- que tienen impacto sobre los procesos.
- Su monitoreo cognitivo. Se requiere que el individuo pueda evaluar el estado de su sistema cognitivo en un momento dado.

Se consideran que son varios los procesos involucrados en la metacognición, [17] a saber:

- El conocimiento metacognitivo, autovaloración o conciencia metacognitiva.
- El control ejecutivo, regulación de la cognición y la autoadministración.

En el proceso de enseñanza-aprendizaje, es importante que se atiendan estos y otros elementos estratégicos, reforzando su aplicación eficaz siempre que sea posible. En este sentido, se señala cómo las estrategias cambian en función de los objetivos, los contenidos y el contexto de realización y la importancia de estimular a los estudiantes en aplicar e integrar los recursos estratégicos de que disponen.

En resumen trabajar enseñanza como investigación, es mucho más que transmitir un procedimiento o describir un

conjunto de técnicas. Enseñar a investigar, consiste en fomentar y desarrollar una serie de habilidades y actitudes propias de la mentalidad científica, adquirir nuevas maneras de comprender la realidad educativa, cobrar conciencia de los límites que tenemos, de las cosas que sabemos y de las muchas que ignoramos y acercarnos con mayor modestia a los problemas del conocimiento [18].

III. UNA EXPERIENCIA CON BUENOS RESULTADOS

Todos estos criterios teóricos fueron aplicados en la enseñanza de la Física en carreras de Ingeniería en la Universidad de Matanzas, Cuba y en la Universidad del Estado del Amazonas, Brasil, considerando que la Física es parte de la vida cotidiana, que está presente en todos los procesos tecnológicos y científicos, y que enseñar Física con un alto grado de motivación constituye una de las tareas prioritarias para los profesores.

El primer intento se realizó en la carrera de Ingeniería Industrial, después de un amplio trabajo de investigación donde se llegó a la conclusión del papel de la Física en la misma [19]. Se realizó una reunión del colectivo de año con todos los profesores, en donde se explicó el objetivo de la experiencia y lo que implicaba dentro del semestre, ya que esto se articula directamente con la disciplina *Problemas prácticos de Ingeniería Industrial* que es la disciplina rectora y hacia la cual tributa en primera instancia esta experiencia. Para llegar a esta reunión ya habíamos realizado encuestas y entrevistas a expertos, especialistas de la producción y profesores de otras disciplinas afines para conocer su opinión con respecto al papel de la Física dentro de la carrera. Una vez explicado esto al colectivo, se realizó una reunión con los alumnos de segundo año de la carrera de Ingeniería Industrial y el de profesores de todas las asignaturas de ese año (Segundo semestre, curso 2001-2002). Fue explicado a los estudiantes lo que se pretendía y se solicitó la disposición de los mismos para participar en la experiencia, dejando bien claro que el principal objetivo era que los estudiantes se involucraran más en su propio aprendizaje, y participaran activamente en él. De 120 estudiantes, 81 estuvieron dispuestos y se adecuaron horarios especiales para explicar lo que harían.

El grupo que no quiso participar recibió sus clases de Física Aplicada por la autora como se venía haciendo tradicionalmente, siguiendo el programa de estudios sin ninguna variación.

Con el grupo experimento, la primera acción fue explicar en qué consistía la experiencia y trazar la estrategia de aprendizaje así como la metodología a seguir, analizando el programa objeto de estudio, buscando la motivación de los estudiantes y el compromiso con el aprendizaje. El profesor de Ingeniería Industrial que atiende el componente laboral en la fábrica colaboró en esta propuesta en la asesoría hacia los problemas de ingeniería relacionados con la Física.

A partir de esto se realizó una encuesta a los estudiantes, cuyos resultados nos permitieron dosificar las tareas de aprendizaje fuera de clase (experiencias de aprendizaje) de forma razonable, valorándolas con el resto de la carga académica del alumno, y que el profesor esté en condiciones de supervisar, monitorear y evaluar.

Se le pidió a los estudiantes que a partir de las temáticas que se estudiarían buscaran intuitivamente en el componente laboral, qué aspectos estaban relacionados con los mismos y fue tal la motivación que del total de alumnos participantes 70, lo que constituye el 86%, 4%, trajeron sus versiones de lo que ellos pensaban que era un problema a solucionar por la Física en la industria.

Se realizó un seminario donde, en la medida que se analizaban los mismos, se criticaban, perfeccionaban, se eliminaban o se aceptaban, se les daba los elementos mínimos necesarios de lo que es un problema científico y su posible solución (hipótesis). De esta manera, se lograba dar respuesta a uno de los objetivos planteados.

Otro paso que se llevó a cabo fueron la realización de otras actividades colaterales.

a) Se capacitó a los profesores de Física para la carrera en la aplicación de las diferentes experiencias de aprendizaje en la Física I y II. Para esta ocasión, se invitó a los profesores a que utilizaran la nueva metodología, pero se les dejó en libertad para ponerla en práctica de la manera que consideraran pertinente. Los resultados fueron, a la larga, que los profesores se motivaron con esta propuesta y en algunas de sus clases (62%) utilizaron esta metodología.

b) Se contó con la colaboración del Departamento de Ingeniería Industrial comprometiendo a los mismos con la puesta en marcha de esta experiencia.

c) Los resultados obtenidos comparados con los del grupo que no participó en la experiencia fueron superiores atendiendo a:

1. Resultados en las evaluaciones parciales realizadas.
2. Opiniones con respecto a la motivación lograda (aunque acoto que para esta autora fue muy difícil despojarse con el grupo no experimental de la experiencia que se estaba llevando a cabo).
3. Calidad en el proceso de enseñanza aprendizaje en relación a la solidez de los conocimientos.

En los cursos 2002-2003 y 2003-2004 se implementó la estrategia tanto en los grupos de regular diurno como del curso para trabajadores, autorizados por la Facultad ya que la motivación lograda por los estudiantes, así como la forma en que llegaban al primer semestre de tercer año en su tributo a la carrera, fue avalado por los profesores de ese año.

Fueron realizadas encuestas y entrevistas, así como la aplicación de la técnica de positivo, negativo e interesante (PNI), al finalizar cada semestre, se procesó los datos y resultados alcanzados por los estudiantes en la presentación de sus trabajos de cursos (siempre referidos a un problema profesional relacionado con la asignatura, su planteamiento de solución (hipótesis) y cómo habían asimilado la Física y su aplicación, lo que nos llevó a valorar los logros de esta experiencia:

1. Modificar el proceso de enseñanza de uno centrado en la docencia a otro centrado en el aprendizaje.
2. Transferir al estudiante, en alguna medida, la responsabilidad de su propio aprendizaje
3. Elevar la calidad del proceso.
4. Que el estudiante aprenda haciendo.
5. Impulsar la mentalidad independiente y emprendedora.
6. Desarrollar algunas habilidades investigativas como: solución de problemas, creatividad y aceptación de retos.
7. Fomentar actitudes de responsabilidad y compromiso.
8. Organización del proceso con compromiso y motivación.
9. Utilización de métodos, técnicas y recursos didácticos por encima de lo tradicional.
10. Criterios de evaluación más objetivos.
11. Mejoría de la comunicación alumno-profesor.

Esta experiencia se ha realizado también durante dos años en la Universidad del Estado de Amazonas, Brasil en el curso de Licenciatura en Matemática con buenos resultados (www.uea.edu.br/pesquisas)

IV. CONCLUSIONES

Esta nueva concepción del proceso de desarrollar habilidades investigativas en los estudiantes sin duda rompe con los esquemas tradicionales de enseñanza a la vez que posibilita obtener resultados superiores tanto cualitativos como cuantitativos, así como lograr la motivación que tanto necesitan los estudiantes en las diferentes carreras y en el estudio de la Física.

A pesara de los buenos resultados alcanzados en las investigaciones realizadas y en las aplicaciones de al misma, aun nos enfrentamos a los profesores que piensan tradicionalmente y que no conciben el proceso de enseñanza aprendizaje bajo esta concepción.

Constituye pues un desafío para esta autora continuar insistiendo y aplicando esos resultados para desarrollar con mayor calidad el proceso.

La aplicación en el contexto amazónico de esta experiencia constituye, más que un desafío un reto por la diversidad de culturas de esta región del continente americano.

La autora es vice-coordinadora de una maestría en la enseñanza de las ciencias en Manaus y orienta dos alumnos del mismo en esta temática y asesora también como cotutora una tesis de doctorado en Física Educativa en el Instituto Politécnico Nacional de México.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad de Matanzas y al Ministerio de Educación Superior de Cuba por la ayuda facilitada para la realización de este proyecto que terminó con una tesis de doctorado y al Instituto Politécnico Nacional de México por acreditar en nuestro trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Sánchez, P. R., *El caso de la investigación histórico sociales el CCH*. Cuadernos del CESU, No. 6, UNAM, México (1995).
- [2] Cazau, P. (*La enseñanza como proceso* en Ciencias de la Educación, Buenos Aires, 2000).
- [3] Mazario, I. (Tesis en opción la grado científico de doctor en Ciencias pedagógicas, La Habana, Cuba, 2003).
- [4] Bruner, J. (*La importancia de la educación*, Paidós Educador, España, 1987).
- [5] Gran diccionario enciclopédico. Editora Corcel, Cuba (1978).
- [6] Colectivo de autores (*Los métodos participativos: una nueva concepción en al enseñanza*, CEPES La Habana, 1999).
- [7] Díaz, E. (*Decidiendo el futuro*, Editora Corcel, La Habana, 1999).
- [8] Oxford, H. G. (*Estrategias de aprendizaje*, México, 1990).
- [9] Castellanos, et al. (*Aprender y enseñar en la escuela*, Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 2002).
- [10] Pozo, J. I. (*De aprendices y maestros. La nueva cultura del aprendizaje*, Graó Editorial, España, 1997).
- [11] Monereo, C. et al. (*Estrategias de enseñanza y aprendizaje*, Editorial Graó, España, 1996).
- [12] Cárdenas, N. (*¿Cómo aprendo?* Material utilizado en el curso de postgrado “Enseñar a aprender” de la Maestría en Ciencias de la Educación, CEDE, UMCC, Matanzas, 2004).
- [13] Beltrán Nuñez, I. (*Sistema didáctico para la enseñanza de las disciplinas Matemática, Física y Química para las Ciencias Técnicas*, Dpto. Docente Metodológico MES, La Habana, 1984).
- [14] Flavell, J., The Bing Times www.stanford.edu/dept/bingschool (1989).
- [15] Sternberg, R. J., *Thinking styles: keys to understanding student performance*, Phi Delta Kappan **71**, 366-371 (1990).
- [16] Wellman *Una realidad pensada*, Revista El pensamiento, Editora MKO, Inglaterra, (1985).
- [17] Halsey, A. H. (*Sociología de la Educación*, Euroamérica, Madrid, 1970).
- [18] Barrera, K. J. (Tesis en opción al grado científico de doctora en ciencias pedagógicas, La Habana, Cuba, 2003).
- [19] Barrera, K. J., (Tesis en opción al grado científico de master en ciencias de la Educación superior, Universidad de Matanzas, Cuba, 1998).

Haciendo ciencia en el aula: Los efectos en la habilidad de falsear diferentes hipótesis sobre la flotación y en las respuestas a la pregunta “¿por qué flotan las cosas?”



Adrián Corona Cruz, Josip Slisko y Julián Gilberto Meléndez Balbuena

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, AP 1152, 72001 Puebla, Pue., México.

E-mail: *acorona@fcfm.buap.mx*

(Recibido el 25 de Junio de 2007; aceptado el 7 de Septiembre de 2007)

Resumen

En este trabajo presentamos los resultados de las actividades basadas en formular y constatar hipótesis (parte básica del método científico) por estudiantes de secundaria, con el que se muestra la posibilidad del desarrollo acelerado de la cognición del estudiante. Con este fin, se diseñó una actividad de aula en que los estudiantes, personalmente y grupalmente, tenían que considerar la veracidad de diferentes afirmaciones sobre las causas de la flotación de los cuerpos (por ejemplo, los cuerpos flotan porque pesan poco). A partir de los resultados derivados al formular la pre y la post-hipótesis sobre la flotación de los cuerpos, así, también, de las constataciones realizadas en clase, se pudo mostrar que la enseñanza activa de las ciencias produce un significativo desarrollo de la habilidad de evaluar y verificar experimentalmente la veracidad de una hipótesis. También se observó un cambio conceptual en las propias concepciones de los estudiantes sobre la flotación.

Palabras clave: Física Educativa, aprendizaje activo, flotación.

Abstract

In this article we present the results of activities, based on formulation and falsification of hypotheses (the essence of scientific method) by secondary school students, which show the possibility of accelerated development of student's cognition. With this aim, a multi-part classroom activity was designed in which the students, in personal and group mode, had to consider the veracity of different affirmation about the causes of flotation of the bodies (for example, the bodies float because they weigh little). Taking into account the results from formulations of initial and final hypotheses about the flotation of bodies, and also from falsifications carried out in the classroom, it was possible to demonstrate that active teaching of sciences produces a significant development of the ability to evaluate and verify experimentally the veracity of one hypothesis. A conceptual change in students' conceptions on flotation was observed, too.

Key words: Physics Education, active learning, flotation.

PACS: 01.40.-d, 01.50.My, 01.50.Pa

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La investigación en didáctica de las ciencias, desarrollada con enfoques alternativos a la enseñanza tradicional, ha identificado varias dificultades en los procesos de aprendizaje, como son la estructura lógica de los contenidos conceptuales, su nivel formal y la influencia de las concepciones alternativas del alumno [1]. Los enfoques más relevantes, que se han ensayado para intentar un mayor éxito en los diversos elementos que configuran las dificultades del proceso de aprendizaje de las ciencias, van desde el aprendizaje por descubrimiento, el aprendizaje basado en resolución de problemas y el cambio conceptual de las ideas alternativas hasta la investigación dirigida y el desarrollo de las capacidades metacognitivas [2].

Es bien conocido que sólo la minoría de los estudiantes, incluso en sus cursos superiores, logra el pensamiento formal. Clásicamente se considera que los alumnos entre los 7 y los 10 años sólo pueden centrarse en la observación (pensamiento concreto) y que en los de edades que van de los 11 en adelante ya pueden comprobar hipótesis, aplicar el método científico y resolver problemas complejos. Sin embargo, la realidad educativa es otra.

La educación actual exige de métodos que logren que los estudiantes aprendan a razonar, a operar con conceptos de un mayor grado de abstracción y generalización, y a su vez, empleen conscientemente el método científico, lo que implica que la enseñanza, centrada en los contenidos, por si misma no es lo importante. Lo que realmente importa es el desarrollo de las habilidades de pensamiento por parte

de los estudiantes. Se considera [3] que se requieren los esquemas operacionales formales para tratar actividades de razonamiento que involucran:

- (a) El control de variables,
- (b) la exclusión de variables no pertinentes,
- (c) la proporción y proporcionalidad,
- (d) la probabilidad y correlación y
- (e) el uso de modelos abstractos para explicar y predecir.

El desarrollo del pensamiento formal se ha logrado colocando al estudiante en conflicto cognoscitivo: hacer que los alumnos experimenten contradicciones que no encajan sus experiencias anteriores y esquemas mentales existentes, los que tienen que reestructurar para acomodar la nueva evidencia. Cuando los alumnos reflexionan sobre sus procesos de pensar y aprender (metacognición), cuando tienen que justificar y defender sus estrategias y conclusiones, entonces generan estrategias más poderosas o conceptos más acertados para resolver problemas.

Nuestro trabajo está organizado en la siguiente forma, en la Sección II mostramos el marco teórico utilizado, la Sección III trata sobre el método científico, en la Sección IV mostramos la metodología seguida, en la Sección V los cambios en la falseación de las hipótesis ofrecidas, la Sección VI trata sobre los cambios en las concepciones sobre flotación, y finalmente en la Sección VII presentamos nuestras conclusiones.

II. MARCO TEÓRICO

Últimamente se cree que, combinando el enfoque de Piaget (enfatisa la cognición individual como la base de pensamiento humano) y de Vigotsky (la perspectiva sociocultural reconoce la conveniencia en un ambiente social de la clase), se crea la posibilidad del aprendizaje acelerado. Un ejemplo concreto es el programa CASE, Aceleración Cognoscitiva a través de la Educación Científica, por sus siglas en inglés, [4,5], basado en la psicología cognoscitiva (conflicto cognoscitivo y su equilibrio) y social (construcción social y reflexión metacognitiva), los programas de habilidades de pensamiento y las estrategias didácticas que superan la persistencia de las ideas previas.

El programa CASE muestra que la evolución del pensamiento de concreto a formal (superior) se logra en forma acelerada, presentando a los alumnos de entre 11 a 14 años las actividades que desafían sus preconcepciones; creando un conflicto cognoscitivo cuando el resultado inesperado que no encaja en sus preconcepciones.

La re-construcción de pensamiento se da resolviendo los conflictos cognoscitivos a través de la discusión en equipos y/o con todos los integrantes de la clase. El CASE está conformado con actividades que implican el uso de habilidades científicas, como son el control de variables, relaciones de proporcionalidad, correlaciones de probabilidad, clasificación, etc. Con el método CASE los alumnos:

- (1) Responden a los problemas abiertos con aumentada confianza y creatividad,

- (2) se muestran más interesados y seguros al contestar las preguntas,
- (3) parecen disfrutar las experiencias,
- (4) se vuelven más dispuestos por hacer las predicciones sobre los experimentos e intentan justificar sus conclusiones, y
- (5) logran buenos resultados resolviendo problemas.

III. MÉTODO CIENTÍFICO

La instrucción que enfatiza y promueve el uso del Método Científico (MC) debe ser la base de la educación en ciencias, para que los estudiantes aprendan a "pensar como científico". Desafortunadamente por la múltiple caracterización del "método científico" y la falta de dominio por parte del docente esta idea no ha tenido éxito. Incluso, muchos autores [6,7] consideran que no existe un método científico. En lugar de usar una receta predeterminada y bien estructurada, el científico, según el problema tratado, tiene que usar, de manera creativa, métodos definitorios, clasificatorios, estadísticos, hipotético-deductivos, procedimientos de medición, etc.

En este trabajo dirigimos nuestra atención a dos elementos básicos del quehacer científico:

- (1) *La formulación de hipótesis* (planteamiento o supuesto que busca explicar un fenómeno físico, en este caso, la flotación de los cuerpos), y
- (2) *la verificación de hipótesis* (constataciones formales que se deben comprobar o refutar mediante la observación, siguiendo las normas establecidas por el MC).

Carretero [8] consideró la posibilidad de una enseñanza activa de las ciencias en la que los alumnos pudieran comprobar por sí mismos la utilización del "método científico", constatando, modificando y verificando las hipótesis sobre el fenómeno físico de flotación.

Como bien se sabe, gracias a los trabajos pioneros de Piaget [9,10], la conceptualización del por qué de la flotación de las cosas, es un proceso complejo cuyo acercamiento a la conceptualización científica depende fuertemente del nivel cognitivo de los niños, pues requiere los patrones del razonamiento formal. Esos patrones no los promueve la enseñanza tradicional y por eso, incluso, los estudiantes universitarios, terminando sus primeros cursos de física, todavía tienen dificultades conceptuales en la comprensión de la fuerza de empuje, responsable, junto con la fuerza gravitacional, del fenómeno de flotación [11].

Durante las entrevistas que condujo Carretero, que eran centradas en el análisis de las hipótesis, los estudiantes mostraron una gran variedad de estrategias relacionadas con la tarea de corroborarlas y falsearlas. Para facilitar las tareas de verificar las hipótesis, los entrevistados tenían a su disposición un recipiente con agua y un conjunto de bolas de diferentes características (tamaño, material, estructura interna,...).

Carretero categorizó esas estrategias de la siguiente manera (desde la estrategia menos a la más elaborada):

1. Descriptiva. Consiste en que el sujeto no realiza ni se propone ninguna actividad destinada a la comprobación de la hipótesis. Parece que no toma en cuenta el carácter hipotético del enunciado. Puede decirse que entiende la frase como si sus dos términos estuvieran unidos por «y» y no por «por qué».

2. Comprobación con resistencia a la falseación. En este caso los sujetos consideran las hipótesis como tal, es decir, le otorgan un carácter de posibilidad y casualidad y dan los pasos necesarios para probarla. Pero, curiosamente, cuando encuentran que la hipótesis se cumple con algunas bolas pero no con otras, llegan a la conclusión de que la hipótesis es «verdad y mentira» a la vez, y no mentira, como obviamente es. Los sujetos que utilizan esta estrategia parecen pensar que para que un enunciado sea verdadero debe cumplirse todos los casos y para que sea falso no deben cumplirse en ningún caso.

3. Verificación. Consisten en que los niños sólo tienen en cuenta los tipos de bolas que confirman la hipótesis, pero ignoran completamente los que demuestran que es falsa.

4. Falseación mediante una interpretación bi-condicional del enunciado. Los sujetos que llevan a cabo esta estrategia son capaces de llegar a la conclusión de que la hipótesis es falsa pero haciendo uso de una argumentación que no es totalmente correcta y que supone una interpretación bi-condicional del enunciado. Por ejemplo, ante la frase, «las bolas flotan porque están huecas» los niños ofrecen como prueba de su falsedad que «hay bolas macizas que también flotan», pero, de hecho, esto no es una prueba correcta, mientras que sí lo es el hecho de que haya bolas huecas que no flotan.

1. Falseadora correcta. Como puede suponerse, consiste en la demostración de la falsedad de la hipótesis, pero interpretándola como un enunciado condicional y no bicondicional.

IV. METODOLOGÍA

Para conocer el desarrollo de la capacidad de analizar la veracidad de una hipótesis sobre un fenómeno físico cotidiano (flotación de los cuerpos), se diseñó una actividad de aprendizaje activo en el aula, dándoles a los alumnos la oportunidad de *hacer ciencia* a su manera.

Esta actividad se llevó a cabo con los 312 alumnos de secundaria, que cursaban diferentes grados en tres telesecundarias.

La actividad de aprendizaje, que se ha observado y analizado en esta investigación, constaba de los siguientes pasos:

a) Conocer el sentido de analizar la veracidad de una afirmación. Se asevera al grupo que un vaso que está sobre la mesa está lleno de aire, y pregunta si están de acuerdo o no (verdad o mentira) y, en su caso, ¿cómo lo demostrarían?

Una vez que ellos se plantean su constatación, se les solicita que la realicen ante el grupo (ejemplo de las acciones a realizar).

b) Conocer diferentes comportamientos de las bolas. Se presentan dos recipientes con agua de diferentes volúmenes y un conjunto de bolas (de diferentes materiales, tamaños, huecas y macizas) de las cuales algunas flotan y otras no.

c) Activación y verificación de las ideas sobre la flotación de los objetos particulares. Un estudiante solicita al grupo que prediga si flotará o se hundirá algún conjunto de las pelotas, verificando las predicciones. Obviamente, en el caso de que no se cumple la predicción se llegaba al desequilibrio cognitivo.

d) Activación de las concepciones generales sobre la flotación. Se solicita a los alumnos que respondan, de forma individual y por escrito, la pregunta “¿por qué flotan las bolas?” (ideas previas) y que se integren en equipos de hasta cinco integrantes.

e) Consideración de diferentes afirmaciones falsas sobre la flotación. Se expone la aseveración, “Las bolas flotan porque pesan poco”, (A1) supuestamente formulada por alumnos de una escuela primaria,

f) se solicita votar como verdadera o falsa la hipótesis,

g) discuten en equipo sobre la verdad o falsedad de la aseveración y ya de “acuerdo”,

h) un estudiante representante de cada equipo pasa frente al grupo a realizar la demostración de su veracidad o falsedad, y, en su caso, responder a los cuestionamientos planteados por el grupo,

i) realizadas las demostraciones, se pide a los estudiantes que escriban la estrategia que ellos creen convencería al niño de la veracidad o falsedad de su aseveración,

j) se continúa repitiendo los pasos *d*, *f*, y *g* con las siguientes hipótesis: “Las bolas flotan porque hay mucha agua” (A2), “Las bolas flotan porque son pequeñas” (A3) y “Las bolas flotan porque están huecas” (A4).

k) Reflexión personal final. A los alumnos se plantea la siguiente pregunta: Si las bolas no flotan porque son pequeñas, no flotan porque están huecas, no flotan porque pesan poco y no flotan porque hay mucha agua, entonces, ¿por qué flotan las cosas en el agua?

V. LOS CAMBIOS EN LA FALSEACIÓN DE LAS HIPÓTESIS OFRECIDAS

El estudio se realizó en quince grupos de telesecundaria de los tres niveles. Los alumnos de tercero y de segundo ya habían analizado el tema de flotación. Para simplificar la presentación de los datos, en lugar de los cinco niveles de Carretero, el patrón de categorización de los alumnos fue el siguiente:

Se consideraba los alumnos como **pensadores concretos** que responden con ideas y acciones que describieron o comprobaron (1 *Descriptiva* y 2 *Comprobación con resistencia a la falseación*), como **pensadores en transición**, aquellos que verificaron las hipótesis (3 *Verificación*), y como **pensadores formales** aquellos que falsearon (4 *Falseación mediante una interpretación bi-condicional del enunciado* y 5 *Falseadora correcta*) las hipótesis.

En el tratamiento de la primera hipótesis (A1), las propuestas personales de los alumnos eran descriptivas y de comprobación (predomina el pensamiento concreto). La discusión que siguió produjo cambios en sus demostraciones, debido a que no tuvieron éxito en convencer a los integrantes de sus grupos.

En los tratamientos de la hipótesis “**las bolas flotan porque hay mucha agua**” (A2) ya se notó una evolución positiva en las contestaciones planteadas por los estudiantes. La misma tendencia se notaba en el tratamiento de la hipótesis (A3), Las estrategias demostradas de la cuarta hipótesis “**las bolas flotan porque están huecas**” (A4) se tomaron como referencia para cuantificar los cambios en la habilidad de tratar las hipótesis producidos por la actividad.

Es importante señalar que en este análisis de tendencias se supuso que la dificultad de falsear las cuatro hipótesis era igual (o similar) y que los cambios mencionados en sus tratamientos corresponden al avance que tenían los estudiantes al entender mejor lo que se les pide o, en otras palabras, a que aprendieron jugar mejor el juego de falsear a las hipótesis. En un futuro trabajo se pondrá explícitamente la veracidad de esa suposición a verificación experimental. Una manera sería realizar el mismo experimento en que diferentes grupos de estudiantes tendrían diferentes secuencias de las cuatro hipótesis consideradas (por ejemplo, A4-A3-A2-A1; A3-A1-A2-A4;...).

Los cambios de nivel en los primeros años (88 alumnos) mostraron una reducción del 25% de los concretos, una reducción del 15% en transición y una ganancia del 41% en formales. Esos resultados muestran un avance significativo en la habilidad de analizar la veracidad de las hipótesis relacionadas con la flotación.

De los alumnos que fueron caracterizados como concretos, el 15% incrementaron su nivel de tratamiento de la hipótesis a transición y el 55% hasta el nivel formal. Los identificados como de nivel en transición pasaron el 68% a formales.

Los cambios de nivel en los segundos años (101 alumnos) mostraron una reducción del 15% de los concretos, una reducción del 14% en transición, y una ganancia del 29% en formales. Esos resultados muestran, también, un avance cognitivo. El 40% de los alumnos que eran clasificados como concretos incrementaron su nivel cognitivo a transición y el 40% hasta el nivel formal. El 65% del nivel en transición pasaron al nivel de formales.

Los cambios en los terceros años (123 alumnos) mostraron una reducción del 13% de los concretos, una reducción del 33% en transición y una ganancia de 47% en formales. Cabe destacar que estos resultados muestran un avance cognitivo mayor que en los años anteriores.

En relación al avance de los alumnos de tercero categorizados como concretos incrementaron su nivel cognitivo el 20% a transición y 67% hasta el nivel formal y los de nivel en transición pasaron el 79% a formales.

En la Tabla I se presentan, como ejemplos, copias de textos que describen las estrategias desarrolladas por algunos estudiantes de los tres niveles de secundaria. En la columna de la derecha de la tabla se muestra el valor

que clasifica la propuesta con el criterio planteado por Carretero.

Tabla I. Ejemplos de estrategias planteadas por los alumnos. En la columna de la derecha se encuentra el valor que clasifica la propuesta.

<i>Alumno de primero</i>	
<i>¿Por qué flotan las cosas en el agua?</i>	
Porque el fondo del agua manda una fuerza a la superficie y hace que floten las cosas	
<i>Las bolas flotan porque pesan poco</i>	
Falso, la que echan una bola chica que flota y una grande que se hunda	2
<i>Las bolas flotan porque hay mucho agua</i>	
Falso, en el recipiente que tiene mucho agua flota y sacándolo y metiéndolo al que tiene poco agua y sigue flotando	3
<i>Las bolas flotan porque son pequeñas</i>	
La demostración... meto una bola chica y flota.	3
<i>Las bolas flotan porque están huecas</i>	
Falso, porque meto una bola grande que no este hueca y flota.	4
<i>¿Por qué flotan las cosas en el agua? Cierre</i>	
Porque el fondo del agua manda una fuerza a la superficie y hace que floten las cosas.	
<i>Alumno de Segundo</i>	
<i>¿Por qué flotan las cosas en el agua?</i>	
Por su mayor densidad que tiene la materia cuando sea mayor o menor que la del cuerpo que flota.	
<i>Las bolas flotan porque pesan poco</i>	
Yo pondría unas pelotas en un recipiente con agua, después demostraría que una pesa más y otra menos porque depende de su densidad de las pelotas y también de su material	2
<i>Las bolas flotan porque hay mucho agua</i>	
Yo pondría un recipiente con agua y pondría dos pelotas y demostraría que flotan con mucha agua, luego le vacío el agua en otro recipiente para dejar poca agua en donde había puesto las pelotas y demostraría que en esa poca agua flotan también aunque es muy poca el agua	3
<i>Las bolas flotan porque son pequeñas</i>	
Yo echaría en un recipiente con agua varias pelotas y demostraría que no importa el tamaño, porque algunas flotan y otras se hunden.	4
<i>Las bolas flotan porque están huecas</i>	
Le diría que no importa si están huecas, sí aún flotan o se hunden, o sea que no importa que estén huecas.	4
<i>¿Por qué flotan las cosas en el agua? Cierre</i>	
Porque su densidad puede ser mayor o puede ser menor o también depende su tipo de materia.	
<i>Alumno de tercero</i>	
<i>¿Por qué flotan las cosas en el agua?</i>	
Por la presión o por el peso de las cosas.	
<i>Las bolas flotan porque pesan poco</i>	
No porque no importa el peso, sino la presión del objeto.	1
<i>Las bolas flotan porque hay mucho agua</i>	
No es verdad, porque si ponemos una bola que pesa en poco agua, no va a flotar igual, si la hecho en mucha agua no flota porque a veces depende del peso o por la presión.	2
<i>Las bolas flotan porque son pequeñas</i>	
No es cierto, porque hay algunas pelotas que son grandes y flotan y hay chicas que no flotan, no depende del tamaño.	4
<i>Las bolas flotan porque están huecas</i>	
Es falso, hay pelotas que están huecas y flotan, pero hay otras que se hunden.	4
<i>¿Por qué flotan las cosas en el agua? Cierre</i>	
Por el peso y por la presión y no importa el agua, el tamaño, el peso, lo que importa es el peso y la presión.	

En estos ejemplos se observa que, independientemente del nivel, mientras la concepción inicial sobre la flotación no fue desafiada por la discusión o por la observación, los

alumnos la mantienen con modificaciones menores. Respecto a la evolución en su habilidad de analizar y comprobar la validez de una hipótesis, en la mayoría de los casos hay una evolución positiva.

En la Tabla II se presentan los cambios porcentuales obtenidos de la cuantificación de las estrategias de constatación entre la primera y la última hipótesis de alumnos de tres escuelas secundarias en sus tres niveles.

Tabla II. Cambios porcentuales en las estrategias de constatación de alumnos de: (a) Telesecundaria de la Comunidad de San Lucas Tejaluca Ahuatlan (rural); (b) Telesecundaria localizada en la Col. Independencia, Tepeojuma (semi-urbana); (c) y una Telesecundaria de la Col. Cruz Verde, Izúcar de Matamoros, Pue. (urbana).

Primeros (88 alumnos)			
Nivel	A1	A4	Cambios
Concretos	45%	20%	reduc 25%
Transición	28%	13%	reduc 15%
Formales	26%	67%	incre 41%
Segundos (101 alumnos)			
Nivel	A1	A4	Cambios
Concretos	40%	25%	reduc 15%
Transición	40%	26%	reduc 14%
Formales	21%	50%	incre 29%
Terceros (123 alumnos)			
Nivel	A1	A4	Cambios
Concretos	24%	11%	reduc 13%
Transición	50%	17%	reduc 33%
Formales	25%	72%	incre 47%

Se observa que hay una fuerte influencia en un grupo de segundo; los alumnos habían tomado el tema de flotación (TSE3 19%, Telesecundaria de la Comunidad de San Lucas Tejaluca Ahuatlan). En sus propuestas aproximadamente el 90% usaron la definición de densidad sin contexto. Se concluye que el profesor propicio una fuerte resistencia, haciendo que los alumnos no manifestaran sus propias concepciones. En promedio, se nota que la ganancia no es función del grado ni del nivel socio económico.

Dado que las ganancias de un curso de enseñanza no-tradicional se considera el 52% como promedio y el 69% como máxima [12], se puede ver que las ganancias muestran, para una sola clase, un buen resultado.

VI. LOS CAMBIOS EN LAS CONCEPCIONES SOBRE LA FLOTACIÓN

Como ya se ha dicho, antes de comenzar las actividades de contrastar las hipótesis sobre posibles causas de la flotación, todos los estudiantes debían de escribir sus respuestas sobre la pregunta “¿por qué flotan las cosas?”. De esas respuestas se puede concluir cuáles eran las concepciones iniciales de los estudiantes sobre la flotación. Esas concepciones las hemos dividido en dos grupos.

El primer grupo son aquellas que son congruentes con las cuatro hipótesis que se han analizado y contrastado en las actividades, según las cuales las causas de la flotación son alguna propiedad del objeto (peso, hueco, tamaño) o la cantidad de agua. Los porcentajes de los estudiantes que

inicialmente compartían esas ideas están presentados en la Tabla III.

Tabla III. Porcentajes de los estudiantes que consideraban como conceptos causantes de la flotación a aquellos TRATADOS en la actividad.

El concepto causante de la flotación	Primer grado	Segundo grado	Tercer grado
Peso (P)	42	29	31
Hueco (H)	29	14	9
Tamaño (V)	1	0	0
Cantidad de agua (A)	0	0	0

Es notable que muchos estudiantes pensaron que un objeto flota si es ligero o es hueco. En otras palabras, esas dos hipótesis no eran solamente de un alumno anónimo de primaria sino son también de ellos.

A cambio, las concepciones de que la flotación de un objeto depende de su tamaño o de cantidad de agua eran casi completamente ausentes y la afirmación de que son de un alumno de primaria les debería parecer más creíble.

También es interesante ver cuáles eran otras concepciones iniciales, diferentes de las que se han tratado en la actividad. Esas se presentan en la Tabla IV.

Tabla IV. Los porcentajes de los estudiantes que consideraban como conceptos causantes de la flotación a los conceptos NO TRATADOS en la actividad.

El concepto causante de la flotación	Primer grado	Segundo grado	Tercer grado
Densidad (D)	4	27	33
Material (M)	26	7	8
Fuerza de empuje (F)	10	2	6
Gravedad (G)	2	6	5

En el segundo y el tercer grado, la concepción dominante es que la flotación de un objeto depende de su densidad relativa con respecto a la densidad de agua. Este hecho es entendible porque los estudiantes ya han visto anteriormente el tema de flotación. Sin embargo, como se verá más adelante, la comprensión de la concepción científica sobre la flotación no era significativa sino más bien memorizada y usada para responder la pregunta directa.

Las concepciones finales de los estudiantes sobre las causas de flotación muestran los patrones interesantes que merecen ser comentados. Como esos patrones son muy diversos, en este artículo vamos a comentar solamente los patrones más importantes:

- A) Mantener una concepción tratada en la actividad.
- B) Eliminar una concepción tratada en la actividad.
- C) Adaptar una concepción tratada en la actividad.

En el primer patrón caben los estudiantes que inicialmente y finalmente pensaban que las cosas flotan por pesar poco (símbolo P-P) o por ser huecas (símbolo H-H).

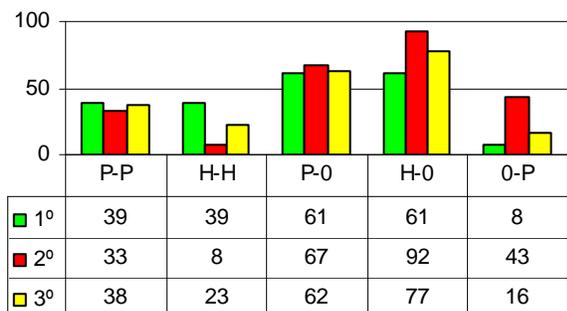
El segundo patrón describe estudiantes que inicialmente pensaban que las cosas flotaban por ser ligeras y que finalmente optaban por alguna otra concepción (símbolo P-0) o los estudiantes que inicialmente pensaban que las cosas flotan por ser huecas y finalmente desecharon esta idea (símbolo H-0).

El tercer patrón caracteriza a los estudiantes que inicialmente no compartían ninguna de las concepciones

tratadas en la actividad y finalmente se quedaron con una de ellas, por ejemplo, creyendo que la flotación de los objetos depende de su peso (símbolo O-P).

El porcentaje de la presencia de esos patrones se presenta en la Tabla V.

TABLA V. Patrones de remoción y retención de los conceptos tratados en la actividad: P: pesado, ligero, peso, etc., H: aire, hueco, bofas, etc., y NO TRATADOS: O: densidad, fuerza, volumen, material, tamaño y forma, etc.



La buena noticia es que la actividad ayudó a muchos estudiantes a dejar de creer que un cuerpo flota por pesar poco o ser hueco (cambios P – O y H – O).

La mala noticia es que, a pesar de la actividad en que los mismos estudiantes encontraron las maneras de falsear esas concepciones con demostraciones prácticas, todavía hay estudiantes que las mantienen (cambios P-P y H-H) o que, incluso, los adoptan al final aunque no las compartían inicialmente (por ejemplo, cambio O- P).

Esta afirmación es especialmente preocupante en el caso del segundo grado. Esos estudiantes, en su mayoría, inicialmente citaron la densidad relativa como la causa de la flotación, pero muchos de ellos terminaron creyendo que el peso del objeto determina su habilidad de flotar. Esto demuestra la fragilidad del “conocimiento” memorizado que no está basado en verdaderas actividades de aprendizaje.

VII. CONCLUSIÓN

Los resultados de esta investigación en el aula sugieren que los estudiantes pueden avanzar en sus habilidades del pensamiento creativo y crítico cuando las actividades de clase se diseñan para promover explícitamente tales habilidades. La determinación de hasta qué punto tales mejoras son de largo plazo y/o transferibles a otros temas se plantean para una investigación futura.

Con respecto a los cambios en el aprendizaje conceptual de la flotación, los resultados apuntan en dos direcciones.

Es muy grato convencerse que varios estudiantes son capaces de eliminar sus simples concepciones iniciales (el cuerpo flota por pesar poco o por ser hueco) sin la intervención del maestro.

Pero, por otro lado, también hay estudiantes que no se convencen por las demostraciones de sus compañeros de que simples concepciones sobre flotación son erróneas y,

en consecuencia, las mantienen o las adoptan como su postura final.

Para conocer las causas de esos patrones en el pensamiento de los estudiantes sobre la flotación, sería necesario realizar un estudio más detallado, explorando, especialmente, qué criterios usan los estudiantes para aceptar o rechazar una demostración sobre la falsedad de una concepción.

Lograr un verdadero cambio conceptual en el tema de flotación es una tarea bastante compleja y difícilmente realizable en una sola clase.

Para lograr tal cambio, aparte de ser capaces de *hacer ciencia*, los estudiantes deben tener oportunidades múltiples de analizar la veracidad, tanto de las concepciones que se prestan fácilmente a la falseación como aquellas cuya limitada validez no es sencillo demostrar. Ese fin se puede alcanzar solamente con las secuencias de aprendizaje que requieren para su realización varias sesiones y con un diseño didáctico bien cuidado y basado en los resultados de la investigación sobre las dificultades que enfrentan los estudiantes al conceptualizar y comprender el fenómeno de flotación [13,14,15].

REFERENCIAS

- [1] Pozo, J. I. y Gómez Crespo, M. A. (*Aprender y enseñar ciencia*, Ediciones Morata, Madrid, 1998).
- [2] Campanario, J. M. y Moya, A., *¿Cómo enseñar ciencias? Principales tendencias y propuestas*, *Enseñanza de las Ciencias* **17**, 17–192 (1999).
- [3] Adhmi, M., Johnson, D. and Shayer, M. (*Thinking Maths*, Heinemann, Oxford, 1998).
- [4] Adey, P. (*The Science of Thinking, and Science for Thinking: A Description of Cognitive Acceleration Through Science Education (CASE)*, International Bureau of Education, Geneva, 1999).
- [5] Adey, P., Robertson, A. y Venville, G., *Effects of a cognitive acceleration programme on Year 1 pupils*, *British Journal of Educational Psychology* **72**, 1–25 (2002).
- [6] Halpin, M. y J. Swab, J., *It's the real thing—the scientific method*, *Science and Children* **27**, 30–31 (1990).
- [7] Collette, A. y E. Chiappetta, E. (*Science instruction in the middle and secondary schools*, OH: Merrill, Columbus, 1994).
- [8] Carretero, M., *¿Por qué flotan las cosas? El desarrollo del pensamiento hipotético deductivo y la enseñanza de la ciencia*, *Infancia y Aprendizaje* **8**, 7–22 (1979).
- [9] Piaget, J. (*The Child's Conception of Physical Causality*, Littlefield, Adams and Company, Totowa, New Jersey, 1966).
- [10] Inhelder, B. y Piaget, J. (*The Growth of Logical Thinking from Childhood to Adolescence*, Basic Books, New York, 1958).
- [11] Loverude, M. E., Kautz, C. H. y Heron, P. R. L., *Helping students develop an understanding of Archimedes principle. I. Research on student understanding*, *Am. J. Phys.* **71**, 1178–1187 (2003).

- [12] Hake, R. R., *Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses*, Am. J. Phys. **66**, 64–74 (1998).
- [13] Gang, S., *Removing preconceptions with a “learning cycle”*, Phys. Teach. **33**, 346–354 (1995).
- [14] Heron, P. R. L., Loverude, M.E., Shaffer, P.S. y McDermott, L. C., *Helping students develop an*

understanding of Archimedes principle. II. Development of research-based instructional materials, Am. J. Phys. **71**, 1188–1195 (2003).

- [15] Jackson, D. P., Laws, P. W. and Franklin, S. V. (*Explorations in Physics. An Activity-Based Approach to Understanding the World*, John Wiley and Sons, New York, 2003).

Un curso de mecánica clásica sin conferencias magisteriales: objetivos, elementos del diseño y efectos en los estudiantes



Josip Slisko¹, Rebeca Medina Hernández²

¹Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

²Departamento de Matemáticas y Física, ITESO, Tlaquepaque, Jal. México.

E-mail: jslisko@cfm.buap.mx

(Recibido el 20 de Agosto de 2007; aceptado el 17 de Septiembre de 2007)

Resumen

Se presentan objetivos, diseño y efectos en los estudiantes de un curso de mecánica clásica caracterizado por la eliminación completa de las conferencias magisteriales. Los objetivos del curso, que se refieren a diferentes maneras de promover la gestión personal de aprendizaje (aprender a aprender solo y en equipo), se derivaron de las tendencias actuales, tanto en la enseñanza de la física y en la educación de los ingenieros como en la economía de conocimiento. La encuesta anónima realizada en la última semana del curso demostró que la gran mayoría de los objetivos y elementos del diseño tenían una resonancia muy favorable en los estudiantes (reflexión sobre propia manera de aprender, importancia del trabajo en equipo, el uso de la secuencia Predecir – Observar – Explicar, la visión sobre resolución de problemas, la adecuación cognitiva de los videos didácticos y de las actividades con medición).

Palabras clave: Aprendizaje activo, predecir – observar – explicar, creencias sobre aprendizaje, resolución de problemas, gestión personal de aprendizaje.

Abstract

Aims, design and effects in students of a classical mechanics course, characterized by complete lecture elimination, are presented. The aims of course, related in different ways to promotion of personal learning management (learning to learn, alone or in a group), were derived from actual trends in physics teaching, engineering education and knowledge-based economy. A survey, filled by students anonymously in the last week of the course, shown that big majority of the aims and design elements had a favorable resonance in students (reflection about own way of learning, importance of group work, usage of the sequence Predict – Observe – Explain, vision of problem solving, cognitive adequacy of didactic videos and activities with measurement).

Key words Active learning, predict – observe – explain, beliefs about learning, problem solving, personal learning management.

PACS: 01.40.-d, 01.50.My, 01.50.Pa

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Centrar el proceso educativo en el estudiante y aprovechar cabalmente los resultados de la investigación educativa sobre cómo se aprende en los entornos escolares son características fundamentales de un movimiento importante para mejorar el aprendizaje en muchos cursos universitarios. En el caso de la física ya es posible consultar una considerable bibliografía de investigación, tanto sobre las dificultades conceptuales que revelan los estudiantes al aprender conceptos y fenómenos físicos como sobre diferentes enfoques didácticos [1,2].

Para los cursos de mecánica existen evidencias experimentales (basadas en análisis de los resultados de 62 cursos con más de 6,000 estudiantes) de que la didáctica con “estudiantes activos” rinde mejores resultados que la

didáctica con “profesor activo – estudiantes pasivos”, que caracteriza a la enseñanza tradicional [3].

Las implementaciones de esos conocimientos en la práctica han causado diferentes cambios. El más fuerte de ellos es que, prácticamente, no existen las conferencias tradicionales que consumen casi todo el tiempo de clase y cuyo objetivo es cubrir el contenido, es decir, presentar detalladamente a los estudiantes la información sobre los conceptos, leyes y teorías y su aplicación en la resolución de problemas.

En algunos casos se eliminan por completo las conferencias del maestro y los estudiantes *hacen física* en el aula siguiendo una guía de actividades, desde las prácticas basadas en computadora hasta las respuestas a las preguntas conceptuales [4,5,6]. En otros casos, el profesor solamente aborda los puntos que los estudiantes no pueden

comprender solos mediante lectura en casa o en grupos de discusión [7,8,9].

También es posible que el profesor reduzca su comunicación “plenaria” solamente al aviso de las actividades por hacer y al cierre de la sesión, reafirmando los principales resultados obtenidos por los estudiantes [10].

La tendencia de reducir o eliminar el discurso del profesor que proporciona información y sustituirlo por actividades múltiples de los estudiantes, asesorados por el profesor y/o sus ayudantes en el aula y retroalimentación en línea, parece ser una estrategia general de mejorar la calidad y reducir los costos de la educación universitaria en los Estados Unidos [11]. La necesidad de cambios en el paradigma educativo no surge solamente de la lucha para mejor posición en el turbio mercado académico, en que compiten las universidades presenciales, virtuales y mixtas, sino aún más debido a las tendencias en la economía globalizada.

La “*economía de conocimiento*” [12,13] y las “*empresas que aprenden*” [14,15] dependen críticamente, y cada día más, de la fuerza laboral que es capaz de aprender y emplear creativamente el conocimiento existente o de crear el conocimiento nuevo para enfrentar de manera novedosa los retos que generan cambios rápidos en el mercado [16]. La más apreciada característica de esa fuerza laboral es la disposición y las habilidades para el aprendizaje continuo a lo largo de la vida (life-long learning).

Se sobreentiende que la calidad y la rapidez aprendizaje empresarial, que el día de hoy son las únicas ventajas competitivas confiables, no se pueden lograr de manera organizada y eficiente sin contar con los “trabajadores de conocimiento”, capaces de detectar, discutir y solucionar los problemas vitales de la empresa. Las instituciones de la educación superior tienen la responsabilidad de preparar esos trabajadores, no solamente para los actuales y potenciales problemas de hoy sino, mucho más, para los que surgirán en las décadas que vienen [17,18]. El cambio urgente, que ya se comentó, es pasar de la educación en que los estudiantes reciben la información de manera pasiva, mediante las conferencias magisteriales, a la educación en que los estudiantes activamente construyen el conocimiento, dentro y fuera del aula.

Como la creación y el fomento de los entornos de aprendizaje activo en el aula no son una tarea trivial, ya aparecen manuales para los docentes interesados en el cambio, desde el nivel de secundaria hasta el nivel universitario [19,20,21].

No sobra destacar, también, la gran diversidad terminológica en los escritos que abogan por los cambios deseables. Por ejemplo, algunos autores en lugar de “entorno de aprendizaje activo” usan el término “entorno de aprendizaje auténtico” [22].

La tendencia de explorar posibilidades del aprendizaje activo es notable, también, en la educación de los ingenieros [23,24,25]. No es ocioso agregar que Prince [23] considera que el aprendizaje activo es todavía un tema polémico que con frecuencias polariza a las comunidades

de profesores. Los partidarios lo ven como una alternativa viable para los métodos tradicionales, que no promueven conocimientos y habilidades profesionales deseados para poder trabajar en el mundo cambiante. Sin embargo, los escépticos lo perciben como un futuro ejemplo en la larga lista de fracasos educativos.

Según Prince [23], el aprendizaje activo se genera con cualquier método de instrucción que involucre a los estudiantes en el proceso de aprendizaje. Obviamente, si el aprendizaje se considera como proceso que va más allá de la memorización y de la repetición de lo dicho y hecho por el profesor, entonces un diseño didáctico que pretenda promover aprendizaje activo, debe exigir que los estudiantes realicen actividades del aprendizaje significativo y que piensen, de manera deliberada y detenida, sobre lo que están haciendo.

Consecuentemente, el núcleo del aprendizaje activo es la verdadera participación y el compromiso intelectual de los estudiantes con el proceso de aprendizaje. Como contraste se puede tomar la enseñanza tradicional basada en la conferencia del maestro, en que los estudiantes reciben pasivamente la información o copian lo escrito en el pizarrón.

Prince [23] afirma que todas las formas del aprendizaje activo practicadas y evaluadas de manera científica en la educación de los ingenieros (aprendizaje cooperativo, aprendizaje colaborativo y aprendizaje basado en problemas) cuentan con evidencias experimentales de su eficacia (aunque con diferentes magnitudes).

En este escrito se reportan los objetivos relacionados con el aprendizaje y las habilidades de desempeño profesional, los elementos del diseño didáctico que los fomentan y sus efectos en cuatro grupos de los estudiantes que tomaron (en el otoño de 2005, durante la estancia sabática del primer autor) un curso de mecánica clásica en el ITESO (Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Tlaquepaque, Jalisco, México). Se trata un curso de servicio a las carreras de ingeniería que imparte el Departamento de Matemáticas y Física. También se comentan algunos cambios en la segunda implementación del curso en la Primavera de 2006.

El artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección II se presentan los objetivos del curso relacionados con las habilidades de aprendizaje, los elementos didácticos del curso se justifican y describen en la sección III, la sección IV contiene la descripción de la metodología y de los efectos del curso en los estudiantes y finalmente, en la sección V, se reportan nuestras conclusiones.

II. LOS OBJETIVOS DEL CURSO RELACIONADOS CON LAS HABILIDADES

En este escrito se consideran solamente los objetivos relacionados con las habilidades deseables, sin analizar los objetivos específicos relacionados con el contenido del curso. Como es por esperar, enfatizando el aprendizaje individual y en equipo, en la implementación se siente fuertemente que el contenido del curso se determinó teniendo en mente que la manera de cubrirlo será,

básicamente, mediante las conferencias magisteriales. No cabe duda que un físico puede “cubrir” muchísimo más del contenido hablando de física en comparación con lo que pueden “descubrir” los estudiantes haciendo física. Por eso, muy pronto se tendrá que considerar y realizar un ajuste entre los objetivos de habilidades y los objetivos del contenido.

Ya existe un amplio consenso [26,27] de que entre las habilidades más deseadas en el caso de los ingenieros, necesariamente figuran las que hacen posibles las siguientes actividades laborales:

- Comunicación, oral y escrita, de ideas científicas,
- técnicas y personales;
- Trabajo en equipo;
- Resolución de problemas;
- Aprender a aprender.

Mientras en la enseñanza tradicional se supone erróneamente que esas habilidades son fáciles de lograr, en este curso a los estudiantes se les proporcionan múltiples oportunidades para conocerlas y practicarlas en los contextos relacionados con los contenidos de mecánica. En el curso de mecánica se mencionaba y ejemplificaba, de manera explícita, que el aprendizaje conceptual y procedimental de mecánica requiere mucha práctica en los procesos metacognitivos y de autorregulación [28,29].

La búsqueda y la formulación de dudas justificadas en la lectura, la construcción individual de los mapas conceptuales, la conclusión en el proceso de resolución de problemas, la formulación, la justificación y la corrección de las predicciones sobre el posible suceso en una situación física son solamente unos ejemplos de las actividades metacognitivas y reflexivas sin las cuales es imposible hablar de un aprendizaje significativo y basado en competencias.

De tal manera, los objetivos del curso relacionados con las habilidades fue lograr que los estudiantes activen, fomenten y desarrollen la *gestión personal de aprendizaje* como la base indispensable del aprendizaje continuo (*life-long learning*).

III. LOS ELEMENTOS DEL DISEÑO DIDÁCTICO DEL CURSO

Para desarrollar el curso en la dirección de la *gestión personal de aprendizaje*, se optó por un formato de implementación basado en tres elementos claves:

- (1) Todas actividades de aprendizaje se realizan en equipo, aunque una parte debe ser individual;
- (2) en la resolución de problema los estudiantes deben comprender y perfeccionar los pasos de experto;
- (3) la secuencia Predecir – Observar – Explicar perfila todas las actividades con vídeos didácticos y prácticas en el laboratorio (actividades con medición).

Para poder implementar estos elementos del diseño, que consumen mucho tiempo de clase, fue necesario eliminar por completo las conferencias magisteriales. Esa decisión tiene como consecuencia que los conocimientos necesarios

para el trabajo en el aula, los deben adquirir los mismos estudiantes mediante lecturas en casa. De tal manera fue posible liberar todo el tiempo de la clase para que los estudiantes pudieran “hacer física”, sea respondiendo preguntas conceptuales sin y con vídeo, formulando y discutiendo sus ideas, realizando mapas conceptuales en el grupo y resolviendo problemas con la estrategia del experto.

A. Aprender con los demás: formación de equipos y retos intelectuales

Antes de iniciar el programa del curso, para afinar sus objetivos de aprendizaje, era importante conocer.

- (1) el nivel cognitivo de los estudiantes y
- (2) sus habilidades para el pensamiento crítico

Para este fin, en la primera sesión del curso, se aplicaron “La prueba de aula del razonamiento científico”, también llamada “La prueba de Lawson” [30], y “La prueba del pensamiento crítico”, preparado por el primer autor y basada en algunas preguntas del libro “Rompecabezas del pensamiento crítico” [31].

Estas pruebas permiten saber no solamente la posición de cada alumno en la escala de desarrollo cognitivo (pensador concreto o empírico inductivo, en transición, pensador formal o hipotético – deductivo) sino también cómo son sus formas de pensar, qué recursos utiliza para resolver un problema (visualización del problema, intuición, conocimiento empírico). Tales conocimientos son indispensables, tanto para afinar la metodología y las actividades del curso y como para formar los equipos de manera equilibrada. En un artículo anterior [32] se han descrito detalladamente los resultados de las pruebas y su uso para introducir el trabajo en equipos y las estrategias de experto en la resolución de problemas.

Al formar los equipos se aclaró que el líder (el estudiante sobresaliente en las pruebas mencionadas) no era aquel que impusiera, ordenara, oprimiera o representara al equipo sino que tuviera la intención de ayudar a los demás. El problema de formar equipo todavía no tiene una solución universalmente aceptada. Incluso, parece que el método selección (al azar vs. mediante un cuestionario sobre los estilos de aprendizaje) no influye en el desempeño académico de los equipos, cuantificado mediante la calificación del reporte de proyecto [33].

Aquí bien cabe destacar lo siguiente: Los problemas que deben enfrentarse en la educación de los ingenieros van más del puro desarrollo cognitivo y de las habilidades para el pensamiento crítico elemental, que, de hecho, sirven solamente como una precondition para un desarrollo intelectual más exigente.

Cada día crece la conciencia de que el resultado de la enseñanza de ingeniería debe ser el cambio adecuado de las creencias que sostienen los estudiantes sobre la enseñanza, el aprendizaje y la naturaleza del conocimiento [34]. La enseñanza que promueve esos cambios fuertes (por ejemplo, que el conocimiento no es absoluto sino dependiente del contexto) debe necesariamente estar centrada en el estudiante y hacerlo responsable de su

crecimiento intelectual [35]. No cabe duda que ese crecimiento será más rápido al aprender con los demás.

De tal manera, con el fin de conocer aún más el perfil académico inicial de los estudiantes, será necesario detectar y tomar en cuenta, en las actividades del curso, sus creencias epistemológicas sobre el conocimiento y el aprendizaje que parecen influir el proceso de aprender y afectar de manera notable los resultados académicos (son buenos predictores de los últimos) [36].

B. Resolución de problemas mediante la estrategia de experto

Sabiendo que la mayor parte de los estudiantes cree que la física es sinónimo de la resolución de problemas y que la

resolución de problemas consiste en insertar números en fórmulas, hemos decidido presentar una visión más adecuada de la resolución de problemas. Tal visión está basada en los conocimientos científicos actuales sobre los procesos mentales que usan los expertos en la resolución de problemas [37].

Esta visión, desde hace ya una década, forma parte de la didáctica de resolución de problemas en la mecánica universitaria [38]. Los pasos del experto en la resolución de problemas es la estrategia que deben promover los cursos de física en la educación de los ingenieros [27]. Para conocer y practicar la estrategia del experto, en la resolución de un problema se le exige al estudiante seguir de manera formal la siguiente secuencia, presentada en la Tabla 1.

Tabla I. Los pasos del experto en la resolución de problemas.

El paso del experto	¿Qué debe hacer el estudiante?
1. Visualización de la situación problemática	Representa, mediante un dibujo, gráfica o diagrama de vectores o de fuerzas, la situación del problema.
2. Análisis conceptual	Del enunciado del problema determina el tipo de movimiento o concepto(s) que deberá tratar en su solución.
3. Modelación matemática	Considera las ecuaciones que se deberán utilizar para definir el modelo matemático de la solución.
4. Planteamiento verbal de la solución	Establece el plan de la solución verbalmente. Como se esperaba, este paso fue el más difícil en la implementación.
5. Ejecución matemática del planteamiento verbal de la solución	Ejecuta su plan verbal utilizando las ecuaciones correspondientes para el problema. Como se puede ver, el estudiante está obligado a realizar cuatro actividades previas a la manipulación matemática, la que en su creencia anterior era la única actividad en la resolución de problemas.
6. Análisis de la solución	Compara con una situación real o verifica la solución por otro camino.
7. Conclusión	Describe el papel que jugó el problema en cuestión de su conocimiento y aprendizaje. También costó mucho trabajo lograr que los estudiantes comenzaran a ver la importancia de estos dos últimos pasos y aportar sus ideas.

C. La secuencia Predecir – Observar – Explicar: videos didácticos y actividades con medición

En este tipo de actividades se usa una variante de la conocida secuencia POE (Predecir - Observar – Explicar; Predict – Observe – Explain) propuesta por White y Gunstone [39] como un instrumento para evaluar la comprensión de los fenómenos que se estudian en la ciencia escolar.

En la primera versión del curso se usaba sistemáticamente con los videos didácticos y en las prácticas de laboratorio. También se tenían dos implementaciones – piloto con las demostraciones interactivas (movimientos sencillos y ondas estacionarios en una cuerda). En la segunda versión del curso (Primavera 2006) se comenzó usar, también, con los applets de física (por ejemplo, al estudiar el tiro parabólico).

C.1 POE con videos didácticos

Predicción

Previo a ver el video se les entrega a cada alumno una hoja (o juego de hojas) previamente redactada(s) con un

formato estructurado. La primera parte contiene los siguientes rubros:

- a) El evento descrito.
- b) Predicción individual
- c) Justificación

Enseguida los alumnos comparan con su equipo la actividad individual. Aquí se les pide no cambiar lo predicho de forma individual, mientras no se presenten argumentos aceptables para el cambio. Se dice explícitamente, que la adecuación de una predicción no depende del número de las personas que la lanzan, sino de la calidad del razonamiento empleado y las evidencias disponibles. Se mencionan casos históricos en que solamente unas pocas personas tenían ideas rechazadas por la mayoría, pero que hoy en día esas ideas se consideran científicamente correctas.

Observación y Explicación

- En esta parte se realizan las siguientes tareas:
- d) Observación de lo que ocurre en el video.
 - e) Comparación de lo predicho con lo observado.
 - f) Explicación de las diferencias y

g) Justificación del razonamiento que llevaba a la predicción correcta.

Esta actividad comienza al presentar una situación física concreta en el vídeo y preguntar qué pasará (de hecho, el propio vídeo muestra la situación y pregunta). El vídeo se detiene sólo, y siguen las actividades individual y grupal. Después la reproducción es activada de nuevo por el profesor (después un tiempo estimado previamente), y el vídeo muestra lo que sucede y lo justifica, mientras el alumno observa y luego responde la segunda parte de la hoja (o juego de hojas).

C.2 POE en actividades de medición

La actividad se lleva a cabo de manera individual y grupal.

1. El alumno hace sus predicciones justificadas (actividad individual);
2. Se monta el equipo (actividad grupal);
3. Se realiza y observa el fenómeno (actividad grupal);
4. Se explican eventuales diferencias entre lo predicho y lo observado (actividad individual combinada con actividad grupal);
5. Se entrega un reporte (actividad grupal).

La práctica a realizar se entrega con antelación para que el alumno la lea y conozca lo que va a realizar en la actividad de laboratorio.

D. El esquema de evaluación

Con las actividades mencionadas, el estudiante aprende continuamente y evalúa el avance de su aprendizaje mediante lecturas comprensivas en casa, observaciones y discusiones con los compañeros o gracias a las aclaraciones del maestro (cuando una duda o dificultad conceptual está compartida por todos los miembros del equipo). Esta evaluación formativa, por supuesto, requiere que el estudiante haga un esfuerzo por activar sus ideas y exponerlas a la crítica de sus compañeros.

En la asignatura de mecánica del semestre pasado estaba establecido que el 70 % de la calificación les corresponde a las tareas y los exámenes parciales (que evalúan lo que se ha trabajado en la parte teórica del curso) y el 30 % le corresponde a las prácticas realizadas en laboratorio. Prácticamente se han respetado estos porcentajes, con las siguientes modificaciones.

Del 70 % quedó:

- Exámenes de diagnóstico de lectura (10 %)
- Tareas (10 %)
- Dudas justificadas, autoexplicaciones, inferencias o ejemplos auto generados (10 %)
- Exámenes parciales (40 %)

El 30 %, que corresponde a las prácticas, se reparten de la siguiente manera: (*Idem*)

- El trabajo individual en la secuencia Predecir – Observar – Explicar (15 %);
- El reporte grupal de la práctica realizada en el laboratorio (15 %).

El contenido de los exámenes parciales refleja las actividades conceptuales y el trabajo hecho en la resolución de problemas. Constan de dos preguntas conceptuales cuya respuesta debe estar ampliamente justificada y 3 problemas con los pasos de experto practicados en el aula.

Como puede verse, el esquema de evaluación da un peso considerable a la lectura. Con una buena práctica de lectura, el estudiante puede “ganar” 20 % de la calificación (diagnóstico de lectura y un “producto” de la lectura, como duda justificada o autoexplicación). Al comenzar el curso, solamente se ha pensado “premiar” las dudas justificadas como producto de lectura, pero debido a la inadecuada participación de los estudiantes, el concepto “producto o experiencia de lectura” se amplió para dar más oportunidades a los estudiantes.

Los detalles de este ajuste entre lo planteado y la disposición de los estudiantes de mejorar su comprensión lectora son interesantes, pero quedan fuera de lo que se pretende reportar en este artículo [32].

Finalmente, como productos “aceptables” de lecturas, aparte de dudas justificadas, quedaron:

- a) Autoexplicaciones de un concepto, un fenómeno, un ejemplo, una figura, una gráfica o un desarrollo matemático;
- b) Inferencias que se puedan hacer de un concepto, una ley o un ejemplo) etc.
- c) Ejemplos nuevos que ayuden a explicar o entender algo.
- d) Mapas conceptuales.

Como es bien sabido de la investigación en psicología cognitiva [40], las actividades de autoexplicación, como todas las actividades metacognitivas, mejoran la calidad de aprendizaje. De manera similar, realizar de manera sistemática y seria la actividad de construcción y revisión de mapas conceptuales propicia la organización del conocimiento y eleva considerablemente la calidad del aprendizaje [41,42].

IV. LOS EFECTOS DE LOS OBJETIVOS DE HABILIDADES Y ELEMENTOS DE DISEÑO EN LOS ESTUDIANTES

Para documentar los efectos del curso en los estudiantes, se elaboró una encuesta que consistía de varias afirmaciones sobre el curso y se pedía que los estudiantes, guardando su anonimato, escogen y justifiquen la postura que les parece la más adecuada para cada afirmación. Las posibles posturas fueron las siguientes:

Posturas favorables

A. Comparto fuertemente la afirmación.

B. Comparto la afirmación.

Postura neutra

C. No tengo opinión.

Posturas desfavorables

D. Me opongo a la afirmación.

E. Me opongo fuertemente a la afirmación.

Una posible medida de los efectos en los estudiantes, o *Medida de Aceptación* (Mda) puede ser cuantificada como

el cociente entre las posturas favorables (A y B) y las desfavorables (D y E):

$$Mda = \frac{\text{Número de posturas favorables}}{\text{Número de posturas desfavorables}}$$

Si *Mda* es menor que 1, el efecto es muy insatisfactorio (número de opiniones favorables es menor que número de opiniones desfavorables).

Si *Mda* se entre 1 y 2, el efecto es insatisfactorio (número de opiniones favorables es menor que dos veces de desfavorables)

Si *Mda* es entre 2 y 4, el efecto es satisfactorio (número de opiniones favorables es entre dos y cuatro veces mayor que el número de opiniones desfavorables)

Si *Mda* es mayor 4, el efecto es muy satisfactorio (número de opiniones favorables es más que cuatro veces mayor que el número de opiniones desfavorables).

En lo que sigue se presentan, mediante las tablas, las posturas de los estudiantes hacia diferentes afirmaciones

sobre distintos aspectos del curso. De las *Mda* correspondientes se puede tener una primera idea sobre los efectos del curso en los estudiantes.

De hecho, como la primera reacción de la mayoría de los estudiantes hacia el diseño sin conferencias magisteriales fue muy adversa, es muy grato leer las justificaciones de los estudiantes que respaldan las posturas favorables. Algunos ejemplos de esas declaraciones, que no necesitan comentarios, se agregan después de cada tabla. Su presencia muestra que valió la pena mantener el enfoque del curso en momentos difíciles de implementación cuando los adversarios intentaban obligar a los profesores de regresar a la metodología tradicional.

Los comentarios necesarios se adjuntan solamente en los efectos con la valoración “insatisfactorio”.

A.1 Las afirmaciones de la encuesta relacionadas con los objetivos de habilidades para el aprendizaje

Tabla II. Reflexionar sobre el aprendizaje.

La afirmación sobre el curso	A	B	C	D	E	Cociente entre (A+B) y (D+E)
Este curso me hizo reflexionar sobre mi manera de aprender.	25	49	7	4	0	74/4 = 18.5 muy satisfactorio

Ejemplos de posturas favorables

“Me abrió la mente.”

“Es bueno aprender de los errores.”

“Reflexione sobre la manera de aprender y esto me va a servir para toda la vida.”

“Me dio oportunidad de pensar en que, quizá, el método tradicional no es tan eficaz como pensamos.”

“Estaba acostumbrado a que el maestro me diera las fórmulas y yo sólo las aplicaba, ahora yo las busco y las comprendo.”

Tabla III. Ver fortalezas personales en el aprendizaje.

La afirmación sobre el curso	A	B	C	D	E	Cociente entre (A+B) y (D+E)
Este curso me ayudó a ver mis fortalezas personales con respecto al aprendizaje.	23	35	18	6	3	58/9 = 6.4 muy satisfactorio

Ejemplos de posturas favorables

“Descubrí mis capacidades y de mi mismo.”

“Pude ver lo que hago bien yo que hago mal.”

“No creí aprobar el curso y, sin embargo, parece ser que si puedo aprender por mí mismo y eso lo aprendí aquí.”

“Creí que me iba costar más trabajo, pero hasta yo mismo me sorprendí.”

“Me di cuenta que al realizar trabajo personal es mucho más fácil aprender que sólo atendiendo al maestro.”

Tabla IV. Ver debilidades personales en el aprendizaje.

La afirmación sobre el curso	A	B	C	D	E	Cociente entre (A+B) y (D+E)
Este curso me ayudo a ver mis debilidades personales con respecto al aprendizaje	25	31	21	6	2	56/8 = 7.0 muy satisfactorio

Ejemplos de posturas favorables

“Para el aprendizaje debe haber disciplina y compromiso.”
 “Porque me hace falta leer más.”

“Mi comprensión a la hora de leer no era buena.”

“Me di cuenta de que no tenía bases muy firmes en física.”
 “Hay que enseñarnos a estudiar de una forma más efectiva.”

Tabla V. Aprender sin conferencia del maestro.

La afirmación sobre el curso	A	B	C	D	E	Cociente entre (A+B) y (D+E)
Este curso me demostró que puedo aprender sin conferencia del maestro.	17	30	14	19	5	$47/24 = 1.96$ insatisfactorio

Ejemplos de posturas favorables

“Nunca lo creí, pero es cierto.”
 “En otros cursos el maestro decía todo, en curso exploré diferentes fuentes bibliográficas.”
 “Comprobamos que aprendíamos por nuestra cuenta, ya que con ayuda del maestro en dudas podíamos resolver los problemas.”
 “Casi todo lo aprendimos leyendo del libro, haciendo problemas o experimentos.”
 “Me gustó mucho, porque siempre he estado en contra de los largos monólogos.”

Ejemplos de posturas desfavorables

“Me demostró que la función del maestro es proporcionar una “conferencia” donde explique y ayude a entender los conceptos que aprendo por mi cuenta.”
 “En la mayoría de las sesiones faltó una explicación del maestro para comprender las lecturas.”

“Descubrí lo contrario, me es difícil aprender sin maestro.”
 “Si se puede aprender, pero a mí me costó mucho trabajo.”

Comentario Este aspecto del curso, por poco, no tuvo un efecto global satisfactorio. Sin embargo, existen grandes diferencias en las posturas de los estudiantes entre los grupos que tomaron el curso. Mientras en un grupo la *MdA* es 6.7, en otro la *MdA* es solamente 0.6. A este último resultado probablemente contribuyeron dos factores: el mayor número de los estudiantes con fuerte creencia de que el papel del maestro es “dar conferencia” y la inexperiencia del maestro con la enseñanza constructivista (fue su primer curso de este corte).

B. Afirmaciones de la encuesta sobre la utilidad del curso y el esquema de evaluación

Tabla VI. Utilidad de los conocimientos y habilidades para el desarrollo profesional.

La afirmación sobre el curso	A	B	C	D	E	Cociente entre (A+B) y (D+E)
Los conocimientos y habilidades logrados en el curso me parecen útiles para mi desarrollo profesional.	14	37	18	13	3	$51/16 = 3.2$ satisfactorio

Ejemplos de posturas favorables

“Los conceptos los aprendí, no solo los macheteé, ya que tenía que analizar determinadamente.”
 “Aprender cosas que no solo me van a servir en mi desarrollo como profesional, sino para cualquier cosa.”
 “Porque en la vida diaria así se trabaja, se debe investigar y resolver sus propias dudas.”

“Si, porque me “entrenó” para dificultades futuras.”

“Aprender habilidades cómo aprender a aprender en vez de memorizar.”
 “Aunque directamente no me sirva en mi carrera profesional, sí me sirve el hecho de aprender a pensar y aprender solo.”

Tabla VII. El esquema de evaluación.

La afirmación sobre el curso	A	B	C	D	E	Cociente entre (A+B) y (D+E)
El esquema de evaluación empleado en el curso me pareció justo.	18	26	18	9	5	$44//14 = 3.1$ satisfactorio

Ejemplos de posturas favorables

“Todo vale así que me esfuerzo, es como un incentivo.”
 “Porque está bien distribuido.”
 “Porque se evalúa parejo trabajo y examen.”
 “Por que se evalúa parejo todo lo que hacíamos en clase y práctica.”

“Me parece bien, menos el concepto de duda.”

C. Las afirmaciones de la encuesta sobre los elementos del diseño didáctico

Tabla VIII. El trabajo en equipo.

La afirmación sobre el curso	A	B	C	D	E	Cociente entre (A+B) y (D+E)
Este curso me demostró la importancia del trabajo grupal en mi aprendizaje.	30	33	10	8	4	63/12 = 5.3 muy satisfactorio

Ejemplos de posturas favorables

“Gracias a mi equipo pude sacar adelante el curso.”
 “Nunca había visto tanto que el trabajo en equipo fuera tan eficiente.”
 “Es esencial en la vida laboral y es muy bueno ejercitar esta cualidad.”

“En el curso se exigió la cooperación de equipo por lo que aprendí de su importancia.”
 “Es más divertido y a su vez más controversial por la diferencia de opiniones.”

Tabla IX. La secuencia Predecir – Observar – Explicar.

La afirmación sobre el curso	A	B	C	D	E	Cociente entre (A+B) y (D+E)
Este curso me demostró la importancia de la secuencia Predecir – Observar – Explicar para el aprendizaje de la física.	25	36	16	5	3	61/8 = 7.7 muy satisfactorio

Ejemplos de posturas favorables

“Te hace tener una visión hacia el futuro.”
 “Fue satisfactorio tener la razón, aún más no tenerla pero comprenderla después.”
 “Es bueno predecir, porque si pasa eso o lo contrario ya no se te olvida.”

“Me ayudó a comprender mis aciertos y mis errores y poderlos justificar.”
 “El maestro tenía razón, muchas veces la intuición nos engaña.”

Tabla X. Los mapas conceptuales.

La afirmación sobre el curso	A	B	C	D	E	Cociente entre (A+B) y (D+E)
Este curso me demostró la utilidad de los mapas conceptuales para la organización y mejor aprendizaje de los conceptos.	9	25	21	17	13	34/30 = 1.1 insatisfactorio

Ejemplos de posturas favorables

“Permite tener una idea mucho más clara que un texto tradicional.”
 “Porque te da una visión más amplia de los capítulos en forma resumida y te muestra como se relaciona con lo demás.”
 “El poder estructurar las ideas después de haber leído es muy positivo para recordar en un futuro la relación entre ello.”
 “Ya que llevan lo más importante y descartamos lo que nos puede confundir.”

“Sirven como una rápida referencia a la hora de analizar el problema.”
Comentario El efecto de este recurso de aprendizaje es el peor de todos. Otra vez, se notan grandes diferencia entre los grupos. Mientras en un grupo la *MdA* es 3.0, en otro la *MdA* es 0.5. Parece ser que esta diferencia se debe a la atención que se prestaba al trabajo con los mapas conceptuales (insistir en el procedimiento de elaboración y la corrección sistemática por parte del maestro). Además, las posturas desfavorables no contienen justificaciones o son vagamente argumentadas (no sirven,

no me gustan, hay mejores maneras de aprender,...), lo que muestra que hay estudiantes que sostienen posturas

poco reflexivas cuando se trata de recursos que pueden ayudar en el aprendizaje.

Tabla XI. La resolución de problemas de física.

La afirmación sobre el curso	A	B	C	D	E	Cociente entre (A+B) y (D+E)
Este curso me mostró que resolver un problema de física es más que un ejercicio matemático.	32	35	11	4	1	$67/5 = 13.4$ muy satisfactorio

Tabla XII. La estrategia para resolución de problemas de física.

La afirmación sobre el curso	A	B	C	D	E	Cociente entre (A+B) y (D+E)
Este curso me ayudó a desarrollar una mejor estrategia de resolver problemas de física.	25	29	19	10	2	$54/12 = 4.5$ muy satisfactorio

Ejemplos de posturas favorables

“Me enseñó a reflexionar.”

“Antes de este curso no sabía muy bien una metodología.”

“Primero hay que ver qué cosas intervienen en el problema para entenderlo.”

“Se me hace un proceso largo pero efectivo, te obliga a reflexionar.”

“Si hubiera sido diferente, quizá seguiría aprendiéndome la fórmula y aplicar sin entender”.

Tabla XIII. Las sesiones en el laboratorio.

La afirmación sobre el curso	A	B	C	D	E	Cociente entre (A+B) y (D+E)
Las sesiones en laboratorio me parecían buenas para el aprendizaje de física.	45	20	9	7	3	$65/10 = 6.5$ muy satisfactorio

Ejemplos de posturas favorables

“Me acercan a la realidad física.”

“Son excelente medio para ejemplificar los conceptos vistos.”

“Se entiende mejor todo cuando lo llevas a la práctica.”

Tabla XIV. Los vídeos didácticos.

La afirmación sobre el curso	A	B	C	D	E	Cociente entre (A+B) y (D+E)
El uso de videos didácticos me pareció bueno para el aprendizaje de física.	55	25	4	1	1	$80/2 = 40$ muy satisfactorio

Ejemplos de posturas favorables

“Excelentes para el deleite visual y mental.”

“Es un mejor ejemplo visual en donde interviene la física.”

“Me ayudó a recordar las imágenes para futuras explicaciones”.

“satisfactorio”. Solamente 2 afirmaciones tenían un efecto “insatisfactorio”. Consecuentemente, el curso y sus objetivos relacionados con las habilidades lograron una resonancia positiva en la mayoría de los estudiantes.

Con respecto a los mapas conceptuales, la mejora se espera mediante dos medidas, La primera es la mejor atención por parte de los profesores y la segunda es el uso del software *Inspiration* para la elaboración de los mapas conceptuales en equipo. De hecho, la realización y las modificaciones de los mapas conceptuales dejarán de ser

V. CONCLUSIONES

De las 13 afirmaciones sobre el curso, 9 tenían en los estudiantes un efecto “muy satisfactorio”, y 2 un efecto

tediosas y el seguimiento por parte de los profesores sería más cómodo.

Otro aspecto que se debe atender es la creencia de algunos estudiantes de que la conferencia del maestro es fundamental para el éxito de su aprendizaje. Debido parcialmente a esa creencia, rechazan sustituir la conferencia del maestro con la lectura y no quieren aceptar el hecho firme de que en su futura profesión la mayor parte de sus conocimientos tendrán que adquirirlos mediante la lectura de los manuales y artículos profesionales, tanto impresos como en la pantalla de su computadora.

El primer paso para enfrentar esta creencia es destacar, en frente de todo el grupo, los casos de aprendizaje auténtico que se den a menudo en el trabajo de equipos sin la ayuda del maestro. Por otro lado, nunca sobra enfatizar que el mejor papel del maestro es intervenir y resolver dudas y confusiones cuando no alcanzan los recursos personales y de equipo.

En el futuro próximo se va a considerar la aplicabilidad de algunas soluciones que aparecen en las revistas sobre la educación de ingenieros para tratar el problema de cómo eliminar o modificar drásticamente las conferencias magisteriales.

Un ejemplo es presentar la conferencia del maestro en el vídeo en línea que el estudiante puede ver cuando quiera [43]. De tal manera, se libera todo el tiempo de la clase para el trabajo de los estudiantes con la ayuda del maestro. Los estudiantes que no entienden el contenido del libro de texto pueden ver el vídeo del maestro y, tal vez, aclarar algunas dudas.

Claro, aquí el problema es de qué y cómo se va a hablar en la vídeo conferencia. Lo ideal sería saber, de la investigación, las dudas de los estudiantes, y tratar de resolverlas mediante comentarios precisos o sugerencias sobre qué se tiene que pensar con más cuidado.

También llama mucho la atención una investigación en que se compararon un curso tradicional (maestro usando acetatos y pizarrón), un curso con el uso de la red, un curso con el uso de “streaming media” y un vídeo curso interactivo, con base en un programa común y con las mismas tareas, exámenes y método de evaluación. El resultado muestra que cada uno de los modos con uso de tecnología mejora el desempeño de los estudiantes en comparación con el método tradicional [44].

Como se ve de esta pequeña muestra de investigaciones actuales, la idea de eliminar las conferencias del maestro es un problema muy importante en la educación de los ingenieros y ya existen varias soluciones que merecen ser consideradas. Sin embargo, como documenta nuestra experiencia, la implementación de una metodología que funciona en una cultura académica y profesional no necesariamente funcionará de manera igual en otra, en este caso, en la que se tiene en México.

Creemos firmemente en que la postura deseada no es abandonar la idea de implementar lo verificado experimentalmente en otros países sino buscar, individual e institucionalmente, las maneras de cambiar la cultura académica y profesional que obstaculiza o impide la implementación. Esto no es una tarea fácil, pero vale la pena trabajar en su realización.

Las razones sobran y son las experiencias maravillas que hemos experimentado en este curso, observando a menudo la emoción que sienten los estudiantes cuando logran comprender el comportamiento del mundo físico que antes les parecía incomprensible o descubren lo sorprendente en lo que tomaban como comprendido. Como se dijo hace mucho tiempo, la mente humana no es una vasija que llenar sino un fuego que encender. Este curso es nuestro modesto intento de encender el fuego de aprendizaje autorregulado en el aula universitaria. Las “chispas” presentadas en este artículo parecen ser un buen comienzo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la *Dirección General Académica del ITESO* por su generoso apoyo que hizo posible, tanto el diseño didáctico de este curso como su implementación en el aula.

REFERENCIAS

- [1] McDermott, L. C. y Redish, E. F., *Resource Letter: PER-1: Physics Education Research*, Am. J. Phys. **67**, 755 – 767 (1999).
- [2] Thacker, B. A., *Recent advances in classroom physics*, Rep. Prog. in Phys. **66**, 1833-1864 (2003).
- [3] Hake, R. R., *Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses*, Am. J. Phys. **66**, 64 – 74 (1998).
- [4] Laws, P. W., *Calculus-based physics without lectures*, Phys. Today **44**, 24 – 31 (1991).
- [5] Laws, P. W. (*Workshop Physics Activity Guide Modules 1-4*, John Wiley and Sons, New York, NY, 1996).
- [6] Jackson, D. P., Laws, P. W y Franklin, S. (*Explorations in Physics: An Activity-based Approach to Understanding the World*, John Wiley and Sons New York, 2003).
- [7] Meltzer D. E. y Manivannan, K., *Promoting interactivity in physics lecture classes*, Phys. Teach. **34**, 72 – 76 (1996).
- [8] Mazur, E. (*Peer Instruction: A User's Manual*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1997).
- [9] Meltzer, D. E. y Manivannan, K., *Transforming the lecture-hall environment: The fully interactive physics lecture*, Am. J. Phys. **70**, 639 – 654 (2002).
- [10] Guisasola, J., Almudí, J. M., Ceberio, M. y Zubimendi, J. L., *A teaching strategy for enhancement of physics learning in the first year of industrial engineering*, Euro. J. Eng. Ed. **27**, 379 – 391 (2002).
- [11] Twigg, A., *Improving Quality and Reducing Cost. Design for Effective Learning*, Change **35**, 22 – 29 (2003).
- [12] OECD (*The Knowledge-Based Economy*, OECD, Paris, 1996).
- [13] Cooke, P. (*Knowledge Economies: Clusters, Learning and Co-Operative Advantage*, Routledge, London, 2001).

- [14] Senge, P. (*The Fifth Discipline. The Art and Practice of the Learning Organization*. Doubleday/Currency, New York, 1990).
- [15] Marquardt, M. y Reynolds, A. (*The Global learning Organization. Gaining Competitive Advantage through Continuous Learning*, Irwin, Burr Ridge, IL, 1994).
- [16] Nonaka, I., y Takeuchi, H. (*The Knowledge-Creating Company*, Oxford University Press, New York, 1995).
- [17] Jarvis, P. (editor) (*The Age of Learning: Education and the Knowledge Society*, Taylor and Francis Group, London, 2001).
- [18] Graham, P. A. (editor) (*Knowledge Economy and Postsecondary Education: Report of a Workshop*, National Academic Press, Washington, DC, 2002).
- [19] Marzano, R. J., Pollack, J. F. y Pickering, D. J. (*Classroom instruction that works: Research-based strategies for increasing student achievement*, Association for Supervision and Curriculum Development, Alexandria USA, 2001).
- [20] Marzano, R. J., Norford, J. S., Paynter, D. E., Pickering, D. J. y Gaddy, B. B. (*A handbook for classroom instruction that works*, Association for Supervision and Curriculum Development, Alexandria USA, 2001).
- [21] Michael, J. A. y Modell, H. I. (*Active learning in secondary and college classroom: A working model for helping the learner to learn*, Erlbaum, Mahwah, NJ, 2003).
- [22] Herrington, A. y Herrington, J. (“What is an Authentic Learning Environment?”, en A. Herrington (editor), *Authentic Learning Environments in Higher Education*, Information Science Publishing, Hershey, PA (USA), 2005).
- [23] Prince, M., *Does active learning work? A review of the research*, J. Eng. Ed. **93**, 223 – 231 (2004).
- [24] De Graaff, E. y Christensen, H. P., *Editorial: Theme issue on active learning in engineering education*, Euro. J. Eng. Ed. **29**, pp. 461 – 463 (2004). Se trata de un número especial de la revista dedicado completamente a diferentes aspectos y formatos de aprendizaje activo.
- [25] Smith, K. A., Sheppard, S. D., Johnson, D. W. y Johnson, R. T., *Pedagogies of engagement: Classroom-based practices*, J. Eng. Ed. **94**, 87 – 101 (2005).
- [26] John, V., *Engineering education – finding centre or “back to the future”*, Euro. J. Eng. Ed. **25**, 215 – 225 (2000).
- [27] Van Heuvelen, A., *Millikan Lecture 1999: The Workplace, Student Minds, and Physics Learning Systems*, Am. J. Phys. **69**, 1139 – 1146 (2001).
- [28] Zimmerman, B. J. *Self-regulated learning and academic achievement: An overview*, Ed. Psychologist **25**, 3 – 17 (1990).
- [29] Zimmerman, B. J., *Becoming a self-regulated learner: An overview*, Theory into Practice **41**, 64 – 70 (2002).
- [30] Lawson, A. E. (*Science Teaching and Development of Thinking*, Wadsworth Publishing Company, Belmont, CL, 1995).
- [31] DiSpezio, M. A. (*Critical Thinking Puzzles*, Sterling Publishing, New York, 1996).
- [32] Medina, R. y Sliisko, J., “*El aprendizaje activo de la física universitaria: Las primeras experiencias de una implementación*”, ponencia presentada en la Reunión Internacional sobre la Enseñanza de la Física y la Especialización de los Profesores (RIEFEP), del 8 al 11 de Noviembre de 2005. Matanzas (Cuba).
- [33] Huxham, M., *Assigning students in group work projects: Can we do better than random?*, Innovations in Education and Training International **37**, 17 – 22 (2000).
- [34] Felder, R. M. y Brent, R., *The intellectual development of science and engineering students. Part 1: Models and challenges*, J. Eng. Ed. **93**, 269 – 277 (2004).
- [35] Felder, R. M. y Brent, R., *The intellectual development of science and engineering students. Part 2: Teaching to promote grow*, J. Eng. Ed. **93**, 279 – 291 (2004).
- [36] Braten, I., y Stromso, H. I., *The relationship between epistemological beliefs, implicit theories of intelligence, and self-regulated learning among Norwegian postsecondary students*, Brit. J. Ed. Psych. **75**, 539 – 565 (2005).
- [37] Reif, F. (*Understanding Basic Mechanics: A Text and Workbook Set*, John Wiley and Sons, New York, NY, 1995).
- [38] Reif, F., *Millikan Lecture 1994: Understanding and teaching important scientific thought processes*, Am. J. Phys. **63**, 17 – 32 (1995).
- [39] White, R y Gunstone, R. (*Probing Understanding*, The Falmer Press, London and New York, 1992).
- [40] Chi, M. T. H., De Leeuw, N., Chiu, M. H. y La Vancher, Ch., *Eliciting self-explanations improves understanding*, Cogn. Sci. **18**, 439 – 477 (1994).
- [41] Novak, J. D. (*Learning, Creating, and Using Knowledge. Concept Maps As Facilitative Tools in Schools and Corporations*, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, 1998).
- [42] Novak, J. D. y Gowin, D. B. (*Learning how to learn*, Cambridge University Press, New York, 1984).
- [43] Foertsch, J., Moses, G., Strikwerda, J., y Litzkow, M., *Reversing the lecture/homework paradigm using eTEACH web-based streaming vídeo software*, J. Eng. Ed. **91**, 267-274 (2002).
- [44] Rutz, E., Eckart, R., Wade, J. E., Maltbie, C., Rafter, C. y Elkins, V., *Student performance and acceptance of instructional technology: Comparing technology-enhanced and traditional instruction in a course in statics*, J. Eng. Ed. **92**, 133–140 (2003).

Programa de estrategias creativas (PEC) para potenciar la actitud creativa del docente de Física



Manuel Reyes Barcos

Departamento de Matemática y Ciencias Naturales, Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Instituto Pedagógico de Miranda, Av., Principal de La Urbina, Edif. Mirage, Caracas, Venezuela.

E-mail: mreyesbar@yahoo.es

(Recibido el 25 de junio de 2007; aceptado el 5 de Agosto de 2007)

Resumen

El propósito de la presente investigación fue diseñar, aplicar y valorar un programa de estrategias creativas a fin de potenciar la actitud creativa de los profesores de física, tendente al mejoramiento de la enseñanza de esta ciencia. A partir de un diagnóstico inicial los objetivos que orientaron la investigación fueron: (a) Evidenciar la presencia de actitud creativa a través de sus indicadores: tolerancia, fluidez, flexibilidad, originalidad y analogía- en los profesores de física; (b) Elaborar un programa de estrategias creativas para los profesores de física; (c) Aplicar el programa elaborado de estrategias creativas a los profesores de física y (d) Valorar el programa elaborado y aplicado de estrategias creativas como factor de cambio en la actitud de los profesores de física para la enseñanza. El abordaje metodológico fue concebido dentro de la investigación acción, bajo un enfoque cualitativo. La investigación se realizó en el Instituto Pedagógico de Miranda y los sujetos cuatro docentes de física. Al realizar la interpretación triangulada de los registros del investigador, los observadores externos y los alumnos se evidenció que los profesores de física sólo presentan la tolerancia como indicador de actitud creativa. En virtud de las carencias observadas y como una aplicación del programa de estrategias creativas se aplicó el taller "Técnicas de Estimulación Creativa" a fin de potenciar en ellos la actitud creativa. Una vez ejecutado el taller se realizó la interpretación triangulada en la segunda fase obteniéndose como resultado la potenciación de cuatro de los cinco indicadores de actitud creativa analizados. De estos hallazgos se desprende que la creatividad puede ser potenciada a través de entrenamiento sistemático.

Descriptores: Enseñanza de la física, creatividad, estrategias creativas.

Abstract

The intention of the present investigation was to design, to apply and to value a program of creative strategies in order to harness the creative attitude of the professors of mathematical, tending to the improvement of the education of this science. From an initial diagnosis the objectives that oriented the investigation were: (a) To demonstrate the presence of creative attitude through its indicators: -tolerance, fluidity, flexibility, originality and analogy in the professors of physics; (b) To elaborate a program of creative strategies for the professors of physics; (c) To apply the program elaborated of creative strategies to the professors of physics and (d) Valuing the program elaborated and applied of creative strategies like factor of change in the attitude of the professors of physics for education. When making the three cornered interpretation of the registries of the investigator, the external observers and the students were demonstrated that the professors of physics only present the tolerance like creative attitude indicator. By virtue of the observed deficiencies and as an application of the program of Technical creative strategies were applied the factory "of Creative Stimulation" in order to harness in them the creative attitude. Once executed the factory the three cornered interpretation was made in the second phase obtaining itself like result the involution of four of the five analyzed creative attitude indicators. These findings it is come off that the creativity can be harnessed through systematic training.

Key Word: Physics education, creativity, creative strategies.

PACS: 01.40.Ej, 01.10.Fv, 01.40.Jp.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la creatividad se impone como alternativa de cambio en el campo educacional, es necesario preparar al hombre para la vida, esto implica un cambio de actitud no sólo en los alumnos, sino en los profesores. Al respecto, Martínez [1] señala que aprender a ser creador en la profesión docente es aprender a ser verdadero maestro.

Desarrollar la creatividad es una expresión que no corresponde sólo al aprendizaje de los alumnos, sino también, y de forma sobresaliente al trabajo de los profesores. Para ello resulta importante establecer una adecuada interrelación entre las actividades de los profesores y los alumnos teniendo como norte conducir al alumno por el camino del dominio de las ciencias y la de fomentar su pensamiento independiente, se trata de que el

conocimiento se comunique con sus movimientos y desarrollo. En tal sentido, Martí [2] destaca que el primer deber del hombre de estos días es ser un hombre de su tiempo, no aplicar teorías ajenas, sino descubrir las propias.

En educación superior, si los alumnos muestran un alto nivel de independencia se facilita el empleo de métodos de investigación para elaborar los trabajos asignados en los cursos, lo cual puede conducir a que ellos mismos se planteen los problemas, muchos de ellos propios de las ciencias, para los cuales tampoco el profesor tiene la solución, uno de ellos podría ser la investigación acción, el cual además de capacitar a los estudiantes en forma eficaz los vincula con su propia realidad, conduce a la solución de problemas de la práctica social además de aprender la creatividad en forma creadora.

En el caso particular de la enseñanza de la física la aplicación de la creatividad debe poner énfasis en el método científico llevado a la práctica, donde se destaque la incorporación de objetivos actitudinales. Podría contagiarse a los alumnos el entusiasmo de descubrir por sus propios medios los principios y teoremas de la física; de esta manera se fomentaría la capacidad de asombro y se mantendría la actitud de preguntarse el por qué de las cosas, así como la búsqueda sistemática de respuestas.

Para que el individuo sea creador, debe dejársele formular sus propias hipótesis y conclusiones, aunque éstas sean erróneas; hay que darle la oportunidad de que él mismo lo compruebe. El perfil del alumno no puede basarse en necesidades y objetivos perentorios, sino en programas de enseñanza dirigidos al desarrollo de la creatividad. De esta manera pensamos que los nuevos objetivos de la educación deben ser flexibles e incluir numerosas posibilidades optativas. Asimismo, en las escuelas e instituciones formadoras de docentes se han de desarrollar actitudes y capacidades intelectuales, de percepción y comprensión, que no queden obsoletas al paso del tiempo.

Con relación a la física se puede afirmar que es una ciencia vieja y polivalente, que ha sido empleada con diversos objetivos, desde instrumentos para la elaboración de vaticinios, hasta la creación de belleza artística. Por otra parte, es una ciencia dinámica y cambiante en sus contenidos y en su propia concepción, lo que sugiere que el abordaje de la física no es sencillo.

La complejidad de la física y de la educación sugiere que los profesores de esta ciencia deben permanecer constantemente atentos y abiertos a los cambios que la situación global exige. La educación como todo sistema, presenta una fuerte resistencia al cambio. En la enseñanza de la física a nivel internacional apenas se produjeron cambios considerables en los años sesenta, cuando surgió un movimiento de innovación que llamó la atención sobre la necesidad de evolución del sistema educativo en física a todos los niveles.

Los profesores de física deben percatarse de la importancia que puede tener un cambio efectivo en la percepción de lo que en realidad es la física. La orientación como saber hacer autónomo, bajo una guía adecuada, es un ejercicio atrayente. Los niños y jóvenes

pueden ser introducidos de forma agradable en actividades que constituyen el inicio razonable del conocimiento matemático, tratando de mantener este interés y no ahogarlo, más adelante, en abstracciones inmotivadas y a destiempo.

Klein [3] escribía en sus lecciones sobre física elemental desde un punto de vista superior:

“Durante mucho tiempo la gente de la universidad se preocupaba exclusivamente de sus ciencias, sin conceder atención alguna a las necesidades de la escuela, sin cuidarse en absoluto de establecer conexión alguna con la física de la escuela. ¿Cuál era el resultado de esta práctica? El joven estudiante de la universidad se encontraba a sí mismo, al principio, enfrentado con problemas que no le recordaban en absoluto las cosas que le habían ocupado en la escuela. Cuando, después de acabar su carrera, se convertía en profesor de enseñanza media se encontraba de repente en una situación en la que se suponía que debía enseñar las físicas elementales tradicionales en el viejo modo pedante; y puesto que, sin ayuda, apenas era capaz de percibir conexión alguna entre su tarea y sus físicas universitarias, pronto recurría a la forma de enseñanza garantizada por el tiempo y sus estudios universitarios quedaban sólo como una memoria más o menos placentera que no tenía influencia alguna sobre su enseñanza”.

Un siglo después, no se puede decir que en nuestro entorno la situación difiere mucho de lo que Klein describía. La sociedad tiene derecho a esperar de las universidades en lo que respecta a la formación de aquellas personas a las que les va a confiar la educación física de los más jóvenes, una formación creativa e innovadora que le permita comprender mejor las dificultades del hombre y de la humanidad en la elaboración de las ideas físicas, y a través de ello las de sus propios alumnos y entender mejor la hilación de ideas, de los motivos y variaciones de la sinfonía física para utilizar su saber como una sana guía para su propia pedagogía.

Es necesario romper, por todos los medios, la idea preconcebida y arraigada en nuestra sociedad de que la física es aburrida, inhumana, inútil y muy difícil.

Basado en los supuestos anteriores, el propósito de la presente investigación fue elaborar, aplicar y valorar un programa de estrategias creativas a partir del diagnóstico a fin de potenciar la actitud creativa de los profesores de física del Instituto Pedagógico de Miranda José Manuel Siso Martínez; tendentes al mejoramiento de la enseñanza de esta ciencia.

La justificación del presente trabajo se fundamenta en el grado de abstracción con los cuales se manejan los conceptos matemáticos, estos son construidos mediante la aplicación del método deductivo, esto hace que la enseñanza de esta ciencia no sea fácil, así que se requiere la utilización de excelentes estilos didácticos y nuevos programas de enseñanza, donde se evidencien los múltiples esfuerzos de mejoramiento de la enseñanza de esta ciencia caracterizados por el énfasis que debe hacerse en incidir y definir la actividad del docente. Las diversas estrategias diseñadas no deben reducirse a la prescripción de recetas elaboradas para que el profesor las aplique, sino

que atienda a la transformación de las prácticas pedagógicas en la enseñanza de la física.

El abordaje metodológico fue concebido dentro de la investigación acción. El escenario estuvo constituido por el Instituto Pedagógico de Miranda José Manuel Siso Martínez, siendo las unidades de análisis los indicadores de actitud creativa – tolerancia, fluidez, flexibilidad, originalidad y analogía – de cuatro docentes de física. Se aplicó la técnica de observación sistemática participante y como instrumento para la recolección de información se utilizó el cuaderno de registro diario.

El estudio buscó a través de los programas de estrategias creativas de enseñanza de la física generar cambios en las actitudes asumidas por los docentes, los cuales orientan sus enseñanzas hacia la forma tradicional, utilizando esquemas epistemológicos que impiden el desarrollo de las actitudes creativas de los alumnos, por otra parte replantear las ideas sobre la enseñanza de la física basada en nuevos paradigmas.

El estudio se estructuró en diez secciones, en la segunda se contextualiza la conexión entre creatividad, ciencias y pedagogía, y se plantean los objetivos del estudio; en la tercera sección se plantea la creatividad como un paradigma emergente de enseñanza de la física, la sección cuatro trata de los rasgos que evidencian la actitud creativa de los profesores. En la sección cinco abordamos la física y su enseñanza, mientras la sección seis describe las teorías sobre creatividad, la sección siete trata sobre las estrategias creativas utilizadas en el estudio, para abordar en la sección ocho el producto obtenido, la sección nueve muestra el aporte teórico de la investigación constituido por el programa (PEC) de estrategias creativas, para finalizar en la sección 10 con las conclusiones del estudio.

II. CREATIVIDAD, CIENCIAS Y PEDAGOGÍA

La creatividad y la práctica de la pedagogía son dos procesos que deberían estar íntimamente relacionados, en donde la acción del profesor, como especialista en pedagogía, podría resultar necesaria y fundamental. Sin embargo, la creatividad a la vez que ofrece la posibilidad de desarrollo al campo educativo y al profesor, exige de éste una preparación acorde. Debe entender que enseñar no es sinónimo de transmitir cultura, sino de capacitar al alumno para que por sí mismo la integre, recree y enriquezca. Si el docente quiere educar para el cambio y capacitar para la innovación debe hacerlo creativamente.

El caso particular de los profesores especialistas en ciencias naturales y física que conciben su quehacer como algo simple, pensando que es suficiente con poseer nuevos conocimientos de la materia a enseñar, saber algo de pedagogía y tener algún curso previo de psicología educativa, no notan que esto constituye una limitación, ya que pone de manifiesto insuficiencias y carencias para el desarrollo de su actividad docente.

Esta puede ser una de las razones que convierte al proceso de enseñanza de la física en algo monótono y sin interés alguno. Se hace necesario entonces hacer una

revisión de la actitud de estos profesores a fin de minimizar los obstáculos que presentan en la renovación de la enseñanza e introducir innovaciones que tiendan a superarlos.

Uno de los estereotipos más comunes hace referencia al científico como una persona abierta a las novedades y como alguien acostumbrado a razonar y a discutir teorías y puntos de vista en función de sus méritos intrínsecos. En este sentido, Campanario [4] asume que existe un paralelismo entre la resistencia de los alumnos al campo conceptual y la resistencia por parte de los profesores de ciencias a aceptar nuevas ideas.

De la Torre [5] considera que la creatividad es una cualidad inherente a todo ser humano, está latente en casi todas las personas, es una cualidad sustantiva de las sociedades de empuje. La diversificación de criterios acerca de creatividad, crea limitaciones para asociar la investigación en ciencias y la pedagogía, sólo si los profesores de ciencias se disponen a proporcionar aportes integradores se podrá, en mejores condiciones orientar a los profesores en el desarrollo de actitudes creativas. En este sentido, Menchén [6] afirma que la superación de esta situación sólo puede darse en el marco de un profundo cambio de enfoque, en el que se contemplen los aspectos creativos de la formación en ciencias. Por ello, es necesario incorporar la creatividad en el proceso de enseñanza, tratando de acercar las ciencias a la realidad e intereses de los alumnos, con el objeto de que aprendan a resolver los problemas de la vida cotidiana. La aplicación de la creatividad en las ciencias debe poner énfasis en el método científico llevado a la práctica, destacando la incorporación de objetivos actitudinales.

El profesor debe despertar en el alumno la curiosidad y estimular la creatividad de ellos, esto podría contribuir a modificar la actitud hacia el aprendizaje de las ciencias y la física. Si se inculca en los alumnos el entusiasmo por descubrir por ellos mismos las leyes, principios y teoremas, tratando de fomentar la capacidad de asombro ante los fenómenos naturales y algoritmos matemáticos, a la vez que mantenemos la actitud de preguntarse el por qué de las cosas y la búsqueda sistemática de las respuestas, no estaríamos eliminando los conocimientos sino que éstos aparecen de una forma natural a lo largo del trabajo escolar.

Los nuevos descubrimientos producen continuos cambios en la sociedad, y la educación no escapa a estos cambios. Ella debe formar para el cambio permanente, la enseñanza basada en la memoria y la repetición tendrá menos importancia que en la actualidad y se centrará la atención en las actividades intelectuales, tales como la comprensión, la aplicación de los conocimientos y la solución de problemas; en este sentido el currículo deberá centrarse en el desarrollo de estas actividades.

Gurfinkel [7], considera que los maestros no han errado al considerar la teoría del desarrollo como base del diseño curricular ya que es importante tener presente que la relación entre el desarrollo mental y el currículo en ciencias no es simple y directo. En tanto, González y Mitjans [8] sostienen que el maestro como elemento activo, define el sentido educativo que tienen para el

alumno las diversas actividades que realiza en la escuela, y debe perfeccionar la concepción general que rige los planes de estudio.

Driver [9], explica que los diseñadores del currículo no sólo necesitan saber contenidos de la materia a enseñar, sino del modo cómo se produce el aprendizaje, debe ser entonces la creatividad el eje central del currículo donde se refleje que las experiencias que han de adquirir los estudiantes en el aula están directamente influidas por el modo en que trabajan los profesores.

Según lo expuesto, la problemática de la creatividad y la enseñanza de la física exige una preocupación permanente, renovada, que supone siempre un juego entre la búsqueda de alternativas y el contraste con la realidad educativa actual, la cual presenta una enseñanza centrada en métodos tradicionales a los cuales, pareciera, no haberseles incorporado el componente creativo.

González [10], afirma que en la enseñanza de la física se distinguen dos tendencias: (a) la física es una ciencia codificada, hecha, en la cual no hay nada que modificar y que está constituida por un conjunto de verdades inalterables descubiertas desde la antigüedad y (b) la física es una ciencia abierta que está en constante evolución y expansión, por ello su enseñanza debe permitir la reinención de lo que es conocido por quien aprende, esto debe ser una condición necesaria aunque no suficiente para que el estudiante sea capaz de inventar o descubrir hechos matemáticos nuevos. De esta manera, la física será una ciencia que enfrente a los alumnos con soluciones problemáticas que sean resueltas creando condiciones favorables al desarrollo de la creatividad.

Es misión de los profesores de física promover en sus alumnos la actitud creativa, a ser capaces de enfrentarse con lo nuevo, a improvisar, a no temer al cambio sino a sentirse mejor con él, esto significa que se debe enseñar y preparar al alumno no según los viejos modelos, sino en el nuevo sentido de formar alumnos "creativos". Ya no se puede considerar que la educación sea fundamentalmente un proceso de aprendizaje; en la actualidad, también abarca la educación del carácter y el proceso de formación de la persona. Es necesario el surgimiento de un nuevo movimiento de enseñanza de la física que haga énfasis en la no objetividad, que intervenga menos lo bueno y lo malo, en la que exista despreocupación por lo correcto y lo incorrecto, es decir, que el alumno pueda enfrentarse consigo mismo, con su propio valor y ansiedad, sus estereotipos o su espontaneidad.

La creatividad debe estar presente en la formación docente de los profesores. Ha de ser asumida por éstos al igual que los valores y las actitudes en virtud de los rasgos que presenta la enseñanza creativa. Es necesario tener presentes las cualidades de autovaloración, confianza en sí mismos y responsabilidad creciente. Asimismo, implica el concepto de enseñanza como un proceso creativo y la aportación de seguridad psicológica para el maestro. Las recompensas de la enseñanza creativa son evidentes por sí mismas. Es un placer emprender las funciones con una mente abierta, una actitud creativa hacia los problemas, y el deseo de considerar los aspectos del proceso de enseñanza creativa tanto a nivel intelectual como afectivo.

El maestro creativo utiliza los descubrimientos de las investigaciones a fin de realizar un trabajo de enseñanza mucho mejor que la del que no está familiarizado con los procesos creativos. Al respecto, Smith [11] opina que la enseñanza se convierte en un proceso creativo cuando el individuo: "ve la necesidad de mejorar sus técnicas y estrategias de enseñanza; piensa en varias alternativas como soluciones de problemas, y tiene la intención de aplicar principios de enseñanza creativa científicamente desarrollados".

La búsqueda de una enseñanza creativa y la determinación de algunos factores que inciden en ella, podría ser una esperanza de acercamiento entre los educandos y los profesores de física. Es preocupante que el alumno dedique muy poco tiempo a la resolución de problemas, esto es consecuencia de la falta de hábitos y la poca disposición a conseguir las metas trazadas, es obvio que no sólo no disfrutan ante los retos intelectuales sino, que no están dispuestos a "malgastar" el tiempo pensando. Sería conveniente intentar romper este círculo vicioso y hacerlos disfrutar de los resultados logrados a través del esfuerzo y dedicación, quizás la magistralidad del profesor debe ser utilizada con menos frecuencia y dar paso a otras formas de enseñanza.

Cuando se habla en la universidad del cultivo de la creatividad, hablamos por un lado de la escuela básica y sus responsabilidades no cumplidas y nuestra responsabilidad como formadores de docentes por rescatar aquellos vestigios de niñez que aún quedan en nuestros alumnos. En tal sentido, Zeromski [12] afirma que hubo que ser creativo ante lo desconocido, enseñando y organizando la creatividad misma y la universidad es uno de los mejores sitios para ello. Esta institución, por su carácter analítico y crítico, rechaza de antemano las imitaciones y propone constantemente mejoras en todos los ámbitos señalados por sus funciones sustantivas.

Las universidades, en particular, las formadoras de docentes deben comenzar a ser concebidas para rechazar la instrucción enciclopédica con base en el conocimiento memorístico ya que de esta manera contribuyen a la formación de un ser pasivo y conformista, proponiendo más bien una educación para desenvolver desde dentro y hacia afuera, todas las facultades innatas del individuo. Esto puede significar el desarrollo en un ambiente apropiado, de un ser creativo, es decir, un individuo libre para pensar y generar ideas acordes con sus intereses.

El dogmatismo en la enseñanza de la física a nivel superior, particularmente en los institutos pedagógicos, debe plantear algunos problemas de conciencia a aquellos que defienden la idea de que la enseñanza de esta ciencia debería tener como resultado el desarrollo de hábitos de razonamiento riguroso. Se deben replantear las ideas sobre la ciencia, el conocimiento científico y cómo se aprende la ciencia, basadas en nuevos paradigmas.

En este sentido, la presente investigación se propuso elaborar, aplicar y valorar un programa de estrategias creativas a fin de potenciar los indicadores de actitud creativa de los docentes de física del Instituto Pedagógico de Miranda José Manuel Siso Martínez tendente al mejoramiento de la enseñanza de esta ciencia. Los

objetivos del estudio son: (1) Evidenciar la presencia de actitud creativa a través de sus indicadores: tolerancia, fluidez, flexibilidad, originalidad y analogía en las estrategias de enseñanza utilizadas por los profesores de física. (2) Elaborar un programa de estrategias creativas basado en los indicadores correspondientes para los profesores de física. (3) Aplicar el programa elaborado de estrategias creativas para la enseñanza de la física en el Instituto Pedagógico de Miranda José Manuel Siso Martínez y (4) Valorar el programa de estrategias creativas elaborado y aplicado como factor de cambio en la actitud de los profesores para la enseñanza de la física.

III. ENSEÑANZA CREATIVA: PARADIGMA EMERGENTE

El estudio propuesto se justifica por el impacto presente y futuro que puede significar para la enseñanza de la física la inclusión de un método de enseñanza creativa, pues de frente al milenio que comienza pensamos que es el momento de abandonar los viejos patrones de enseñanza que se vienen utilizando, toda vez que los formadores de docentes deben infundir en los estudiantes la capacidad de transformar por sí mismos los conocimientos adquiridos.

Asimismo, se debe incentivar la utilización de estrategias de enseñanza de la física que evidencien la presencia de actitudes creativas en los profesores. Actualmente el proceso de enseñanza de la física está limitado por no ser creativo, este problema podría resolverse con la elaboración de programas de implantación de la creatividad en el aula donde se recojan aquellas conductas ignoradas, las cuales pueden ser consideradas como componentes esenciales de la conducta creativa.

Los currículos emergentes, a la luz de los nuevos enfoques planteados por el nuevo milenio deberían relacionar la conducta del docente como estrategia de enseñanza con la conducta del alumno que responde por pensamientos, sentimientos y acciones, lo cual es el proceso de aprendizaje.

El estudio en cuestión representa un aporte debido a las escasas investigaciones a nivel de actitudes creativas que se han realizado en nuestro país, sobre todo en el área de la física donde pareciera urgente hallar modelos emergentes de enseñanza que modifiquen la motivación de los alumnos hacia su aprendizaje, así como, conseguir que los profesores estimulen la creatividad para que de esta manera su labor cobre sentido y se justifique.

Se impone mantener una actitud positiva hacia la innovación, es decir, debemos percibir y transmitir el cambio como un medio para una mejora potencial de los individuos y las organizaciones y no como una amenaza o imposición de los cambios por decreto.

En la mayoría de nuestras escuelas de educación e institutos pedagógicos no se aplican estrategias creativas de enseñanza de la física, sino que se enseña por autoridad y memorísticamente, lo que constituye un ejercicio más motriz que mental. En este sentido, el momento es

propicio para cambiar los viejos paradigmas de enseñanza en pro de que nuestros educandos, que serán los maestros del mañana sean capaces de transformar por sí mismos los conocimientos previamente adquiridos en estrategias cognitivas útiles en situaciones problemáticas. Al respecto, Machmud [13] afirma que la innovación debe estar presente en todo campo de trabajo especialmente en la enseñanza de la física, donde el alumno recibe poco entrenamiento en la resolución de problemas, y el profesor pocas veces le indica que debe enseñar y cómo hacerlo.

IV. RASGOS QUE EVIDENCIAN LA ACTITUD CREATIVA

Para evidenciar los indicadores de actitud creativa en los docentes de física del Instituto Pedagógico de Miranda José Manuel Siso Martínez se consideraron las siguientes categorías de análisis mostradas en la Tabla I según Torrance [14] y Guilford [15].

V. LA FÍSICA Y SU ENSEÑANZA

El árbol de las ciencias ha presentado durante siglos un aspecto en el cual parecía que cada una de sus ramas crecía con total independencia del conjunto de las demás. Sin embargo, en la actualidad sabemos que todas las disciplinas científicas se encuentran íntimamente ligadas entre sí, lo que obliga a que los métodos de enseñanza utilizados sean similares para todas.

En el mundo actual, donde la educación constituye el medio indicado para el desarrollo y formación de sus habitantes como el recurso más valioso y como fórmula para enfrentar los problemas de una sociedad dinámica y en constante cambio, se hace necesario buscar la manera de utilizar al máximo el potencial creativo de sus actores. La física estaría acorde con los requerimientos de esta sociedad, si los profesores potenciamos en los alumnos una actitud reflexiva que permita el desarrollo de su creatividad y así lograr entender los procesos en los cuales se da una acumulación de hechos y datos que permiten la ampliación y perfeccionamiento de la teoría. El reto de la enseñanza de la física ha de ser el desarrollo de la creatividad del educando para brindar oportunidades de que ellos aprendan superando los bloqueos preceptuales, culturales y emocionales que la limitan.

La formación científica correspondiente a los diferentes niveles de educación de nuestro país debería proporcionar a los futuros ciudadanos los elementos básicos de las disciplinas científicas para que sean capaces de entender la realidad que les rodea y puedan entender el papel de la ciencia en nuestra sociedad. Asimismo, los primeros contactos con la ciencia deberían contribuir a que éstos desarrollasen ideas adecuadas sobre la física. Al respecto, Reyes [16] expone que el profesor debe motivar al alumno para que sea capaz de producir nuevas conductas, de tal manera que pueda presentar situaciones

TABLA I. Categoría de análisis de los rasgos que evidencian ausencia o presencia de actitud creativa

INDICADOR	CONCEPTUALIZACIÓN	RASGOS DE EVIDENCIA
Tolerancia	Atributo de la creatividad de difícil integración en un sistema constituido y cerrado que estimula la iniciativa en los individuos, les permite admitir la ambigüedad, respetar la libertad de los demás y escuchar sus criterios.	Ambigüedad Respeto Aceptación
Fluidez	Habilidad para emitir un rápido flujo de ideas, pensar en más cosas, ideas y preguntas, y considerar un mayor número de soluciones posibles frente a un hecho o problema dado dentro de un lapso preciso	Producción de ideas Variedad Múltiples respuestas y soluciones
Flexibilidad	Capacidad de utilizar y hallar enfoques diversificados para abordar una situación, encontrar diversas soluciones para un problema, buscar pistas diferentes, clasificar de diferentes maneras, cambiar perspectivas y percibir las cosas de otra manera, oposición a la rigidez y a la imposibilidad de ofrecer otras alternativas	Aceptación Adaptación Argumentación Generación de clasificaciones múltiples y complejas.
Originalidad	Es la capacidad de producir asociaciones muy distantes de los datos en cuestión, ofrecer soluciones hábiles, astutas, fuera de lo común, proporcionar respuestas o crear objetos estadísticamente raros en el grupo, conjuga e integra los términos de innovación valiosa y suele tener el rasgo inconfundible de lo único e irrepetible	Asociación Producción Estimulación Soluciones novedosas
Analogía	Consiste en asociar dos o más ideas o dos o más objetos en forma de imagen, ello permite crear metáforas ricas en fantasía y susceptibles de conducir a la resolución de problemas sumamente complejos sin desintegrar la realidad, al analizarla contempla aspectos que unidos en lo real se distinguen de lo conceptual	Semejanza Comparación Lógica Metáforas

nuevas ante el dominio del conocimiento y habilidades que incluyen las exigencias propias de la realidad científica.

La enseñanza actual de la física presenta problemas estratégicos inherentes a la forma usual de su praxis, en este sentido Infante [17] expone que el profesor no entiende porqué el alumno no entiende lo que él entiende, este problema se deriva de dos concepciones: (a) la forma mecánica de entender la física donde los contenidos son presentados como “recetas” para ser aplicados y (b) concebir el conocimiento didáctico matemático circunscrito sólo al conocimiento estrictamente científico, académico. Esto distorsiona la metodología de la enseñanza de la física lo cual crea una imagen falsa de lo que es la actividad física, de su carácter constructivo de ciencia viva. Es necesario un giro en los actuales métodos de enseñanza de esta ciencia basados en la adopción de recursos y medios que presenten los conceptos de manera concreta.

Asimismo, Olfos [18] opina que la enseñanza de la física se realiza como un proceso de cristalización de habilidades fluidas para ganar eficacia en tareas específicas dentro de un paradigma pragmático. Las actividades en la clase de física tienden a suplantar el razonamiento con la memorización de rutinas o algoritmos. Cuando el pensamiento del alumno se hace dependiente de las rutinas, se detiene frente a las situaciones imprevistas o nuevas para él. Las estrategias de pensamiento aferradas a las rutinas favorecen la eficiencia en un dominio de conocimiento integrado, pero restringido, sin favorecer la generalización. Según esta tradición, el conocimiento se considera como una estructura establecida para ser transferida, sin énfasis en la construcción de habilidades generadoras. La creatividad y el pensamiento inductivo tienden a quedar fuera de la clase de física y a la espera de otro paradigma, como una

condición para que estos posibles resultados se institucionalicen como consecuencia en la clase de física.

Martínez [1] alega que algunos matemáticos piensan que el contenido programático de los cursos de física universitaria es el más importante para todo futuro profesional, haciendo caso omiso a la carrera que estudian sus alumnos y, por lo tanto, las posibles áreas de aplicación de la física a las mismas, por lo que muchos alumnos deben repetir el mismo curso de esa física pura, abstracta y desligada de la realidad. Aun así, el profesor de física rara vez reconoce su deficiencia didáctica, más bien, racionaliza el hecho achacando su fracaso a los alumnos porque “son malos para la física”. Esto conduce a pensar que los profesores universitarios con responsabilidades de formar los profesionales del futuro –en nuestro caso los docentes– han sobrevalorado la importancia de esta ciencia, esto le resta tiempo, energía y esfuerzos mentales a las materias profesionales, que son las que verdaderamente preparan al futuro profesional para trabajar con la realidad concreta de su área específica.

Mientras, Santos [19] considera que existen obstáculos internos y externos al cambio. Entre los internos señala: objetivos confusos, falta de recompensa a la innovación, uniformidad de enfoque, escasa inversión, mal diagnóstico de puntos débiles, escaso perfeccionamiento, atención centrada en compromisos inmediatos, pasividad, etc. Entre los que proceden del exterior: resistencia al cambio procedente del entorno, incompetencia de los agentes externos, supercentralización, actitud defensiva de los profesores, ausencia de agentes externos que sirvan de estímulo, incompleta conexión entre la teoría y la praxis, base científica subdesarrollada y dificultad de observación de la tarea profesional.

Riveros [20], opina que el debate sobre cómo actualizar a los profesores de física presenta dos tendencias extremas: los que creen que lo indispensable es saber enseñar e imparten cursos relacionados con el proceso de enseñanza-aprendizaje; y los que creen que lo indispensables es saber la ciencia, ya que no se puede enseñar lo que se ignora. Generalmente el problema es como enseñar los temas del programa del curso que se está impartiendo, el debate sobre cómo enseñar tiene muchas vertientes, desde la que se propone enseñar los principios básicos para deducir todas las consecuencias de la ciencia que se enseña hasta los que prefieren basarse en la historia para motivar al estudiante en la resolución de problemas reales.

El profesor debería intentar enseñar métodos de razonamiento y manejo de información en sus componentes inductivos y deductivos. Actualmente están en boga las ideas constructivistas, los mapas conceptuales, la conexión con la realidad, etc. Hay un acuerdo de que es necesario conocer lo que el alumno sabe, para extender o agregar conceptos a su repertorio, utilizando los métodos tradicionales, el encontrar lo que el alumno sabe lleva tanto tiempo que lo limita para aprender nuevos conceptos, es necesario hallar nuevos métodos eficientes y rápidos, debemos entrenar a los alumnos en el arte de pensar propiciando un ambiente donde esto se pueda desarrollar.

No hay posibilidad de aprendizaje sin un mínimo de ilusión, deseo y motivación; cualidades que no son innatas sino que, se adquieren gracias al entorno familiar y escolar y a la manera de ser y enseñar de los profesores. Hay pedagogías y actuaciones docentes que cercenan la curiosidad del alumno y otras que las estimulan. El deseo del alumno de aprender y estudiar crece en función de la relación que establece con su profesor y de cómo éstos le seducen con sus planteamientos metodológicos; lo mismo sucede con el grado de interés que muestra el alumno por una u otra asignatura.

VI. CREATIVIDAD

La creatividad se puede entender como el arte de crear obras tomando de la vida sólo los elementos imprescindibles, y con la ayuda de éstos, valiéndose de medios nuevos; llegar, sin copiar ni imitar, a la creación de algo que posea realidad propia, utilidad y vida, de tal manera que no evoque otra cosa que ella misma.

Sobre creatividad existen diversidad de criterios, para efectos de esta investigación, el autor comparte plenamente la apreciación de De Bono [21] quien afirma, que existen muchas personas que aprecian el valor de las nuevas ideas creativas pero no están preparadas para aceptar la necesidad de la creatividad si se mantiene un nivel de exhortación. Pero cuando reconocen la necesidad lógica y real de la creatividad su actitud cambia. La comprensión de la lógica de la creatividad no basta para convertir en más creativa a una persona; pero sí para ayudarla a concienciarse de la necesidad de creatividad, el

perfeccionamiento de estrategias creativas es capaz de cambiar conceptos y percepciones. En tanto, Guilford [15] expone que se comete frecuentemente un error al referirse a ella generalizando el concepto. Se asume como término unívoco y absoluto, cuando se trata de un fenómeno polisémico y relativo, al igual que otros términos como educación, comunicación e inteligencia, advirtiéndose que la complejidad de este concepto psicológico, así como el de inteligencia llevan una carga polisémica, por lo que recomienda que el término potencial creativo, como el de inteligencia, necesitan de calificativos siempre que se empleen con el deseo de que la comunicación resulte precisa. De igual manera, agrega que los factores necesarios que inciden en un individuo para producir resultados creativos de cualquier índole, además de la originalidad son: la flexibilidad, la fluidez y la analogía.

Por su parte, Gardié [22], define la creatividad como proceso que culmina con la producción o descubrimiento de algo que sea a la vez novedoso y de utilidad social y estética. En tanto Majaro [23] la define como el proceso de pensamiento que nos ayuda a generar ideas.

Villar [24], piensa que la creatividad no se fomenta con el aprendizaje de técnicas, sino que debe existir una sintonía con la postura personal. Es conveniente construir la plataforma desde la que se trabaja, móvil y susceptible de cambio. Es frecuente vincular la creatividad con el hallazgo y ejecución de soluciones nuevas ante una situación en que no contamos con soluciones ya aprendidas o que conviene hallar otras soluciones. Hay posibilidades creativas en lo científico, técnico, artístico, en todo ámbito de actividad humana, aún con sus peculiaridades en la problemática de la creatividad apuntan rasgos comunes. Creatividad no se identifica con inteligencia, tal como ésta es generalmente entendida y medida, el criterio más utilizado para la identificación de la creatividad es el de novedad, aunque existen tres criterios importantes utilizados para caracterizarla: originalidad, fluidez y flexibilidad.

A poco tiempo de iniciado el siglo XXI, en la sociedad no se han logrado niveles creativos que satisfagan las necesidades de desarrollo del potencial de inteligencia de los individuos, el ser humano ha de hacerse capaz de realizar nuevas conductas, que sean útiles en las nuevas situaciones que encuentre, para ello es necesario el desarrollo de conocimientos y habilidades pero también disposición para la creatividad.

En opinión del investigador, cuando se ejerce la profesión docente se presentan situaciones en la enseñanza, en las cuales se dan comunicaciones profesor-alumno, profesor-profesor, alumno-alumno, pero el énfasis debe ponerse en el alumno, que es de quién al final se espera que aprenda una determinada asignatura.

La tarea de enseñar es un problema complejo. Generalmente, cuando en educación se plantean situaciones nuevas hay una llamada a la creatividad, es preciso entonces, escuchar lo que la situación nos dice para dar amplio margen a la búsqueda de ideas e involucrar a los demás, para de esta manera facilitar la solución de problemas.

Cuando se enseña, deben interrelacionarse la creatividad del profesor y la de los alumnos, las actividades deben presentarse de tal manera que el profesor manifieste su creatividad pues de esta manera ayudaría a sus alumnos a ser más creativos

Dependiendo de la manera como se desarrolle el proceso de enseñanza, hasta la clásica clase magistral puede ser creativa, lo importante de una enseñanza creativa es que el profesor no agregue obstáculos a la creatividad de los alumnos ni sofoque sus conductas creativas, para lograr esto, no es necesario alterar lo que usualmente se hace en el ámbito educativo ni buscar variar la conducta bruscamente, es suficiente con atender a las limitaciones de la realidad y a sus exigencias. Una manera sería definiendo los procesos creativos, como por ejemplo, seleccionar en que va a fijar su atención, que conviene y puede poner en práctica, adoptar un estilo y forma de enseñar propios. Quizás con esto no se logren grandes cambios en el comportamiento, pero tal vez mejoraría su actuación.

El ser y el hacer del profesor están íntimamente relacionados, las conductas creativas implican una disposición personal y necesitan un clima que las facilite, no es suficiente con utilizar nuevas técnicas, lo fundamental es procurar trabajar en un clima grupal creativo donde el repertorio rutinario de la clase se vea influenciado por estrategias novedosas que contribuyan al mejoramiento del proceso de enseñanza.

VII. ESTRATEGIAS CREATIVAS

La estrategia es el instrumento comunicador de las ciencias aplicadas sin el cual quedarían en mera especulación teórica. La creatividad como proceso de pensamiento de vida, como capacidad mental y solución de problemas, como producto e ideación, como interacción con el medio, como actitud personal, dará pie a estrategias diferentes, Para efectos de este trabajo utilizaremos las siguientes: el arte de preguntar, las asociaciones forzadas, el check list, los escenarios creativos, el torbellino de ideas, el esqueleto del pez, Los seis sombreros para pensar y los seis pares de zapatos para la acción.

El arte de preguntar, permite designar la realidad, conocerla y comunicarla, penetrar en la esencia de las cosas y poner de manifiesto el potencial creativo de las personas [25]. Mientras las asociaciones forzadas consisten en combinar lo conocido con lo desconocido para forzar una relación y obtener ideas originales, dados un problema o situación se describen sus elementos, atributos o funciones principales, luego se elabora una lista de términos al azar [26]. Por su parte, el *check list* es una técnica asociada al torbellino de ideas, que tiene su origen en las preguntas que Polya se formulaba para la solución de problemas, busca el quebrantamiento del objeto planteado, su combinación, reorganización, empleos diferentes, ampliación, transformación, inversión, visión diferente, inferencia, disminución y adaptación [27]. Los

escenarios creativos son una técnica utilizada en la solución de problemas del futuro mediante el acercamiento interdisciplinario, un escenario es como un relato o sinopsis de un camino proyectado de acción o acontecimientos. Consiste en una descripción de posibles temas futuros en una situación problemática [14]. En tanto el torbellino de ideas es la técnica más difundida, en su aplicación se diferencian tres fases: descubrir los hechos, descubrir las ideas y descubrir las soluciones [27]. El diagrama del esqueleto del pez, es una técnica que permite analizar los cursos y consecuencias de una situación problemática, determinando los orígenes verdaderos y no los aparentes, generando un diagnóstico y posteriormente su solución [23]. Los seis sombreros para pensar están diseñados para sacar el pensamiento del estilo argumentativo habitual y llevarlo a un estilo cartográfico [20], y los seis pares de zapatos para la acción generan seis estilos diferentes para actuar y permitir a la persona asumir un papel diferente o combinar dos papeles ante una situación que requiere de un desempeño eficiente [20].

Para lograr el resultado deseado de las estrategias para activar el pensamiento creativo, es necesario que no existan juicios de valor y opiniones, a fin de estimular una actitud creativa que propicie la expresión de ideas diferentes y la fluidez de diversidad de aplicaciones.

Las estrategias no hacen que las personas sean creativas, no dan directamente el potencial creativo a quien no lo tiene, éste está conformado por el conjunto de rasgos individuales. Ellas desinhiben, desbloquean y facilitan el acceso a la reserva preconscious, cuando existan dificultades por vía lógico racional.

VIII. EL PRODUCTO

Ahora describiremos el análisis, interpretación y discusión de las evidencias obtenidas por el investigador, los observadores externos y los alumnos a fin de cumplir los objetivos propuestos en este estudio. El mismo se realizó en dos fases: (I) las observaciones realizadas por el investigador, los observadores externos y los alumnos a fin de evidenciar los supuestos del investigador con respecto a la presencia de los indicadores de actitud creativa, tolerancia, fluidez, flexibilidad, originalidad y analogía- en los profesores de física y (II) la elaboración, aplicación y valoración del taller de estimulación creativa a los profesores del Instituto Pedagógico de Miranda José Manuel Siso Martínez.

Fase I

Los resultados de trabajos previos del investigador [16] motivan el objeto de estudio del presente, dado el interés por mejorar la enseñanza de la física a nivel superior, particularmente en la UPEL-Instituto Pedagógico de Miranda "José Manuel Siso Martínez". Esta motivación, según Reyes [28] surge de la carencia de indicadores de actitud creativa presentada por los profesores de física quienes son los encargados de preparar a las nuevas

generaciones para enfrentarse a los problemas individuales y colectivos que les planteará un mundo de perfiles diversos.

La actitud creativa debería estar presente en las orientaciones didácticas que imparten los profesores de física, la intransigencia y la rigidez son enemigos de la actitud creativa.

El planteamiento anterior permitió hacer una serie de observaciones directas en la realidad concreta del proceso de enseñanza de la física en el Instituto Pedagógico de Miranda “José Manuel Siso Martínez” tendentes a determinar la presencia de los indicadores de actitud creativa, tolerancia, fluidez, flexibilidad, originalidad y analogía en los profesores de física.

Luego de realizar las observaciones por parte del investigador, los observadores externos y los alumnos, se procedió a la codificación de los indicadores en los cuadernos de registro diario a fin de realizar la interpretación triangulada de las mismas.

Las evidencias muestran que de los indicadores de actitud creativa analizados, sólo la tolerancia está presente como indicador de actitud creativa en los profesores de física.

Fase II

A la luz de las evidencias obtenidas en estas observaciones se planteó la necesidad de buscar opciones que permitieran superar las limitaciones presentadas por los profesores en la enseñanza de la física.

En este sentido, se diseñó, aplicó y valoró el taller “Técnicas de Estimulación Creativa” [29] dirigido a los participantes de la investigación, dieciséis profesores de diferentes especialidades, para valorar de una vez el taller, con el propósito de potenciar en ellos los indicadores de actitud creativa-tolerancia, fluidez, flexibilidad, originalidad y analogía. El mismo constó de cinco sesiones durante el lapso del 15 de octubre de 2001 hasta el 29 de octubre de 2001, y se aplicaron las técnicas de estimulación creativa presentadas en la sección anterior. Una vez ejecutado el taller se procedió a valorar su consistencia en cuanto a potenciación de los indicadores de actitud creativa, tolerancia, fluidez, flexibilidad, originalidad y analogía.

El procedimiento seguido para tal fin -al igual en que en la fase I fue la observación directa por parte del investigador, los observadores externos y los alumnos; una vez realizadas éstas, se codificaron los indicadores en los cuadernos de registro diario y se hizo la interpretación triangulada de cada uno de los indicadores analizados. Una vez aplicado el taller “Técnicas de Estimulación Creativa” se evidenció que los indicadores de actitud creativa: Tolerancia, fluidez, flexibilidad y originalidad se manifestaron en los rasgos actitudinales de los profesores, mientras la analogía se mantiene ausente.

Estos hallazgos indican un adelanto en cuanto a la potenciación de actitudes creativas en los profesores, aún cuando las evidencias muestran predominio de lo tradicional sobre lo novedoso.

Este resultado es controversial, toda vez que la carencia de estos indicadores, hace a los profesores

abstraerse de la concreción, no ser flexibles y no tener sensibilidad por los problemas, siendo los encargados de preparar a las nuevas generaciones para enfrentarse a los problemas individuales y colectivos que les plantea un mundo de perfiles diversos.

Los resultados obtenidos indican un adelanto en cuanto a la potenciación de actitudes creativas en los profesores, sin embargo, lo tradicional sigue prevaleciendo sobre lo novedoso. En este sentido se crea el Programa de estrategias creativas (PEC) aplicable a cualquier área del saber. El mismo se relata en la siguiente sección.

IX. PROGRAMA DE ESTRATEGIAS CREATIVAS (PEC)

A. Modelos y programas

Un modelo es una construcción mental, es la imagen o representación del conjunto de relaciones que definen un fenómeno con miras a su mejor entendimiento.

Un programa es un conjunto de actuaciones que se desean aprender para alcanzar determinados objetivos; un planteamiento diseñado para su realización o desarrollo con miras a alcanzar mejor determinados objetivos, es un instrumento organizativo y didáctico que regula las actividades que se quieren ejecutar.

De La Torre [6], afirma que en los modelos didácticos privan las consideraciones teórico-prácticos algunos autores utilizan el término modelo para sus programas por responder a una línea o concepción y a un proyecto para la acción.

En esta sección se presenta un modelo, Figura 1, que pretende representar conceptual y adecuadamente la estructura teórica como imagen de la realidad estudiada, potenciar la actitud creativa de los profesores de física tendente al mejoramiento de la enseñanza de esta ciencia, el mismo contempla cuatro dimensiones que persiguen facilitar la reflexión, aún cuando se conoce la complejidad del recurso utilizado, la modalidad del proceso y el nivel de transformación que se aspira.

El modelo propuesto tiene que ser un motivo permanente de autocrítica y perfeccionamiento del profesor de física, el mismo no debe tomarse como una declaración de intenciones, sino como un plan que se establece, se sigue, se reorienta y está en permanente evaluación.

Para efecto de este programa se asume que muchas personas aprecian el valor de nuevas ideas pero no están preparados para aceptar la necesidad de la creatividad si se mantiene un nivel de exhortación, pero cuando reconocen la necesidad lógica y real de la creatividad su actitud cambia. La comprensión de la lógica de la creatividad no basta para convertir en más creativa a una persona; pero si para ayudarla a concienciarse de la necesidad de la creatividad, el perfeccionamiento de estrategias creativas es capaz de cambiar conceptos y percepciones.

Según De La Torre [5] un programa es creativo cuando sus propósitos, contenidos, medios y regulación se orientan a potenciar algunos de los atributos de la creatividad, en tal sentido, son tan diversos y plurales como lo son los rasgos y las manifestaciones creativas. Unos están dirigidos a fomentar la espontaneidad, la sensibilización de los problemas, otros, como este caso, a la divergencia y actitudes creativas. Para ello es necesario planificar actividades diversas, dentro y fuera del ámbito académico.

B. Propósitos del programa

Con los propósitos del programa se persigue justificar y legitimar los valores, que él representa. En este sentido se plantea: (a) desarrollar en los profesores de física estrategias que lo ayuden en la solución de problemas relacionados con su quehacer diario en el aula de tal manera que activen su capacidad adaptativa, promuevan formas flexibles de actuación y las apliquen en sus clases, y (b) promover la aplicación del pensamiento divergente o creativo, potenciando los rasgos de creatividad; tolerancia, fluidez, flexibilidad, originalidad y analogía con el fin de crear actitudes positivas hacia la enseñanza de la física.

C. Contenidos del programa

Este programa se refiere a la estimulación de las actitudes creativas utilizando como contenido las estrategias creativas aplicadas al ámbito educativo, el mismo proporciona ciertas competencias en el proceso creativo. La estructura cuadrimensional (Figura 1) que lo constituye, está conformada por las estrategias creativas (dimensión 1) las cuales se utilizan para potenciar los indicadores (dimensión 2) los cuales caracterizan y están interrelacionados con los rasgos de la creatividad (dimensión 3). La conjunción de estos elementos conducen a proyectar un profesor que piense, sienta y actúe creativamente, es decir, un profesor que posea características de actitud creativa (dimensión 4). Estas dimensiones se explican a continuación:

Dimensión 1: Estrategias creativas.

Constituyen esta dimensión las estrategias creativas, las cuales son definidas por Benedito [30] como el medio sistematizado de organizar y desarrollar las actividades para estimular el pensamiento creativo. En nuestra concepción incluimos procedimientos de relajación y relax imaginativo, además describimos las estrategias como una secuenciación de acciones tales como: visualización, juicios, imaginación, transformación, inferencia, adaptación, símiles, fantasía, semejanza, curiosidad, análisis, relación, reflexión y jerarquización que facilitan el proceso creativo provocando un cambio de actitud en los profesores de física.

En el modelo se presentan ocho estrategias – escenarios creativos [14], check list [27], asociaciones forzadas [26], esqueleto del pez [23], torbellino de ideas [27], zapatos para la acción y sombreros para pensar [23] adaptados por Vivas y preguntas creativas [25] adaptada

por Reyes. Las cuales fueron dirigidas a la sensibilización y fomento de la expresividad espontánea a potenciar la innovación, la divergencia y las actitudes creativas en los profesores de física

Dimensiones 2 y 3: Indicadores que caracterizan los rasgos creativos

En la dimensión 2 se presentan 5 rasgos de la creatividad – tolerancia, fluidez, flexibilidad, originalidad y analogía– relacionados con los indicadores, dimensión 3, y que caracterizan la actitud creativa de los profesores de física, los mismos serán potenciados en la búsqueda de una línea de pensamiento que permita prever los cambios necesarios para generar un docente creativo, que sea capaz de trascender las cosas y los hechos mismos, que amplíe el horizonte que el mundo le presenta y finalmente que tenga pensamientos claros y bien definidos que redunden en la creación de nuevas formas de enseñanza, toda vez que sin cambio las ideas se pierden y la enseñanza de la física sigue encaminada hacia la tradicional transmisión de información que sólo sirve para alcanzar un rendimiento expresado en calificaciones.

Dimensión 4: Actitudes creativas

En esta dimensión se presentan las actitudes que caracterizan al profesor creativo, 10 en total, son el resultado de la aplicación de las estrategias creativas las cuales potencian los indicadores de los rasgos de la creatividad considerados y producen un cambio en la actitud de los profesores hacia la enseñanza de la física, esto los conduce a aflorar la creatividad presente en ellos. Estos cambios se perciben a través de las siguientes características: (a) se opone a la rigidez, es decir, es flexible para enfrentar los patrones preestablecidos y es capaz de intentar otras vías de acción, (b) compara lo incomparable, (c) asocia lo que está separado, (d) busca semejanzas, (e) asocia lógicamente, (f) admite la ambigüedad y la incertidumbre, (g) sugiere ideas y soluciones a los problemas, (h) respeta la libertad de los demás, (i) produce respuestas infrecuentes e ingeniosas a situaciones específicas y (j) propone múltiples vías para realizar tareas y variedad de alternativas para la realización de problemas.

Debemos entender, entonces, que no importa la severidad con la cual nuestra creatividad haya sido reprimida, ella puede ser potenciada, estimulada y desarrollada a través del uso de técnicas creativas precisas. En el programa se presentan ocho estrategias, las cuales actúan sobre catorce indicadores de los rasgos de creatividad considerados, el mismo puede ser de aplicación individual o colectiva, dirigido a potenciar la creatividad. Cabe destacar que también puede accionar sobre cualquier otro indicador de los que las teorías acerca de creatividad señalan. En cuanto a las estrategias creativas propuestas, éstas no tienen una función preestablecida sobre los indicadores considerados, sino que actúan sobre todos en total independencia. El programa se presenta en la siguiente figura.

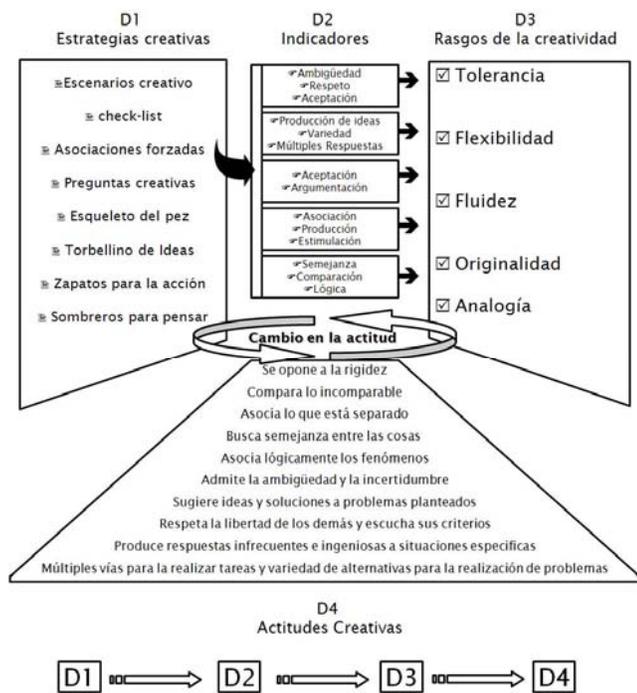


FIGURA 1. Programa de Estrategias creativas (PEC), para potenciar la actitud creativa de los profesores de física tendente a mejorar la enseñanza de esta ciencia.

X. CONCLUSIONES

Del estudio, se desprende que la creatividad puede ser cultivada a través de entrenamiento y técnicas sistemáticas, pues hasta los individuos que se consideran “naturalmente” creativos pueden serlo aún más. Ella combina el desarrollo de actitudes y habilidades. Investigaciones recientes sustentan el postulado de que la brecha entre el talento creativo innato de un individuo y su escasa producción creativa puede disminuirse por medio de la educación de la creatividad. Estas referencias nos conducen a pensar, que la creatividad debe estar presente en la formación de profesores, en virtud de que se tiende a enseñar lo que se practica; más que lo que se recibe pasivamente. Para consolidar estos resultados es necesario continuar promoviendo estas estrategias con el fin de estimular la creatividad en los profesores, evitando de esta manera la pérdida de interés.

REFERENCIAS

[1] Martínez, M., *Argos* **25**, 7-9 (1996).
 [2] Martí, José. (*Obras completas*, Editorial de Ciencias Sociales, Cuba, 1965).
 [3] Klein, F., *Física elemental desde un punto de vista superior*. Biblioteca Física, Madrid (1927).
 [4] Campanario, J., *Investigación didáctica* **17**, 397-410 (1977).
 [5] De La Torre, S. (Métodos Creativos (comp.) *Manual de Creatividad*, Vives Ediciones, España, 56-65, 1991).
 [6] Menchén, F. (Un modelo para implantar la creatividad en clase (com.), *Manual de creatividad*, Vives Ediciones, España, 329-452, 1991).

[7] Gurfinkel, L. (*La enseñanza de las ciencias naturales y la generación del 46*. Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Venezuela, 1997).
 [8] González, F y Mitjáns, A. (*La personalidad, su educación y desarrollo*, Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1989).
 [9] Driver, R., *Un enfoque constructivista para el desarrollo del currículo en ciencias*, Investigación y experiencias didácticas **6**, 109-120 (1988).
 [10] González, F. (*Paradigmas en la enseñanza de la física*. Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Venezuela, 1997).
 [11] Smith, A. (*Educación y Creatividad*, Claretianas, Madrid, 1993).
 [12] Zeromski, A., *Reencuentro* **1**, 35-39 (1996).
 [13] Machmud, J. (*Cambio en la creatividad a través de la solución creativa de problemas de física*, Trabajo de grado de maestría no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 1988).
 [14] Torrance, P. (*Orientación del talento creativo*, Troquel, España, 1969).
 [15] Guilford, J. (*La naturaleza de la inteligencia humana*, Paidós, España, 1986).
 [16] Reyes, M. (*Abordaje creativo de las ciencias*, Universidad Santa María, Venezuela, 1996).
 [17] Infante, P., *Enseñanza de la física* **8**, 33-38 (1999).
 [18] Olfos, R., *Revista Latinoamericana de Investigación en Física Educativa* **4**, 23-43 (2001).
 [19] Santos, M. (*La escuela que aprende*, Morata, España 2000).
 [20] Riveros, H., (*¿Quiero mejorar mi clase de física? Sócrates y el arte de pensar*, International Conference on Physics Education, Brasil, 2000).
 [21] De Bono, E. (*El pensamiento creativo*, Paidós, Barcelona, 1995).
 [22] Gardié, O. (*Proyecto Escuela Creativa_ II Encuentro Creatividad y Educación*, Maracay, 1995).
 [23] Majaro, S. (*Marketing y creatividad*, Ediciones Díaz de Santos S.A, España, 1994).
 [24] Villar, L. (*El autoperfeccionamiento del profesor*, Kapelusz, España, 1980).
 [25] Marín, R. (*La creatividad en educación*, Kapelusz, Argentina, 1984).
 [26] Whiting, Ch. (*Creative thinking*, Reinhold Pub, New York, 1958).
 [27] Osborn, A. (*Imaginación aplicada*, Velflex, España, 1960).
 [28] Reyes, M. (*Actitud creativa del docente en el Instituto Pedagógico de Miranda “José Manuel Siso Martínez”*. Trabajo de ascenso no publicado. Universidad Pedagógica Experimental Libertador. Instituto Pedagógico de Miranda. Miranda, 1998).
 [29] Vivas, D. y Reyes M. (*Taller Técnicas de estimulación creativa*, Material mimeografiado. Miranda: Instituto Pedagógico de Miranda “José Manuel Siso Martínez”, 2001).
 [30] Benedito, V., *Elaboración de un modelo taxonómico de métodos y técnicas creativas*, Innovación creadora **2**, 22-31 (1977).

La plataforma interactiva Moodle: Una oportunidad para la docencia universitaria de la Física



J. Fuentes Betancourt¹, A. Pérez Perdomo¹, A. Montoto González², M. Domínguez Hernández³ y O. Calzadilla Amaya¹

¹Taller de Enseñanza de la Física Universitaria, Universidad de la Habana, San Lázaro y L, CP 10200, La Habana, Cuba.

²Grupo de Informática, Universidad de La Habana, San Lázaro y L, CP 10200, La Habana, Cuba.

³Facultad de Artes y Letras, Universidad de La Habana, San Lázaro y L, CP 10200, La Habana, Cuba.

E-mail: jfuentes@fisica.uh.cu

(Recibido el 4 de Julio de 2007; aceptado el 16 Agosto de 2007)

Resumen

Este trabajo examina cómo se transforman la enseñanza y el aprendizaje con la introducción de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC's), particularmente al emplear cursos mixtos, implementados en las Facultades de Física y Artes y Letras de la Universidad de La Habana. Se describen algunas de las actividades colaborativas usadas en la plataforma interactiva Moodle como el Foro, el Portafolio electrónico y el WebQuest. Se presenta un ejemplo de la instrumentación del WebQuest en un tema del curso de Física Moderna II, donde se muestran las ventajas que ofrece como actividad de enseñanza aprendizaje y la motivación conseguida por el ejemplo real utilizado en el WebQuest.

Palabras clave: Plataformas interactivas, teoría del aprendizaje, WebQuest.

Abstract

This work examines how teaching and learning are transformed with the introduction of the Information and Communications Technologies (ICT's), particularly using e-blended courses, implemented in the Faculties of Physics and Arts and Letters of the Havana University. Some of the collaborative activities are described using the interactive platform Moodle, like Forum, the electronic Portfolio or e-portfolio, and WebQuest. An example of the instrumentation of WebQuest is presented in a topic of the course of Modern Physics II, allowing to appreciate the advantages offered. Thus, increasing the motivation and activating the student's learning when they face a real problem posed by WebQuest.

Key words: Interactive Platforms, Learning Theory, WebQuest.

PACS: 01.40.Ha, 01.40.Ha, 01.40.-d.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La introducción de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones ha abierto nuevas perspectivas para el proceso de enseñanza aprendizaje. La enseñanza asistida por ordenadores marcó el inicio de una gran transformación en este proceso, por la introducción de tutoriales, simulaciones, hipertextos e hipermedias.

El desarrollo de las primeras plataformas de gestión de cursos en la última década del siglo pasado significó, igualmente, un sustancial paso de avance, por las posibilidades de interactividad que impulsarían estas plataformas. El uso de las TIC's requirió el desarrollo de las ideas que sustentarían teóricamente el aprendizaje en este entorno y el surgimiento de nuevos enfoques, que permitieran una utilización más efectiva de las TIC's en el proceso de enseñanza aprendizaje.

No obstante, la introducción de las TIC's en la enseñanza universitaria aún no alcanza los niveles de empleo que debiera [1]. En las Facultades de la Universidad de la Habana se comenzó a finales del siglo pasado, en cursos de apoyo a la docencia presencial. En particular en la Facultad de Física estas se introdujeron en la docencia de la disciplina Física General: integración de conocimientos de Computación con los de Álgebra y Óptica en la realización de seminarios para los alumnos del tercer año de la carrera de Física; uso de la plataforma Moodle en varias asignaturas (Introducción a los Métodos Experimentales, Mecánica, Óptica y Física Moderna II). Otro hecho significativo es que los estudiantes emplean las TIC's en diferentes actividades extracurriculares, lo que nos llevó a pensar que nos darían una opción adicional para incrementar la motivación del estudiante en su aprendizaje.

El trabajo está organizado de la forma siguiente: en la sección II se relacionan algunas características de las plataformas interactivas y en particular de la plataforma Moodle, se describen a continuación las características fundamentales del Foro, el Portafolio Electrónico y el WebQuest. En la sección III se reporta el desarrollo de la aplicación del Webquest en la asignatura de Física Moderna II en la carrera de Física, finalmente en la sección IV se presentan nuestras conclusiones.

II. DESARROLLO

Al seleccionar, dentro del amplio espectro de posibilidades, las tecnologías más convenientes a la filosofía educacional que la inspire, la educación virtual —o sea, aquella que se realiza en un espacio didáctico apoyado en una red de ordenadores— no rechaza la incorporación de elementos de la enseñanza tradicional, especialmente en los llamados cursos mixtos. Hay que señalar que en la educación virtual se hace cada vez más énfasis en un aprendizaje centrado en el estudiante, lo que se facilita con el empleo de las TIC's.

Las plataformas interactivas, de gestión de cursos de código libre, comienzan, a partir de finales del año 2000, un perfeccionamiento que las ha convertido en una opción ventajosa con respecto a sus similares con carácter comercial como Blackboard, WebCT, y a otras pertenecientes a universidades como es el caso de TELEDUC.

Se han desarrollado diferentes plataformas interactivas de código libre: ATutor, Moodle, Claroline, Flee3, entre otras. Las primeras están basadas en el php, apache y MySQL y la última en apache, MySQL y Phytan.

La plataforma interactiva Moodle posee una estructura interna que permite añadir diferentes módulos a la distribución básica y a los usuarios-desarrolladores crear otros que pueden ser integrados. Así, gracias a la amplia "Comunidad Moodle", se han ido construyendo unidades modulares que posibilitan una gestión educativa de mayor alcance. Entre estas podemos mencionar el calendario, el portafolio electrónico, el correo electrónico interno, la visualización de objetos y el dfwiki. Se ha desarrollado, igualmente, su compatibilidad con los principales estándares de contenido: el SCORM y el IMS, y con la herramienta LAMS.

Un hecho importante a destacar es la existencia de listas de discusión que se caracterizan por su gran actividad, lo que permite resolver los problemas que se presenten de implementación y funcionamiento de los módulos.

Se ha ganado en estabilidad y rapidez en la gestión de las últimas versiones: la 1.6 y la 1.7. En estos momentos se encuentra como última versión estable la 1.8.

En la Universidad de la Habana se cuenta con la plataforma interactiva Moodle, v 1.6, en la url <http://moodle.uh.cu>

A. El foro

El foro [2] es una de las actividades colaborativas centrales en casi todas las plataformas interactivas y también en la Moodle. Permite la reflexión colectiva sobre determinados temas y la transmisión de noticias a todos los participantes inscriptos en un curso o sitio instruccional. El foro fue, en su tiempo, uno de los argumentos más importantes para la fundamentación de las posibilidades de carácter pedagógico inherentes a internet, con base en la teoría de la conversación [2].

El foro en la plataforma Moodle puede ser configurado de acuerdo con el objetivo que se propone el profesor. En las últimas versiones se posibilita mantener a los profesores y estudiantes al tanto de las nuevas intervenciones, de manera fácil y rápida, mediante correos electrónicos que se envían automáticamente a los participantes. Sin embargo, en un curso con gran cantidad de alumnos, el número de correos electrónicos puede ser apreciable, por lo que resulta útil emplear otra opción que se nos ofrece: los canales RSS.

Los canales RSS hacen llegar una señal a los usuarios. Esto último se realiza sin necesidad de entrar a la plataforma, identificarse y acceder al foro. Son una opción muy ventajosa, pues permiten ahorrar tiempo, ya que leyendo el pequeño resumen que obtenemos del canal remoto podemos decidir si nos interesa la información y solo entonces acceder al foro. Es también posible inscribirse en diferentes foros, incluso de cursos distintos y recibir noticias por RSS, sin necesidad de entrar a los sitios correspondientes. Esta opción de los canales RSS también funciona para los glosarios. Las últimas versiones de los navegadores Opera, Mozilla FireFox y IE7 permiten la incorporación a estos canales con solo oprimir sobre el icono de los RSS, lo que ha facilitado su uso.

B. El portafolio electrónico

Recientemente se ha comenzado a implementar el uso del Portafolio electrónico en la docencia universitaria en países de habla española, aunque su empleo en países de habla inglesa es de larga data. El portafolio electrónico [4] se define como una colección de trabajos que muestran el avance en el aprendizaje en un período de tiempo. Según la bibliografía, es precisamente el proceso de construcción del portafolio lo importante, dado que muestra el crecimiento del estudiante en su aprendizaje.

Hay diferentes tipos de portafolios, de acuerdo con su finalidad y su uso. En las instituciones educativas se emplea para el seguimiento y la evaluación del aprendizaje; mientras que en las empresas contiene el conjunto de los mejores trabajos de un profesional o grupo de profesionales, que muestran su competencia en una determinada rama. Lo mismo se ha hecho en la esfera del arte, con el dossier que recoge las obras de un artista o grupo, que muestran su creatividad y dominio de determinadas técnicas.

Zeichner y Wray (2001) [Ver en 7] clasifican tres tipos diferentes de portafolios. Estos son:

- de aprendizaje: documenta que el estudiante está aprendiendo con el tiempo,
- credencial: se usa para el registro o propósitos de certificación,
- escaparate: sirve para solicitar empleo o con otras finalidades en que se deba mostrar lo que se es capaz de hacer.

Mientras que el portafolio de aprendizaje o credencial contiene los ejemplos de trabajo, así como los productos finales de los ejercicios realizados durante un determinado tiempo, el portafolio escaparate sirve para mostrar solamente los mejores trabajos de un estudiante o profesional.

El tipo de portafolio que se usa se determina a partir del propósito para el cual se elabora, y del auditorio al que va destinado. Así, un portafolio desarrollado para mostrar el cambio en la estructura cognoscitiva y el progreso del aprendizaje de un estudiante no será apropiado emplearlo al solicitar un trabajo; igualmente un portafolio que despliega sólo las mejores muestras de trabajo no será útil para evaluar el aprendizaje reflexivo.

Una característica importante a señalar es que cuando se elabora un portafolio como recurso en el proceso de enseñanza aprendizaje, los trabajos que contiene están sometidos a una valoración personal y a otra externa, del profesor y también de los otros estudiantes.

Para Bullock y Hawk [5] un portafolio se caracteriza por:

- Tener objetivos específicos.
- Desarrollarse para una audiencia particular.
- Tener reflexiones sobre los trabajos que contiene.

Los portafolios electrónicos [5] se distinguen de los tradicionales por ser esencialmente interactivos, lo que es posible por estar en un formato digital.

La elaboración de un portafolio electrónico transcurre por diferentes etapas:

Primera etapa:

Presentación. El estudiante debe darse a conocer en una página de entrada, describir su trayectoria académica o profesional y dar el Índice de contenidos del portafolio previamente discutido con su profesor. Esta etapa es muy importante, pues en ella el profesor deberá definir las competencias u objetivos de aprendizaje que el estudiante deberá cumplimentar y precisamente el portafolio electrónico da las evidencias de que los logró.

Segunda etapa:

El estudiante aportará los trabajos que mostrarán que ha realizado el aprendizaje. Esta se puede subdividir en la recolección de información y la selección por parte del estudiante de aquellos trabajos que mejor documentan que ha alcanzado los objetivos planteados inicialmente.

Tercera etapa:

En esta etapa se debe hacer una reflexión sobre los trabajos seleccionados y cómo justifican estas evidencias que se ha realizado el aprendizaje. El docente debe prestar especial atención al aprendizaje del estudiante en este momento dar recursos para facilitar la realización de las reflexiones [4].

Cuarta etapa:

Publicación. Se lleva a cabo cuando se tienen los trabajos y las reflexiones sobre ellos. Estos trabajos publicados documentan que se han cumplido adecuadamente los objetivos iniciales de aprendizaje y permiten que sean de conocimiento, tanto del grupo como de una comunidad más amplia y obtener nuevas reflexiones sobre ellos.

Es importante que el docente y el alumno lleguen a un acuerdo sobre las competencias que debe tener el estudiante al final de la elaboración del portafolio y estas se definan claramente al iniciar la confección del portafolio. El profesor deberá estar atento a la elaboración del portafolio, y brindará al alumno los recursos necesarios para que logre realizar de forma óptima el aprendizaje.

Se plantea [6] que las evidencias presentes en el portafolio electrónico pueden ser de diferentes tipos. Tenemos los artículos, certificados y títulos, provenientes de la trayectoria anterior del estudiante; las reproducciones que son evidencias recogidas fuera del contexto académico formal como otro curso y, por último, las producciones elaboradas para el portafolio.

En [7] se describe la experiencia realizada con la introducción del portafolio electrónico integrado a la plataforma Moodle en la asignatura Fundamentos Matemáticos para ingenieros. Se reporta el mejor aprovechamiento de los alumnos que usaron el portafolio electrónico durante el curso.

Existen diferentes herramientas para habilitar el portafolio, e instituciones que lo tienen a disposición de sus usuarios. En el caso específico de la plataforma Moodle, se ha desarrollado una sección que cuenta con un almacén de los trabajos y otro de todos los portafolios, con reglas muy estrictas de acceso.

El profesor, cuando crea un curso, puede añadir el portafolio como una de las Secciones. Aparecerán entonces dos subsecciones relacionadas: "Almacén de Archivos", que contiene artículos sin reflexiones, directorios y diferentes enlaces y el "Almacén de Portafolios", donde se encuentran los portafolios existentes. Además, se puede crear un portafolio nuevo, etc.

Cuando un estudiante se inscribe en un curso que dispone de este medio, automáticamente se crea su propio recurso, llamado "Mi portafolio". El profesor puede ver los portafolios de los alumnos y añadirles tareas, al apretar "Los portafolios de mis estudiantes".

Mediante "Mi Almacén", el alumno puede subir materiales a su Almacén de Archivos, que luego pueden pasar al portafolio del alumno cuando se añadan las reflexiones sobre el aprendizaje realizado. Este portafolio puede tener clave de indización, lo que permite hacer búsquedas temáticas, entre otras tareas.

A través del Almacén de Archivos se puede añadir un enlace, por ejemplo, a la subsección del alumno, así como a otros archivos.

Con el objetivo de comenzar su empleo en la Universidad de la Habana, uno de los autores de este trabajo, hizo la traducción del portafolio electrónico de la SPDC al español y se llevó a cabo su implementación en la plataforma interactiva Moodle de la Universidad de la

Habana. Se ha comenzado a utilizar el portafolio electrónico en la Facultad de Artes y Letras con un contenido consensuado entre la profesora Domínguez y los alumnos de su curso. Se planifica utilizarlo en la Facultad de Física en los cursos de Óptica y Física Moderna II. Se planea que el portafolio electrónico contenga las diferentes tareas realizadas, WebQuests y otros materiales de importancia en el curso

C. EL WebQuest

El WebQuest fue desarrollado por Bernie Dodge [8] como una herramienta informática que posibilita optimizar el empleo de tiempo de los estudiantes, facilitar la cognición, el desarrollo del pensamiento científico, la capacidad de análisis, síntesis y de evaluación de la información. Además, está orientada a que los alumnos reflexionen en cómo emplear la información, más que en buscarla, y en consecuencia contribuye a la organización del trabajo del estudiante.

Se trata de averiguar algo y los participantes pueden desempeñar diferentes papeles en ese proceso. El WebQuest se divide comúnmente en las siguientes partes:

- Introducción.
- Tarea.
- Proceso.
- Recursos.
- Conclusiones.

El curso de Física Moderna II en la plataforma Moodle fue desarrollado como apoyo al curso presencial, que se imparte a los estudiantes del cuarto año, primer semestre, de la carrera de Física. Como una forma de motivación y de adecuación al modelo educativo virtual elaborado para la enseñanza de la Física fueron concebidos los WebQuest que a continuación se reseñan:

- Aplicación de los radioisótopos en la Medicina.
- Accidente de Chernobil.
- Origen del Universo.
- Reacciones nucleares en las estrellas.

con el objetivo de evaluar el tema Radioactividad, los dos primeros, y Cosmología, los otros dos.

III. INSTRUMENTACIÓN DEL WebQuest, “Aplicación del WebQuest a la Medicina”

Al presentar este tema, el estudiante ya ha adquirido previamente conocimientos sobre la radioactividad y sus diferentes formas, las reacciones nucleares y cómo se puede obtener, a partir de estas, isótopos radioactivos, algunos de los cuales no existen en la naturaleza. El valor de estos conocimientos para la obtención de radioisótopos útiles con fines médicos posibilita que el aprendizaje sea significativo.

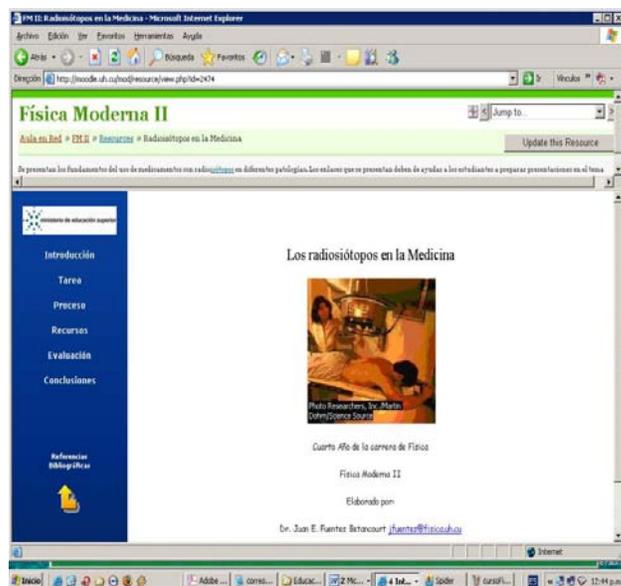


FIGURA 1. Se muestra la página principal del WebQuest “Los radioisótopos en la Medicina”.

Después de una introducción al tema, se describieron los objetivos de la actividad. Entre ellos tenemos que el estudiante identifique:

1. Los diferentes radioisótopos más usados en la Medicina, sus características, y cuáles de ellas permiten que sean medicamentos o medios de análisis clínico.
2. Las reacciones nucleares que favorecen la obtención de los radioisótopos para la Medicina
3. Los diferentes empleos de los radioisótopos en la Medicina.
4. Las medidas de seguridad a observar en la aplicación de los radioisótopos.

Para orientar el trabajo de los estudiantes, además de las referencias a los textos de la asignatura, se les dio acceso en la intranet a varias páginas Web en las que se ofrece información sobre la obtención y empleo, como medicamentos y medios de análisis, de los isótopos marcados. El estudiante, al ir incorporando esta información a su constructo mental, conforma su propia comprensión de ella.

Con el objetivo de presentar a los estudiantes la actividad con sus objetivos, tareas a realizar y literatura inicial que se recomienda, se elaboró un WebQuest confeccionado sobre una Web (ver Figura 1), en cuya página principal se da el título, asignatura en la que se empleará, nombre del profesor y del elaborador y se relacionan hiperenlaces a las diferentes páginas secundarias.

En la introducción se describe sucintamente el surgimiento de la Medicina Nuclear y cuál ha sido su desarrollo. En la sección Tarea se describe qué se debe hacer, mientras que en Proceso se explica cómo proceder para elaborar el informe final. La sección Calificación describe la forma de evaluación personal y colectiva de cada miembro del grupo y en Referencias se relacionan diferentes páginas Web para la búsqueda de información.

Se utilizaron imágenes, siempre que fue posible, en las páginas Web, para aumentar la motivación por su lectura. Con el empleo de presentaciones realizadas por los estudiantes y discutidas colectivamente en el grupo logramos acercarnos a un aprendizaje conversacional [2], según el principio de que "Se aprende haciendo, pero se aprende mejor hablando acerca de lo que se ha hecho"[9]. Este tipo de aprendizaje está regido por el intercambio de criterios y el debate, con lo que aprovechamos al máximo la Zona de Desarrollo Próximo (ZDP) de los estudiantes.

IV. CONCLUSIONES

Se describen las potencialidades que en el proceso de enseñanza aprendizaje poseen algunas de las actividades colaborativas factibles de instrumentar en la plataforma interactiva Moodle, como el Foro, el Portafolio electrónico y el WebQuest. Asimismo, se describe la instrumentación de la modalidad de cursos mixtos en la enseñanza de la Física, con el ejemplo de su aplicación en el curso de Física Moderna II, empleando el WebQuest. Se evidencia cómo la selección de ejemplos de la vida real posibilita que el aprendizaje sea significativo, incrementa la motivación de los estudiantes, su capacidad de reflexión, promueve aptitudes para el trabajo en equipo, fomenta habilidades para llegar a un consenso, lo capacita en la búsqueda de información en Internet y lo entrena en la evaluación de la calidad de la misma. Además, el uso de seminarios de discusión facilita un aprendizaje conversacional.

Se discute la naturaleza del aprendizaje colaborativo en esta actividad, que fue bien recibida por los estudiantes, de modo que se logró el cumplimiento de los objetivos inicialmente planteados. Al evaluar la experiencia llegamos a la conclusión de que debemos mejorar el trabajo en grupo de los estudiantes, para lograr verdaderos equipos de trabajo, y resultado del aprendizaje colaborativo. Aún así, los resultados obtenidos hasta ahora son muy alentadores.

REFERENCIAS

- [1] UNESCO. *Declaración Mundial sobre la Educación Superior para el Siglo XXI: Visión y Acción*. Conferencia Mundial de la Educación Superior. 9 de octubre de 1998. http://www.unesco.org/education/educprog/wche/declarati on_spa.htm Tomado en Enero del 2006.
- [2] Pask, G., *Conversation Theory*. <<http://tip.psychology.org/pask.html>> Tomado en Mayo 2006.
- [3] Fuentes Betancourt, J. E., Universidad de La Habana. Facultad de Física. Curso de Física Moderna II. Plataforma Moodle UH <http://moodle.uh.cu>.
- [4] Barberá, E.; Bautista, G.; Espasa, A.; Guasch, T., "*Portafolio electrónico: desarrollo de competencias profesionales en la Red*". En: Antoni BADIA (coord.). Enseñanza y aprendizaje con TIC en la educación superior [monográfico en línea]. Revista de Universidad y Sociedad del Conocimiento (RUSC) **3**, UOC, (2006). http://www.uoc.edu/rusc/3/2/dt/esp/barbera_bautista_espas a_guasch.pdf, ISSN 1698-580X, Tomado en: 09/03/2007.
- [5] García Doval, F., "*El papel de los portafolios electrónicos en la enseñanza aprendizaje de las lenguas*" Revista Electrónica Internacional **14**, 112-119 (2006).
- [6] Barton, J. and Collins, A., "*Portfolios in teacher education*". J. Tchr. Educ. **44**, 200-210 (1993).
- [7] Perea, C., Campillo, P., Devesa, A. y Herranz, V., "*Integrando el portafolio digital para una docencia virtual de calidad en fundamentos matemáticos para ingenieros*", Universidad 2006, en el CD VIR-077, La Habana, Cuba, (2006).
- [8] Dodge B., "*Some Thoughts About WebQuests*", http://webquest.sdsu.edu/about_webquests.html. Tomado en Marzo del 2007.
- [9] Tomado de http://www.thirteen.org/edonline/concept2class/webquests/ index_sub3.html, en Abril 2007.

An heuristic review of Lanczos potential



César Mora and Rubén Sánchez

Research Center on Applied Science and Advanced Technology of National Polytechnic Institute, Av. Legaría No. 694. Col. Irrigación, CP 11,500, México City.

E-mail: cmoral@ipn.mx

(Received 20 July 2007; accepted 26 August 2007)

Abstract

We present a review of 3-tensor potential L_{abc} proposed by Lanczos for the Weyl conformal curvature tensor. We show the role that plays Lanczos tensor in General Relativity for theoretical physics postgraduate students. In the same way that the electromagnetic vector potential can be used to compute the Maxwell field, the Lanczos potential can also be employed to compute the Weyl curvature tensor of a gravitational field.

Key words: Lanczos potential theory, Weyl-Lanczos equations, Lanczos coefficients.

Resumen

Realizamos una revisión del potencial 3-tensorial propuesto por Lanczos L_{abc} para el tensor de Weyl de curvatura conforme. Mostramos el papel que juega el tensor de Lanczos en Relatividad General para estudiantes de posgrado de física teórica. En la misma forma que el vector potencial puede ser usado para calcular el campo de Maxwell, el potencial de Lanczos también puede ser empleado para calcular el tensor de curvatura de Weyl de un campo gravitacional.

Palabras clave: Teoría de potenciales de Lanczos, ecuaciones de Weyl-Lanczos, coeficientes de Lanczos.

PACS: 04.20.-q, 04.90.+e, 95.30.Sf

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

In the recent years there has been a renewed interest in the 3-tensor potential L_{abc} proposed by Lanczos for the Weyl curvature tensor [1]. However, in the General Relativity and gravitation most popular textbooks, like Misner, Thorne and Wheeler [2], Wald [3], Hawking *et al.* [4], Weinberg [5], Penrose and Rindler [6], Stephani *et al.* [7], etc. there is not any treatment about Lanczos potential theory. Nevertheless, it is important in theoretical and physical aspects because we acknowledge that Einstein equations can be written in terms of the covariant derivative of Lanczos Potential in its Jordan form; also, there is a possibility of the existence of an Aranov-Bhom's gravitational quantum equivalent effect to the traditional one [8]. In the educational field, the importance of Lanczos potential is clear because of its analogy with the electromagnetic 4-vector potential.

Our aim in this work is to present an heuristic point of view of Lanczos potential that reaffirms the last mentioned analogy between gravity and electromagnetism. This is focused to postgraduate General Relativity students. The paper is organized as follows: in Sect. II, we present some algebraic properties of Lanczos potential; in Sect. III, we mentioned the physical interpretation of Lanczos potential; en Sect. IV,

we show the method for the vacuum space-times; in Sect. V, we show a brief example for Schwarzschild space-time. Finally, in Sect. VI, we present our conclusions. Appendix A.I is devoted to spinor formalism.

II. ALGEBRAIC PROPERTIES OF LANCZOS POTENTIAL

In General Relativity, we often need to work in a given space-time, or to derive one in the form of an exact solution to Einstein's gravity equations. In 1962 Lanczos suggested an auxiliary potential [9]; through it and the covariant derivative, we can obtain the conformal curvature C_{abcd} of decomposition of Riemann curvature tensor

$$R_{abcd} = C_{abcd} + E_{abcd} + G_{abcd}, \quad (1)$$

where the following abbreviations are followed

$$\begin{aligned}
 E_{abcd} &\equiv \frac{1}{2}(g_{ac}S_{bd} + g_{ad}S_{bc} - g_{ad}S_{bc} - g_{bc}S_{ad}), \\
 G_{abcd} &\equiv \frac{R}{12}(g_{ac}g_{bd} - g_{ad}g_{bc}) \equiv \frac{R}{12}g_{abcd}, \\
 S_{ab} &\equiv R_{ab} - \frac{1}{4}Rg_{ab}, \quad R \equiv R^a{}_a.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

The Lanczos potential is studied in relation to a Weyl candidate, *i.e.*, a 4-rank tensor with the following expression

$$\begin{aligned}
 W_{abcd} &= L_{abc;d} - L_{abd;c} + L_{cdb;a} - L_{cda;b} \\
 &\quad + L_{(ad)}g_{bc} + L_{(bc)}g_{ad} - L_{(ac)}g_{bd} \\
 &\quad - L_{(bd)}g_{ac} + \frac{2}{3}L^r{}_{r;s}(g_{ac}g_{bd} - g_{ad}g_{bc}),
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

where we define

$$L_{ad} \equiv L^r{}_{a;d;r} - L^r{}_{a;r;d} \tag{4}$$

The above equation is equivalent to the dual form

$$\begin{aligned}
 W_{abcd} &= L_{ab[c;d]} + L_{cd[a;b]} \\
 &\quad - {}^*L_{ab[c;d]} - {}^*L_{cd[a;b]}.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Initially, an arbitrary tensor of third order has 4^3 free components, but further we have to impose the following 40 algebraic symmetries

$$L_{abc} = -L_{bac}, \tag{6}$$

the four (*gauge algebraic conditions of Lanczos*)

$$L^r{}_{a;r} = 0, \tag{7}$$

and the dual four conditions

$${}^*L^r{}_{a;r} = 0, \tag{8}$$

or equivalently

$$L_{abc} + L_{bca} + L_{cab} = 0, \tag{9}$$

then, his initially sixty four degrees of freedom are reduced to sixteen. Further six *differential Lanczos gauge conditions*

$$L_{ab}{}^r{}_{;r} = 0. \tag{10}$$

In fact, the Lanczos potential also admits a wave equation [2], the tensorial form of this wave equation has proved to be very useful to find Lanczos potential by some interesting methods due to Velloso and Novello [3]. The complete form of the tensorial equation for Lanczos potential is

$$\begin{aligned}
 \square L_{abc} + 2R^r{}_c L_{abr} - R^r{}_a L_{bcr} - R^r{}_b L_{car} \\
 - g_{ac}R^{rs}L_{rbs} + g_{bc}R^{rs}L_{ras} - \frac{1}{2}RL_{abc} = J_{abc}.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

III. PHYSICAL INTERPRETATION OF LANCZOS POTENTIAL

The role of Lanczos potential L_{abc} with respect to the Weyl tensor W_{abcd} is the same that plays the vector potential A_a for the Maxwell tensor F_{ab} . Then, in the same

way that we derive the electromagnetic tensor F_{ab} from A_a , we can derive the electromagnetic field F_{ab} as:

$$F_{ab} = W_{ab}(A) = A_{a;b} - A_{b;a}, \tag{12}$$

we can also derive the Weyl curvature tensor from a potential; nevertheless, this could not be a vector potential as in the electromagnetic case, instead it must be a 3-rank tensor called *the Lanczos potential* L_{abc} , with similar properties, see equation (3).

Also, assuming that some space-time M admits an electromagnetic field $F_{ab} = -F_{ba}$, then this field obeys certain rules. For example

$$\begin{aligned}
 F_{ab;c} + F_{bc;a} + F_{ca;b} &= 0, \\
 F^{cd}{}_{;d} &= J^c.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Therefore, the gravitational Lanczos potential L_{abc} physically corresponds with the electromagnetic vector potential A_a . In a certain point of view, A_a could be derived in a covariant way to get the electromagnetic tensor F_{ab} (as is suggested by (12)). Also, the Lanczos potential could be derived in a covariant way to get the Weyl gravitational field as it is correspondingly suggested by (12). The source of the electromagnetic equation (second equation of (13)) corresponds to (11) Lanczos equation with sources.

IV. METHOD FOR THE VACUUM SPACE-TIMES

If we have a space-time with a global Killing vector field ζ^a [11], it is sometimes possible to generate a Lanczos potential with the following method:

If ζ^a is a non-null Killing vector that satisfies Killing equation

$$\zeta_{a;b} + \zeta_{b;a} = 0, \tag{14}$$

and also is hyper surface orthogonal vector (*i.e.* satisfies the following mathematical relation)

$$\zeta_{[a;b}\zeta_{c]} = 0. \tag{15}$$

Then, it is possible to take an unit vector u_a from the group of motions, such that

$$u_a = \frac{\zeta_a}{\zeta}, \quad \zeta^2 = s\zeta_a\zeta^a > 0, \quad s = \begin{cases} 1 \\ -1 \end{cases}. \tag{16}$$

u

Thus, the Killing equation (14) guarantees that u_a is *expansion-less* and *shear-free*, *i.e.*

$$u_{(a;b)}(\delta_m^a - u^a u_m)(\delta_n^b - u^b u_n) = 0, \tag{17}$$

and by means of the hyper surface orthogonality condition of ζ^a we have

$$u_{[a;b}u_{c]} = 0, \tag{18}$$

therefore,

$$u_{a;b} = sa_a u_b, \tag{19}$$

where we have defined the first curvature vector of the group of congruence (also called and known as

acceleration) to be $a_a = u_{a;b} u^b$ which for all group of motions even those not satisfying (18), this is a gradient $a_a = (\ln(I/\xi))_{,a}$. Then, a candidate of Lanczos potential is given by

$$L_{abc} = (a_a u_b - a_b u_a) u_c - \frac{1}{3} s (a_a g_{bc} - a_b g_{ac}), \quad (20)$$

which satisfies (6), (7) and (9). Then, verifying the Lanczos gauge (10) and the (3) condition of the potential, we can fix completely our candidate as a full-fledged Lanczos potential. We can trace the spinorial analog of (3) to fix our candidate. In the following section, we show an example for the Schwarzschild space-time.

V. AN EXAMPLE FOR THE SCHARZSCHILD SPACE-TIME.

Now, we show a brief example of the method [11] using the Schwarzschild line element in the coordinates, (t, r, θ, ϕ) as follows

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2M}{r}} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2(\theta) d\phi^2. \quad (21)$$

The time-like Killing vector $\xi^a = \delta_0^a$ has squared norm

$$\xi^2 = g_{00} = \left(1 - \frac{2M}{r}\right), \quad (22)$$

clearly this vector fields are hypersurface-orthogonal. If we introduce the corresponding unit vector field,

$$u_a = \frac{\xi_a}{\xi}, \quad u_a u^a = 1, \quad (24)$$

then

$$u_{a;b} = a_a u_b, \quad \text{with} \quad a_a = u_{a;b} u^b, \quad (25)$$

now, with the velocity vector u_a and the acceleration a_a , it is possible to write a Lanczos potential in the following form

$$L_{abc} = (a_a u_b - a_b u_a) u_c - \frac{1}{3} (a_a g_{bc} - a_b g_{ac}), \quad (26)$$

this is the 3-rank tensor that Novello and Velloso [10] prove to be a Lanczos potential. We start to manage the example by using a preferred null tetrad in the Newmann-Penrose convention, say

$$\{e_a\} = (m_a, \bar{m}_a, l_a, k_a),$$

$$g_{ab} = 2m_{(a} m_{b)} - 2k_{(a} l_{b)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (27)$$

$$m_a \bar{m}^a = 1, \quad k_a l^a = -1,$$

we continue the present example employing the null tetrad provided by Kinnersley, which are

$$l^a = \frac{1}{\Delta} (r^2, \Delta, 0, 0), \quad n^a = \frac{1}{2r^2} (r^2, -\Delta, 0, 0),$$

$$\Delta \equiv r^2 - 2Mr,$$

$$m^a = \frac{1}{\sqrt{2}r} (0, 0, 1, i \csc(\theta)), \quad (28)$$

$$\bar{m}^a = \frac{1}{\sqrt{2}r} (0, 0, 1, -i \csc(\theta)).$$

Here, the non-vanishing spin coefficients and Weyl scalar components are

$$\rho = -\frac{1}{r}, \quad \beta = -\alpha = \frac{\cot(\theta)}{2\sqrt{2}r}, \quad \mu = -\frac{r-2M}{2r^2},$$

$$\gamma = \frac{M}{2r^2}, \quad \Psi_2 = \frac{M}{r^3}, \quad (29)$$

then, the intrinsic derivatives are

$$D = l^a \nabla_a = \frac{r^2}{\Delta} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r},$$

$$D' = n^a \nabla_a = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\Delta}{2r^2} \frac{\partial}{\partial r},$$

$$\delta = m^a \nabla_a = \frac{1}{\sqrt{2}r} \left(\frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{i}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \phi} \right),$$

$$\delta' = \bar{m}^a \nabla_a = \frac{1}{\sqrt{2}r} \left(\frac{\partial}{\partial \theta} - \frac{i}{\sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \phi} \right), \quad (30)$$

from these set of relations we have that the only non-vanishing components of Lanczos tensor are

$$L_1 = -\frac{1}{3} \frac{M}{r^2} \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1}, \quad L_6 = -\frac{M}{6r^2}, \quad (31)$$

where we used the following relations between the null tetrad and the Weyl scalars

$$\Psi_0 = C_{abcd} l^a m^b l^c m^d, \quad \Psi_1 = C_{abcd} l^a m^b l^c n^d,$$

$$\Psi_2 = C_{abcd} l^a m^b \bar{m}^c n^d, \quad \Psi_3 = C_{abcd} l^a n^b \bar{m}^c n^d, \quad (32)$$

$$\Psi_4 = C_{abcd} \bar{m}^a n^b m^c n^d,$$

and Lanczos scalars

$$L_0 = L_{abc} l^a m^b l^c, \quad L_1 = L_{abc} l^a m^b \bar{m}^c,$$

$$L_2 = L_{abc} \bar{m}^a n^b l^c, \quad L_3 = L_{abc} \bar{m}^a n^b m^c, \quad (33)$$

$$L_4 = L_{abc} l^a m^b m^c, \quad L_5 = L_{abc} l^a m^b n^c,$$

$$L_6 = L_{abc} \bar{m}^a n^b m^c, \quad L_7 = L_{abc} \bar{m}^a n^b n^c.$$

This is an example of a Lanczos potential that has been computed from the Novello and Velloso's Lanczos gravitational potential 3-rank tensor that illustrates the use of the null tetrad and spinorial coefficients from the Newmann- Penrose formalism [10].

VI. CONCLUSIONS

It has been found that the method of Novello and Velloso [10] described in section IV, could be used to compute a Lanczos gravitational potential, and it has been pointed out

that we can use it in the derivation of the Weyl curvature tensor for the simple case of a Schwarzschild spherically symmetric vacuum space-time. The Lanczos tensor is important in the derivation of the Einstein field equations in his Jordan form. We have used the spin-coefficients and the Newmann-Penrose formalism in this method to achieve our objective of showing an easy and convenient way to get this important quantity.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by EDI, COFAA-IPN SNI-CONACyT grants and Research Project SIP-20071482.

REFERENCES

[1] Bergqvist, G., *A Lanczos potential in Kerr geometry*, J. Math. Phys. **38**, 3142-3154 (1997); Edgar, S. B. and Hoglund, a., *The Lanczos potential for the Weyl curvature tensor: existence, wave equation and algorithms*, Proc. Roy. Soc. Lond. **A 453**, 835-851 (1997); López-Bonilla, J. L., Ovando, G. and Peña, J. J., *Lanczos potential for plane gravitational waves*, Found. Phys. Lett. **12**, 401-405 (1999); Cartin, D., *The Lanczos potential as a spin-2 field*, hep-th/0311185v1 (2003); O'Donnell, P., *Lanczos tensor potential for conformally flat space-times* **119**, 341-345 (2004); Mena, F. C and Tod, P., *Lanczos potentials and a definition of gravitational entropy for perturbed FLRW space-times*, gr-qc/0702057v1 (2007).
 [2] Misner, Ch. W., Thorne, K. S. and Wheeler, J. A. (*Gravitation*, Freeman, New York, 1995).
 [3] Wald, Robert M. (*General Relativity*, The University of Chicago Press, Chicago and London, 1984).
 [4] Hawking, S. W., Ellis, G. F. R. (*The Large Scale Structure of Space-Time*, Cambridge Universty Press, Cambridge, 1973).
 [5] Weinberg, S. (*Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*, John Wiley, New York, 1972).
 [6] Penrose, R. and Rindler, W. (*Spinors and space-time, vol. 1 "Two-Spinor Calculus and Relativistic Fields"*, Cambridge University Press, Cambridge, 1984).
 [7] Stephani, H., Kramer, D., Maccallum, M., Hoenselaers, C., Herlt, E. (*Exact Solutions of Einstein's Field Equations*, Cambridge University Press, Cambridge, 2006).
 [8] Holgersson, D. (*Lanczos potentials for perfect fluid cosmologies*, Linköping University Thesis, 2004); on-line at: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-2582>
 [9] Lanczos, C., *The splitting of the Riemann tensor*, Rev. Mod. Phys. **34**, 379-389 (1962).
 [10] Novello, M. and Velloso, A. L., *The connection between general observers and Lanczos potential*, Gen. Rel. Grav. **19**, 1251-1265 (1987).
 [11] Dolan, P. and Kim, C. W., *Some solutions of the Lanczos vacuum wave equation*, Proc. R. Soc. Lond. **447**, 577-585 (1994).

A.I NEWMANN-PENROSE CONVENTION FOR THE SPIN-COEFFICIENTS

In this section we show the symbology employed by Newmann and Penrose to denote several spin-coefficients that we have already computed for the vacuum space-time. This notation has been proved to be very useful. The Christoffel symbols of second kind can be written in terms of spinorial coefficients as

$$\Gamma_{ab}^c = \gamma_{AAB}^C \mathcal{E}_B^{\dot{C}} + \bar{\gamma}_{A\dot{A}\dot{B}\dot{C}} \mathcal{E}_B^C, \quad (34)$$

where we followed the convention of decomposition of the null tetrad in terms of the canonical spinorial frame

$$\begin{aligned} m^a &= o^A \bar{l}^{\dot{A}}, & \bar{m}^a &= l^A \bar{o}^{\dot{A}}, \\ l^a &= t^A \bar{l}^{\dot{A}}, & k^a &= o^A \bar{o}^{\dot{A}}, \end{aligned} \quad (35)$$

the basis spinors o^A and l^A from a dyad in the sense that satisfies the normalized relation of inner product:

$$o_A t^A = \varepsilon_{AB} o^A t^B = 1,$$

and ε_{AB} is the "local metric" of the spin space $SL(2,C)$, which has the components

$$\varepsilon_{AB} = \varepsilon^{AB} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

The spinor indices are raised and lowered according to the rules

$$\alpha^A = \varepsilon^{AB} \alpha_B, \quad \alpha_A = \varepsilon_{AB} \alpha^B. \quad (36)$$

The spin inner product is antisymmetric in the sense that the spinorial indices A, B, \dots do not commute, *i.e.*

$$\alpha_A \varepsilon^{AB} \neq \varepsilon^{BA} \alpha_A, \quad (37)$$

$$\varepsilon_{AB} \alpha^A \beta^B = \alpha_A \beta^A = -\alpha^A \beta_A.$$

The diagrams of Newmann-Penrose are the following

TABLE I. Symbology of Newmann-Penrose for the spinor $\gamma_{A\dot{A}B}^C$.

	C	0	1	$\dot{1}$	$\dot{1}$
$A \dot{A} \backslash B$	0	0	0	1	
$0 \dot{0}$	ε	$-\kappa$	$-\tau'$	γ'	
$1 \dot{0}$	α	$-\rho$	$-\sigma'$	β'	
$0 \dot{1}$	β	$-\sigma$	$-\rho'$	α'	
$1 \dot{1}$	γ	$-\tau$	$-\kappa'$	ε	

TABLE II. Symbology of Newmann-Penrose for the spinor $\gamma_{A\dot{A}BC}$.

$A \dot{A} \backslash B \ C$	$0 \ 0$	$1 \ 0=1 \ 0$	$1 \ 1$
$0 \ \dot{0}$	κ	$\varepsilon=-\gamma'$	$\pi=-\tau'$
$1 \ \dot{0}$	ρ	$\alpha=-\beta'$	$\lambda=-\sigma'$
$0 \ \dot{1}$	σ	$\beta=-\alpha'$	$\mu=-\rho'$
$1 \ \dot{1}$	τ	$\gamma=-\varepsilon'$	$\nu=-\kappa'$

There are also two more tables for the complex conjugate spin-coefficients symbols.

TABLE III. Symbology of Newmann-Penrose for the spinor

$\gamma_{\dot{A}\dot{B}}^{\dot{C}}$.

$A \ \dot{A} \ \dot{B} \ \dot{C}$	$\dot{0} \ \dot{0}$	$\dot{0} \ \dot{1}$	$\dot{1} \ \dot{0}$	$\dot{1} \ \dot{1}$
$0 \ \dot{0}$	$\bar{\epsilon}$	$-\bar{\kappa}$	$-\bar{\tau}'$	$\bar{\nu}'$
$0 \ \dot{1}$	$\bar{\alpha}$	$-\bar{\rho}$	$-\bar{\sigma}'$	$\bar{\beta}'$
$1 \ \dot{0}$	$\bar{\beta}$	$-\bar{\sigma}$	$-\bar{\rho}'$	$\bar{\alpha}'$
$1 \ \dot{1}$	$\bar{\gamma}$	$-\bar{\tau}$	$-\bar{\kappa}'$	$\bar{\epsilon}'$

TABLE IV. Symbology of Newmann-Penrose for the spinor

$\gamma_{\dot{A}\dot{B}\dot{C}}$.

$A \ \dot{A} \ \dot{B} \ \dot{C}$	$\dot{0} \ \dot{0}$	$\dot{0} \ \dot{1} = \dot{1} \ \dot{0}$	$\dot{1} \ \dot{1}$
$0 \ \dot{0}$	$\bar{\kappa}$	$\bar{\epsilon} = -\bar{\nu}'$	$\bar{\pi} = -\bar{\tau}'$
$0 \ \dot{1}$	$\bar{\rho}$	$\bar{\alpha} = -\bar{\beta}'$	$\bar{\lambda} = -\bar{\sigma}'$
$1 \ \dot{0}$	$\bar{\sigma}$	$\bar{\beta} = -\bar{\alpha}'$	$\bar{\mu} = -\bar{\rho}'$
$1 \ \dot{1}$	$\bar{\tau}$	$\bar{\gamma} = -\bar{\epsilon}'$	$\bar{\nu} = -\bar{\kappa}'$

Notice that in these tables the second and third rows, of the complex conjugate of spin-coefficient $\gamma_{\dot{A}\dot{B}}^{\dot{C}}$ and $\gamma_{\dot{A}\dot{B}\dot{C}}$ are interchanged. Because of the obvious relations

$$\overline{\gamma_{\dot{A}\dot{B}}^{\dot{C}}} = \bar{\gamma}_{\dot{A}\dot{B}}^{\dot{C}} = \bar{\gamma}_{\dot{A}\dot{B}}^{\dot{C}}, \tag{38}$$

and correspondingly

$$\overline{\gamma_{\dot{A}\dot{B}\dot{C}}} = \bar{\gamma}_{\dot{A}\dot{B}\dot{C}} = \bar{\gamma}_{\dot{A}\dot{B}\dot{C}}. \tag{39}$$

(We also can think that the capital latin spinorial indices with dot \dot{A}, \dot{B}, \dots can not see the spinorial indices without a dot A, B, \dots and then, can permute with this last set without *interference*. But the capital indices without the dot A, B, \dots can not commute between them, because in doing so, they could *interfere* with the value of the spinorial quantity.)

Una idea profunda en la comprensión del mundo físico: el principio de superposición de estados



O. Organista, V. Gómez, D. Jaimés y J. Rodríguez

Grupo de Física Matemática, Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional, Calle 73 No. 11-95, Bogotá D. C., Colombia.

E-mail: jorganis@pedagogica.edu.co

(Recibido el 15 de agosto de 2007; aceptado el 10 de septiembre de 2007)

Resumen

Se presenta un conjunto de ejemplos del principio de superposición. Este conjunto se estructura de tal forma que la idea se va desarrollando progresivamente desde nociones elementales hasta la superposición de amplitudes de probabilidad cuánticas. Se muestran relaciones y diferencias entre el uso de esta idea desde los puntos de vista clásico y cuántico.

Palabras claves: Comprensión del concepto de superposición, intuición en mecánica cuántica, ilustraciones del principio de superposición de estados.

Abstract

A group of examples of the superposition principle is presented. This group is structured in such a way that the idea leaves developing progressively from elementary notions until the superposition of quantum probability amplitudes. Relations and differences between the uses of this idea are identified from the classic and quantum points of view.

Key words: Understanding of the superposition concept, intuition in quantum mechanics, illustrations of the superposition principle of states.

PACS: 03.65.Ta, 01.40.gb, 01.50.-i.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La mecánica cuántica, provee un esquema racional adecuado para la descripción del mundo microscópico. Esta descripción es necesaria para la comprensión del mundo macroscópico pues la materia y la radiación consisten de partículas subatómicas. Sin embargo, un conjunto de leyes diferentes a las leyes clásicas es requerido.

Este conjunto de leyes se presenta al estudiante que inicia su estudio de la naturaleza desde la teoría cuántica, como una teoría anti-intuitiva [1,2,3,4], cuyos principios resultan de difícil comprensión. Una de las razones por las que sucede esto es porque en mecánica cuántica se tiene un grado de abstracción tal que se pierden las imágenes directas que permiten familiarizarse con los fenómenos [5,6].

Desde el punto de vista de la teoría cognitiva, en particular, de la teoría de Johnson-Laird, las imágenes son un tipo de representaciones que contienen aspectos perceptibles de los objetos. Según dicha teoría “la mente es un sistema de representaciones simbólicas, esta construye símbolos y los utiliza en diferentes procesos cognitivos, como: la percepción, el pensamiento, el lenguaje, etc.” [7]. De esta manera, el uso de imágenes constituye un recurso cognitivo para el pensamiento del ser humano y su

ausencia dificulta la apropiación de una idea y por lo tanto su comprensión.

Uno de los cambios fundamentales y más drásticos para el pensamiento contenido en la teoría cuántica se encuentra presente en el llamado principio de superposición de estados [8,9].

Este principio afirma que la combinación lineal de dos estados posibles del sistema, es también, un estado posible del sistema. Lo cual lleva a pensar que los objetos cuánticos están en todos sus estados posibles, aunque sean estados, que desde el punto de vista de la física clásica, se interpretan como contradictorios [3].

Diversas investigaciones sobre el principio de superposición se presentan en la literatura, con énfasis distintos. En investigaciones en enseñanza de la física se evidencia malos entendidos de este principio, aún desde la teoría clásica [10].

Lynn y Caponigro, por su parte, hacen notar que la interpretación del principio de superposición de estados cuánticos está íntimamente relacionada con los supuestos filosóficos que se asumen, tales como los que subyacen al platonismo, al idealismo y al realismo [9].

Por su parte, Everett propone una nueva interpretación de la teoría cuántica [11]. En su interpretación, el estado de superposición queda determinado por el conjunto de

observaciones (realizaciones) secuenciales realizadas sobre el sistema [3].

Roger Newton, resalta el hecho que los efectos de interferencia producidos por la superposición de estados se deben a la caracterización del estado como un vector de estado y no como un rayo. Newton, señala que es precisamente esta caracterización del estado, “la que conlleva al efecto Aharonov-Bohm, a la fase Berry y a otros fenómenos familiares de entrelazamiento” [12].

En otros estudios, se ha determinado el rango de validez del principio de superposición en la teoría cuántica no relativista. Cisneros, analiza tres reglas que limitan a este principio y que se conocen como reglas de superselección [8].

Por su parte, Shapiro ha llevado a cabo la idea de Kobzarev acerca de la posibilidad de mundos cuánticos donde se viole el principio de superposición. Shapiro, presenta una dinámica modificada del vector de estado [3], adicionando un término no lineal a la ecuación de Schrödinger. Muestra que es posible una interpretación probabilística de la función de onda modificada, al igual que la existencia de amplitudes de transición, como de cantidades físicas conservadas [13].

En este artículo presentamos nuestra contribución al esfuerzo por hacer de la teoría cuántica una teoría intuitiva. Se describe un conjunto de ejemplos estructurados como una unidad, que constituyen aportes didácticos para la divulgación y comprensión del principio de superposición en un curso introductorio de mecánica cuántica. Además se muestran relaciones y diferencias entre el principio de superposición desde los puntos de vista clásico y cuántico.

El artículo está organizado como sigue: en la Sección II se ofrece un conjunto de ejemplos sobre el principio de superposición clásico. A partir de estos ejemplos abstraemos cuatro nociones constitutivas del concepto de superposición. En la Sección III se caracteriza el principio de superposición en mecánica cuántica. En la Sección IV se ilustra este principio y en la Sección V se enfatizan los cambios que sufre el concepto de intuición en este nuevo marco teórico, finalmente en la Sección VI presentamos nuestras conclusiones.

II. EJEMPLOS SOBRE EL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN CLÁSICO

A. Un sistema visto como superposición de objetos

Un conjunto de objetos que configuran un determinado sistema nos ofrece una primera noción del principio de superposición. Encontramos objetos que conforman el sistema y que no pierden su identidad; sin embargo, el conjunto como un todo genera una percepción global independiente a la percepción de cada uno de sus objetos componentes. Por ejemplo, los elementos que configuran una oficina. Cada uno de los elementos puede conmutarse, cambiarse de posición, pero la noción de oficina se mantiene. Si se quita el computador y luego los escritorios y así sucesivamente la percepción de oficina se va diluyendo, hasta quedar un simple cuarto vacío. En este

primer ejemplo la noción que queremos resaltar, es la de un conjunto de individualidades constituyéndose como un todo.

B. Superposición de luz de colores

Nuestro siguiente ejemplo, es el maravilloso fenómeno de los colores. La luz proveniente del Sol al incidir sobre un prisma, se descompone en un conjunto de colores. Este conjunto de colores, al ser nuevamente combinado en una misma región del espacio se percibe como luz blanca. Además de la individualidad de cada color, resaltamos aquí la idea de separabilidad como noción constitutiva del concepto de superposición. Notemos además que no es posible identificar, a simple vista, en la luz blanca los diferentes colores; se hizo necesario un agente externo, el prisma, para evidenciar el conjunto de individualidades que coexisten en el sistema «luz blanca». Así, es debido a nuestras capacidades ópticas que no podemos, como en el ejemplo de la oficina, identificar en el sistema cada uno de los elementos superpuestos. Posiblemente si tuviéramos «ojos prismas» veríamos en vez de luz blanca una gama de colores.

C. Superposición de movimientos

Nuestro siguiente ejemplo donde se presenta una combinación de entidades que no pierden su individualidad, separables pero que combinadas generan una percepción distinta a la individualidad de cada componente, es la superposición de movimientos. Tomemos como ejemplo el movimiento parabólico: se superpone un movimiento horizontal con velocidad constante y un movimiento vertical con aceleración constante generando una trayectoria parabólica. Si se “apaga” el movimiento horizontal, el objeto continua en caída libre. Si se apaga el movimiento de caída libre, el movimiento horizontal perdura. Como en el ejemplo anterior, en este, al apreciar la trayectoria parabólica no se puede a simple vista identificar cada uno de los elementos superpuestos. Sin embargo, si se proyecta el movimiento a dos pantallas ubicadas adecuadamente, sus sombras darían cuenta de las individualidades que componen el estado de superposición.

En estos ejemplos se ha querido enfatizar reiteradamente que la superposición no es mezcla de entidades, en el sentido que en una mezcla se pierde la individualidad de las componentes. Por ejemplo, en la realización de un jugo de fresas, después de licuar las fresas con el agua es imposible restablecer las fresas y el agua por aparte.

D. Otros ejemplos

Las visualizaciones de superposiciones de ondas en cuerdas, en membranas, en el agua [14], permiten deleitarse con la percepción de la superposición. Además es bien conocido el uso del concepto de superposición de fuerzas, de campos eléctricos, de campos magnéticos, etc.

Ahora, vale la pena presentar la idea de superposición en otros escenarios. La teoría de series nos ayuda a ver los números en términos de extrañas superposiciones. Por ejemplo los números irracionales se pueden ver como superposición de números racionales:

$$\pi^2 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2}, \quad \pi^4 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{90}{n^4} . \quad (1)$$

El análisis de Fourier resuelve la cuestión de cuándo una función $f(t)$ puede ser superposición (suma o integral) de exponenciales $\exp(i\omega t)$. Por ejemplo,

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\omega t}, \quad (2)$$

en donde c_n son coeficientes reales y ω representa la frecuencia de la función. Nótese que en este caso las individualidades son las funciones exponenciales de la forma $e^{in\omega t}$.

Los desarrollos en series de Taylor de una función,

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x-x_0)^k, \quad (3)$$

donde k indica la k -ésima derivada de $f(x)$, permiten descomponer una función en términos de polinomios, en este caso las individualidades son los polinomios de la forma x^k .

Estos ejemplos evidencian otra noción constitutiva de la idea de superposición, la idea de contribución; esta nos da cuenta del aporte de cada individualidad al estado de superposición. Este aporte (análogo al peso estadístico) no altera la naturaleza individual de los elementos superpuestos. En los ejemplos de las series de Fourier y de Taylor la contribución de cada individualidad se manifiesta en los coeficientes c_n y $f^{(k)}(x_0)/k!$, respectivamente. En los casos perceptibles de superposición de ondas se sabe que las contribuciones pueden ser en fase, en desfase o en amplitudes (intensidad).

E. El principio de superposición clásico

El concepto de superposición surge para expresar concisamente los resultados de este gran número de ejemplos. Las ideas de individualidad, separabilidad, percepción como un todo y contribución, se formalizan en la estructura algebraica conocida como espacio vectorial [15]. Esta formalización asocia el concepto de superposición con el concepto de operación aditiva. La individualidad queda formalizada en los elementos del espacio vectorial (los vectores, cada vector es en sí mismo una individualidad), la separabilidad en la idea de combinación linealmente independiente, la percepción como un todo con la definición unívoca de los coeficientes (amplitudes de probabilidad) de los estados en una base determinada y la contribución, en la multiplicación de un

escalar por una individualidad (por un vector). Por ejemplo, el desplazamiento es una magnitud vectorial y cada desplazamiento (cada individualidad) se puede escribir como combinación de otros desplazamientos. Normalmente se escribe como:

$$\Delta \vec{r} = \Delta x \vec{i} + \Delta y \vec{j} + \Delta z \vec{k} . \quad (4)$$

De esta manera, un desplazamiento puede ser pensado como una magnitud tres dimensional. Este caso se puede generalizar para considerar superposiciones de magnitudes n -dimensionales. En este sentido, las cantidades vectoriales de la física como velocidad, momentum, aceleración, fuerza, campo eléctrico, campo magnético, etc., ilustran el concepto de superposición.

El principio de superposición clásico establece entonces, que existen entidades físicas y matemáticas que se pueden expresar como una combinación de “elementos” que coexisten conservando su individualidad.

Desde el punto de vista cognitivo, una característica de los ejemplos clásicos que hemos enunciado, es que de todos ellos fácilmente existe una imagen [7]. En algunos casos la imagen es concreta, sustancial, como en los ejemplos de la oficina, de ondas en una cuerda o de ondas en el agua; en otros casos existen imágenes gráficas como en la superposición de movimientos y en otros casos las expresiones matemáticas evidencian el principio de superposición. Así las imágenes mentales se convierten en un recurso del pensamiento para la comprensión de un concepto, para su familiarización y su uso [16].

III. EL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN EN MECÁNICA CUÁNTICA

Hemos ilustrado el principio de superposición desde el punto de vista clásico y este esfuerzo nos ha llevado a proponer cuatro nociones que fundamentan este principio: individualidad, separabilidad, percepción como un todo y contribución. Se sabe que la mecánica cuántica exige una nueva organización conceptual para la descripción de los fenómenos atómicos y con frecuencia se dice que el principio de superposición está en el corazón de esta nueva organización conceptual. Así que la cuestión que interesa es: ¿qué cambios sufre el principio de superposición clásico en la mecánica cuántica?

Inicialmente vale la pena preguntarse si en la teoría cuántica es posible pensar en magnitudes n -dimensionales, como en el caso de las magnitudes vectoriales clásicas. La respuesta es contundente: sí. Todas las magnitudes que especifican un atributo de una entidad física (polarización, espín, localización, traslación, momentum, energía, etc.) se deben pensar como n -dimensionales en la teoría cuántica y se denominan vectores de estado.

En mecánica clásica los atributos de un objeto son pensados como existentes *a priori*. Atributos tales como forma (extensibilidad), dureza, transparencia, localizabilidad, movilidad, etc., se asumen como determinados objetivamente aún si no se miden. Mientras que en mecánica cuántica, siguiendo la interpretación

ortodoxa de Copenhagen [3], cada magnitud física que representa un atributo se debe pensar como una superposición de las n dimensiones que la constituyen. Estas n dimensiones representan los posibles valores (posibilidades) que puede tomar la magnitud. Estas posibilidades se manifiestan en el momento de la medición, así que los atributos que caracterizan un determinado sistema físico dependen del observador. Este cambio que propone la mecánica cuántica en cuanto a cómo se conciben los atributos nos lleva directamente a introducir el principio de superposición, ya que el vector de estado se debe considerar como una superposición de posibilidades (antes de la medición).

El uso del concepto de superposición de estados, en donde las individualidades son las posibilidades de ser o de estar de un sistema, se adecua con las cuatro nociones que propusimos en el caso clásico. El cambio drástico se da en cuanto a la interpretación de una de las nociones presentadas, la noción de contribución, ya que los coeficientes que acompañan a las individualidades¹ no representan información directa del sistema. Para saber la contribución (número real) de cada individualidad es necesario calcular el cuadrado de la norma del coeficiente; este resultado se interpreta como la probabilidad de que el sistema se encuentre en el estado correspondiente al ser observado (medido).

Presentamos a continuación un conjunto de ejemplos para ilustrar esta idea.

IV. EJEMPLOS SOBRE EL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN DE ESTADOS

A. El gato de Schrödinger (experimento mental)

Un gato dentro de una caja cerrada con átomos radiactivos constituye nuestro primer ejemplo de superposición de estados. Si se considera que con la desintegración del 50% de los átomos el gato muere, y después de un determinado tiempo se ha desintegrado esta cantidad de la muestra, si no se abre la caja, aunque un observador no podría decir nada acerca del estado en el que se encuentra el gato, vivo o muerto, podría decir que el gato tiene dos posibilidades de estar, el estar vivo o el estar muerto, así que como no está observando en cual está, se dice que el gato se encuentra en un estado de superposición de estas dos posibilidades. Simbólicamente esta situación se representa como:

$$|\text{estado del gato}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{vivo}\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\text{muerto}\rangle. \quad (5)$$

Así la probabilidad de que el gato esté vivo es:

$$p(\text{vivo}) = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 = \frac{1}{2}, \quad (6)$$

y la probabilidad de que esté muerto es:

$$p(\text{muerto}) = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 = \frac{1}{2}. \quad (7)$$

Nótese que la suma de probabilidades es uno puesto que el gato sólo tiene dos posibilidades de estar: vivo o muerto.

B. Posición de una partícula

Otro ejemplo de superposición de estados lo encontramos en las posibles posiciones, dentro de ciertos límites, en las que se encuentra una partícula. El estado de superposición implica que existe una probabilidad distinta de cero de encontrar la partícula dentro de esos límites, se denota de la forma:

$$|\text{posición partícula}\rangle = a_1|\text{posición } x_1\rangle + \dots + a_N|\text{posición } x_N\rangle. \quad (8)$$

La expresión anterior representa una suma de estados posibles, cada uno de ellos contribuyendo de distinta forma al estado total. Se debe cumplir que:

$$\sum_{i=1}^N |a_i|^2 = 1, \quad (9)$$

donde x_1 y x_N son los límites donde se encuentra la partícula.

C. Polarización de fotones

Se asume que un fotón polarizado oblicuamente puede ser visto como estando parcialmente en el estado de polarización paralelo y parcialmente en el estado de polarización perpendicular [17]. Por lo tanto, el estado de polarización oblicuo puede ser considerado como el resultado de algún tipo de proceso de superposición aplicado a los dos estados, paralelo y perpendicular. Esto implica un cierto tipo de vínculo, de relación entre los distintos estados de polarización, un vínculo similar al de haces polarizados en óptica clásica, pero que ahora es aplicado, no a los haces, sino a los estados de polarización de un fotón particular [17]. Este vínculo permite que cualquier estado de polarización sea expresado como una superposición de cualquier par de estados de polarización mutuamente perpendiculares.

D. Estado de Localización

Tomemos de nuevo fotones. Tratemos esta vez con su posición y su momentum en vez de la polarización. Si preparamos un haz monocromático, entonces sabemos algo sobre la localización en el espacio y el momentum de

¹ Estos coeficientes se conocen como amplitudes de probabilidad y en general son números complejos.

los fotones asociados. Sabemos que cada uno de los fotones está en algún sitio del espacio por donde va el haz. Si consideramos el haz formado por un solo fotón y lo hacemos pasar por una pantalla con dos rendijas, debido al fenómeno de interferencia, es necesario pensar la localización del fotón como superposición de las localizaciones de cada una de las dos rendijas, es decir, el estado de localización del fotón es la superposición de los estados de localización de las rendijas:

$$|\text{trayectoria del fotón}\rangle = a_1|\text{rendija 1}\rangle + a_2|\text{rendija 2}\rangle. \quad (10)$$

Asumir el estado de localización de esta forma permite reproducir los patrones de interferencia al otro lado de la pantalla [1].

E. Estado de espín

El estado de espín debe ser pensado como una magnitud n -dimensional según el sistema microscópico. Si una partícula es de espín $1/2$, el espacio de estados corresponde a un espacio vectorial 2-dimensional. Si es de espín 1, el espacio de estados correspondiente es 3-dimensional. Si es de espín $3/2$ el espacio de estados correspondiente es 4-dimensional, etc. [17].

V. SOBRE LA INTUICIÓN QUE EXIGE LA TEORÍA CUÁNTICA

Los ejemplos mostrados anteriormente se pueden sintetizar diciendo que un sistema cuántico es descrito por un vector de estado, el cual puede ser expandido en una superposición de estados particulares (auto-estados) de algún observable,

$$|\psi\rangle = \sum_{i=1}^N c_i |\psi_i\rangle, \quad (11)$$

donde N representa la dimensionalidad del espacio de estados y donde los coeficientes c_i son amplitudes de probabilidad. La probabilidad de que un observador (medidor de un atributo) encuentre al sistema en un estado ψ_i , está dada por $|c_i|^2$.

La característica básica del principio de superposición de la teoría cuántica es que las amplitudes de probabilidad puedan interferir y esta característica no tiene análogo clásico [12]. Es esta característica la que genera una gran cantidad de fenomenología novedosa: estados entrelazados, teleportación de estados, criptografía cuántica, computación e información cuántica, etc. [18].

El acostumbrarse a pensar en superponer amplitudes de probabilidad (posibilidades de estar) nos ayuda a apropiarnos de la nueva idea propuesta por la teoría cuántica. El considerar que algo es posible si se ajusta con un modelo explicativo coherente es un recurso que exige la teoría cuántica al pensamiento. Por ejemplo, el espín se hace posible gracias a que la teoría del momento angular

(modelo explicativo) lo engloba, es decir, el espín es considerado como una clase de momento angular [19].

Desde el punto de vista cognitivo este recurso se convierte en una herramienta que trasciende el uso de imágenes sustancialistas, puesto que, aunque las imágenes ayudan a familiarizarnos con una determinada teoría no son necesarias para la coherencia de ésta [1,7,16].

Es importante tener en cuenta que para lograr llegar al nivel de abstracción que exige la teoría cuántica es necesario además de ampliar la noción de imagen, cambiar el concepto de intuición [20]. Ahora la intuición debe complementarse con las representaciones matemáticas del mundo microscópico [6,21].

La intuición es la capacidad que tenemos de predecir lo que va a suceder y se ajusta a nuestra percepción sensorial [22]. La teoría cuántica trabaja a una escala microscópica que no percibimos directamente a través de nuestros sentidos, por lo tanto no es posible dar una predicción de lo que sucederá solo con la observación del sistema, por esto se dice que es anti-intuitiva. Desarrollar intuición en mecánica cuántica no es pretender poder observar directamente a esta escala atómica, y así dar predicciones, la idea es reformular o ampliar el concepto de intuición. Es la noción de probabilidad la que permite interpretar el principio de superposición de estados, es por esto que la mecánica cuántica exige otro tipo de intuición: la existencia de un modelo explicativo (por su puesto abstracto) debe ser parte básica de la intuición. La dificultad entonces se va diluyendo si nos acostumbramos a pensar de esta manera.

VI. CONCLUSIONES

Se ha ilustrado, por medio de ejemplos, el principio de superposición clásico. A partir de estos ejemplos se ha logrado abstraer cuatro nociones constitutivas de este principio: individualidad, separabilidad, percepción como un todo y contribución.

Estas nociones se hacen independientes de la naturaleza de las entidades que se superponen y es en este sentido que consideramos que las cuatro nociones estructuran el principio de superposición. Esta estructura permite analizar el principio de superposición en mecánica cuántica. Esto se llevó a cabo realizando las siguientes relaciones: las individualidades con las posibilidades de estar de un sistema (estados del sistema), la separabilidad con la idea de una combinación linealmente independiente de los estados, la percepción como un todo con la definición unívoca de los coeficientes (amplitudes de probabilidad) de los estados en una base determinada (auto-estados), y las contribuciones, con el cuadrado del valor absoluto de las amplitudes de probabilidad.

REFERENCIAS

- [1] Dirac, P. (*The Principles of Quantum Mechanics*. Clarendon Press, 4a. Edición, Oxford, 1958).

- [2] Tipler, P. (*Physics for scientist and engineers*, Reverté, 4a. Edición, Barcelona, 1999).
- [3] Laloë, F., *Do we really understand quantum mechanics? Strange correlations, paradoxes, and theorems*, Am. J. Phys. **69**, 656 (2001).
- [4] Mohrhoff, U., *What quantum mechanics is trying to tell us?*, Am. J. Phys. **68**, 728 (2000).
- [5] Redish, E., *Implications of cognitive studies for teaching physics*, Am. J. Phys. **62**, 796 (1994).
- [6] Bao, L. and Redish, E., *Understanding probabilistic interpretations of physical systems: A prerequisite to learning quantum physics*, Am. J. Phys. **70**, 210 (2002).
- [7] Greca, I. y Moreira, M., *Un Estudio Piloto sobre Representaciones Mentales, Imágenes, Proposiciones y Modelos Mentales respecto al concepto de Campo Electromagnético en alumnos de Física General, estudiantes de postgrado y físicos profesionales* Revista Enseñanza de las Ciencias **16**, 289 (1998).
- [8] Cisneros, C., Martínez-y-Romero, R. P., Nunez-Yepez, H. N. and Salas-Brito, A. L., *Limitations on the superposition principle: superselection rules in non-relativistic quantum mechanics*, Eur. J. Phys. **19**, 237 (1998).
- [9] Lynn, H. and Caponigro, M., *Quantum Formalism: Brief Epistemological Considerations*, e-print [quant-ph/0610228].
- [10] Sengören, S. and Tanel, R. and Kavcar, N., *Drawings and ideas of physics teacher candidates relating to the superposition principle on a continuous rope*, Phys. Educ. **41**, 453 (2006).
- [11] Everett, H., "Relative State" Formulation of Quantum Mechanics", Rev. Mod. Phys. **29**, 454 (1957).
- [12] Newton, R., *What is a state in quantum mechanics?*, Am. J. Phys. **72**, 348 (2004).
- [13] Shapiro, I., *Quantum theory without the superposition principle*, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **16**, 197 (1972).
- [14] French, A. (*Vibraciones y Ondas* Reverté, Barcelona, 1974).
- [15] Nakos, G., Joyner, D. (*Álgebra lineal*, International Thomson Editors, Mexico, 1999).
- [16] Redish, E., *Implications of cognitive studies for teaching physics*, Am. J. Phys. **69**, 796 (1994).
- [17] Lévy-Leblond, J. and Balibar, F. (*Quantics*, North-Holland, 1990).
- [18] Zeilinger, A. Ekert, A. Bouwmeester, D. (*The Physics of Quantum Information*. Springer, 1a. Edición, Germany, 2001).
- [19] Feynman, R. (*Física vol.3*, Pearson Education, Mexico, 1963).
- [20] Keeports, D., *Addressing Physical Intuition—A First-Day Event*, Phys. Teach. **38**, (2000).
- [21] Lévy-Leblond, J. (*Conceptos Contrarios o el Oficio del Científico*, Tusquets, 1a. Edición, España, 2002).
- [22] Singh, C., *When physical intuition fails*, Am. J. Phys. **70**, 1103 (2002).

Bandas de energía, origen y consecuencias



I. Rojas^{1,2}, César Mora¹ y H. J. Herrera Suárez^{1,3}

¹CICATA-IPN Av. Legaría No. 694. Col. Irrigación, CP 11,500, México D. F.

²Universidad Tecnológica de Querétaro, Ave. Pie de la Cuesta S7N, Col. San Pedrito Peñuelas, Querétaro Qro., México.

³Universidad de Ibagué – Coruniversitaria, Carrera 22, Calle 67, Barrio Ambalá, Colombia.

E-mail: cmoral@ipn.mx

(Recibido el 6 de Julio de 2007; aceptado el 10 de Agosto de 2007)

Resumen

En un material cristalino existen bandas de energía donde los electrones se mueven libremente, es decir, estas bandas son el resultado de la superposición de los niveles atómicos de los átomos que constituyen un cristal. Cuando los átomos individuales se acercan para formar el cristal, se colocan en un arreglo periódico formando una red cristalina, donde sus niveles de energía atómicos interactúan entre sí, dando lugar a bandas de energía. Una ilustración simple de los orígenes atómicos de algunos anchos de banda de energía prohibida (*band gaps*) se dan con un ejemplo de una cadena lineal de átomos en los cuales cada átomo está asociado con dos estados. Los orígenes químicos del *band gap* se indican considerando una aleación binaria AB. Se describe la clasificación de los metales y aislantes de acuerdo a la teoría de bandas y el concepto de enlace metálico se introduce como un enlace covalente insaturado.

Palabras clave: Mecánica cuántica, bandas de energía, estructura de bandas.

Abstract

In crystalline material exists energy *band gaps* where the electrons can move freely, so, these bands are the results of atomic levels superposition that form a crystal. When the individuals' atoms are closing to form a crystal, they take a place in a periodic arrangement forming a crystalline lattice, where their atomic energy levels interact themselves, forming energy *band gaps*. A simple illustration of the atomic origins of some *band gaps* is given with an example of a linear chain of atoms in which each atom is associated with two states. The classification of metals insulates and semi conductors according with the *band gaps* theory is described and the concept of metallic bond is introduced as a unsaturated covalent bond.

Key words: Quantum mechanics, band gaps, bands structure.

PACS: 03.65.-w, 64.40.Kb, 71.20.-b

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Al final del primer Congreso Solvay, en 1911, termina la etapa inicial de la historia de la teoría cuántica, en la que gran parte de la comunidad científica reconoció que en la suposición de Planck había “algo” real. En los trabajos de Einstein por primera vez se aplicaron estas ideas, esencialmente en osciladores armónicos. Las ideas cuánticas no se habían utilizado en otro tipo de sistemas, ni se sabía cómo hacerlo. Sin embargo, las aplicaciones hechas fueron suficientes para concluir que la física clásica era limitada. El problema entonces sería cómo desarrollar una teoría consistente [1].

En 1912, Niels Bohr se unió al grupo de Rutherford en Manchester, Inglaterra. Bohr llegó justo en un momento importante, cuando se investigaban las consecuencias del modelo atómico de Rutherford. Un problema al que de inmediato se dedicó Bohr fue el de la estabilidad del átomo propuesto. Bohr aplicó la física clásica a esta cuestión, dándose cuenta de que se llegaba a una inmensa

contradicción y que la estabilidad del átomo, según el modelo de Rutherford, no podía reconciliarse con los fundamentos de la mecánica de Newton y el electromagnetismo de Maxwell.

En 1913 se inicia la segunda etapa del desarrollo de la física cuántica, al publicar Niels Bohr su notable trabajo sobre la constitución de átomos y moléculas, en el cual aplicó las ideas cuánticas a la estructura del átomo de hidrógeno.

Bohr trabajó con el átomo de hidrógeno, ya que solamente tiene un electrón y encontró los valores de las frecuencias que debería tener la radiación emitida por el electrón. Resultó que estos valores que obtuvo concordaban, con los valores experimentales que se conocían desde hacía mucho tiempo. Además, encontró en términos de la constante de Planck, de la masa y de las cargas eléctricas del electrón, una cantidad que se había obtenido empíricamente, en relación a los espectros de los átomos, que es la llamada constante de Rydberg. Asimismo, Bohr predijo la existencia de otras líneas del

espectro que no caían en la región visible, sino en el ultravioleta extremo y en el infrarrojo extremo. Parte de estas predicciones fueron verificadas experimentalmente por T. Lyman en 1914, otra parte por F. Brackett en 1922 y otra parte más por A. H. Pfund en 1924 [2].

En noviembre de 1924, Louis de Broglie presentó en la Universidad de París su tesis doctoral “Investigaciones sobre la teoría de los cuanta”. Al realizar este trabajo, De Broglie estuvo muy influenciado, entre otras cosas, por el trabajo de Einstein de 1905 sobre los cuantos de radiación (fotones) así como por algunas ideas de su teoría de la relatividad especial.

Hasta ese momento se había aceptado, aunque no entendido muy bien, el carácter dual de la radiación: en ciertas circunstancias la luz se comportaba como onda y en otras, como partícula. L. de Broglie avanzó un paso al llegar a la idea de que, al igual que la luz, la materia también debería tener este comportamiento dual [3].

Posteriormente, Schrödinger demostró que la mecánica ondulatoria y la mecánica de matrices son versiones matemáticas diferentes de una misma teoría, hoy denominada mecánica cuántica. Incluso en el caso del átomo de hidrógeno, formado por sólo dos partículas, ambas interpretaciones matemáticas son muy complejas. El siguiente átomo un poco más complejo (en comparación con el hidrógeno), el de helio, tiene tres partículas, e incluso en el sistema matemático relativamente sencillo de la dinámica clásica, el problema de los tres cuerpos (la descripción de las interacciones mutuas de tres cuerpos distintos) no se puede resolver por completo. Sin embargo, sí es posible calcular los niveles de energía. La elección depende de la conveniencia de la formulación para obtener soluciones aproximadas apropiadas.

Todos estos trabajos de investigación llevados a cabo a principios del siglo pasado han ayudado a desarrollar lo que ahora conocemos como mecánica cuántica, que permite determinar y conocer las características electrónicas de los materiales así como su comportamiento subatómico, esto hace posible entender el por qué los metales son buenos conductores de la electricidad y del calor. Si la banda está parcialmente desocupada es factible la dispersión de electrones a estados desocupados, entonces existe flujo de electrones en el material, que determina el comportamiento de los metales. Si la banda está llena los electrones pasan a través del material, si existen estados desocupados en bandas de energía más altas sólo accesibles por excitación térmica por lo que el material se considera aislante. Un semiconductor es un material que se comporta como conductor o como aislante dependiendo del campo eléctrico en el que se encuentra. La configuración de las últimas bandas de energía son las de mayor interés en la conductividad eléctrica. Si la banda más externa no está completamente llena se denomina banda de conducción, pero si está llena se denomina banda de valencia. La diferencia de energía existente entre el máximo de la banda de valencia y el mínimo de la banda de conducción se le llama “*band gap*” (*E_g*). Así, para que un material pueda conducir electricidad, los electrones de la banda de valencia tienen que “saltar” a la banda de conducción y requieren una energía *E_g* como mínimo, la

cual es del orden de unos cuantos electrón-volts (eV). Un material semiconductor tiene un *band gap* pequeño de alrededor de 1eV, de tal manera que los electrones pueden saltar a la banda de conducción con la energía térmica que pueden recibir de sus alrededores. Al saltar un electrón a la banda de conducción, deja un estado vacío en la banda de valencia que se le denomina “*hueco*”. Los huecos pueden tratarse como partículas con carga igual a la de los electrones, pero positiva. Es por esto que en un semiconductor puede haber flujo de electrones en la banda de conducción y flujo de huecos en la banda de valencia.

La ciencia de materiales en la actualidad busca relacionar las propiedades de estos para determinar las aplicaciones en equipos y dispositivos cada vez más sofisticados y con mejores propiedades, tanto electrónicas como mecánicas. Sabemos que las propiedades de los materiales están determinadas por su comportamiento electrónico desde el punto de vista atómico, y que dependen de su arreglo atómico cristalino. Desde los años 20's a 30's, surgió una nueva forma de la estructura electrónica de los materiales, más bien desde un punto de vista químico que del físico, aunque mucho de este trabajo ha sido realizado por los físicos. Para entender las propiedades de los materiales cristalinos y no cristalinos debemos tomar en cuenta diferentes puntos de vista y colocarnos en un problema del espacio real. Estas ideas no son nuevas, ya que en los años 20's y 30's del siglo XX, cuando se empezó a analizarse más a fondo la teoría de bandas en los sólidos, los físicos del estado sólido, y también los químicos trataron de entender las propiedades de los sólidos en términos de enlaces individuales. La teoría moderna nos permite analizar ya sea el punto de vista del espacio real o del espacio recíproco. El objetivo es entender que existe una relación entre la estructura de bandas de energía y el comportamiento atómico local y las propiedades electrónicas.

En la sección II mencionamos cómo se forman las bandas de energía considerando un modelo simple asociado a los estados en que se encuentra un átomo de acuerdo a su número cuántico. En la sección III, se muestra un modelo del origen de las bandas de energía considerando una cadena lineal de átomos donde se asocia un átomo a dos estados de energía, así como los principios químicos de las bandas de energía considerando una aleación binaria *AB*. En la sección IV, se muestra un análisis de la variación que sufren las bandas de energía en un semiconductor en función de la temperatura y que provocan una expansión en la celda cristalina del semiconductor. En la sección V se hace un análisis general de los orígenes de las bandas de energía y qué información nos proporciona las características que posee un material en relación a las bandas de energía. Finalmente, en la sección VI mostramos nuestras conclusiones.

II. FORMACIÓN DE LAS BANDAS DE ENERGÍA

El análisis de la formación de bandas basado en un modelo simple considerando únicamente la banda *s*, donde asociamos un estado *s* con cada átomo, nos lleva a una

banda de estados. El modelo de la banda s es un simplificación burda, ya que un átomo está asociado con más de un estado s . Dependiendo del valor del número cuántico principal puede haber estados s, p, d, \dots dentro de cada capa del átomo. A energías más altas, hay un continuo de estados de energía del electrón libre, los cuales lejos del átomo se representan por ondas planas. En este artículo nos enfocaremos sólo a los electrones de valencia. En el estado sólido, a presiones normales, los estados permanecen enlazados al núcleo y por lo tanto no elevan las bandas de energía. Se obtiene que existe una banda para cada estado de valencia en una celda unitaria de un cristal. Por lo tanto, si hay N_a átomos en la celda unitaria y N_v estados de valencia asociados a cada átomo, entonces hay $N_a N_v$ bandas. Los *gaps* de las bandas son rangos de energía en la cual no caen las bandas de energía, estos no sólo son importantes por las propiedades eléctricas y ópticas que comunican a los materiales, sino también pueden estabilizar un cristal en una estructura en particular [4].

La figura 1 muestra los cambios en los niveles de energía del electrón de un conjunto infinito de átomos en un cristal, así como el parámetro de red es reducido de $1 m$ a 1 \AA . Cuando los átomos están separados $1 m$, los dos estados de valencia de cada átomo no interactúan con estados de otros átomos (ejemplo, la probabilidad de tunelaje del electrón entre los átomos es despreciable).

Cuando los átomos llegan a estar dentro del rango de tunelaje uno con respecto al otro (del orden de 10 \AA), hay una probabilidad finita de que un electrón brinque de un átomo al siguiente y se produzca la formación de la banda. El ancho de la misma se incrementa en proporción al aumento de la probabilidad de tunelaje, el cual está determinado por la integral de salto. Eventualmente, en algunas densidades críticas, las bandas de energía empiezan a traslaparse y aumentan la densidad que amplía las bandas y provoca un mayor traslape de estas. Sin embargo, si la densidad de equilibrio del material está debajo de la densidad crítica, entonces hay un *gap* de energía entre las bandas.

Los dos estados atómicos de la figura 1, podrían tener dos orígenes distintos. La primera posibilidad es que son dos estados atómicos en el mismo átomo, por ejemplo los estados $1s$ y $2s$. La segunda posibilidad es que se refiera a estados en dos átomos distintos en la celda de un cristal, por ejemplo un estado en un átomo A y un estado en un átomo B en una aleación AB . Estas posibilidades son consistentes con el panorama de que el *band gap* tiene un origen atómico o químico. Una posible característica engañosa de la figura 1 es el hecho de que las dos bandas de estado provienen de dos estados atómicos a la izquierda. Podríamos pensar que los estados en la banda superior están formados a partir de combinaciones lineales de los estados atómicos superiores en átomos a través del cristal. Esto es incorrecto, ya que las bandas son mezclas de estados atómicos. Los estados moleculares son funciones de Bloch no de estados atómicos puros sino de combinaciones de estados atómicos llamados “*híbridos*”, esta mezcla de estados atómicos es llamada “*Hibridación*”.

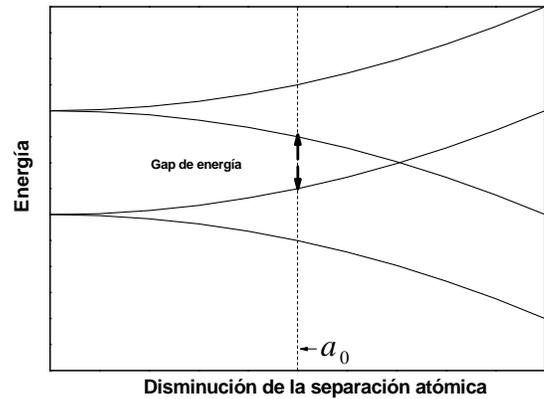


FIGURA 1. Se muestra los dos niveles de energía en cada átomo de un cristal infinito ensanchado en las bandas, tanto que el parámetro de red es reducido a partir de un valor muy grande, donde el salto del electrón no ocurre, al valor a_0 , perteneciendo al cristal en equilibrio. En a_0 , las bandas de energía están separadas por un *gap*.

III. CADENAS INFINITAS

Consideremos una cadena lineal infinita de átomos con espaciamiento atómico a y condiciones periódicas de frontera aplicadas en los extremos de la cadena. Cada átomo está asociado a dos estados $|1\rangle$ y $|2\rangle$.

Los elementos de la matriz Hamiltoniana son todos cero excepto para las integrales de salto entre átomos vecinos y los elementos de la matriz localizados. Si ε_1 y ε_2 están además en los elementos de matriz localizados en $\langle 1|H|1\rangle$ y $\langle 2|H|2\rangle$ con ε_1 y ε_2 , y si $|m,1\rangle$ y $|m,2\rangle$ indican los estados $|1\rangle$ y $|2\rangle$ en un átomo m , entonces las integrales de salto β_1 , β_2 , y β_2 son por lo general diferentes de cero:

$$\begin{aligned} \langle m,1|H|m \pm 1,1\rangle &= \beta_1, \\ \langle m,1|H|m \pm 1,2\rangle &= \beta_{12}, \\ \langle m,2|H|m \pm 1,2\rangle &= \beta_2, \end{aligned} \quad (1)$$

así suponemos que las integrales de salto entre diferentes estados atómicos en átomos vecinos son las mismas. El modelo tiene por lo tanto cinco parámetros ε_1 , ε_2 , β_1 , β_{12} , y β_2 .

Debido a que hay una simetría traslacional podemos aplicar el teorema de Bloch. Sin embargo, ya que hay dos estados en cada sitio atómico, el teorema de Bloch establece una combinación lineal de los estados atómicos:

$$\Psi_k^{(n)} = N^{-\frac{1}{2}} \sum_m e^{ikma} (c_1^{(n)}(k)|m,1\rangle + c_2^{(n)}(k)|m,2\rangle), \quad (2)$$

aquí $(c_1^{(n)}(k)|m,1\rangle + c_2^{(n)}(k)|m,2\rangle)$ es el estado híbrido, por ejemplo de una combinación lineal de estados

atómicos en un átomo m . Para asegurar que éste estado híbrido está normalizado requerimos que:

$$|c_1^{(n)}(k)|^2 + |c_2^{(n)}(k)|^2 = 1. \quad (3)$$

en donde (n) anticipa el hecho que en cada k habrá dos eigenestados los cuales deberán etiquetarse con $n=1$ y $n=2$. n es llamada el índice de la banda. Así, los números cuánticos para los eigenestados del sistema son el vector de onda k y el índice de banda n . La suma en la Ec. (2) de todos los sitios atómicos m y el factor $N^{-1/2}$ es para normalizar el estado de Boch, donde N es el número (infinito) de sitios atómicos de la cadena.

La ecuación de Schrödinger puede ser escrita como

$$H|\Psi_k^{(n)}\rangle = E|\Psi_k^{(n)}\rangle, \quad (4)$$

sustituyendo la Ec. (2) para en la Ec. (4) tenemos:

$$\sum_m e^{ikma} (c_1^{(n)}(k)H|m,1\rangle + c_2^{(n)}(k)H|m,2\rangle) = E_k^{(n)} \sum_m e^{ikma} (c_1^{(n)}(k)|m,1\rangle + c_2^{(n)}(k)|m,2\rangle), \quad (5)$$

proyectando la Ec. (5) sobre los estados $|0,1\rangle$, y multiplicando la izquierda por $\langle 0,1|$ tenemos que satisface la ecuación de Euler:

$$0 = (\varepsilon_1 + 2\beta_1 \cos(ka) - E_k^{(n)})c_1^{(n)} + 2\beta_{12} \cos(ka)c_2^{(n)}, \quad (6)$$

similarmente, proyectando la Ec. (5) sobre $|0,2\rangle$, multiplicando a la izquierda por tenemos:

$$0 = 2\beta_{12} \cos(ka)c_1^{(n)} + (\varepsilon_2 + 2\beta_2 \cos(ka) - E_k^{(n)})c_2^{(n)}, \quad (7)$$

las Ecs. (6) y (7) son ecuaciones seculares. Hay dos ecuaciones debido a que hay dos estados atómicos base en la celda unitaria. Para soluciones no triviales requerimos que el determinante secular sea cero:

$$0 = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 + 2\beta_1 \cos(ka) - E_k^{(n)} & 2\beta_{12} \cos(ka) \\ 2\beta_{12} \cos(ka) & \varepsilon_2 + 2\beta_2 \cos(ka) - E_k^{(n)} \end{vmatrix}.$$

Expandiendo el determinante obtenemos una ecuación cuadrática con las raíces:

$$E_k^{(1)} = \frac{g_1(k) + g_2(k)}{2} - \left(\left(\frac{g_1(k) - g_2(k)}{2} \right)^2 + 4\beta_{12}^2 \cos^2(ka) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

y

$$E_k^{(2)} = \frac{g_1(k) + g_2(k)}{2} + \left(\left(\frac{g_1(k) - g_2(k)}{2} \right)^2 + 4\beta_{12}^2 \cos^2(ka) \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

en donde:

$$g_1(k) = \varepsilon_1 + 2\beta_1 \cos(ka) \quad (10)$$

y

$$g_2(k) = \varepsilon_2 + 2\beta_2 \cos(ka).$$

Estas dos soluciones están graficadas como una función de k en la Fig. 2. Reconocemos a $g_1(k)$ como la estructura de banda para la cadena lineal infinita si hubiera sólo estados $|1\rangle$ asociados con los átomos. Luego, $g_2(k)$ es la estructura de banda para una cadena infinita si solamente hubiera estados $|2\rangle$, asociados con los átomos. En la Fig. 3, la banda inferior $E_k^{(1)}$ cae de $g_1(k)$ y $g_2(k)$, mientras que la banda superior $E_k^{(2)}$ cae arriba de $g_1(k)$ y $g_2(k)$, excepto en $k = \pm\pi/2a$ donde $E_k^{(1)} = g_1(k)$ y $E_k^{(2)} = g_2(k)$.

Por otra parte, observamos que el efecto de los estados acoplados $|1\rangle$ y $|2\rangle$ sobre los átomos adyacentes, a través de β_{12} aumenta la diferencia de energía entre las dos bandas $g_1(k)$ y $g_2(k)$. Este efecto disminuye a medida que la diferencia de energía $|g_1(k) - g_2(k)|$ se incrementa a medida que $|\beta_{12}|$ decrece.

A cualquier valor particular de k hay obviamente un *gap* de energía entre $E_k^{(1)}$ y $E_k^{(2)}$, pero esto no significa que sea un *gap* de energía. Cuando hablamos de un *gap* de energía, significa que hay un rango de energías donde no hay eigenvalores para todos los vectores de onda. Así hay un *gap* en la densidad de estados como una función de la energía, esto se obtiene en la Fig. 3 si el máximo de la banda inferior está por abajo del mínimo de la banda superior, lo cual se alcanza cuando los parámetros ε_1 , ε_2 , β_1 , β_2 y β_{12} , satisfacen una simple desigualdad. Esto se ilustra en la Fig. 3, donde la densidad de estados correspondientes se muestra también a la derecha de la estructura de banda [4]. Así los *band gaps* surgen a partir de los conjuntos base extendiéndose a cada átomo incluyendo estados de energía atómicos más altos.

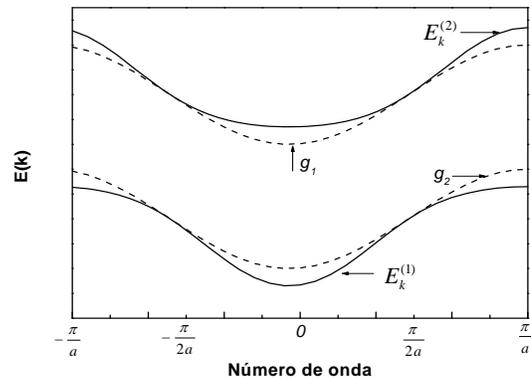


FIGURA 2. Las bandas de energía $E_k^{(1)}$ y $E_k^{(2)}$, dadas por las Ecs. (9) y (10) para un anillo infinito en el cual cada átomo está asociado con dos estados con energías localizadas ε_1 , ε_2 . Las curvas etiquetadas $g_1(k)$ y $g_2(k)$ son las bandas de energía en ausencia de saltos β_{12} entre los estados $|1\rangle$ y $|2\rangle$ sobre átomos adyacentes como se muestra en la Ec. (11). Nótese que es menor que $g_1(k)$ y es mayor que $g_2(k)$ en todos los vectores de onda excepto para $k = \pm\pi/2a$.

Si consideramos una cadena lineal de átomos A y B en una aleación, cada átomo está asociado con un sólo estado, y se obtienen dos bandas de estados, una de enlace y otra de antienlace. El *gap* de energía es la diferencia en energía entre el máximo de estados enlazados y el mínimo de estados no enlazados, la cual es sólo $\varepsilon_A - \varepsilon_B$. En este caso el *band gap* es una consecuencia de la presencia de dos átomos distintos en una celda unitaria.

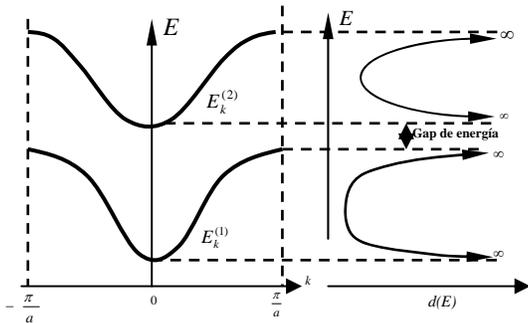


FIGURA 3. A la izquierda vemos la bandas de energía $E_k^{(1)}$ y $E_k^{(2)}$ mostradas en la Fig. 2. A la derecha la densidad de estados correspondientes $d(E)$ está graficada como una función de la energía. Hay un *gap* de energía indirecto entre el máximo de $E_k^{(1)}$ y el mínimo de $E_k^{(2)}$

Para entender el valor del cambio del *gap* de energía, es necesario conocer la densidad de estados y la energía de los orbitales electrónicos. Se requieren simulaciones basadas en la teoría de la densidad funcional (Density Functional Theory) para calcular la función de onda electrónica y su periodicidad. Para esto se puede emplear un software de alta confiabilidad y reputación como el programa de simulación Viena.

IV. BAND GAP EN UNA DIMENSIÓN

Dentro de cada *gap*, la luz es completamente reflejada (Bragg), resultando una fuerte dispersión cerca de las frecuencias críticas del *gap*. Los eigenmodos de las ecuaciones de Maxwell en la vecindad del *gap*, son también modificados. En lugar de las ondas planas usuales, los eigenmodos llegan a ondas cuasiestáticamente moduladas, con una onda pura permanente se llega a alcanzar exactamente al número de onda para la resonancia. En este caso hay dos posibles ondas permanentes con diferentes fases espaciales.

Estas son familiares en la teoría electrónica del *band-gap*, y tienen la propiedad usual de que una tiene una eigenfrecuencia arriba y la otra abajo, de la frecuencia central del *gap*. La propagación de un campo libre con una frecuencia en la región del *gap* es, claro, prohibido. Sin embargo, en presencia de un medio no lineal, es posible que la propagación pueda ocurrir a un cambio de fase no lineal [6].

Las bandas de energía de semiconductores exhiben grandes cambios con la temperatura a presión constante. Hay dos efectos que contribuyen a estos cambios: el

primero es la expansión térmica de la celda, relacionada al cambio de energías del electrón con el volumen, y el segundo efecto es la renormalización directa de las bandas de energías debido a las interacciones electrón-fonón [7].

La expresión completa del cambio del *gap* E_g con la temperatura es:

$$\left(\frac{\partial E_g}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial E_g}{\partial T}\right)_{\varepsilon_p} + \left(\frac{\partial E_g}{\partial T}\right)_{TE}, \quad (11)$$

en donde

$$\left(\frac{\partial E_g}{\partial T}\right)_{TE} = -3\alpha B \left(\frac{\partial E_g}{\partial p}\right)_T, \quad (12)$$

siendo $\alpha = L^{-1} \left(\frac{\partial L}{\partial T}\right)$ el coeficiente de expansión lineal y

$B = -V \left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T$ el módulo de expansión volumétrica. Los

cambios del *gap* inducidos por la expansión térmica son obtenidos usualmente de valores experimentales de α , B y la variación del *gap* con la presión hidrostática, medida en experimentos a presión alta.

El efecto de la interacción electrón-fonón, por otra parte, implica el cálculo de dos tipos de procesos, los términos Debye-Waller (DW) y el Self-Energy (SE). Estos términos surgen de la teoría de perturbaciones hasta un segundo orden y ambos son proporcionales al cuadrado del desplazamiento atómico u , proporcional a T , esto es, a mayor T mayor u y ambos términos DW y SE aumentan. El término DW está relacionado con la segunda derivada del potencial en primer orden de la teoría de perturbaciones y es más fácil de evaluar. El término SE contiene la primera derivada del potencial del cristal (interacción electrón-fonón) y está dado por el segundo orden de la teoría de perturbaciones (emisión y reabsorción de un fonón y viceversa). Para obtener el término SE se tiene que sumar sobre todos los estados intermedios, *i.e.*, se debe llevar a cabo una integración en el espacio k . Algunas veces este término puede despreciarse ya que la corrección DW produce una contribución más importante. Sin embargo, en años recientes ha sido más reconocido que se tiene que incluir ambos tipos de términos para calcular la variación del *gap* con la temperatura [7, 11].

IV. CONCLUSIONES

El estudiar el carácter electrónico de los materiales con el comportamiento químico y atómico, relacionado con las bandas de energía acerca de los orígenes atómicos del *band gap* nos permite clasificar a los materiales de acuerdo a la teoría de bandas en materiales conductores, semiconductores y aislantes.

Podemos cambiar las propiedades de un material variando el ancho de la banda de energía, lo que provoca un cambio en el color de la luz que se producirá cuando los pares electrón-hueco se recombinen. La posibilidad de cambiar el *band gap* de los semiconductores por medio de la variación de las composiciones químicas de compuestos

y aleaciones, ha tenido un impacto impresionante en el desarrollo científico y tecnológico de estos materiales.

La formación de las bandas de energía es importante, ya que nos permite conocer el comportamiento de los materiales desde el punto de vista de sus propiedades electrónicas, lo que nos ayuda a caracterizar y desarrollar nuevos materiales para aplicaciones más específicas, puesto que actualmente el desarrollo tecnológico y científico requiere de un conocimiento más detallado de las propiedades de los materiales modernos que permita aplicaciones más especializadas de éstos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a R. Sánchez, E. Marín y H. Luna por sus comentarios y observaciones a este trabajo. César Mora es becario EDI y COFAA-IPN, H. Herrera Suárez es becario PIFI-IPN y CONACYT, y agradece el apoyo brindado por la Universidad de Ibagué – Coruniversitaria. Este trabajo fue realizado con apoyo del proyecto de investigación SIP-20071481.

REFERENCIAS

- [1] Brown, E. (*Una faceta desconocida de Einstein*. Fondo de Cultura Económica, 2da. Edición, México, 1997).
- [2] Gribbin, J. (*En busca del gato de Schrödinger*, Salvat Editores, Barcelona, 1994).
- [3] Abragam, A., *Mundo Científico* **12**, 952 (1992).
- [4] Sutton, A. P. (*Electronic Structure of Materials*, Clarendon Press-Oxford, New York, 1993).
- [5] He, H. and Drummond, D., *Phys. Rev. E* **54**, 896 (1998).
- [6] Allen, P. B. and Heine, V., *J. Phys. C* **9**, 2305 (1976).
- [7] Allen, P. B. and Cardona, M. *Phys. Rev. B* **27**, 4760 (1983).
- [8] Lautenschlager, P., Allen, P. B. and Cardona, M. *Phys. Rev. B* **31**, 2163 (1985).
- [9] Krishnamurthy, S., Chen, A., Sher, A. and Van Schilfggilde, M., *J. Electronic Matter* **24**, 1121 (1995).
- [10] Olguín, D., Cantarero, A. and Cardona, M. *Phys. Stat. Sol. (b)* **220**, 33 (2000).

Descripción de la evolución del Universo: una presentación para alumnos preuniversitarios



R. García-Salcedo¹ y Claudia Moreno²

¹Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada-Unidad Legaria del Instituto Politécnico Nacional, Legaria #694. Col. Irrigación, CP.11500, México, D. F.

²Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería de la Universidad de Guadalajara, Corregidora No.500, Sector Reforma, CP.44420, Guadalajara, Jal., México.

E-mail: rigarcias@ipn.mx; claudia.moreno@cucei.udg.mx

(Recibido el 10 de julio de 2007; aceptado el 26 de agosto de 2007)

Resumen

Uno de los temas que más atrae la atención de los alumnos preuniversitarios son los relacionados con el Universo. En este trabajo, que está dirigido a los profesores de esos alumnos, se describen las hipótesis fundamentales basadas en las observaciones astronómicas para construir un modelo del Universo. La ecuación de Friedmann, que describe la evolución del Universo, se deduce sin el uso de la teoría de la relatividad general de Einstein. De la misma forma, una ecuación termodinámica que nos ayuda a complementar el estudio de la evolución del Universo se deduce. Finalmente, se dan algunas soluciones a dichas ecuaciones para describir algunas etapas del Universo.

Palabras clave: Ecuación de Friedmann, Expansión del Universo, Física Educativa.

Abstract

One of the subjects that attracts the attention of the high school students are the related with Universe. In this work the fundamental hypotheses based in the astronomical observations are described to construct a Universe model. The Friedmann equation that describes the evolution of the Universe is deduced without the use of the Einstein's general relativity theory. Of the other hand, a thermodynamic equation that helps us to complement the study of the evolution of the Universe is deduced. Finally, some solutions to these equations to describe some stages of the Universe are discussed.

Key words: Friedmann Equation, Expansion of the Universe, Physics Education.

PACS: 01.55.+b, 01.30.-y, 95.10.-a, 98.80.-k

I. INTRODUCCIÓN

El hombre desde la antigüedad, ha sentido la curiosidad por comprender todo lo que le rodea, particularmente, cada vez que miraba el cielo nocturno se preguntaba qué eran aquellos objetos brillantes que se observaban. Los griegos, hace más de veinte siglos, llamaron a estos "puntos" estrellas. También observaron que al unir las estrellas por líneas imaginarias parecían formar figuras que llamaron constelaciones.

¿Por qué las estrellas parecen estar quietas en el Universo? ¿A qué distancia se encuentran? ¿Por qué hay algunas "estrellas" que parecen moverse respecto de la mayoría? ¿De dónde se formó todo eso, incluyendo a la Tierra y al mismo hombre? En pocas palabras, ¿qué es el Universo?, ¿de qué está formado, cómo surgió, y cómo evoluciona?

Muchas civilizaciones antiguas dieron respuesta a varias de estas preguntas y plantearon sus propias concepciones de cómo estaba constituido el Universo y de cómo se había formado [1]. Sin embargo, no fue sino hasta el siglo XX, con la aparición de la teoría de la relatividad de Einstein que se logró hacer un primer

modelo matemático que describe la evolución del Universo que explica muchas observaciones astronómicas, entre otras su expansión y la cantidad de elementos químicos que se encuentran en el Universo actualmente.

La ciencia que estudia el origen y evolución del Universo se conoce como cosmología. El modelo cosmológico más ampliamente aceptado por la comunidad científica es el modelo estándar de la cosmología [2]. Este modelo, basado en la teoría de la relatividad de Einstein, supone al Universo como un "gas" homogéneo en expansión. Las componentes que constituyen este "gas" son una mezcla de radiación (ondas electromagnéticas) y de materia (polvo, cuyos granos serían las galaxias). Sin embargo, alguno de estos componentes ha predominado en ciertas etapas de la evolución del Universo, de tal forma que se habla de una época donde dominó la radiación (Universo temprano) y otra donde dominó la materia (Universo actual).

Recientemente se han hecho revisiones de algunos resultados de la cosmología observacional [3,4], los cuales parecen indicar que la cosmología es aún una ciencia joven y que aún pudieran dejar abiertas las puertas para muchos otros modelos.

El objetivo de este trabajo es deducir, a partir de la teoría Newtoniana, las ecuaciones básicas de la evolución del Universo: la ecuación de Friedmann y la ecuación termodinámica. Asimismo, describir algunas etapas de la evolución del desde su origen (si es que lo tuvo) hasta nuestros días. Todo ello con la finalidad de presentar a alumnos preuniversitarios este tema de una forma simple y clara. Se encuentran trabajos en la literatura donde se hace una presentación similar, sin el uso de la relatividad general [5].

Tipler argumenta a favor de un análisis desde el punto de vista de la mecánica Newtoniana, como el que se presenta aquí, demostrando que ésta última es tan rigurosa como la proveniente de la relatividad general [6].

El presente artículo está organizado de la siguiente manera: En la sección II, se explicarán brevemente algunas consideraciones que se requieren para generar un modelo de Universo en expansión que reproduzca las observaciones astronómicas. En la sección III, se deduce la ecuación dinámica que gobierna la evolución del Universo, sin hacer referencia alguna a la teoría de la relatividad general, debido a su complejidad matemática; sin embargo, se deducirá desde la mecánica Newtoniana. También es necesaria una ecuación termodinámica para completar la descripción por lo que en la Sección IV se obtendrá esta ecuación y se presentan tres soluciones para contenido material en el Universo, correspondientes a distintas épocas de evolución del Universo. Finalmente, en la sección V se dan algunas conclusiones.

II. CONSIDERACIONES BÁSICAS

El modelo estándar de la cosmología, conocido también como el modelo de la gran explosión (“Big Bang”) es uno de los más exitosos para explicar el origen y evolución del Universo [2,7], debido a dos de las observaciones astronómicas fundamentales que favorecen su aceptación:

1. La expansión actual del universo y,
2. La radiación de fondo de tres grados Kelvin (radiación electromagnética observada en todas direcciones del Universo, la cual esta asociada a su temperatura).

Además, este modelo está basado en algunas hipótesis sobre nuestro Universo que describiremos a continuación. Se observa a distancias pequeñas que el Universo no es homogéneo (tienen la misma composición en todas direcciones) ni isotrópico (no existe dirección privilegiada) debido a que cuando observamos por telescopio vemos que existen planetas, estrellas y galaxias de distintas masas en distintas direcciones. Sin embargo, las imágenes tomadas con el Telescopio Espacial Hubble (HST, Hubble Space Telescope) sobre el campo profundo (muy distantes de nuestra galaxia) muestra que el Universo si es homogéneo (Figura 1) a grandes escalas, es decir, a distancias mayores que 100 megaparsec (1 megaparsec equivale a 3.2×10^3 años-luz y un año luz equivale a 9.46×10^{15} m), para mayor detalle revisar capítulo 1 de [6,7]. Por otro lado, las observaciones con el satélite COBE (Cosmic Background Explorer), muestra una isotropía en la radiación cósmica de fondo en el

Universo temprano, lo cual hace evidente también la homogeneidad del Universo (Figura 2). En 1933, el científico Edward Milne nombró a estas hipótesis como el principio cosmológico el cual afirma que no existe un lugar privilegiado en el Universo.

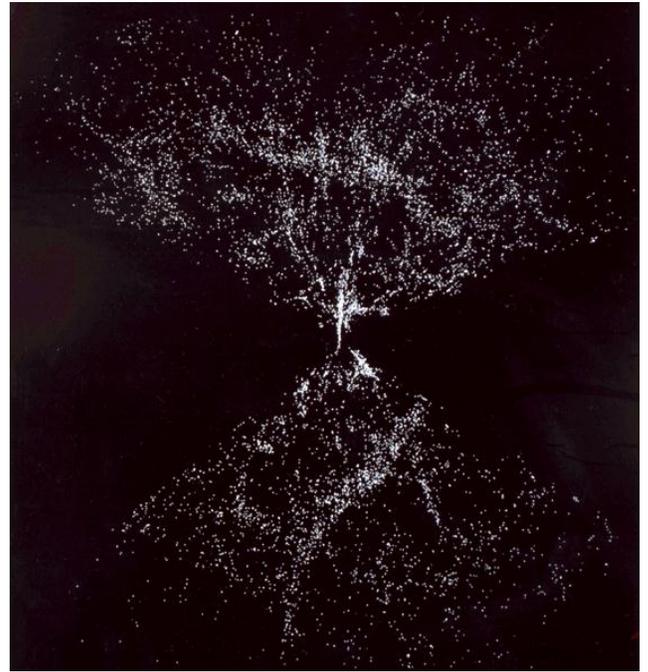


FIGURA 1. Se observa la distribución de las galaxias a distintas distancias, teniendo como centro a la Tierra [15].

Entre 1928 y 1929, Edwin Hubble desde el telescopio de Monte Wilson, determinó la distancia a la galaxia de Andrómeda (la más cercana a la Vía Láctea donde orbita nuestro Sol), 700000 años luz, mediante estrellas de brillo variable conocidas como cefeidas [3]. Asimismo, usando un método conocido como escala de distancias cósmicas [8], encontró las distancias a diferentes nebulosas que resultaron ser extragalácticas. Con esto, concluyó la existencia de “universos islas” situados muy lejos de la Vía Láctea.

Para determinar la velocidad que tiene una galaxia respecto de la Tierra se utiliza su corrimiento al rojo. Esta técnica consiste en observar el cambio que sufre la frecuencia de la luz (radiación electromagnética) emitida por la galaxia que llega a la Tierra. De forma similar en que la frecuencia del sonido de una sirena de una ambulancia cambia cuando se acerca o se aleja de nosotros (efecto Doppler [13]).

Así que Hubble determinó que la velocidad de las galaxias y su distancia estaban correlacionadas de tal forma que mientras más alejadas estuvieran de la Tierra, más rápidamente se alejaban de nosotros. Este resultado se conoce como ley de Hubble [9] lo que significa, que después de mucho tiempo de creencias erróneas, el Universo se expande.

Matemáticamente, la ley de Hubble se enuncia como:

$$v=Hr \quad (1)$$

donde v es la velocidad de recesión (retroceso) de la galaxia, que para velocidades pequeñas está dada por cz (c es la velocidad de la luz y z es el corrimiento al rojo), H es la constante de Hubble y r la distancia a la que se encuentra la galaxia, determinada con métodos astronómicos.

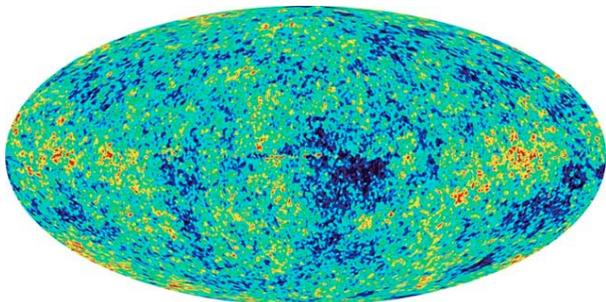


FIGURA 2. Se observa la radiación cósmica de fondo detectada por el satélite WMAP [16].

Hubble encontró el valor actual para la constante H (que se denota como H_0) de 500 km/s/Mpc, es decir, por cada megaparsec de distancia su velocidad de recesión aumenta en 500 km/s. La utilización de diversos métodos de medición de distancias y velocidades ha llevado a que este valor este cambiando [10]. El valor más actual fue proporcionado por el satélite WMAP de $H_0 = 73 \pm 3 \text{ kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$.

Una forma muy sencilla de estimar la edad del Universo es a través del valor actual de la constante de Hubble. Para ello, se considera que la expansión se realiza a velocidad constante, de tal forma que $r = vt$. Combinando esta última expresión con la ecuación (1) se tiene que:

$$t = \frac{1}{H_0}, \quad (2)$$

el cual se conoce como tiempo de Hubble. Sustituyendo el valor actual de la constante de Hubble obtenemos una edad aproximada del Universo de 12 mil millones de años.

III. ECUACIÓN GEOMÉTRICA

En esta sección se deduce una de las ecuaciones que gobiernan la dinámica de nuestro Universo sin recurrir a la teoría de la relatividad general (una nota histórica sobre cómo Einstein llegó a esta teoría puede verse en [11]). El principio básico de la conservación de la energía es el que nos permitirá deducirla. La otra de estas ecuaciones es proporcionada por las propiedades termodinámicas del Universo y se deducirá en la siguiente sección.

Comenzaremos por suponer que el Universo se comporta como un gas en expansión, modelado por una esfera de radio r . Consideremos una galaxia de masa m a una distancia r del centro de la esfera, como si estuviera colocada en la superficie de ésta. La galaxia es

influenciada gravitacionalmente sólo por la masa que se encuentra en el interior de la esfera denotada por $M = \frac{4}{3} \rho \pi r^3$, aquí ρ es la densidad de masa del contenido de la esfera. Así, la energía mecánica total de la galaxia de está dada por

$$E = \frac{1}{2} mv^2 - G \frac{Mm}{r^2}, \quad (3)$$

donde G es la constante de gravitación Universal de Newton. Esta energía debe permanecer constante mientras la esfera considerada se está expandiendo.

De acuerdo a la ley de Hubble, esa galaxia se mueve debido a la expansión, por lo que sustituyendo la velocidad de la ecuación (1) en la ecuación (3), tenemos que:

$$E = \frac{1}{2} mH^2 r^2 - \frac{4}{3} \pi G \rho m, \quad (4)$$

que también se puede expresar como

$$H^2 - \frac{8}{3} \pi G \rho = \frac{2E}{mr^2}. \quad (5)$$

Como el Universo se encuentra en expansión, las distancias entre sus componentes crecen con el tiempo. Así definimos el factor de escala de la expansión $R(t)$ como el factor por el cual se van expandiendo dichas distancias. De esta forma

$$r = \frac{R(t)}{R(t_0)} r_0, \quad (6)$$

es la proporción de crecimiento de r desde el tiempo t hasta el tiempo t_0 , donde r_0 es la distancia medida en t_0 . La velocidad de expansión está dada como

$$v = \frac{dr}{dt} = r_0 \frac{\dot{R}(t)}{R(t)}, \quad (7)$$

donde el punto sobre la letra significa la derivada con respecto al tiempo t .

Usando esta última ecuación, la constante de Hubble puede expresarse como

$$H(t) = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)}, \quad (8)$$

la cual se denomina parámetro de Hubble dado que depende del tiempo t .

Si escribimos la ecuación (5) en términos del parámetro de Hubble, tenemos

$$H(t)^2 = \frac{8}{3} \pi G \rho - \frac{k}{R(t)^2}. \quad (9)$$

Ésta relación recibe el nombre de ecuación de Friedmann y $k = -\frac{2E}{m}$ es una constante relacionada con la energía del Universo en un tiempo determinado.

La diferencia entre la descripción Newtoniana de este trabajo y la descripción relativista es que k describe la geometría del espacio-tiempo (una versión pedagógica sobre cosmología con el uso de la relatividad general puede verse en [12]).

Cuando $E = 0$, la densidad del Universo ρ toma un valor conocido como densidad crítica ρ_c que se obtiene al despejar ρ de la ecuación (5),

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}, \quad (10)$$

esta cantidad puede ser evaluada en la actualidad, sustituyendo H por H_0 , así

$$\rho_{c0} = 1.879 \times h^2 \times 10^{-29} \frac{gr}{cm^3},$$

siendo h la constante de Hubble en unidades de 100 km/s/Mpc. Esta densidad corresponde aproximadamente a 3 átomos de hidrógeno por metro cúbico.

Otra propiedad importante de la ecuación de Friedmann se obtiene cuando escribimos la ecuación (9) como

$$\frac{k}{H^2 R^2} = \frac{8\pi G \rho}{3H^2} - 1 \equiv \Omega - 1, \quad (11)$$

siendo Ω la relación entre la densidad ρ y la densidad crítica ρ_c ,

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}. \quad (12)$$

Debido a que $H^2 R^2 \geq 0$, existe una relación entre el signo de k y el signo de $\Omega - 1$ que podemos resumir como

$$\begin{aligned} k = +1 &\rightarrow \Omega > 1, \\ k = 0 &\rightarrow \Omega = 1, \\ k = -1 &\rightarrow \Omega < 1. \end{aligned} \quad (13)$$

La densidad crítica es una densidad límite que modela geoméricamente nuestro Universo. Si la densidad del Universo es mayor que la densidad crítica, entonces $\Omega > 1$ y, por tanto, se dice que nuestro Universo es cerrado ($k = +1$) ya que la atracción gravitacional hace que la expansión se detenga en algún momento y con ello, el Universo colapse. Si $\Omega = 1$, el Universo se expande, como actualmente se observa, solo que a velocidad constante y así lo hará por siempre (Universo plano, $k = 0$). Finalmente, si $\Omega < 1$, entonces $\rho < \rho_c$ y, por tanto, en este escenario la concentración de materia es poca lo cual hace que la expansión sea acelerada (Universo abierto, $k = -1$).

Para una descripción completa de la evolución del Universo, se hace necesaria una ecuación del comportamiento termodinámico del "gas" en expansión considerado, lo cual se deducirá en la siguiente sección.

IV. ECUACIÓN TERMODINÁMICA

Antes de comenzar a ver la ecuación termodinámica, se debe aclarar que utilizaremos la equivalencia entre la masa y la energía, $E = mc^2$ (donde c es la velocidad de la luz en el vacío), demostrada por Einstein en 1905 como consecuencia de su teoría de la relatividad especial. Consideraremos un sistema de unidades donde $c = 1$.

Cuando un gas que se encuentra confinado en un recipiente esférico se expande, éste ejerce una presión sobre la superficie de la esfera que lo contiene de tal forma que para aumentar el volumen de la esfera una cantidad infinitesimal (muy pequeña) de volumen

$dV = d(R^3)$, con R el radio de la esfera, se requiere de una energía igual al negativo del trabajo ejercido por la presión interna, es decir $-pd(R^3)$. El cambio de energía interna del gas es $dE = dm = d(\rho R^3)$. Por lo que,

$$d(\rho R^3) = -pd(R^3). \quad (14)$$

Reescribiendo la ecuación (14), obtenemos

$$R \frac{d\rho}{dt} + 3(\rho + p) \frac{dR}{dt} = 0. \quad (15)$$

Ahora, combinando las ecuaciones (9) y (15) obtenemos la siguiente expresión

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{4}{3} \pi G (\rho + 3p) R, \quad (16)$$

que se le conoce como ecuación de la aceleración del Universo.

Las ecuaciones (9) y (15), son las ecuaciones que nos permitirán describir la evolución del Universo; sin embargo, podemos darnos cuenta que son dos ecuaciones con tres incógnitas ρ , p y R , todas dependientes del tiempo, así que requerimos de una última ecuación. Ésta es la ecuación de estado que describe al gas, es decir, la relación entre p y ρ .

En la época en que Einstein estudiaba un modelo cosmológico adecuado a las observaciones, no se sabía que el Universo se expandía, creía que era estático, es

decir, su aceleración igual a cero, $\frac{d^2 R}{dt^2} = 0$. Esto significa

que, de acuerdo con la ecuación (16), si la densidad media del Universo es positiva, entonces la presión media sería

negativa, $p_m = -\frac{\rho_m}{3}$. Esto es imposible ya que en general

vemos estrellas y galaxias compuestas de lo que se conoce como polvo y, esta ecuación de estado, corresponde a la de radiación electromagnética [13]. Considerando la densidad de energía positiva, Einstein introdujo la energía de vacío cuya ecuación de estado es $p_v = -\rho_v$. Esta presión

compensaba la expansión que se observaba, de forma que el Universo se observara estático. Este mecanismo es el mismo que cuando intentamos jalar un émbolo de una jeringa sin permitir el paso de aire o algún líquido creamos un vacío en el interior de la jeringa.

Se sabe que para la materia (que actualmente predomina en el Universo) conocida como polvo, la ecuación de estado corresponde a la de un gas ideal, ya que no hay interacción entre sus partículas, es decir, $p_m = 0$. Si sustituimos este valor de la presión en (14), vemos que la energía del interior de una esfera no cambia cuando ésta se expande, solo se distribuye en su interior.

Como hemos visto, en general tenemos una ecuación de estado para el contenido del Universo en una forma simple

$$p = \omega \rho, \quad (17)$$

donde ω es una constante independiente del tiempo. Si sustituimos la ecuación (17) en (15) obtenemos

$$-3(1+\omega)\frac{d\rho}{dt}=\frac{\dot{R}}{R}, \quad (18)$$

e integrando en ambos lados, la densidad de energía evoluciona como

$$\rho \propto R(t)e^{-3(1+\omega)}. \quad (19)$$

De esta forma, la densidad como función del factor de escala se expresa como

$$\begin{aligned} p = \frac{1}{3}\rho &\rightarrow \rho \propto R^{-4}, \\ p = 0 &\rightarrow \rho \propto R^{-3}, \\ p = -\rho &\rightarrow \rho = \text{constante}, \end{aligned} \quad (20)$$

para radiación electromagnética, materia y energía de vacío, respectivamente.

La ecuación de Friedmann (9) la podemos escribir, sin pérdida de generalidad como

$$\dot{R}(t)^2 \propto \rho R(t)^2. \quad (21)$$

Al sustituir las densidades obtenidas en la ecuación (20) tenemos que la dependencia del factor de escala y la densidad como función de t son

$$\begin{aligned} R \propto t^{1/2} &\rightarrow \rho \propto t^{-2}, \\ R \propto t^{3/2} &\rightarrow \rho \propto t^{-2}, \\ R \propto e^{Ht} &\rightarrow \rho = \text{constante}, \end{aligned} \quad (22)$$

para radiación, materia y energía de vacío, respectivamente.

Esto último nos dice que en el caso de Universo dominado por radiación o materia o, quizá, una combinación de ambos, la densidad tiene una singularidad al tiempo cero, es decir, la densidad de energía es infinita en el famoso "Big Bang" o gran explosión, y conforme se va expandiendo esa energía se va distribuyendo a lo largo del Universo. Como un ejercicio para el lector, se pide encontrar las expresiones de la temperatura del Universo como función del tiempo y comprobar que mientras el Universo se expande (tiempo cada vez más grande) su temperatura va disminuyendo.

V. CONCLUSIONES

Aunque todavía hace falta mucho en la descripción de nuestro Universo, en este trabajo se han explicado las consideraciones básicas en las que se debería basar cualquier modelo que pretenda describir las actuales observaciones astronómicas.

Desde la mecánica Newtoniana, se ha deducido una ecuación que nos permite conocer la evolución del Universo (Ecuación de Friedmann. Estrictamente hablando esta ecuación se debe deducir formalmente de la teoría de la relatividad general de Einstein; sin embargo, la diferencia entre deducirla como se hizo en este trabajo y la relativista, es que no se tiene, de entrada, la interpretación de la energía como curvatura de un espacio-tiempo, lo cual es muy evidente en la teoría de Einstein [12,14].

También de forma muy simple se dedujo la ecuación termodinámica que gobierna el Universo, considerando tres tipos principales de formas de energía que pudiera contener: radiación, materia y de vacío.

Finalmente, mediante la resolución de las ecuaciones, se obtuvo la evolución del factor de escala, por tanto, de la densidad de energía como función del tiempo, con lo que se pudo entender que al tiempo $t=0$ existió una singularidad en donde dicha energía era infinita, en el caso de materia o radiación y constante si se tuviera siempre energía de vacío.

Aún quedan muchas preguntas por resolver, falta hacer una descripción más precisa del Universo; sin embargo, lo que hemos visto hasta aquí, son las ecuaciones básicas mediante las cuales, nosotros podríamos sacar más conclusiones acerca de la evolución de nuestro Universo.

Esperamos que estas notas, sean comprensibles para alumnos que hayan concluido una formación preuniversitaria y que esta forma de explicar la evolución del Universo los invite a seguir estudiando más en este apasionante tema.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a los árbitros por sus útiles comentarios para la mejora de este manuscrito. RGS agradece a Lorena Ramírez por las útiles discusiones sobre el tema. Agradecemos a SNI-CONACyT (México). Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto CONACyT J-49924.

REFERENCIAS

- [1] Torres, J., García-Salcedo, R. y Agüero, M. A., *Astronomía, gravitación y modelos cosmológicos*, CIENCIA ergo sum, **11-2**, 191 (2004).
- [2] Peebles, P. J. E. (*Physical Cosmology*, Princeton University Press, Princeton, 1971); Weinberg, S. (*Gravitation and Cosmology*, John Wiley & Sons, New York, 1972); Zeldovich, Y. B. and Novikov, I. D. (*Relativistic Astrophysics: The Structure and Evolution of the Universe*, Chicago University Press, Cambridge, 1983); Islam, J. N. (*An Introduction to Mathematical Cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992).
- [3] López-Corredoira, M., *Observational Cosmology: caveats and open questions in the standard model*, *Recent Res.*, *Devel. Astronomy & Astrophys* **1**, 561 (2003).
- [4] Reid, D. D., Kittell, D.W., Arsznov, E. E. and Thompson, G. B., *The picture of our universe: A view from modern cosmology*, [arXiv:astro-ph/0209504v2](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0209504v2), (2002).
- [5] Jordan, T., *Cosmology calculations almost without general relativity*, *Am. J. Phys.* **73**, 653-662 (2005); Visser, M., *Gen. Rel. Grav.* **37**, 1541-1548 (2005); Nemiroff, R.J. and Patla B., *Adventures in Friedmann Cosmology: An Educationally Detailed Expansion of the Cosmological Friedmann Equations*, [arXiv:astro-ph/0703739v1](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0703739v1), (2007); Akridge, R., *A simple cosmology: General relativity not required*, *Am. J. Phys.* **62**, 195-200 (2001); Lemons, D. S., *A newtonian cosmology Newton would understand*, *Am. J. Phys.* **56**, 502-504 (1988).

- [6] Tipler, F. J., *Rigorous Newtonian cosmology*, Am. J. Phys. **64**, 1311-1315 (1996).
- [7] Kolb, E. and Turner, M. (*The Early Universe*, Addison-Wesley P. Co., U.S.A., 1990).
- [8] <http://www.oarval.org/cosmyardsp.htm>, visitada el 9 de agosto de 2007.
- [9] Hubble, E., *Proceedings de la Academia Nacional de Ciencias de EEUU* **15-3**, 68-173 (1929).
- [10] Van Leeuwen, F., Feast, M. W., Whitelock, P.A. and Laney, C.D., *Cepheid Parallaxes and the Hubble Constant*, [astro-ph/arXiv:0705.1592] (2007).
- [11] Sauer, T. *Albert Einstein's 1916 Review Article on General Relativity*, [arXiv:physics/0405066v1](https://arxiv.org/abs/physics/0405066v1), (2004).
- [12] Ureña-López, L.A., *Unveiling the dynamics of the universe*, [arXiv:physics/0609181v1](https://arxiv.org/abs/physics/0609181v1), (2006).
- [13] Resnick, R., Halliday, D. and Krane, K. (*Física*, CECSA, México D.F. , 1998).
- [14] Sales Lima, J. A., *Note on solving for the dynamics of the Universe*, Am. J. Phys. **69**, 1245-1247 (2001).
- [15] <http://www.udel.edu/mvb/PS146htm/146noov.html> imagen tomada el 9 de agosto de 2007.
- [16] http://apod.nasa.gov/apod/image/0302/sky_wmap.jpg, imagen tomada el 9 de agosto de 2007.

Francisco Javier Estrada, el físico mexicano más notable y olvidado del siglo XIX



J. R. Martínez^{1,2}

¹Facultad de Ciencias y Departamento Físico-Matemático, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Álvaro Obregón 64, 78000 San Luis Potosí, S. L. P., México.

²Museo Casa de la Ciencia y el Juego, Madero 446, Centro Histórico, 78000 San Luis Potosí, S.L. P., México.

E-mail: flash@ciencias.uaslp.mx; flash@galia.fc.uaslp.mx

(Recibido el 9 de agosto de 2007; aceptado el 28 de agosto de 2007)

Resumen

Las importantes y abundantes contribuciones a la física y en especial al electromagnetismo de Francisco Javier Estrada, muchas de ellas desconocidas, lo colocan no sólo como el primer electricista mexicano, como fue conocido años después, sino como el físico mexicano más notable del siglo XIX. Estrada logró contribuir de manera importante en la formación científica de personalidades que, dedicándose posteriormente a la medicina, a la ingeniería, a la farmacia y a la química, tuvieron un destacado protagonismo científico dictando el carácter intelectual que caracterizó al San Luis de fines del siglo XIX y comienzos del siglo XX. En el presente trabajo nos centraremos en la figura y aportaciones que a la física realizó Francisco Javier Estrada Murguía, y adelantaremos algunos apuntes a la enseñanza de la física en cuanto a sus actividades en la cátedra de física del Instituto Científico y Literario de San Luis Potosí. A fin de proporcionar datos e impresiones de la comunidad intelectual, científica y popular de la época reproducimos en el texto las notas aparecidas en los periódicos de la época referentes al trabajo, personalidad y aportaciones de Francisco J. Estrada.

Palabras clave: Historia de la Ciencia, Tributo a Personaje, Construcción de Equipos.

Abstract

Francisco Javier Estrada is known as the first Mexican electrician due to his important, relevant and great quantity contributions to the physics in particular to electromagnetism. His work situates him as the main Mexican physicist of the nineteenth century. The scientific formation of people that contributed to medicine, engineering, chemistry and pharmacy, fact that characterizes the intellectuality of the end of nineteenth century and beginning of twenty century in the city of San Luis, was educated by Estrada. In this work, we focus on the contributions to the physics of Francisco Javier Estrada and we give details about the teaching of physics as titular in the cathedra of physics in the Scientific and Literary Institute of San Luis Potosí. In order to give dates and opinions of the intellectual, scientific and popular community, we reproduce journalistic notes about his work, contributions and personality of Francisco J. Estrada.

Key words: History of Sciences, Biographies, Construction of devices.

PACS: 01.65.+g, 01.60.+q, 07.07.-a

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

En 1868, ante la salida de las tropas francesas de San Luis Potosí, al triunfo de la República, se reinstauró el Instituto Científico y Literario de San Luis Potosí, en el edificio que cuatro años antes había sido ocupado por el ejército francés, edificio que fuera el Colegio Guadalupano Josefino años atrás. Con la reinstauración del Instituto se creó la cátedra de física, misma que fue encargada a un joven potosino que recién se graduaba en Farmacia en la Ciudad de México y que había mostrado dotes interesantes para el trabajo práctico; había realizado estudios de física en la Escuela Nacional de Medicina. El joven farmacéutico comenzó a adentrarse en los intrincados temas de física y en poco tiempo se convirtió, no sólo en un excelente profesor de física, sino en uno de los físicos mexicanos

más brillantes de la época, y comenzó a ser conocido como el primer electricista mexicano.

El rescate de su trabajo brindará importantes contribuciones al estudio de la historia de la física en México y particularmente a la enseñanza de la física. El joven Estrada logró contribuir de manera importante en la formación científica de personalidades que, dedicándose posteriormente a la medicina, a la ingeniería y a la misma farmacia, carreras que comenzaron a ofrecerse al final de la segunda mitad del siglo XIX en el Instituto Científico y Literario de San Luis, tuvieron un destacado protagonismo científico dictando el carácter intelectual que caracterizó al San Luis de fines del siglo XIX y comienzos del siglo XX.

El conocer cómo se realizaban las experiencias y demostraciones en física y qué tipo de contenidos se trataban hace más de cien años, resulta de vital

importancia tanto para la historia de la ciencia como para su didáctica. En esa época, como tal, no existían físicos de formación, habría que recordar que a mediados del siglo XX comenzaron a crearse las carreras de física y que en particular en San Luis Potosí en 1956 se creó la tercera escuela de física en el país.

Por otro lado, en las instituciones llamadas científicas, prácticamente no se realizaba trabajo de investigación científica. En tales condiciones, la práctica de la física desde el México colonial fue esporádica y resultado de las inquietudes individuales de algunas mentes lúcidas [1]. Especial mención merece la fundación del Real Seminario de Minería en 1792, que fue la primera escuela técnica establecida en el Nuevo Mundo; en ella se instalaron los primeros laboratorios científicos modernos de México, de física, de química y de mineralogía principalmente, y se proporcionaron facilidades para la realización de trabajos de investigación experimental. A uno de sus catedráticos, Francisco Antonio Bataller y Ros, se debe la redacción en 1802 del primer texto escolar de física mexicano, *Principios de física matemática y experimental*.

En el presente artículo nos centraremos en la figura y aportaciones que a la física realizó Francisco Javier Estrada Murguía, nuestro farmacéutico en cuestión y adelantaremos algunos apuntes a la enseñanza de la física en cuanto a sus actividades en la cátedra de física del Instituto Científico y Literario de San Luis Potosí. Por ejemplo, del material revisado en cuanto a los instrumentos del gabinete de física del siglo XIX, que formó el propio Estrada, podemos encontrar que la enseñanza de la física se centraba en cuestiones experimentales, la enseñanza era explicativa y descriptiva y menos teórica y matemática que en la actualidad.

A fin de proporcionar datos e impresiones de la comunidad intelectual, científica y popular de la época reproducimos en el texto las notas aparecidas en los periódicos de la época referentes al trabajo, personalidad y aportaciones de Francisco J. Estrada, hijo.

II. DE FARMACÉUTICO A FÍSICO

Francisco Javier Estrada nació el 11 de febrero de 1838, realizó sus primeros estudios en San Luis Potosí, para posteriormente trasladarse a proseguirlos a la Ciudad de México; en 1854, a los 16 años, ingresa al Colegio de San Ildefonso y cursa el primer año de bachillerato. Posteriormente se inscribe en la carrera de farmacia. De pequeño, Estrada concurrió a la escuela principal Lancasteriana en el año 1846 en que se hacía cargo de la misma el competente profesor Don Pedro Vallejo [2].

Veintidós años contaba el joven Estrada, en 1860, cuando daba cima a sus estudios en la carrera de farmacia, faltándole tan sólo el examen recepcional para titularse de Profesor en dicha carrera. En noviembre de ese año lo recibe su ciudad natal con sus calles henchidas de silencio y con su pétreo e inmutable fisonomía. En los primeros meses de 1861 se titula Estrada de farmacéutico.

Al terminar sus estudios de Farmacia en la Escuela Nacional de Medicina en la ciudad de México en el año de

1861, regresó a San Luis y se hizo cargo de una farmacia de otro ilustre personaje de la ciencia, Florencio Cabrera, la Botica de El Refugio. Luego de trabajar durante un tiempo como encargado de la botica Estrada se apasiona por la física y muestra aptitudes para el trabajo experimental y práctico. Los encargados de la reapertura del Instituto no dudaron en nombrar a Estrada como titular de la cátedra de física.

Francisco Javier Estrada recién titulado como farmacéutico presencia la llegada a San Luis de las primeras tropas imperialistas, al finalizar el año de 1863. Con tal motivo era ocupado el edificio del Instituto para cuartel y hospital de las tropas francesas. Sufre la casa de estudios una clausura por tres años. Pero con el advenimiento de la República en 1867, se trató de fundar planteles de educación, organizándose entonces la reapertura del Instituto. Entre las cátedras que ofrecía el nuevo Instituto se encontraba la cátedra de física.

En 1868 Estrada se hace cargo de la cátedra de física. A partir del año en que asume la cátedra, es cuando empiezan a aparecer en diarios y revistas especializadas los primeros trabajos, estudios, artículos científicos e invenciones suscritos por Estrada. Las primeras concepciones sobre electricidad, aunque no alcanzaron el éxito deseado según él lo manifestó con ingenua sinceridad, fueron sin embargo bastante notables y llevaron grabados el sello de originalidad que es propia de los grandes talentos superiores, cuyas obras, aunque no responden siempre al resultado que se busca, dejan generalmente abierta una posibilidad que puede conducir, con el tiempo, a la obtención de verdaderos y sólidos principios.

No sólo teorizaba en la cátedra, sino que se preocupó de dotarla de un surtido número de aparatos físicos, lo cual se constata al ver que en el año de 1871, Estrada gestionaba ante el gobierno local la traída de Europa de 28 instrumentos y aparatos para dotar el Gabinete de Física, además de que él mismo construyó 16 instrumentos para el mismo gabinete. Gestiones encaminadas a tal fin realiza años más tarde, (1878), ante el Sr. Gral. Díez Gutiérrez, Gobernador del Estado de San Luis Potosí, logrando que se hiciese un pedido a París de nuevos aparatos e instrumentos para el referido Gabinete de Física.

El telégrafo se convertía en el medio de comunicación, Estrada no tardó en estar trabajando en variaciones a los sistemas de transmisión, su habilidad práctica le permitió familiarizarse con la electricidad y en poco tiempo montaba su propio laboratorio en donde construiría una gran variedad de aparatos y mejoras a aparatos de uso común.

Está reportado que en 1868 recién abierto el Instituto Científico y Literario de San Luis Potosí, Estrada desarrolló una máquina dinamo-eléctrica, o dínamo que se hizo funcionar como motor eléctrico, delante de un concurso de personas respetables de la ciudad, el día 20 de agosto de 1868 [3,4,5,6,7,8,9]. Esta máquina se mandó construir a la casa de Breguet, en Francia, en 1869, remitiéndose dos veces los dibujos y explicaciones; pero en ningún caso se obtuvo contestación. Más tarde apareció en la exposición de Viena, en 1873, la misma máquina con

el nombre de dinamo eléctrico de Gramme, y con sólo la diferencia de que ésta era de eje horizontal y el modelo que se envió era de eje vertical. De ahí se repartió la invención a todos los países civilizados, haciendo la fortuna de muchos fabricantes.

Irónicamente, años más tarde, el Gobierno de San Luis Potosí mandaba traer una máquina de Gramme para el alumbrado eléctrico, misma que en su momento fue donada al gabinete de física del Instituto Científico de San Luis a petición del propio Francisco Estrada, según se menciona en el informe anual de 1885 de la Junta de profesores del Instituto y que transcribe el periódico *La Unión Democrática* [10].

A solicitud del Ciudadano Farmacéutico Francisco Estrada, Catedrático de Física de este Establecimiento, el Ciudadano Gobernador hizo que pasaran al gabinete de esta cátedra, las máquinas de Gramme y reguladores que servían anteriormente para el alumbrado eléctrico, lo cual ha venido a aumentar el número de importantes aparatos que ya posee la expresada cátedra.

Extenso sería el catálogo de todos sus trabajos si llegara a formarse, ya que no todos ellos fueron dados a la luz pública, pero es más que suficiente para formarse un juicio sobre la genial fecundidad del personaje que nos ocupa, los siguientes que se consignaron en diversas publicaciones del país y del extranjero – principalmente en Estados Unidos y Francia – con los títulos que a continuación se describen [11]:

1. Nuevo Instrumento para medir la electricidad.
2. Empleo de los rayos solares como fuerza motriz. El presente trabajo apareció después en Francia bajo el nombre de otro autor.
3. Máquina de vapor sin fuego; empleando el hielo en sustitución del combustible.
4. Explicación del movimiento del radiómetro de Crookes en gases enrarecidos.
5. Nuevo telégrafo impresor mexicano: 3 modelos. Este telégrafo lo vieron funcionar el C. Ministro de Fomento Vicente Riva Palacio, el C. Gobernador del Estado, Gral. Carlos Díez Gutiérrez y otras muchas personas.
6. Varios sistemas nuevos de transmisión telegráfica Duplex.
7. Pequeña lámpara de incandescencia.
8. Nuevo manipulador de teclado para alfabeto Morse.
9. Reformas hechas al telégrafo autográfico Cowper.
10. Sistemas diversos de transmisión Duplex. Este estudio en que se proponen reformas al telégrafo autográfico de Cowper existe manuscrito en el entonces Ministerio de Fomento.
11. Piano eléctrico inventado y descrito en 1878.
12. Predicción de los temblores de tierra y erupciones volcánicas, verificados con el auxilio del teléfono. Esta nueva aplicación del teléfono apareció después como idea propia y primitiva de un físico italiano, que copió lo expuesto por el Sr. Estrada en el órgano periodístico el “Correo de San Luis”, del 4 de marzo de 1883.
13. Lámpara de gas de manto incandescente o foto-radiante. Privilegio pedido por este nuevo sistema al Ministerio de Fomento por Jonás Arva Edisson Ferratecci

(pseudónimo y anagrama de Francisco Javier Estrada) el día 9 de octubre de 1895.

14. Nuevo sistema de comunicación eléctrica, entre los telégrafos de las vías férreas y los trenes en movimiento.

15. Cadena eléctrica de Farnesi d Astracco (otro pseudónimo de Francisco Javier Estrada).

16. Balanza geológica electromagnética o nuevo instrumento para estudiar los fenómenos geológicos electro-magnéticos del interior de la tierra y sirve también como medio de vaticinar los temblores y erupciones volcánicas. El autor pretendió que este trabajo se imprimiese en varios idiomas en Europa y en los Estados Unidos; mas no lo logró por falta de recursos propios. El gobierno potosino lo mandó imprimir por su cuenta en español; pero se vedó su circulación hasta que no se hubiesen obtenido las patentes respectivas, cosa que solicitó el Sr. Estrada al Gobierno Mexicano, en el mes de febrero de 1895, acompañando al estudio respectivo una descripción detallada de dicho invento.

17. Nuevo micrófono o transmisor a gran distancia y un nuevo sistema de transmisión telefónica con reformas en los teléfonos y nuevas disposiciones en las líneas para gran alcance.

Aparte de los aparatos que construyó son incontables los estudios, disertaciones y tesis que sobre diversos asuntos publicó [11]: *Disertación sobre el teléfono. Predicción de los temblores de tierra y erupciones volcánicas. El cólera y las moscas o sea la propagación de esta epidemia por estos insectos. Previsión o idea nueva y original imitada por Farnesi d Astraco. Las moscas son insectos propagadores del cólera: verdad enteramente comprobada por célebres bacteriologistas tales como Stemberg y Biggs, con motivo de la última invasión del cólera en Nueva York. Opinión que va de acuerdo con otros bacteriologistas europeos. Saneamiento de la ciudad de México. Revista de algunos proyectos propuestos al H. Ayuntamiento. Procedimiento electro-dinámico moderno, propuesto por Francisco J. Estrada.*

Igualmente fueron numerosos los trabajos inéditos que dejó el ilustre hombre de ciencia potosino [11]:

- Receptor rápido polarizado de sifón. Instrumento inventado en el año de 1883 y enviado a París y los Estados Unidos sin haber podido ser presentado.
- Reóstata diferencial de resistencia variable. Instrumento eléctrico inventado en 1887 y enviado a París y Estados Unidos, corriendo la suerte que el anterior.
- Aplicación de los agentes físicos, muy especialmente de la electricidad a la estrategia militar y al arte de la guerra. Procedimientos nuevos y secretos.

Los títulos anteriores tomados de las publicaciones periódicas de la época, si bien dan una idea de lo extenso y productivo de su trabajo, no reflejan del todo la calidad e importancia de los mismos. A fin de ampliar este punto destacamos a continuación algunos puntos de vital importancia.

Francisco Javier Estrada, impulsaba la comunicación telefónica entre México y San Luis, una de las más grandes distancias de comunicación logradas en ese

momento en el mundo, pudiendo realizar tal cosa el 20 de enero de 1882, utilizando para ello nuevos instrumentos reformados por él mismo para grandes distancias. La prensa nacional daba cuenta de tan importante logro al anunciar: *Comunicación telefónica directa entre México y San Luis Potosí*, realizada el 20 de enero de 1882 con los nuevos instrumentos reformados para gran distancia por Francisco J. Estrada, notas publicadas en periódicos del país [12,13,14,15]. En 1886, Estrada patenta la comunicación inalámbrica para comunicar trenes en movimiento, descubierta nueve años antes que Marconi [16]. Estrada tuvo, en parte, el enorme orgullo de ver triunfantes los principios y las ideas geniales que agitaron su recia intelectualidad de hombre avezado al estudio, y sus esfuerzos en bien de la humanidad por darle una vida más cómoda y más prospera. De esto tenemos un elocuente y cumplido testimonio cuando nos enteramos que gracias a él, por primera vez en todo el Continente, se encendió la primera luz eléctrica de arco, precisamente en el patio de la actual Universidad Autónoma de San Luis Potosí, con motivo de una jamaica (evento o venta de caridad para reunir dinero) organizada con fines benéficos.

La mayoría de los trabajos mencionados, Estrada los desarrolló cuando había sido atacado, a los treinta años de edad, de ataxia locomotriz, lo cual lo dejó prácticamente ciego y paralítico; a pesar de ello, no interrumpió sus trabajos, que lo llevaron a ser miembro de la Academia de Ciencias de París.

A pesar de ser atacado de ataxia locomotriz, se ganó a pulso el título de primer electricista mexicano al tener contribuciones brillantes a la física [17]. Extensa sería la lista de trabajo y aparatos realizados y fabricados por Estrada, como puede observarse en las descripciones a su trabajo anteriores, entre ellas podemos mencionar además [17]: dos aparatos telegráficos impresores, un barómetro automático de máxima y mínima, varios sistemas de galvanoplastia, cuatro aparatos de transmisión simultánea, una muy notable modificación al teléfono de Bell, un motor dinámico eléctrico, por el que mereció un diploma de la sección de ciencias físico-químicas del Ministerio de Fomento de Estados Unidos, un aparato para medir la velocidad de las corrientes eléctricas, tan preciso que medía hasta un milésimo de segundo, y lo que es mucho más importante la telegrafía sin hilos, antes de que la descubriera Marconi. Como consecuencia de esto último Estrada solicitó un privilegio para utilizar la comunicación inalámbrica para comunicar trenes en movimiento, según aparece en el Periódico Oficial del Estado de San Luis Potosí [16]:

“Carlos Diez Gutiérrez Gobernador Constitucional del Estado Libre y Soberano de San Luis Potosí, a sus habitantes sabed: Que por la Secretaría de Fomento, colonización, industria y comercio se me ha comunicado lo siguiente:

“Secretaría de Fomento, colonización, industria y comercio de la República Mexicana.-Sección 2a. El Presidente de la República se ha servido dirigirme el decreto que sigue:

“Porfirio Díaz. Presidente constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, a sus habitantes sabed:

“Que en virtud de la facultad que me confiere la fracción XVI del artículo 85 de la Constitución, he tenido a bien decretar lo siguiente:

“Artículo único.-De conformidad con lo prevenido en la ley de 7 de Mayo de 1832 y en su reglamento de 12 de Julio de 1852, se concede privilegio exclusivo por diez años al C. Francisco Javier Estrada, por su sistema para comunicar un tren de ferrocarril en movimiento, con las oficinas telegráficas. El interesado pagará veinte pesos por derecho de patente.

“Por tanto mando se imprima, publique, circule y se le dé el debido cumplimiento.

“dado en el Palacio del Poder Ejecutivo de la Unión en México a 12 de Junio de 1886.-Porfirio Díaz.- Al C. Manuel Fernández, Oficial mayor encargado de la Secretaría de Estado y del despacho de Fomento, colonización, industria y comercio.”

Y lo comunico a ud. para su conocimiento y demás fines.

Libertad y Constitución. México. Junio 12 de 1886.—P.a. d.S., M. Fernández. Oficial mayor.- Al Gobernador de San Luis Potosí.”

Por tanto, mando se cumpla y ejecute el presente decreto y que todas las autoridades lo hagan cumplir y guardar, y al efecto se imprima, publique, circule y se le dé el debido cumplimiento.

Palacio de Gobierno del Estado de San Luis Potosí. a 21 de Julio de 1886.-Carlos Diez Gutiérrez.-Juan Flores Ayala, Secretario.”

En 1877, Estrada había desarrollado su telégrafo impresor, y dado a conocer en la prensa nacional, misma que lo conminaba a ocurrir al Ministerio de Fomento a registrar su aparato. En ese tiempo Estrada se encontraba prácticamente ciego y simplemente al tacto arreglaba y construía su telégrafo impresor, situación que hacía más notable su labor. En el “Mensajero” aparecía [18]:

“Satisfacción y sorpresa nos han causado saber que es un hecho en la práctica el pensamiento de los telégrafos impresores conocidos hasta hoy. Del de Hughes, porque evita su complicación mecánica; y del francés, porque no está expuesto a las frecuentes descomposturas. El telégrafo del Sr. Estrada basado en nuevas aplicaciones de los principios del electro-magnetismo hasta ahora conocidos, reúne a la sencillez de mecanismo, solidez y velocidad en el despacho de los mensajes, que se imprimen simultáneamente en la estación final y en la partida.

Su uso está al alcance de todas las personas que sepan escribir. Un niño, con estos rudimentales conocimientos puede hacerlo funcionar; pues lo que mas llama la atención, lo que es una positiva mejora, lo que indudablemente lo hará ocupar un lugar preferente en las oficinas telegráficas, es la velocidad con que funciona, pues manejada por una persona experta, discrepa un cuarto del tiempo que emplea el de Morse.

Felicitemos sinceramente al Sr. Estrada, no solo por su notable invento, sino por su última mejora, que ha

realizado, estando ciego y paralítico, según se nos informa.

Llamamos la atención del Sr. Ministro de Fomento, para que inquiriendo la verdad sobre lo que dejamos asentado, estimule al físico de San Luis, a efecto de que su invención salga del reducido espacio del gabinete experimental, y conocido en el mundo científico, lo introduzca a la utilidad general, y a la propia en que sin duda redundará.”

Sus esfuerzos se veían coronados al desarrollar un nuevo sistema telefónico que superaban a los existentes en todo el mundo y alcanzaba distancias nunca antes cubiertas, tal como puede apreciarse en una carta enviada al Ministerio de Fomento y que publicó el periódico “Nacional” de México y que reprodujo el diario oficial de San Luis “La Unión Democrática” [19].

“Ciudadano Ministro de Fomento:

Francisco Estrada, hijo, catedrático de física en el instituto de esta ciudad, ante usted, en la forma legal, me presento manifestando: que después de algunos años de experimento y estudio, he logrado combinar un nuevo sistema de transmisión telefónica que permita la comunicación a distancias mucho mayores de las que alcanzan actualmente y por los medios ordinarios.

Los principales fundamentos del sistema son: 1°. El uso de un nuevo micrófono ó transmitidor que produce un aumento en las variaciones de resistencia al paso de la corriente, traduciéndose de este modo en el Teléfono receptor, por mayor claridad en los sonidos. 2°. Una disposición particular en las comunicaciones eléctricas que permite el refuerzo a la corriente de línea de una inducida de caracteres particulares. 3°. Una reforma en el Teléfono receptor que le da mayor sensibilidad procurando la adición de unas piezas y mayor facilidad en la percepción del sonido.

Acompaño, al efecto, por duplicado, las explicaciones y dibujos respectivos que dan una idea detallada de las referidas bases.

Creando que cada una de éstas constituye por sí sola una mejora sobre los métodos de transmisión empleados hasta hoy, me atrevo por ello, a solicitar de quien corresponda, un privilegio por el tiempo que la ley pueda concederme, para el uso del nuevo sistema que llevo mencionado.

Por tanto, a usted ciudadano Ministro, suplico se sirva dar a mi solicitud el curso que la ley designa, con lo que practicaré un acto de justicia, y recibiré en ello especial favor.

Libertad en la Constitución. San Luis Potosí, Junio 16 de 1881.-Francisco Estrada (h.)-Una rúbrica”

El 26 de diciembre de 1883, el Periódico Oficial del Estado, La Unión Democrática, publicaba la concesión del privilegio concedido a Francisco Estrada [20]: “...Lo ha obtenido del Gobierno general nuestro notable electricista, el Sr. Francisco Estrada, hijo, para su comunicación telefónica. Consideramos importante la justa concesión hecha al Sr. Estrada, pues sus aparatos telefónicos de los cuales tiene colocados algunos, son superiores a los conocidos, por su sencillez, por su fácil

manejo y por sus efectos acústicos, de los cuales llama la atención la circunstancia de escucharse la voz transmitida a más de tres o cuatro metros de distancia, sin necesidad del teléfono auricular, cuando dicha voz se transmite por un instrumento especial de la invención del Sr. Estrada.”

En 1879 colaboraba con la Secretaría de Fomento y con el Gobierno del Estado en el establecimiento del Observatorio Meteorológico que se instalaba en el Instituto Científico y Literario, poniéndolo en relación directa con el de México; y no sólo esto, sino que ideaba aparatos para tales finalidades [11].

A partir de esta colaboración, Estrada entró en comunicación con Mariano Barcena del Observatorio Meteorológico Central a quien envió uno de sus trabajos relacionados con telegrafía. La Unión Democrática, publica la carta de respuesta de Mariano Barcena, donde se hace referencia a una nueva revista de corte científico, la Revista Científica Mexicana [21]:

“El Sr. Francisco Estrada (hijo). Este digno hijo del Estado, bien conocido en la república de las letras por su inquebrantable dedicación al estudio de las ciencias naturales, ha encontrado el sistema de duplicar la corriente eléctrica, pudiéndose por un solo conductor, librar y recibir mensajes telegráficos. Escrita sobre la materia su bien probada tesis, la remitió al Observatorio Meteorológico Central y el acierto con que está hecho este notable trabajo, mereció a su autor una distinción honorífica según consta en la carta que a nuestras instancias nos ha sido facilitada, y que publicamos a continuación, por entrañar su contenido la justa honra de que también participa nuestro Estado.

He aquí la carta.

“Observatorio Meteorológico Central.-

México, Septiembre 12 de 1879.- Sr. D- Francisco Estrada, (hijo).- San Luis Potosí.- Estimado amigo y Sr. mío:- Tuve el gusto de recibir el pliego que adjuntó vd. a su apreciable de fecha 5 del corriente.

Después de estudiado atentamente, me permití leerlo ante la sociedad de Historia Natural, en la sesión de anoche. Fue escuchada la lectura con grande interés, y al concluirla fue vd. nombrado miembro honorario de dicha sociedad, dispensándose a la postulación todos los trámites reglamentarios, siendo esta una honra que rara vez concede la sociedad.

En cuanto al importante trabajo de vd. se publicará, no en un periódico político sino en uno exclusivamente científico, que con el nombre de Revista Científica Mexicana comenzará a dar a luz, desde principios de Octubre, en unión de los Sres. D. Manuel Orozco y Berra, D. Antonio García y Cubas y D. Miguel Pérez mi compañero de observatorio.

Como vd. se dedica mucho a la ciencia, pongo desde hoy a su disposición las columnas de mi periódico, esperando que vd. se servirá honrarle frecuentemente con sus trabajos.

Mucho agradecería que me remitiese, si le es posible, una lámina que represente el aparato, a que se refiere vd. en su trabajo, a fin de ilustrarlo al ser publicado.

Me es muy grato ofrecerme con este motivo tan plausible como su amigo afectísimo q.b.s.m. Mariano Barcena, director.”

Estrada seguía compartiendo el tiempo en sus investigaciones en electromagnetismo, la impartición de la cátedra de física, y su trabajo como farmacéutico pues continuó haciéndose cargo, ahora, de su propia farmacia; en el periódico oficial del Estado, aparecía en la lista de la junta de salubridad de médicos, cirujanos, farmacéuticos, flebotomianos y parteras, residentes en la ciudad y legalmente autorizados para ejercer la profesión, con la expresión de las escuelas donde han hecho los estudios. Igualmente aparece en un reporte que los miembros de la junta visitadora realizaron a su botica en 1877. Ya retirado de la cátedra de física, en 1887, le fue concedido un nuevo privilegio por su procedimiento para fabricar y envasar vinos espumosos y licores alcohólicos efervescentes. Por si fuera poco fue electo, en 1871, como Magistrado del Supremo Tribunal de Justicia del Estado como supernumerario y en 1876 como suplente. Para 1879, Estrada había diseñado nuevos aparatos para telegrafía y además de ilustrar a sus alumnos en la cátedra de física sobre los fundamentos y el uso de los mismos, comenzó a ofrecer cursos para aprender la utilización de los nuevos aparatos así como los aparatos de uso común en comunicación telegráfica en ese entonces. Para tal efecto publicó sus cursos para señoritas en los periódicos locales, uno de ellos decía.

TELEGRAFÍA ELÉCTRICA

“El día 15 del corriente se abrirá en la casa del que suscribe, y bajo su dirección, una cátedra teórico-práctica del expresado ramo para señoritas exclusivamente. La clase, que será gratuita, se dará los martes, jueves y sábados de 5 a 6 de la tarde.

Las inscripciones se reciben en la misma casa, calle de Tercer Orden, núm. 3.

San Luis Potosí, Enero 5 de 1879.-FRANCISCO ESTRADA (H).”

De esta forma, Estrada combinaba sus trabajos y para tal efecto establece su propio laboratorio donde había sentado sus reales y experimentaba con el electromagnetismo y la química. Sin embargo, el electromagnetismo fue su pasión, y en el que tuvo las grandes contribuciones no siempre reconocidas, aunque para el núcleo de radioaficionados, miembros de la Federación Mexicana de Radioescuchas es considerado el padre de las telecomunicaciones modernas, en realidad título ganado a pulso y que al menos constituye un reconocimiento a su labor [22]. Estrada publica una pequeña nota en La Unión Democrática de San Luis Potosí refiriéndose a una nueva planta que presentaba propiedades eléctricas y magnéticas, y conminaba a los estudiosos de la botánica cualquier referencia a tan extraordinaria planta, la nota es la siguiente [23]:

“Se ha encontrado en las regiones ecuatoriales una planta que goza de propiedades sumamente raras, pues participa de las de la electricidad y el magnetismo. Algunos

hombres de la ciencia la han bautizado con el nombre de “phytolacsa eléctrica”. La zona en donde se ha descubierto está comprendida entre los diez y doce grados de latitud Norte, zona que abunda en vegetales raros por sus propiedades botánicas y medicinales y de las que con frecuencia se descubre en los vegetales que espontáneamente crecen en nuestro feraz territorio.

Esta circunstancia hace creer que sería posible que la “phytolacsa eléctrica” creciera en algunos puntos de nuestras cálidas costas, con más probabilidades quizá en las que baña el Golfo de Mexicano.

Si los estudiosos botánicos que han recorrido en distintas direcciones nuestra tierra caliente, hubiesen encontrado algún vegetal en que sospecharen propiedades tan interesantes, harían un positivo, servicio a la ciencia suministrando las noticias que tuvieren respecto de la existencia en nuestro país de la nerviosa planta que tanto ha llamado la atención. En este supuesto y lograda su adquisición serían indemnizados de los gastos que para ello erogaren así como de los que ocasionare su transporte a esta Capital.

Las contestaciones pueden dirigirse al que suscribe en el Instituto Científico.

San Luis Potosí, Abril de 1878.- Francisco Estrada (hijo).”

Los trabajos de investigación en física que realizaba Estrada, eran llevados al aula y aprovechados para las demostraciones de la cátedra. Hay que recordar, como lo mencionamos anteriormente, que las clases eran descriptivas y demostrativas, por lo que en el campo del electromagnetismo su cátedra se veía enriquecida por sus experimentos. Algunos de sus aparatos fueron cedidos al gabinete de física para su utilización en la cátedra de física. Una muestra de lo anterior lo tenemos en una nota publicada en La Unión Democrática [24]:

“Tengo el honor de poner en conocimiento de V. para que se sirva elevarlo al del ciudadano Gobernador, que en esta fecha he entregado al C. Director del Instituto Científico según consta por el recibo que acompaño, dos aparatos electromagnéticos que sirvieran para experimentos sobre la transmisión telegráfica simultánea, y que convenientemente arreglados según ofrecí, quedan al servicio del Gabinete de Física del espresado (sic) establecimiento.

Al dar cuenta al R. Funcionario con esta nota, he de merecer a V. se sirva manifestarle mi profundo agradecimiento, por haber proporcionado los medios de experimentación para un objeto tan útil que constituye por el solo un adelanto en las líneas telegráficas, y cuya adopción en ellas espero del Gobierno de la Federación de quien depende sean publicados los dos sistemas nuevos á que me refiero en comunicación que por separado dirijo al Ministerio de Fomento.

Sírvase V aceptar con este motivo las seguridades de mi particular aprecio y consideración.

Independencia y Libertad, Octubre 22 de 1879.-Francisco Estrada (h).- Al Secretario de Gobierno del Estado.”

Francisco Javier Estrada se convirtió en uno de los más respetados profesores del Instituto, no sólo por sus importantes contribuciones a la Ciencia, sino por su brillantez como profesor y titular de la cátedra de física. Al estar casi ciego y paralítico debido a la ataxia locomotriz que padecía, los estudiantes se trasladaban a su casa para tomar sus lecciones de física y apreciar las demostraciones físicas que realizaba con sus equipos, así como con los instrumentos del gabinete de física que Estrada había estado formando con ayuda de su preparador de la clase de física Francisco A. Noyola. En 1878 aparece en la Unión Democrática el reporte de faltas de asistencia de catedráticos del Instituto, al final de la nota se indica que no se menciona en el reporte a Francisco Estrada (hijo) y Francisco Limón, por dar las clases en sus casas [25].

Cuando era necesario que Francisco Estrada se trasladara al Instituto era llevado cargado por sus estudiantes hasta la planta alta del edificio del Instituto donde estaba colocada el aula y gabinete de física, así sucedió hasta el 6 de febrero de 1886 en que fue retirado de la cátedra ante la oposición de sus alumnos, por su imposibilidad física, mismos que publicaron una carta el 14 de febrero de 1886 en El Estandarte, pidiendo el regreso de Estrada a la cátedra [26].

Tan estimado era por sus alumnos que, a lo largo de los años recopilaron toda una lista de sus trabajos, y las menciones a los mismos que aparecían en los periódicos de la época que se editaban en el país. La lista de datos referentes a las invenciones, trabajos, artículos y disertaciones suscritos por Estrada, fue pegada en la parte posterior de su retrato que fue colocado en el salón en el que profesó cátedra y, a partir de 1908, llevó su nombre en un homenaje póstumo que se le brindó en el edificio del Instituto. El título de la lista en cuestión es como sigue:

“DESCUBRIMIENTOS, INVENCIONES Y TRABAJOS DE DON FRANCISCO J. ESTRADA. PROFESOR DE FÍSICA Y ELECTRICISTA. Fechas en que fueron realizados; periódicos y diarios en que están consignados: con datos y documentos coleccionados por sus discípulos.”

Al separarse de la cátedra, Estrada queda sin trabajo remunerado, sus investigaciones que culminaba en privilegios solicitados al Gobierno a fin de poder ser explotados en base a proyectos no pueden aprovecharse a plenitud, el medio, representaba en aquella época, y de hecho en la actual, un medio sumamente difícil para el aprovechamiento de la innovación tecnológica, sus proyectos no son apoyados y sus magros recursos usados para financiar sus propios trabajos de investigación y la construcción de sus instrumentos diseñados. Por fortuna es recompensado por el Gobierno del Estado de San Luis Potosí asignándole una pensión anual que correspondía a dos meses de sueldo que percibía como profesor, al respecto la prensa nacional comentaba en el periódico El Liberal, a través de una nota reproducida por el Periódico Oficial del Estado, bajo el título de Iniciativa Generosa [27]:

“El periódico El Liberal, quizá el más importante que se publica en la capital de la República, en uno de sus últimos números, trae el párrafo que a continuación copiamos.

Lo es á todas luces una que acaba de presentar á la Legislatura de San Luis Potosí el Gobernador de aquel Estado.

Se trata pues, de que se decrete una pensión vitalicia de seiscientos pesos anuales a favor del Sr. Don Francisco Estrada.

El Sr. Estrada fue uno de los educadores mas empeñosos y distinguidos de la juventud potosina, y es además un sabio de primer orden que ha llamado la atención de las sociedades científicas extranjeras que tienen en gran estima sus vastos conocimientos.

Hoy vive este sabio ilustre, ciego, paralítico y en la miseria.

Parece justo que se le atienda, y sin duda que así lo hará la Legislatura potosina, decretando la pensión iniciada por el Ejecutivo de aquel Estado.”

Después de dejar la cátedra de física, continúa trabajando en sus investigaciones en electromagnetismo y se traslada a la Ciudad de México donde vive prácticamente sólo y abandonado hasta su muerte en 1905.

En el discurso pronunciado la noche del día 14 de octubre de 1908, en el Instituto Científico y Literario, con motivo de una velada en honor de Francisco Estrada (h.) y Dr. Gregorio Barroeta, Francisco Noyola preparador de la clase de física que impartía Estrada en el discurso de velada de colocación de piedra y retrato en el aula en el Instituto, ahora Universidad Autónoma de San Luis Potosí, se refería a sus últimos momentos [28]:

“... y decidme también si no pensáis que el ángel tutelar que protege a los Edison y a los Marconi, no vibró alguna vez sus alas fecundantes acariciando el cerebro del modesto sabio potosino, que hasta en las últimas horas de su vida, inventaba el reloj de la hora universal, batallando por arreglar él con sus convulsas manos, el mecanismo de su invento cuyos rodajes, según se refiere, quedaron esparcidos en el momento de la muerte, sobre el maltratado pavimento de su habitación casi miserable...”

III. CONCLUSIONES

Las importantes y abundantes contribuciones de Francisco Javier Estrada, a la física y en especial al electromagnetismo, muchas de ellas desconocidas, lo colocan no sólo como el primer electricista mexicano, como fue conocido años después, sino como el físico mexicano más notable del siglo XIX. La labor de Estrada como investigador y catedrático, lo colocan como el prototipo de profesor-investigador que las universidades modernas mexicanas tratan de configurar como perfil idóneo en la formación de recursos humanos y en la generación de nuevo conocimiento, así como su aplicación. A pesar de sus aportaciones poco trascendió el trabajo de Estrada, como suele suceder en países donde la

ciencia y la tecnología son desairadas, aparte de las tribulaciones que en aquella época envolvían al país. Sus innovaciones tecnológicas poco aprovechadas, lo que hubiera dado ventaja competitiva a México, el hecho de aprovechar la comunicación inalámbrica o el uso de la luz de arco por citar algunas, apoyando el reconocimiento mundial al trabajo de Estrada, que en su mayoría realizó estando casi ciego y paralítico debido a la ataxia locomotriz, con que fue atacado. Nueve años después Marconi patentó la comunicación inalámbrica ya dada a conocer por Estrada, como suele suceder, en esa ocasión si hubo respuesta del Gobierno de la República, comunicando Porfirio Díaz, en 1902, al Congreso que se iban a realizar las primeras pruebas de telegrafía sin hilos en Veracruz [29]. De igual manera, Porfirio Díaz llegó a felicitar a Edison, en una carta grabada en cilindro de cera audible en sus fonógrafos [30]; que se sepa no existe ninguna felicitación hacia Estrada.

Su labor como educador fue igualmente excepcional, como lo demuestra el respeto y cariño de sus alumnos formados en la cátedra de física y que la mayoría de ellos llegaron a ser profesionales de la ingeniería, medicina, farmacia y posteriormente la química, mismos que a su vez tendrían aportaciones al mundo de la ciencia.

Estrada no cejó en sus labores de gestión, aunque sin mucho éxito, al menos logró que parte de sus trabajos fueran apoyados económicamente por el Gobierno del Estado redituando así el crecimiento del Gabinete de Física del Instituto Científico y Literario. Algunos años después de que Estrada dejara la cátedra, se lograba que el gabinete fuera completado según lo requería Estrada y transmitir el espíritu de gran calidad a la cátedra de física, tal como se menciona en las memorias de los trabajos de la junta directiva del Instituto Científico en 1892 y que reproducía en parte el Periódico Oficial del Estado [31].

“...Las cátedras se han mejorado notablemente, dotándolas de cuanto han menester para que los alumnos que a ellas concurren saquen el producto debido a sus laboriosos trabajos. El Gabinete de Física, que se hallaba instalado provisionalmente en una de las aulas del edificio, ha sido trasladado al elegante salón destinado a ese objeto y enriquecido con todos aquellos aparatos que los progresos de la ciencia reclaman. Esta cátedra es sin duda una de las mejores y más bien dotadas del Establecimiento.”

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Archivo Histórico del Estado de San Luis Potosí, las facilidades prestadas para la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Herrera-Feria, M.L., *Elementos* **48**, 25 (2002-2003).
- [2] Medellín-Espinosa, I., *Acción*, No. 6260, (1938).
- [3] *El Monitor Republicano*, agosto y septiembre (1868).
- [4] *El Siglo Diez y Nueve*, México, agosto y septiembre de 1868.
- [5] *El Constitucional*, México, 31 de agosto (1868).
- [6] *Semanario Ilustrado*, núm. 19, (1868).
- [7] *El Recopilador*, México, núms. 12 y 13 (1868).
- [8] *El Republicano*, San Luis Potosí, 6 de junio (1868).
- [9] *La Orquesta*, México, agosto y septiembre (1868).
- [10] *La Unión Democrática*, San Luis Potosí, Num. 745, (1885).
- [11] Penilla-López, S., *Estilo, revista de cultura*, No. 14, (1950).
- [12] *El Ciudadano*, México, 1 de febrero (1882).
- [13] *El Monitor Republicano*, México, 2 de febrero (1882).
- [14] *El Siglo Diez y Nueve*, México, 9 de febrero (1882).
- [15] *La República*, México, 31 de enero (1882).
- [16] *Periódico Oficial del Gobierno del Estado de San Luis Potosí*, Tomo XI, núm. 790, 21 de julio (1886).
- [17] Medina-Romero, Jesús, *Presencia de San Luis*, suplemento dominical de *El Heraldo de San Luis*, No. 25, 4 de septiembre (1983).
- [18] *El Mensajero*, México, 3 de diciembre (1877).
- [19] *La Unión Democrática*, San Luis Potosí, No. 411, 26 de julio (1881).
- [20] *La Unión Democrática*, San Luis Potosí, No. 618, 26 de diciembre (1883).
- [21] *La Unión Democrática*, San Luis Potosí, 27 de septiembre (1879).
- [22] Hernández, J.A., *Pulso*, No. 6621, 18B (2007).
- [23] *La Unión Democrática*, San Luis Potosí, No. 121, 5 de mayo (1878).
- [24] *La Unión Democrática*, San Luis Potosí, No. 247, 30 de octubre (1879).
- [25] *La Unión Democrática*, San Luis Potosí, No. 135, 6 de julio (1878).
- [26] *El Estandarte*, San Luis Potosí, edición del 14 de febrero (1886).
- [27] *Periódico Oficial del Gobierno del Estado de San Luis Potosí*, No. 815, 30 de octubre (1886).
- [28] *Discursos, velada de honor de los señores Francisco Estrada (h.) y Dr. Gregorio Barroeta*, San Luis Potosí, 14 de octubre (1908).
- [29] *Efemérides*, El universo de la radio **1**, 55 (1996).
- [30] *Evocaciones de la máquina parlante*, Fonoteca del INAH, No. 43 de Testimonio Musical de México, (2004).
- [31] *Periódico Oficial del Gobierno del Estado de San Luis Potosí*, No. 1203 (1892).

Alejandro González y Hernández,

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México,
D. F., México.

E-mail: agh@hp.fciencias.unam.mx

Experimento y Simulación, Opciones didácticas en la enseñanza-aprendizaje de la Física.

Alejandro Hurtado Márquez, Carlos A. Lombana Arroyave, Medardo Fonseca, Oscar Ocaña Gómez. 204 pp. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, 2006. ISBN 958-8247-68-3.

En los últimos años, la investigación educativa en física ha tomado particular importancia en la investigación de como aprender y enseñar física. En la actualidad reconocer las concepciones espontáneas de los estudiantes, la utilización de nuevas estrategias para lograr la modificación y evolución de esas preconcepciones y el propósito de alcanzar un aprendizaje significativo de la física mediante el cambio conceptual son resultados de un proceso de investigación en la didáctica de las ciencias.

En el libro de Alejandro Hurtado Márquez *et al.*, se hace una reflexión profunda acerca de estos temas, primeramente se insiste en que el aprendizaje de la física mediante la resolución de problemas, la práctica del laboratorio y la teoría debe sufrir una transformación que incorpore los resultados de la investigación educativa a la práctica de los procesos de aprendizaje y de enseñanza.

De esta manera, en el capítulo I del libro *Experimento y Simulación*, los autores nos comentan sobre algunas de las tendencias actuales sobre la enseñanza y el aprendizaje de la física, empezando con un análisis de los aspectos generales de la enseñanza de la física, lo que se debe aprender en una asignatura de física que no debe confundirse con un curso más de matemáticas y que debe buscar que el estudiante logre la estructuración de un cuerpo teórico coherente, por ejemplo, mediante el desarrollo del trabajo a realizar alrededor de la fenomenología de un problema a estudiar. Se discute en este capítulo sobre el papel que juega la coherencia del lenguaje y su incidencia en el aprendizaje de la asignatura, así el enunciado de la tercera Ley de Newton “para cada acción existe una reacción igual y opuesta”, será más clara para el estudiante si se presenta como “Si un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, éste ejerce simultáneamente una fuerza de igual magnitud y dirección contraria al primero”. Se reflexiona aquí sobre orientar el aprendizaje de la física hacia el desarrollo de competencias en donde los estudiantes logren aplicar diversos tipos de habilidades y destrezas, de orden psicomotor, sensorial, afectivo y cognitivo en las diferentes áreas del conocimiento de la física. En este primer capítulo, se insiste ya en que el computador y en general la informática es un buen medio para ayudar al desarrollo de destrezas del pensamiento físico del

estudiante, nos habla ya de las ventajas de usar un libro electrónico en CD-ROM o DVD, que en la actualidad tienen gran capacidad para guardar el contenido de textos con imágenes, sonidos y vídeos y los materiales educativos necesarios para apoyar los aprendizajes de los estudiantes, del uso del Internet como una herramienta para la educación a distancia y nos comenta básicamente de las PC como máquinas de enseñanza, en donde se destaca su poder de multiprogramación, su rapidez de funcionamiento, su gran capacidad de almacenamiento de información que incluye el registro de respuestas de los usuarios y su interfaz gráfica para representar datos o visualizar gráficas, animaciones o vídeos. Se considera también aquí, que la alfabetización computacional se realice en las instituciones educativas para mejorar el nivel de competitividad de los futuros docentes y profesionales en ciencias e ingeniería, es decir, para que se sepa usar apropiadamente la herramienta computacional dentro del conjunto de aplicaciones que son relevantes en el aprendizaje de la física. En específico emplear el computador como medio de cálculo numérico y/o simbólico en la solución de problemas, para realizar experimentos con modelos matemáticos (simulación), para el control y automatización computarizada de experimentos, y para el empleo de sistemas expertos en la solución de problemas. Resalta la creación y el uso de lo que se ha llamado Unidad Didáctica Informática (UDI) que son unidades de apoyo a la enseñanza de la física a nivel de la educación media basada en el uso de nuevas tecnologías. Finalmente en este capítulo, se plantea una estrategia para la resolución de problemas de física (que sigue siendo un elemento activo de los cursos de física teóricos), que incluye un proceso cíclico de análisis o reflexión, planteamiento, experimentación, simulación y solución analítica y/o numérica, verificación y retorno al análisis o la reflexión.

En el capítulo II se establece una discusión acerca de la experimentación convencional y la experimentación computarizada. Se trata primero de las prácticas experimentales en la enseñanza de la física, que desde un punto de vista constructivista perseguiría promover el cambio conceptual de los estudiantes. Los autores, con base a la experiencia del grupo de investigación al que pertenecen, infieren que en el laboratorio los estudiantes y docentes se reúnen para realizar, examinar e intentar proporcionar una descripción y explicación de las diferentes fenomenologías que son objeto de estudio en la física, que el trabajo experimental constituye una oportunidad para desarrollar nuevas formas de razonar de manera sistemática, que en general se puede transferir a otras situaciones problemáticas experimentales o

cotidianas, con lo cual se permite a los estudiantes confrontar sus errores conceptuales, que el trabajo en el laboratorio crea actitudes positivas, permite contrastar modelos teóricos y/o simulados, motiva al manejo de datos con la ayuda que prestan las PC, los diferentes programas y las hojas de cálculo, ayuda a comunicar valores humanos, permite diseñar diferentes estrategias para la resolución de problemas, posibilita la evaluación de diferentes alternativas de trabajo y permite fundamentar la toma de decisiones. Los autores agregan además que la experimentación constituye una herramienta para el desarrollo de toda clase de habilidades y competencias científicas y de investigación. Otros temas que se tratan en el capítulo se refieren a la experimentación en el aula que se debe recurrir a ella sobre todo cuando hay poca disponibilidad de material o equipo para el trabajo experimental, a la descripción del sistema de adquisición de datos que con la evolución de las tecnologías actuales hacen uso de sistemas computarizados con la ganancia de la disminución de los tiempos de preparación de un experimento y la ampliación de los tiempos para el estudio de los fenómenos bajo experimentación, al análisis de datos con ideas básicas para la evaluación de resultados experimentales, a la calibración de los instrumentos de medida, incluyendo los sensores o dispositivos de captura de datos experimentales mediante una PC. Se termina el capítulo con una discusión sobre la incidencia pedagógica del empleo de los experimentos automatizados en donde se comenta la pérdida de poder adquirir habilidades y destrezas que se logra con la práctica manual de la experimentación.

El capítulo III se refiere a la simulación, de la cual se comenta que “consiste básicamente en construir modelos informáticos que describen la parte esencial del comportamiento de un sistema de interés y en diseñar y realizar experimentos con el modelo y extraer conclusiones de sus resultados para apoyar la toma de decisiones”. En este capítulo se analiza cómo las simulaciones pueden ayudar al estudiante a encontrar sentido a las relaciones entre variables, a entender las ecuaciones como relaciones físicas entre medidas, a construir modelos mentales de sistemas físicos, a proporcionar a los estudiantes experiencias de aprendizaje activo, estimulante y del tipo “manos a la obra”, de servir como libro de notas en que el estudiante pueden explicarse y describir a sí mismo lo que está entendiendo. Se hace aquí, una revisión de los programas o paquetes computacionales de uso frecuente para el apoyo a las disciplinas de las matemáticas y las ciencias naturales, en especial la física. Así se comenta sobre Mathcad, un poderoso ambiente computacional centrado en la notación matemática real, combinado con un procesador de palabras, Mathematica, una herramienta de las más potentes, que integra gran parte de los conceptos de la matemática con las modernas técnicas computacionales de software, Derive, un software con los que se puede trabajar el álgebra, las ecuaciones, la trigonometría, los vectores, las matrices y el cálculo, Matlab, un entorno integrado de trabajo que permite y facilita el análisis y el cálculo numérico de manera interactiva, Interactive

Physics, software que permite realizar simulaciones en diferentes áreas de la física con objetos dibujados en la pantalla del computador y Modellus, herramienta orientada a la simulación y modelación de sistemas. Se habla también sobre los lenguajes de programación, desde Fortran (acrónimo de FORMula TRANSLator), hasta C y C++, Java y Fislets (pequeños programas construidos en Java o JavaScript con aplicaciones específicas para la física). Una mención especial, se hace en este capítulo, a los métodos numéricos, en donde se discute acerca de la importancia de los métodos numéricos en la enseñanza-aprendizaje de la física, se establecen métodos de resolución numérica de ecuaciones diferenciales como los Métodos de Euler, el de Runge-Kutta y el de Runge-Kutta-Noström y se da un ejemplo de aplicación de estos métodos para el caso de un cuerpo que cae en un campo gravitacional constante sujeto a una fuerza de rozamiento proporcional a la rapidez.

En el capítulo IV, se hace una integración entre el experimento habitual, el computador y la simulación, para ello, se abordan la incidencia e impacto de dicha integración en diferentes áreas de la física. En cinemática, se discute la toma de datos de un movimiento con ticómetro y sensores, y su simulación con Interactive Physics (IP). Se analiza teóricamente un problema de estática y se describe su simulación con IP. En dinámica, se estudia experimentalmente el coeficiente de fricción, mediante la interfaz de adquisición de datos “COBRA”, se hace el análisis teórico de la dinámica de un bloque sobre una cuña sin fricción y se realiza su simulación con IP, se trata teóricamente y simuladamente un problema de colisión interesante y sorprendente como aplicación del principio de la conservación de la energía mecánica y del momento, y se discute experimentalmente el péndulo interrumpido con un planteamiento previo que incluye el análisis, la solución teórica y la predicción, para proceder enseguida a la solución experimental. Con el uso del sistema de adquisición de datos por PC “COBRA”, se continúa con la experimentación para determinar la velocidad de las ondas sonoras, el estudio experimental de las oscilaciones libres, amortiguadas y forzadas, la elongación de una banda de caucho y la tensión superficial. Se hacen modelos con IP de campo eléctrico y experimentos de impulso magnético por medio de toma de datos con la interfaz “COBRA” y por último utilizando software como Mathematica, Electronics Workbench o la Interfaz “COBRA” se propone implementar una metodología para la discusión y análisis de los sistemas oscilatorios en circuitos eléctricos. En este capítulo, se muestran algunos resultados de la aplicación de las herramientas computacionales aconsejadas en este libro y que se han subido a páginas Web, en donde se tratan temas como energías renovables, teoría de la relatividad especial y el problema de los tres cuerpos de Lagrange y termina con una aplicación de Modellus.

En el capítulo V, a manera de colofón, se establecen brevemente perspectivas de trabajo para un planteamiento integrado de la enseñanza de la física. Ahí se comenta que los esquemas pedagógicos y didácticos con los que actualmente se cuentan para abordar la teoría y la

experimentación en el aprendizaje y la enseñanza de la física trae consigo una serie de expectativas insospechadas para el campo educativo. La realización en esta obra de diferentes experiencias alrededor de las nuevas tecnologías en los procesos de enseñanza aprendizaje de la física fue el resultado de buscar alternativas metodológicas que se pudiesen insertar integralmente en el trabajo del aula, en la solución de situaciones problemáticas que conllevarían al uso de la simulación y la experimentación computarizada o no, pero siempre sobre la base de constructos epistemológicos y disciplinares de la física, su enseñanza y su aprendizaje. Como recomendaciones finales, se sugiere que los estudiantes y docentes se agrupen para consolidar el trabajo colectivo, para dar mayor solidez y coherencia a sus propuestas de solución de enseñanza y de aprendizaje, ya sean teóricos, experimentales, convencionales, simulados o experimentales asistidos por PC.

El libro de Alejandro Hurtado Márquez *et al.*, no es un libro de texto pues trata diferentes tópicos de la

enseñanza-aprendizaje de la física, es como el subtítulo lo menciona opciones didácticas para introducirse a la aplicación de las nuevas tecnologías de la informática en la enseñanza-aprendizaje de la física. El libro es una obra de consulta indispensable, muy aconsejable para docentes que quieren comprometerse con los nuevos métodos de enseñanza y para estudiantes que desean aprender la física con las nuevas tecnologías computarizadas con que cuenta el mundo moderno. En ambos casos docentes y estudiantes, encontrarán ejemplos que les den pistas claras de todas las posibilidades que se puedan desarrollar con las nuevas herramientas que se dan a conocer y se discuten ampliamente en esta obra, sin dejar de lado, que algunos de estos casos concretos que se discuten en el libro, se puedan llevar a cabo, para que los lectores docentes o estudiantes experimenten por sí mismos lo que el autores ha tratado de comunicar en palabras e imágenes.

ANNOUNCEMENTS

ICPE 2007

The International Conference on Physics Education: Building Careers with Physics, will take place in Marrakech, Morocco, from November 11-16, 2007.

This conference will be hosted by the Cadi Ayyad University of Marrakech - in collaboration with the Tunisian Society of Optics (STO), the Moroccan Society of Applied Physics (SMPA) and the Faculty of Sciences Semlalia (FSS). ICPE2007 is supported by the International Commission on Physics Education (ICPE) of the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP).

ICPE2007 is the first IUPAP-supported international conference on physics education in North Africa. The main objective of ICPE2007 is to provide an opportunity to exchange ideas and experiences about Building Careers with Physics, and to discuss the potentialities which the physical sciences offer in curricula development, and their impact on enriching the professional skills of the graduates. This conference will bring together physicists, physics educators, physics education researchers and curriculum developers from around the World to share and debate their findings and experiences in the teaching-learning process in Physics, in general, and in career-oriented curricula and Educational Reforms in particular. The main conference topics are:

- New Job Opportunities.
- Effective Teaching Strategies.
- Learning with Technology.
- Physics for Sustainable Development.
- Bridging the Gaps.
- Women and Girls in Physics.

Additional information in www.icpe2007.org

X INTERNACIONAL WORKSHOP ON TEACHING OF PHYSICS

Havana Convention's Palace, Havana, Cuba

March 17 to 21, 2008

The Ministry of Education of Cuban Republic and the Latin-American and Caribbean Pedagogical Institute have the pleasure of inviting you to participate at the *X International Workshop on Teaching of Physics* which will be held in the Havana Convention's Palace, Havana, Cuba, from March 17 to 21, 2008

About Pre-Congress courses.

These courses will be about Didactics of Science in General, Didactics of Natural Science, Didactics of Physics, Didactics of Mathematics, Didactics of Chemistry, Didactics of Biology and Didactics of

Geography. Each course will have duration of eight hours and a certificate of attendance will be given to the participants. More information about Pre-Congress courses will be in The Congress WEB page: www.didacien.rimed.cu. The course will be given in The Capitoly Convention Center

Registration fee

Participants: 150 CUC. **Includes:** congress materials, certificates, coffee, scientific activities and closing lunch. You must pay 20 CUC in addition for the pre-congress courses. **Includes:** course materials, and certificate. The payment of the congress and the pre-courses must be in cash in Cuba from Sunday March 16, 2008 in Havana Convention's Palace. For any further information about the Congress, visit the WEB page of the congress www.didacien.rimed.cu or contact directly the following persons:

Carlos Sifredo Barrios

Executive Vicepresident of the Congress

Email: didacien@mined.rimed.cu

TEL/FAX: 567 553422

Ángel Salabarría Lay

Havana Convention's Palace

Ave 146 e/11 y 13, Playa

Email: angel@palco.cu

Tel: 537 2026011 al 19, ext 1511

Fax: (537) 202 8382

Web: www.cpalco.com

XVI INTERNATIONAL WORKSHOP NEWS TRENDS IN TEACHING PHYSICS

29 May – 1 June, 2008

Puebla, Pue., Mexico

Each year at the end of May, the University of Puebla in Puebla, Mexico, organizes an international workshop focused to physics teachers. Some Conferences on Physics Education and short courses are given.

Further information: www.fcfm.buap.mx/taller

Contact the following persons:

Josip Slisko: jslisko@fcfm.buap.mx,

Adrián Corona: acorona@fcfm.buap.mx,

Cesar Mora: cmoral@ipn.mx

LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION

Volume 1, Number 1, September 2007

CONTENTS/CONTENIDO

Papers/Artículos

Circuits hapenings, Paul Hewitt	1-3
Problem solving and writing I: The point of view of physics, Jorge Barojas	4-12
Periodic motions: How their period changes with amplitude of the oscillations and the friction?, H. G. Riveros and E. Cabrera Bravo	13-18
Estrategia EE (Excel-Euler) en la enseñanza de la Física, Ricardo Buzzo Garrao	19-23
Six Lessons from the Physics Education Reform Effort, Richard Hake	24-31
Tutoriales para Física Introductoria: Una experiencia exitosa de Aprendizaje Activo de la Física, Julio Benegas	32-38
La enseñanza de la Física a través de habilidades investigativas: una experiencia, Josefina Barrera Kalhil	39-43
Haciendo ciencia en el aula: Los efectos en la habilidad de falsear diferentes Hipótesis sobre la flotación y en las respuestas a la pregunta “¿Por qué flotan Las cosas?”, Adrián Corona Cruz, Josip Slisko y Julián Gilberto Meléndez Balbuena	44-50
Un curso de mecánica clásica sin conferencias magisteriales: objetivos, elementos del diseño y efectos en los estudiantes, Josip Slisko y Rebeca Medina Hernández	51-61
Programa de estrategias creativas (PEC) para potenciar la actitud creativa Del docente de Física, Manuel Reyes Barcos	62-72
La plataforma interactiva Moodle: Una oportunidad para la docencia universitaria de la Física, J. Fuentes Betancourt, A. Pérez Perdomo, A. Montoto González, M. Domínguez Hernández y O. Calzadilla Amaya	73-77

continued/continuación

LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION Vol. 1, No. 1, Sept. 2007

contents/contenido

An heuristic review of Lanczos potential, César Mora and Rubén Sánchez	78-82
Una idea profunda en la comprensión del mundo físico: el principio de superposición de estados, O. Organista, V. Gómez, D. Jaimes y J. Rodríguez	83-88
Bandas de energía, origen y consecuencias, I. Rojas, César Mora y H. J. Herrera Suárez	89-94
Descripción de la evolución del Universo: una presentación para alumnos preuniversitarios, R. García-Salcedo y Claudia Moreno	95-100
Francisco Javier Estrada, el físico mexicano más notable y olvidado del siglo XIX, J. R. Martínez	101-108

Book reviews/Revisión de libros

Experimento y simulación, opciones didácticas en la enseñanza- Aprendizaje de la Física, Alejandro González y Hernández	109-111
---	---------

Announcements/Anuncios

Próximos congresos	112
--------------------	-----