

# Prototipo electromecánico didáctico para apoyar en la enseñanza sobre turbinas eólicas



**Raúl Castillo Meraz<sup>1</sup>, Roberto Carlos Martínez Montejano<sup>2</sup>, Isaac Campos Cantón<sup>3</sup>, Carmen del Pilar Suarez Rodriguez<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Coordinación Académica Región Huasteca Sur, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Carretera Tamazunchale - San Martín Km. 5, C.P. 79960, Tamazunchale, San Luis Potosí, México.*

<sup>2</sup>*Unidad Académica Multidisciplinaria Zona Media, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Carretera Rioverde-San Ciro, Km 4, C.P. 79615, El Carmen, Rioverde, San Luis Potosí, México.*

<sup>3</sup>*Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, C.P. 78000, Álvaro Obregón 64, Col. Centro, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.*

**E-mail:** raul.castillo@uaslp.mx

(Recibido el 13 de febrero de 2018, aceptado el 6 de noviembre de 2018)

## Resumen

Este artículo describe el diseño y la implementación de un sistema experimental que estima la potencia eléctrica que se puede producir por el movimiento angular de un sistema mecánico el cual emula el comportamiento interno simplificado de una turbina eólica comercial; también muestra los principios fundamentales de la conversión de energía mecánica en eléctrica los cuales son las bases principales de la operación de dispositivos electromecánicos tales como los aerogeneradores. Se involucran algunos conceptos relacionados con asignaturas de Máquinas Eléctricas, Física, Energías Renovables, Electrónica de Potencia y Microcontroladores los cuales fueron aplicados por estudiantes de ingeniería que participaron en el desarrollo de este proyecto. El principal objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema para aplicaciones didácticas que se pueda montar en condiciones interiores y pueda ser construido con elementos accesibles y componentes económicos.

**Palabras clave:** Energía Eólica, Máquina Eléctrica, Potencia Eléctrica, Potencia Mecánica, Enseñanza de la Física.

## Abstract

This article describes the design and implementation of an experimental system that estimates the electric power that can be produced by the angular motion of a mechanical system that represents the physical behavior of a commercial wind turbine; also shows the fundamental principles of mechanical-into-electrical energy conversion which are the main basis of operation of electromechanical devices such as wind turbines. Some theoretical concepts related with subjects of electric machinery, physics, renewable energies, power electronics and micro controllers were verified by engineering students that participated in the development of this project. The main aim of this work is to develop a system for didactic applications that can be mounted at indoor conditions and can be constructed from a set of basic and cheap electrical components.

**Keywords:** Electric Machine, Electric Power, Mechanical Power, Physics Teaching, Wind Energy.

**PACS:** 07.05.Fb, 88.05.-b, 84.50.+d, 07.50.Ek: 01.30.Os, 01.40.-d, 45.20.D-

**ISSN 1870-909**

## I. INTRODUCCIÓN

La principal motivación para el desarrollo de este experimento fue la demostración de la relación entre la velocidad de viento y la potencia eléctrica que es capaz de producir una turbina eólica pensado para estudiantes de ciencias e ingeniería a través de un prototipo experimental que emule el comportamiento mecánico y eléctrico básico de dichos sistemas los cuales son dispositivos capaces de convertir la energía eólica a energía eléctrica.

En años recientes, la tendencia de la producción de energía en el mundo ha cambiado drásticamente debido al colapso de los precios del petróleo dejando un mejor panorama para las energías renovables en el mercado. Casi la mitad de la energía eléctrica generada mundialmente en 2014 fue basada en fuentes renovables [1].

Adicionalmente, la demanda energética mundial está proyectada para crecer un 37% para el año 2040 [2]. Esto representa un verdadero reto para la comunidad mundial porque es necesario incrementar la generación de energía de todo el mundo y además también requiere que la

generación de esta energía no impacte todavía más en las condiciones ambientales tan críticas en las cuales se encuentra el mundo actualmente.

Las fuentes de energía renovables son una opción ideal para tratar con este problema. Hoy en día, la energía eólica es el tipo de energía renovable más utilizada, tan solo por debajo de la energía hidroeléctrica [2] y su uso ha estado creciendo exponencialmente en las últimas décadas. Su gran eficiencia de conversión energética y el hecho de no depender de la irradiancia del sol, son algunas ventajas de las turbinas de viento contra otros tipos de energía renovable.

En este contexto, es necesario promover el estudio de este tipo de energía en las universidades e institutos de educación superior; también es necesario desarrollar proyectos educativos que ayuden a los estudiantes a comprender el funcionamiento de estos sistemas y aprender sobre la relación de la energía eólica con otras disciplinas como maquinas eléctricas. Algunos trabajos recientes han tratado sobre estos temas [3, 4].

Este trabajo está enfocado en el desarrollo de un sistema didáctico que se basa en el principio de la conversión de energía de las turbinas de viento (mecánica a eléctrica) y que fue diseñado para ayudar a estudiantes de ingeniería a entender el principio de operación de la energía eólica y conversión de potencia. Este sistema fue construido mediante un conjunto de componentes eléctricos y mecánicos y en su implementación se colaboró con estudiantes de Ingeniería Mecatrónica y Electrónica.

A continuación, se muestra un resumen de este trabajo: en la primera sección de este trabajo, se presenta una breve introducción. En la segunda sección, se muestra el marco teórico de la energía eólica y la transformación de potencia mecánica a eléctrica, así como la implementación del sistema experimental. En la tercera sección se muestran los resultados obtenidos. Por último, en la cuarta sección se presenta una discusión final y, en la quinta sección, las conclusiones de este trabajo.

## II. MARCO TEÓRICO

### A. Marco Teórico sobre la Energía Eólica

A continuación, se presenta un marco teórico fundamental para comprender el principio de la energía eólica.

Considere un sistema de flujo de aire sin pérdidas por fricción como se muestra en la figura 1.

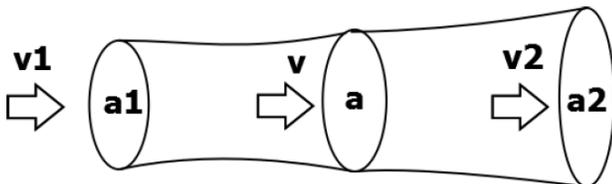


FIGURA 1. Modelo de estudio para la obtención de la potencia mecánica del viento.

El viento circula por un área “a1” a una determinada velocidad “v1”. Posteriormente atraviesa el área de barrido de las palas del aerogenerador (denotada por “a”) a una determinada velocidad “v”. Por último, sale del área de barrido atravesando un área “a2” a otra velocidad “v2”. De acuerdo al teorema de la energía cinética  $E_K$ , un sistema de partículas de masa  $\Delta m$  moviéndose a una velocidad “v” tiene una energía dada por:

$$P_{gen} = \eta C_p P; \quad (1)$$

Esta es la energía que circula por el área de barrido del aerogenerador; entonces se puede definir la potencia mecánica en un tiempo  $\Delta t$  como sigue:

$$P = \frac{E_K}{\Delta t} = \frac{1}{2} v^2 \left( \frac{\Delta m}{\Delta t} \right). \quad (2)$$

Por otra parte, y de acuerdo a la mecánica de fluidos, el flujo de masa que circula por una determinada área viene dado por:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho A v. \quad (3)$$

Dónde:

- $\rho$  = densidad del aire [Kg/m<sup>3</sup>]
- $A$  = Área transversal [m<sup>2</sup>]
- $v$  = velocidad del viento [m/s]

Por último, al sustituir la ecuación (3) en (2), se obtiene la siguiente relación:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3. \quad (4)$$

La ecuación (4) denota la potencia mecánica disponible en el viento. Si se considera el área de barrido y la densidad del aire como constantes, se aprecia que la potencia mecánica es función únicamente de la velocidad del viento al cubo.

Es posible demostrar [5] que, si se toma en cuenta el cambio de energía desde  $v_1$  hasta  $v_2$  y, además, consideramos que por el área de barrido, el viento fluye a una velocidad promedio dada por:

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2}. \quad (5)$$

Entonces, la potencia efectiva  $P_e$  que entra a las aspas del aerogenerador viene dada por la siguiente relación:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 C_p; \quad (6)$$

$$0 \leq C_p \leq 0.59.$$

Donde el valor  $C_p$  se denomina “Coeficiente de Betz” [6] el cual indica que la máxima potencia mecánica que se puede extraer del viento a través de un aerogenerador es el 59%.

La ecuación (6) denota la potencia mecánica que entra al aerogenerador.

### B. Marco Teórico sobre Aerogeneradores

Para conocer la potencia eléctrica generada a la salida del aerogenerador, se necesitan conocer las partes básicas que lo componen. Dichas partes se muestran en la figura 2.

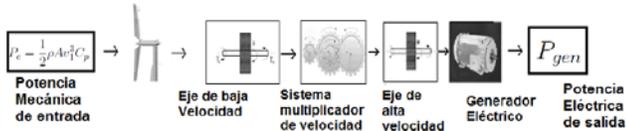


FIGURA 2. Partes básicas de un aerogenerador.

A continuación, se explica cada una de las partes:

- *Eje de baja velocidad.* Esta parte está unida al rotor y a las aspas la cual provoca giros a baja velocidad angular (decenas de revoluciones por minuto) debido a la velocidad del viento.
- *Sistema multiplicador de velocidad.* Consiste en una serie de engranes multiplicadores que consiguen multiplicar la velocidad del eje de baja velocidad.
- *Eje de alta velocidad.* Esta parte está unida al generador eléctrico y su velocidad angular puede ir desde cientos hasta miles de revoluciones por minuto.
- *Generador Eléctrico.* Popularmente conocido como “Dinamo” es la parte crucial del aerogenerador ya que es el encargado de transformar la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Un parámetro importante del generador eléctrico es su eficiencia eléctrica ( $\eta$ ) la cual indica que porcentaje de potencia mecánica se transforma en potencia eléctrica [7]. Los generadores asíncronos tienen eficiencias típicas de  $0.8 \leq \eta \leq 0.9$  mientras que los generadores síncronos tienen eficiencias de  $0.5 \leq \eta \leq 0.7$  [8].

Considerando un sistema sin pérdidas de potencia y en términos de eficiencias, se puede definir la potencia eléctrica a la salida del aerogenerador como:

$$P_{gen} = \eta C_p P; \quad (7)$$

Dónde:

- $P_{gen}$  = Potencia eléctrica generada [W]
- $\eta$  = Eficiencia del generador eléctrico
- $C_p$  = Eficiencia mecánica (coeficiente de Betz)
- $P$  = Potencia disponible en el viento [W] (ec. 4)

### III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Con el objetivo de implementar un sistema para emular el comportamiento interno de un aerogenerador simplificado *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 12, No. 4, Dec. 2018*

(Fig. 2) se montó un sistema con elementos eléctricos y mecánicos que sirvieran para tal finalidad.

En la Figura 3 se puede apreciar el diagrama del prototipo propuesto.

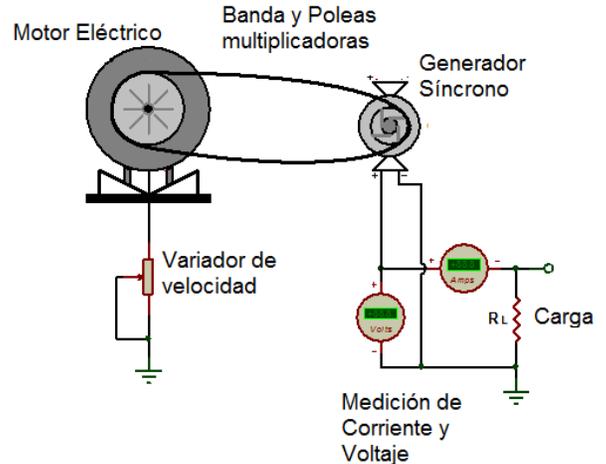


FIGURA 3. Diagrama del prototipo propuesto,

La rotación del eje de baja velocidad fue emulada con un motor de corriente alterna (AC). La velocidad angular de este motor se controla con un transformador variable (VARIAC, conocido como “Variador de velocidad”) conectado entre el motor y la red eléctrica de Corriente Alterna. Posteriormente, se montó una polea de diámetro amplio al motor y estas tres partes (motor, VARIAC y la polea) emulan el comportamiento del eje de baja velocidad. La banda que conecta la polea grande con la polea pequeña emulan el sistema de engranes. La razón de las poleas es de 1:4.

Finalmente, la polea pequeña se une al generador síncrono (alternador de coche) transformando la potencia mecánica en potencia eléctrica.

A la salida del sistema se coloca una carga resistiva, un amperímetro y un voltímetro para realizar las mediciones.

Las características técnicas de los elementos utilizados en el sistema pueden ser apreciadas en la Tabla I.

TABLA I. Datos técnicos de los componentes utilizados.

Parte	Datos técnicos	Parte emulada
Transformador Variable	STACO ENERGY 501C, 120 V, 60 Hz, 5 A	Eje de baja velocidad
Motor Eléctrico	SIEMENS, 373 Watts, 1740 RPM	Eje de baja velocidad
Poleas y banda	Razón 1:4	Multiplicador
Generador síncrono	HITACHI, 12 Volts DC, 50 A, $\eta=0.54$	Generador eléctrico

En la figura 4 se muestra el prototipo terminado.

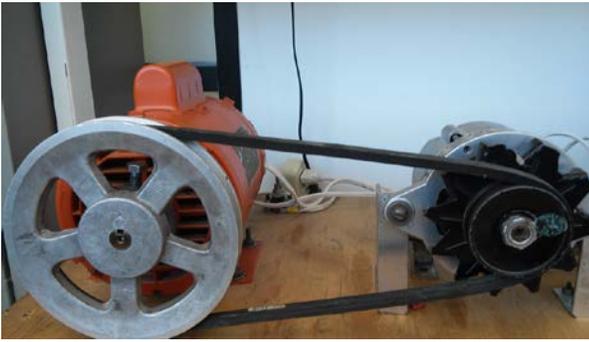


FIGURA 4. Prototipo implementado.

Con el objetivo de medir las revoluciones por minuto (RPM) a las que giraba el motor y el generador síncrono, se realizó una colaboración con estudiantes de Ingeniería Mecatrónica y Electrónica para que diseñaran un contador de revoluciones mediante la plataforma ARDUINO como parte del proyecto integrador de varias de sus asignaturas. En la figura 5 se puede apreciar el contador de revoluciones implementado.

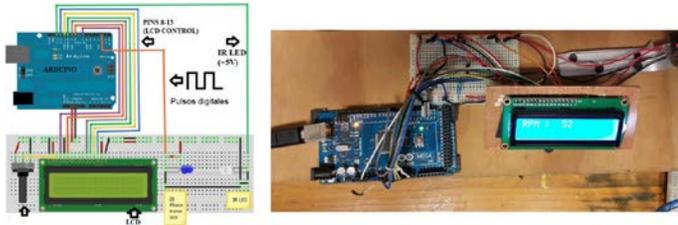


FIGURA 5. Contador de revoluciones implementado en ARDUINO.

#### IV. RESULTADOS

Los resultados de las mediciones realizadas al prototipo se muestran en la Tabla II.

TABLA I. Resultados del prototipo implementado.

RPM del Motor	RPM del Generador	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia Eléctrica [W]
85	340	3.94	0.87	3.42
116	462	6.27	1.24	7.76
16	649	7.3	1.45	10.01
243	972	9.27	1.85	17.12
250	1000	9.46	1.89	17.85
500	2000	19.83	3.95	78.4
75	2300	24.76	4.94	122.2
625	2500	28.7	5.72	164.16
750	3000	41.5	8.2	340.3

Con el objetivo de establecer un comparativo entre el prototipo implementado y una turbina eólica comercial, se tomaron los datos de la turbina SUNSOL-TEC de 300 Watts (Fig. 6). El coeficiente de Betz para esta turbina es  $C_p = 0.27$ .



PARAMETRO	VALOR
FABRICANTE	SUNSOL-TEC
POTENCIA NOMINAL	300 W
VELOCIDAD NOMINAL DE VIENTO	12.5 m/s
VOLTAJE NOMINAL DE CD	12 V
CORRIENTE NOMINAL	12 - 25 A
POTENCIA MÁXIMA	350 W
VELOCIDAD DE VIENTO MÁXIMA	15 m/s
VELOCIDAD DE VIENTO MÍNIMA	2 m/s
NÚMERO DE ASPAS	6
DIÁMETRO DE LAS ASPAS	1.14 m
VELOCIDAD ANGULAR NOMINAL	900 RPM
TIPO DE GENERADOR	ASÍNCRONO
RAZÓN VELOCIDAD-PUNTA	4.29

FIGURA 6 a) Turbina eólica SUNSOL-TEC. b) Datos técnicos.

El conjunto de datos de la potencia eléctrica generada por esta turbina a diferentes velocidades de viento y revoluciones por minuto en el rotor puede apreciarse en la Tabla III.

TABLA III. Potencia eléctrica generada por la turbina comercial SUNSOL-TEC

Velocidad de viento [m/s]	Velocidad Angular [RPM]	Potencia Eléctrica [W]
2	142	152
5	355	192
7	497	218
10	711	258
12	853	298
15	1066	348

Finalmente, se muestra una tabla comparativa entre velocidades angulares del prototipo emulador y de la turbina comercial, así como de la potencia eléctrica generada por ambos dispositivos (Tabla IV).

TABLA IV. Comparativo entre velocidades angulares y potencia eléctrica.

RPM motor	RPM generador	Potencia Eléctrica generada [W]	RPM turbina	Potencia eléctrica de la turbina [W]
625	2504	164	142	152
651	2597	190.5	355	192
677	2710	220.9	497	218
705	2802	256.2	711	258
730	2915	297	853	298
765	3012	344	1066	348

Con el objetivo de observar la relación entre las velocidades de ambos dispositivos, se graficó la velocidad angular del motor contra la velocidad angular de la turbina. Dicha gráfica puede apreciarse en la figura 7, y al aplicar una regresión lineal simple se puede apreciar la siguiente relación:

$$\omega_{motor} = 0.1379\omega_{turbina} + 604.24 . \quad (8)$$

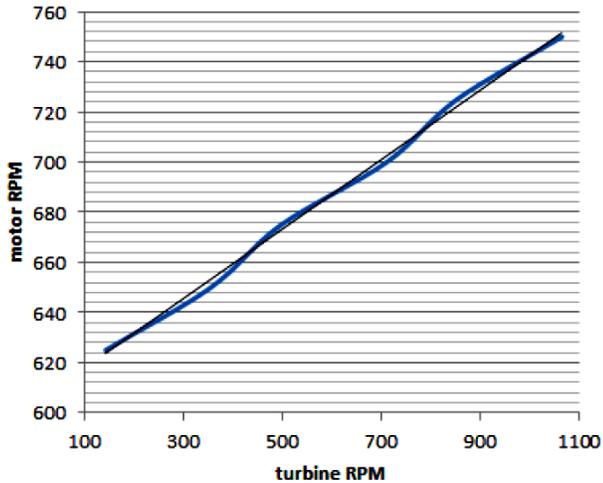


FIGURA 7. Gráfico de la velocidad angular del motor vs velocidad angular de la turbina.

Dónde:

- $\omega_{motor}$ = velocidad angular del motor (RPM)
- $\omega_{turbina}$ = velocidad angular de la turbina (RPM)

Para establecer la relación entre la velocidad angular del motor y la velocidad de viento que se quisiera emular mediante el prototipo, se recurre a la definición de la Razón velocidad-punta la cual está definida como:

$$\lambda = \frac{\omega_{turbina} R}{v} . \quad (9)$$

Dónde:

- $\lambda$  = Razón velocidad-punta [sin dimensiones]
- $\omega_{turbina}$  = velocidad angular de la turbina [rad/s]
- R = Radio de las aspas del rotor [m]
- v = velocidad del viento [m/s]

Dicha cantidad es útil para establecer una relación entre la velocidad del viento y la velocidad angular a la que gira una turbina eólica.

Despejando la variable  $\omega_{turbina}$  de la ecuación 9 y sustituyendo en la ecuación 8 se llega a la siguiente relación:

$$\omega_{motor} = 9.84v + 604.24 . \quad (10)$$

Por último, en la figura 11, se muestra un comparativo gráfico entre la Potencia mecánica disponible en el viento (azul), Potencia eléctrica generada por la turbina comercial (azul), Potencia eléctrica generada por el sistema emulador (rojo).

(amarillo) y la Potencia eléctrica generada por el sistema emulador (rojo).

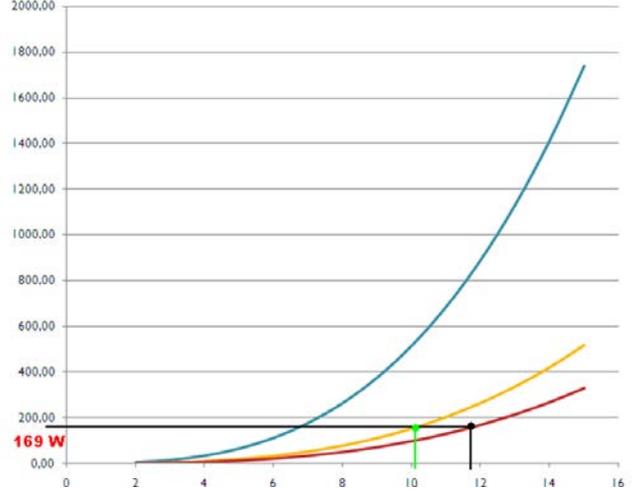


FIGURA 8 Comparativo gráfico (eje y = potencia [W]; eje x = velocidad de viento [m/s]) entre la Potencia mecánica disponible en el viento (azul), Potencia eléctrica generada por la turbina comercial (amarillo) y la Potencia eléctrica generada por el sistema emulador (rojo).

## V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se desarrolló un sistema que convierte potencia mecánica a potencia eléctrica y se realizó una comparación con una turbina eólica comercial de baja potencia. El sistema puede ser implementado en laboratorios escolares en condiciones interiores para relacionar asignaturas como como maquinas eléctricas, electrónica de potencia, física, microcontroladores y energía renovable.

Durante el desarrollo de este proyecto, se involucró la participación de estudiantes de Ingeniería Mecatrónica y Electrónica para la implementación del contador digital de revoluciones y la obtención de datos, así como el análisis por el método de mínimos cuadrados que fue usado para encontrar la ecuación 8 con el fin de obtener una relación entre las velocidades angulares.

A partir de la ecuación 8 se obtiene la ecuación 10 la cual fue parte importante para saber a qué velocidad angular se debía poner en marcha el motor para emular una determinada velocidad de viento en la turbina.

Con el prototipo se puede emular un rango aceptable de velocidades de viento (2-15m/s) para la turbina comercial como se puede observar en la figura 8.

Mediante componentes eléctricos simples se logró implementar un prototipo didáctico para comprender el principio de funcionamiento simplificado de las turbinas eólicas. Sin embargo, apreciando la tabla IV puede notarse que, para lograr potencias eléctricas similares a las entregadas por la turbina eólica SUNSOL-TEC, se necesitan velocidades angulares más elevadas. Esto se debió a que la eficiencia del generador síncrono utilizado ( $\eta=0.54$ ) era menor que la del generador asíncrono de la

turbina comercial ( $\eta \approx 0.9$ ). En la práctica, conseguir generadores asíncronos es algo complicado debido a su escasez y esto, además, incrementaría el costo del prototipo por ello no se tomó en cuenta esta opción.

El costo económico total del prototipo utilizando partes usadas osciló alrededor de los \$2,200 pesos; si se hubieran considerado piezas nuevas, el precio estimado ascendería a \$5,000 pesos aproximadamente.

Sin embargo, la turbina eólica SUNSOL-TEC tiene un precio aproximado de \$15,000 pesos en el mercado (incluyendo gastos de transportación e impuestos). Aquí puede apreciarse una diferencia notable de coste económico entre el prototipo desarrollado y el dispositivo comercial.

Por otra parte, se observó que el prototipo implementado está limitado a las RPM que gire el motor. El motor SIEMENS alcanza un máximo de 1740 RPM dado que es de 0.5 Caballos de potencia. Esto impacta en las velocidades de viento y las potencias eléctricas que quieran lograrse dado que el alternador, teóricamente y según sus datos técnicos, puede girarse hasta 15,000 RPM y así obtener corrientes cercanas a los 50 Amperes.

Por tanto, si quisieran emularse velocidades de viento mayores y obtenerse potencias eléctricas superiores (emulando el comportamiento de turbinas eólicas de mayor envergadura), se debe cambiar el motor por uno de mayor potencia y también deben cambiarse las poleas y la banda para que la multiplicación de velocidad sea mayor; esto impactaría incrementando el costo económico del sistema.

Algunas mejoras propuestas para el prototipo son:

- Implementación de un freno mecánico para detener por completo la velocidad de giro del prototipo.
- Analizar las pérdidas de potencia eléctrica.
- Sustitución del alternador de automóvil por un generador asíncrono de mayor eficiencia y sustituir el motor actual por un motor de mayor potencia, así como las poleas por unas de mayor tamaño.

Actualmente este prototipo es utilizado como parte del proceso de enseñanza en diversas asignaturas de las diferentes licenciaturas impartidas en la Facultad de

## AGRADECIMIENTOS

Se hace un extensivo agradecimiento a los estudiantes de Ingeniería Mecatrónica y Electrónica Víctor Hugo Maximino González y Carlos Adán Méndez Quistián por su valiosa colaboración en el desarrollo de este proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] <http://www.iea.org/> (International Energy Agency, consultado el 10 junio de 2016).
- [2] <http://www.eia.gov/> (U.S. energy information administration, consultado el 10 de junio 2016).
- [3] De Luca, R., *Wind energy: an application of Bernoulli's theorem generalized to isentropic flow of ideal gases*, Eur. J. Phys. **34**, 189-197 (2013).
- [4] Zucker, F., Grabner, A., Strunz, A., Meyn, J., *Quantitative analysis of a wind energy conversion model*, Eur. J. Phys. **36**, 025014 (2015).
- [5] Patel Mukund, R., *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation 1<sup>a</sup> ed*, (CRC press, USA, 2006).
- [6] Ackermann, T., *Wind power in power systems*, 1<sup>o</sup> ed (John Wiley, USA, 2012).
- [7] Chapman, S. J., *Electrical Machinery Fundamentals*, 5<sup>o</sup>. Ed. (McGraw Hill, México, 2012).
- [8] Abdus Salam, M., *Fundamentals of Electrical Machines*, 1<sup>a</sup> ed (Alpha Science International Ltd, USA, 2005).
- [9] Rashid, M., *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*, 4<sup>o</sup> ed. (Prentice Hall, USA, 2013).
- [10] <https://www.arduino.cc/> (sitio oficial de Arduino, consultado el 12 julio de 2016).