

# Modelo de generador eólico de eje vertical usando redes neuronales

## Trabajo Terminal No. 2018-B087

*Alumnos: García García Damián Amaury, Paz Santos Salvador\*, Pineda Aburto Jennifer*

*Directores: Suárez Castañón Miguel Santiago, Moreno Armendáriz Marco Antonio*

*Turno para la presentación del TT: Matutino*

*e-mail: salvador.paz.santos@gmail.com*

**Resumen** – Partiendo de la problemática de la producción de energía en las ciudades y las limitantes existentes en los modelos usados para diseño de generadores eólicos de eje vertical, este proyecto se enfoca en el desarrollo de un modelo de caja negra usando redes neuronales a partir de los datos obtenidos de un prototipo. Para esto, es necesaria la construcción e instrumentación de dicho prototipo, para después realizar el entrenamiento de una red neuronal. Como caso de estudio se elige la Ciudad de México, en donde se recolectarán los datos, dando así origen al modelo.

**Palabras clave** – Instrumentación, Inteligencia Artificial, Reconocimiento de Patrones, Redes Neuronales.

## 1. Introducción

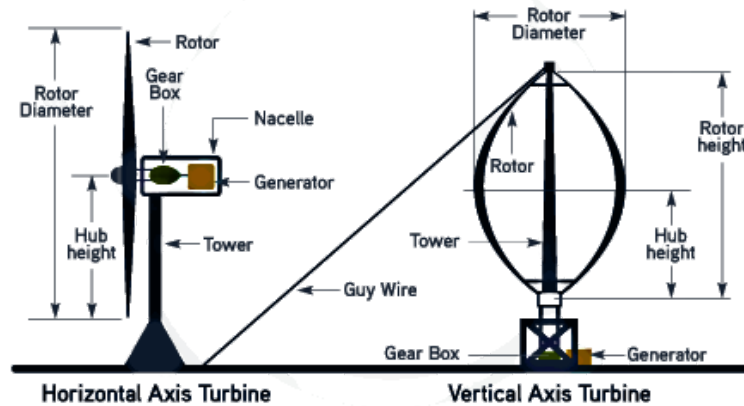
La generación de energía renovable es uno de los tópicos actualmente en auge, debido al incremento de la contaminación y polución por el uso de combustibles fósiles a partir de la primer revolución industrial, provocando un aumento en la demanda del uso de energías renovables. Algunos ejemplos de este tipo de energías son la energía solar, hidráulica, geotérmica y eólica. De ellas, la energía eólica es una de las fuentes de energía renovables con más potencial [1] por su alta rentabilidad y rendimiento.

Para aprovechar este potencial, se han usado a lo largo de la historia máquinas como los molinos, que son construcciones con aspas de gran tamaño que, impulsados por la corriente del viento, son capaces de mover rodillos para moler granos [2]. A partir de este antecedente, los primeros aerogeneradores eléctricos surgieron a finales de 1970 [3]; estos usan un mecanismo para generar corriente eléctrica mediante hélices unidas a un eje. Actualmente la capacidad eólica instalada a nivel mundial es de 539,291 MW, representando el 5% de electricidad generada por la población, según estadísticas publicadas a finales de 2017 [4] por la WWEA (World Wind Energy Association). Por este motivo, a lo largo de los años se han llevado a cabo investigaciones y proyectos en este ámbito con la finalidad de profundizar, optimizar y expandir el uso de este método de producción de energía.

Los generadores comúnmente utilizados para satisfacer las demandas de energía eólica son los horizontales o HAWTs (por sus siglas en inglés, “Horizontal Axis Wind Turbine”), dado que la tecnología que usan es la más revisada y probada, y se dice que es, en la mayoría de los casos, más fiable [5]. Sin embargo, los requerimientos para usar este tipo de dispositivos limitan mucho su implementación, debido a que se debe colocar en un espacio donde el viento posea una sola dirección y sea de flujo laminar, y el sitio no debe encontrarse rodeado de obstáculos [6]. Las granjas compuestas de dichos generadores requieren espacios amplios, para poder separar cada turbina de la turbulencia generada por otras; esto limita la cantidad de energía que puede ser extraída de cierta región [2].

A causa de estos requerimientos, es especialmente complicado aplicar este método de generación de energía en las ciudades, donde los espacios reducidos y las construcciones obstruyen el libre flujo del viento e intervienen directamente con la dirección en la que corre, provocando un régimen de viento turbulento. En contraste, los aerogeneradores de eje vertical o VAWTs (por sus siglas en inglés “Vertical Axis Wind Turbine”) no requieren de corrientes de viento unidireccionales, soportan el régimen de viento turbulento, y sus requerimientos de espacio son mucho menores, por lo tanto, son adecuados para su uso en las urbes [7]. Adicionalmente, los VAWTs pueden ser más fáciles de manufacturar, de bajo peso, crean poca contaminación auditiva y pueden tolerar climas extremos [2].

En la **Figura 1** se observa un diagrama que muestra las configuraciones generales de los aerogeneradores con eje horizontal y con eje vertical.



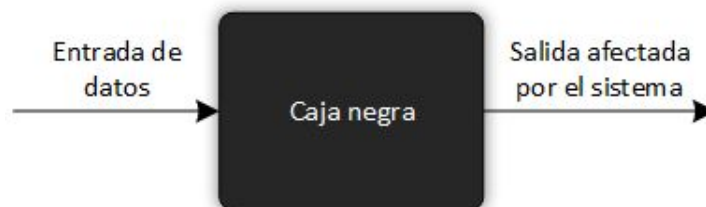
**Figura 1.** Configuraciones de aerogeneradores [8].

El diseño de los aerogeneradores verticales es, en general, complejo. Se ha experimentado con diversos diseños de las aspas, en particular dos tipos, las usadas en los HAWTs, haciendo uso de la aerodinámica y las presiones altas y bajas, como en las alas de un avión, o con las aspas viendo directamente en la dirección del viento [2][9].

Para conocer la eficiencia de los distintos diseños de hélices en los VAWTs existen diferentes formas de modelar, los modelos matemáticos, representan el sistema por medio de relaciones matemáticas, los modelos computacionales o CAE (por sus siglas en inglés, “Computer-aided Engineering”), que se basan en simulaciones por computadora, y los modelos por medio de inteligencia artificial, que abstraen el comportamiento del sistema partiendo de mediciones históricas del mismo, comportándose como una caja negra.

Un modelo de caja negra nos permite prescindir inicialmente de los detalles internos y atender las interacciones con el entorno. La caja negra se utiliza para representar a los sistemas cuando no sabemos qué elementos lo componen, pero sabemos que a determinadas entradas corresponden determinadas salidas que han sido transformadas dentro del sistema. Un modelo de este tipo incluye e interrelaciona únicamente variables externas (observables), especialmente entradas y salidas [10].

Dentro de la **Figura 2**, podemos ver la descripción del modelo que se usará en este proyecto.



**Figura 2.** Modelo de caja negra.

Ya que no sabemos cómo interactúan las variables de entrada con el sistema, es prácticamente imposible obtener una base matemática que describa el proceso que nos interesa, en este caso la generación de energía eólica. Es aquí donde haremos uso de las Redes Neuronales Artificiales (RNA), que presentan varias ventajas sobre las técnicas de modelado convencionales, ya que son capaces de modelar sin necesidad de suposiciones sobre la naturaleza, sin comprender la base matemática del problema y de aprender relaciones entre las variables a partir de un conjunto de ejemplos.

Las RNA son una rama de la Inteligencia Artificial, cuyo funcionamiento está inspirado en las neuronas biológicas. Su procesador elemental son las neuronas artificiales, que se interconectan entre sí para recibir una serie de entradas (ya sea del exterior o de otras neuronas), con pesos diferentes, y procesarlas para proporcionar una salida única.

Uno de los elementos principales de una RNA es el aprendizaje, que es la manera en cómo se almacena la información dentro de la red para poder ajustar, adecuada e internamente, todos los pesos asociados a cada entrada para aproximar la salida a un valor deseado, de manera que pueda responder después por sí sola a situaciones distintas de las aprendidas.

Este aprendizaje que realizan las neuronas se categoriza en supervisado y no supervisado. El primero se caracteriza porque el proceso de aprendizaje se realiza mediante un entrenamiento controlado; es decir, se ingresan datos específicos para determinar la respuesta de una RNA y aproximar la salida a lo esperado mediante la modificación de sus pesos; mientras que el segundo no recibe ninguna información por parte del entorno que le indique si la salida generada en respuesta a una determinada salida es correcta o no.

## Estado del Arte

Para la realización del estado del arte, de manera interna y externa se consultaron trabajos terminales, tesis, investigaciones y productos similares en el mercado en donde se manejan tecnologías similares a las propuestas, dando como resultado la siguiente tabla:

TRABAJOS SIMILARES	DESCRIPCIÓN	TECNOLOGÍA EMPLEADA
Trabajo Terminal No. 2009-0079: Sistema Simulador de Redes Neuronales Artificiales	Sistema entrenado para la base de aprendizaje y simulación de cómo actúa una red neuronal dados ciertos datos de entrenamiento siguiendo el modelo de caja gris.	Redes neuronales
Toward the Coevolution of Novel Vertical-Axis Wind Turbines	Uso de la evolución artificial para diseñar prototipos de turbinas de viento con ejes verticales a ser evaluadas en condiciones reales de viento.	Evolución asistida por subrogación.
Magnetorheological fluid dampers: a review of parametric modelling	Modelado de simulación, basado en modelos de caja negra. para amortiguadores de fluido magnetorreológico.	Modelos de caja negra
3D printed Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) model	Modelado de turbina de viento con eje vertical impreso en 3D.	Simulación, impresión 3D
AirEnergy 3D	Turbina de viento impresa generadora de energía.	Transformadores eólicos
Vertical Axis Wind Turbine Evaluation and Design	Simulación de hélices para turbinas de viento con ejes verticales con sus respectivas simulaciones de viento por computadora, enfocado en turbinas para azoteas.	Simulación, impresión 3D
<b>Solución Propuesta:</b> Modelo de generador eólico de eje vertical usando redes neuronales	Modelo de caja negra capaz de determinar la cantidad de energía producida por un generador eólico vertical, dadas sus características e interacción con el viento.	Redes neuronales

**Tabla 1.** Resumen de productos similares.

## 2. Objetivos

**General:** Obtener un modelo de caja negra para un generador eólico vertical, mediante el uso de una red neuronal entrenada con datos reales obtenidos mediante mediciones realizadas a un generador prototipo.

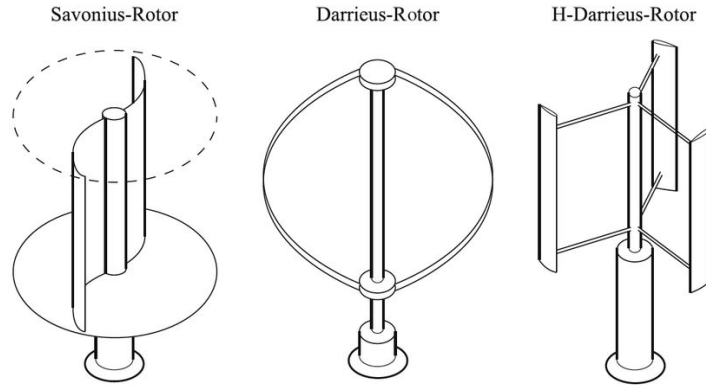
### Particulares:

- Construir el generador prototipo.
- Analizar los parámetros a medir por el prototipo.
- Instrumentar sensores para la medición de viento, rotación y otros.
- Obtener un conjunto de datos a partir de los sensores colocados en el prototipo.
- Diseñar una red neuronal para modelar el comportamiento del generador y la relación entre la geometría y su desempeño.
- Entrenar la red neuronal para obtener el modelo descrito anteriormente.

### 3. Justificación

Este trabajo terminal surge como respuesta a la necesidad de diseñar un generador eólico vertical, del cual se desconoce el rendimiento que tendrá en la zona donde será utilizado. Este rendimiento depende mayoritariamente del diseño de las hélices: su peso, geometría, características aerodinámicas y material. Existen dos diseños que se investigan comúnmente, Savonius[16], donde las aspas están unidas completamente al eje, y Darrieus [17], donde las aspas se encuentran mayoritariamente separadas del eje, combinaciones de estas variantes también existen [2].

En la **Figura 3** están mostrados diferentes modelos de hélices.



**Figura 3.** Diseños de hélices usados en aerogeneradores de eje vertical [18].

Para diseñar las hélices, se pueden utilizar distintos modelos, modelos matemáticos de primeros principios, encontrando ecuaciones que representen las hélices y sus interacciones; sin embargo, no existen ecuaciones para describir nuestro sistema debido a la dificultad que se presenta al tratar con un régimen de viento turbulento, ya que éste se mueve en trayectorias irregulares sin seguir un orden establecido, y esto provoca que la cantidad de movimiento que puede provocar en una turbina sea errática [6].

El modelo CAE, que no necesita de una ecuación que modele la interacción completa, ya que divide en un número finito de partes un fenómeno para no calcular la interacción en conjunto, en cambio, realiza el cálculo de la interacción de un solo elemento, asumiendo que la suma del comportamiento de todos los elementos será el comportamiento del sistema; a esto se le conoce como análisis de elemento finito [18]. Sin embargo, simular vientos turbulentos es complicado, ya que la turbulencia incrementa respecto a la superficie del aspa, afectando todo el sistema [19].

Dadas las limitantes existentes en los modelos anteriormente mencionados, decidimos usar el modelado por caja negra puesto que, usando este método para realizar el proceso de aprendizaje de una RNA, podemos aproximar cualquier función sin necesidad de saber la estructura de la función.

Es por esta razón que se ha propuesto un sistema que sea capaz de modelar la potencia resultante de un aerogenerador, dadas sus características y las del entorno. En primera instancia, se construirá un generador electromecánico, con un eje, al cual se le instalará un diseño de hélices resultado de una previa investigación. Posteriormente, se instalarán sensores para medir la energía producida y distintos parámetros definidos en un análisis previo. Estos sensores recolectarán datos por un periodo de tiempo a determinar, los cuales serán analizados para diseñar una red neuronal apropiada que sea capaz de representar al modelo.

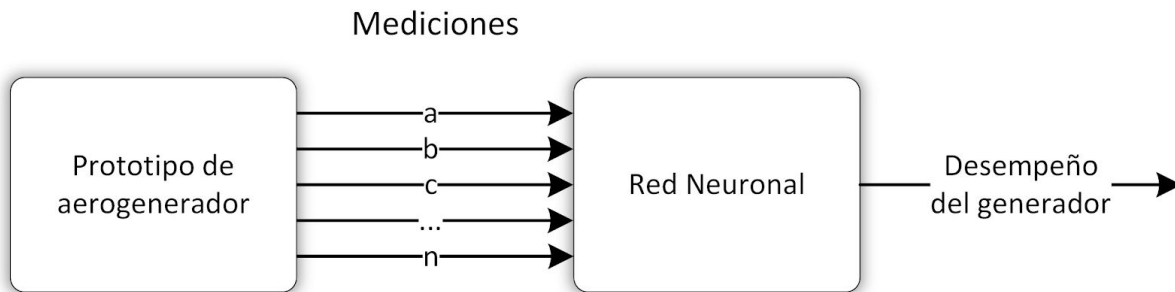
El modelo obtenido en el desarrollo de este Trabajo Terminal podrá ser usado en el futuro para realizar un diseño óptimo de generadores eólicos de eje vertical especialmente optimizados para la Ciudad de México.

## 4. Productos

El presente proyecto espera obtener un modelo de caja negra que relacione los parámetros físicos del diseño del prototipo con el desempeño de generación de energía eléctrica, resultado del entrenamiento de una red neuronal con los datos obtenidos de las lecturas de dicho prototipo.

Con base en esto, los productos a obtener son:

- Conjunto de datos reales de generación de energía en función de parámetros definidos en la investigación.
- Prototipo instrumentado de aerogenerador.
- Modelo del aerogenerador.



**Figura 4.** Arquitectura del sistema.

En la **Figura 4** se observa la arquitectura básica del sistema propuesto. Se dispondrá de un generador eólico prototipo, con el cual se obtendrán mediciones de factores como viento, velocidad de rotación de las hélices, generación de corriente, por medio de sensores instalados en el generador. Los datos generados por estas mediciones se usarán como parámetros en el entrenamiento de una red neuronal. El entrenamiento exitoso de la red neuronal obtendrá como resultado el modelo buscado, que logre establecer una relación entre los parámetros de entrada (mediciones) y la generación de energía.

## 5. Metodología

Para este proyecto utilizaremos la metodología SCRUM, ya que al ser una metodología ágil que permite trabajar colaborativamente, permite el desarrollo y gestión de este proyecto con eficacia, flexibilidad y control al estar basado en la entrega parcial y regular de un producto, priorizado por el beneficio que aporta al proyecto.

Esta metodología en específico está indicada para proyectos en entornos complejos, donde se necesita obtener resultados inmediatos y los requisitos son cambiantes; a la vez de que es fundamental la innovación, competitividad de los integrantes, flexibilidad en cuestión a tiempos y productividad con respecto al rendimiento.

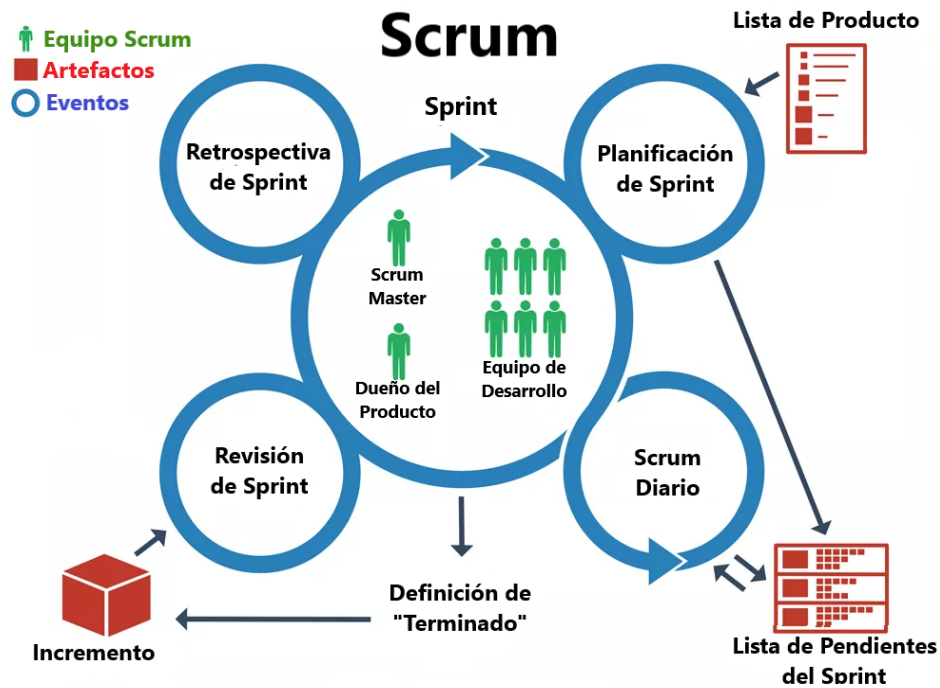
Este proyecto se categoriza como complejo por las tareas que implica y las áreas en las que se desarrolla, como en la construcción e implementación del modelo prototipo, donde se requiere un conocimiento avanzado en electrónica, la medición de valores físicos reales, y el desarrollo y entrenamiento de una red neuronal.

En la **Figura 5**, podemos observar detalladamente la implementación de esta metodología a lo largo del proyecto. Cada iteración (llamada Sprint) consta de un periodo de dos semanas, donde los tres integrantes que conforman el equipo de desarrollo se reunirá para revisar avances.

El papel del Scrum Master y del dueño del producto lo asumirán ambos directores de este trabajo terminal, que revisarán cada evento de la metodología haciendo uso de la plataforma Trello para la planificación de las actividades a realizar durante cada iteración, así como la retrospectiva de las actividades completadas en el Sprint finalizado, la revisión de las nuevas actividades a realizar en el Sprint actual y los avances incurridos en el transcurso del día antes del siguiente Sprint (Scrum Diario).

La lista de pendientes del Sprint se revisará en cada Scrum diario; a su vez, los productos y avances que se vayan entregando y revisando en cada Planificación de Sprint estarán detallados en la lista de producto. La aprobación de cada Sprint terminado será determinada por el Scrum Master y, en conjunto con el equipo de desarrollo, se determinará el incremento del proyecto.

La **Figura 5** sirve como una mejor descripción de la metodología que se usará durante este proyecto.



**Figura 5.** Flujo de trabajo en SCRUM [20].

## 6. Cronograma

Nombre del alumno: García García Damián Amaury

TT No.:2018-B087

Título del TT: Modelo de generador eólico de eje vertical usando redes neuronales.

Actividad	2019											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
<b>Investigación</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Aerogeneradores de eje vertical</li> <li>Red neuronal convolucional</li> <li>Circuitos convertidores analógico-digital</li> </ul>												
<b>Diseño de prototipo</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Cotización y compra de componentes</li> </ul>												
<b>Construcción de prototipo</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Armado de circuito</li> </ul>												
<b>Instrumentación de prototipo</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Colocación y ajuste de sensores</li> </ul>												
<b>Recolección de datos</b>												
<b>Presentación TT1</b>												
<b>Preprocesamiento de datos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Clasificación de información recolectada por sensor</li> </ul>												
<b>Desarrollo de red neuronal</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Diseño y programación de etapa de preprocesamiento</li> </ul>												
<b>Entrenamiento de red neuronal</b>												
<b>Análisis de resultados</b>												
<b>Desarrollo de documentación</b>												
<b>Presentación TT2</b>												

Actividad	2019											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
<b>Investigación</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Aerogeneradores de eje horizontal</li> <li>Red neuronal recurrente</li> <li>Modelos de hélices híbridas.</li> </ul>												
<b>Diseño de prototipo</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Selección de sensores</li> </ul>												
<b>Construcción de prototipo</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Construcción de generador de energía mecánica a eléctrica</li> </ul>												
<b>Instrumentación de prototipo</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Calibración y mantenimiento de sensores</li> </ul>												
<b>Recolección de datos</b>												
<b>Presentación TT1</b>												
<b>Preprocesamiento de datos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Clasificación de información recolectada por sensor</li> </ul>												
<b>Desarrollo de red neuronal</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Diseño y programación de la arquitectura de red neuronal</li> </ul>												
<b>Entrenamiento de red neuronal</b>												
<b>Análisis de resultados</b>												
<b>Desarrollo de documentación</b>												
<b>Presentación TT2</b>												



Actividad	2019											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
<b>Investigación</b> • Tipos de modelos • Perceptrón multicapa • Modelos de hélices Darrieus.												
<b>Diseño de prototipo</b> • Diseño de circuito												
<b>Construcción de prototipo</b> • Impresión de hélices en 3D												
<b>Instrumentación de prototipo</b> • Pruebas en sensores												
<b>Recolección de datos</b>												
<b>Presentación TT1</b>												
<b>Preprocesamiento de datos</b> • Clasificación de información recolectada por sensor												
<b>Desarrollo de red neuronal</b> • Diseño y programación de etapa de pruebas y validación de la red neuronal												
<b>Entrenamiento de red neuronal</b>												
<b>Análisis de resultados</b>												
<b>Desarrollo de documentación</b>												
<b>Presentación TT2</b>												

## 7. Referencias

- [1] Canseco, M. (2010). *Energías renovables en América Latina*. Madrid España.
- [2] Preen, R. J., Bull, L., (2015). *Toward the Coevolution of Novel Vertical-Axis Wind Turbines*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 19, no. 2, pp. 284 - 294.
- [3] Asociación Mexicana de Energía Eólica (2006), *El potencial eólico mexicano: Oportunidades y retos en el nuevo sector eléctrico*. Ciudad de México, México.
- [4] WWEA. (2018, Febrero 12). *Wind power capacity reaches 539 Gw, 52,6 Gw added in 2017*. [Online]. Disponible: <https://wwindea.org/blog/2018/02/12/2017-statistics/>
- [5] Prieto M., R., (2012). *Aerogenerador de eje horizontal frente a aerogenerador de eje vertical*. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- [6] Turean, N., (2015). *Aerogenerador de viento*. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- [7] Sharpley, N., (2013, Octubre 28). *Vertical-axis wind turbine tolerates turbulent wind*. [Online] Disponible: <http://www.easybib.com/reference/guide/apa/website>
- [8] Cemaer. (2015, Enero 8). *Energía eólica - Tipos de turbinas de viento*. [Online]. Available: <http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2015/01/08/energia-eolica-tipos-de-turbinas-de-viento/>
- [9] Deisadze, L., Digeser, D., Dunn, C., Shoikat, D. (2013). *Vertical Axis Wind Turbine Evaluation and Design*. Instituto Politécnico de Worcester, Worcester, Estados Unidos.
- [10] Espinoza, C. (2011). *Sistema problemático. Diseñando líneas de investigación*. Huancayo, Perú.
- [11] Gómez, F. J., Fernández, F. A., López, M. T., Díaz, M. A. (1994). *Aprendizaje con redes neuronales artificiales*. Ensayos: Revista de la Facultad de Educación de Albacete, no. 9, pp. 169 - 180. Albacete, España.
- [12] *Sistema Simulador de Redes Neuronales Artificiales*, TT 2009-0079, 2009, Edmundo René Durán Camarillo.
- [13] Wang, D. H., Liao, W. H., (2011). *Magnetorheological fluid dampers: a review of parametric modelling*. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of Ministry of Education of China, Chongqing University, Chongqing, Republic of China.
- [14] Sánchez, R., Fernández, M., Nolasco, S. (2015). *Aplicación de Redes Neuronales Artificiales (RNA) en la Predicción y Modelado de la Cinética de Extracción de Aceite de Canola*. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- [15] Savonious, S. J., (1930). "Wind Rotor" Patent US 1 766 765.
- [16] Darrieus, G. J. M., (1931). "Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current" Patent US 1 835 018.
- [17] Schmelter, R., Denk, P., (2014). *Vertikale Kleinwindanlagen in Bayern: Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse*. Springer - Verlag. pp. 12 - 131. Wiesbaden, Alemania.
- [18] Bhavikatti, S. S., (2005). *Finite element analysis*. New Age International. Delhi, India.
- [19] Al-Abadi, A.; Kim, Y. J.; Delgado, A., (2016). *Turbulence Impact on Wind Turbines: Experimental Investigations on a Wind Turbine Model*. Phys.: Conf. Ser. 753 032046.
- [20] Schwaber, K., Sutherland, J. (2016). *La Guía de Scrum*. Estados Unidos.

## 8. Alumnos y Directores

*García García Damián Amaury*.- Alumno de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales en ESCOM, Boleta: 2016630546, Tel.5534460784, email damiangarcia.g95@gmail.com

Firma: \_\_\_\_\_

*Paz Santos Salvador*.- Alumno de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales en ESCOM, Boleta: 2016630298, Tel. 5510454827, email salvador.paz.santos@gmail.com

Firma: \_\_\_\_\_

*Pineda Aburto Jennifer*.- Alumno de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales en ESCOM, Boleta: 2016601344, Tel. 5546893764, email jennifer.pineda.ipn@gmail.com

Firma: \_\_\_\_\_

*Suárez Castañón Miguel Santiago*.- Dr. en C. de la Computación en el Instituto Politécnico Nacional en 2005, M. en C. de la Computación de la UNAM en 2001, Ing. en Cibernética y Ciencias de la Computación en la Universidad La Salle AC en 1991, Profesor de ESCOM/IPN desde 2000. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I desde 2007. Co-autor de más de 25 artículos de investigación publicados en revistas contenidas el Journal Citation Reports. Áreas de Interés: Ingeniería de Software. Ext. 52043, Tel. celular 5550 689512, email: sasuares@prodigy.net.mx.

Firma: \_\_\_\_\_

*Moreno Armendáriz Marco Antonio*.- Obtuvo el grado de Licenciatura en Ingeniería Cibernética en la Universidad La Salle y los grados de Maestro y Doctor en Ciencias en la especialidad de Control Automático en CINVESTAV-IPN en 1999 y 2003, respectivamente.

Áreas de interés: Redes Neuronales Artificiales aplicadas a la identificación y control de sistemas, Visión por Computadora, Mecatrónica e implementación sobre FPGAs de este tipo de algoritmos.

Actualmente miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI).

Teléfono: 57-29-6000 ext. 56525

email: mam.armendariz@cic.ipn.mx

Firma: \_\_\_\_\_

CARÁCTER: Confidencial  
FUNDAMENTO LEGAL: Art. 3, fracc. II, Art. 18, fracc. II  
y Art. 21, lineamiento 32, fracc. XVII de la L.F.T.A.I.P.G.  
PARTES CONFIDENCIALES: No. de boleta y Teléfono.