

ISSN 2523-6873

Volumen I, Número 2 — Abril — Junio - 2017

# Revista de Ingeniería Innovativa

**ECORFAN®**



**ECORFAN-Republic of Peru**

## **Indización**

- RESEARCH GATE
- GOOGLE SCHOLAR
- HISPANA
- MENDELEY

## **ECORFAN-Perú**

### **Directorio Principal**

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD.

### **Director Regional**

SUYO-CRUZ, Gabriel. PhD.

### **Director de la Revista**

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC.

### **Edición Tipográfica**

TREJO-RAMOS, Iván. BsC.

### **Edición de Logística**

SERRUDO-GONZALEZ, Javier. BsC.

Revista de Ingeniería Innovativa, Volumen 1, Número 2, de Abril a Junio 2017, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Perú. La Raza Av. 1047 No.- Santa Ana, Cusco-Perú. Postcode:11500. WEB: [www.ecorfan.org/republicofperu](http://www.ecorfan.org/republicofperu), [revista@ecorfan.org](mailto:revista@ecorfan.org). Editora en Jefe: RAMOS-ESCAMILLA, María ISSN 2523-6873. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN Imelda, LUNA-SOTO, Vladimir, actualizado al 30 de Junio 2017.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan necesariamente las opiniones del editor de la publicación.

Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin permiso del Instituto Nacional de defensa de la competencia y protección de la propiedad intelectual.

## **Consejo Editorial**

BELTRÁN-MIRANDA, Claudia. PhD  
Universidad Industrial de Santander, Colombia

BELTRÁN-MORALES, Luis Felipe. PhD  
Universidad de Concepción, Chile

RUIZ-AGUILAR, Graciela. PhD  
University of Iowa, U.S.

SOLIS-SOTO, María. PhD  
Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca, Bolivia

GOMEZ-MONGE, Rodrigo. PhD  
Universidad de Santiago de Compostela, España

ORDÓÑEZ-GUTIÉRREZ, Sergio. PhD  
Université Paris Diderot-Paris, Francia

ARAUJO-BURGOS, Tania. PhD  
Universita Degli Studi Di Napoli Federico II, Italia

SORIA-FREIRE, Vladimir. PhD  
Universidad de Guayaquil, Ecuador

## **Consejo Arbitral**

VGPA. MsC

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

EAO. MsC

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

MMD. PhD

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

BRIIIG. PhD

Bannerstone Capital Management, U.S.

EAO. MsC

Bannerstone Capital Management, U.S.

OAF. PhD

Universidad Panamericana, México

CAF. PhD

Universidad Panamericana, México

RBJC. MsC

Universidad Panamericana, México

## Presentación

ECORFAN, es una revista de investigación que publica artículos en el área de: Revista de Ingeniería Innovativa.

En Pro de la Investigación, Enseñando, y Entrenando los recursos humanos comprometidos con la Ciencia. El contenido de los artículos y opiniones que aparecen en cada número son de los autores y no necesariamente la opinión de la Editora en Jefe.

Como primer artículo está *Estudio termografía para el ahorro de energía y prevención de accidentes* por DOMÍNGUEZ-NORIEGA, Alonso Rafael, CHÁVEZ-SAENZ, Velia, AYÓN-NÚÑEZ, Pedro Alexander y ROBLES-ROMERO, Román, como siguiente artículo esta *Modulación-Demodulación en amplitud para el proceso de sincronía eléctrica* por RUEDA-GERMÁN, Clementina, RIVAS-CAMBERO, Iván de Jesús, ARROYO-NÚÑEZ, José Humberto y ELIZALDE-CANALES, Francisca Angélica con adscripción en la Universidad Politécnica de Tulancingo, como siguiente artículo esta *Fuente sintonizable de fibra óptica para aplicaciones en Banda-C* por PÉREZ-SÁNCHEZ, Grethell Georgina, ANDRADE-GONZÁLEZ, Edgar Alejandro, SANDOVAL-ROMERO, Gabriel Eduardo y MEJÍA-ISLAS, José Adolfo con adscripción en la Universidad Autónoma Metropolitana, y la Universidad Nacional Autónoma de México, como siguiente artículo esta *Análisis dinámico de la inclinación de colectores solares de placa plana y tubos evacuados para determinar el potencial energético-económico en las ciudades de Chihuahua y Durango* por ESCOBEDO-BRETADO, Jorge, RÍOS-OROZCO, Carlos, NAJERA-TREJO, Mario y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio con adscripción en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, y el Instituto Tecnológico de Durango, como siguiente artículo está *Observador lineal usado para estimar corrientes en los devanados de un aerogenerador* por PÉREZ-BARRIOS, Carlos Ángel, TÉLLEZ-ANGUIANO, Adriana del Carmen, HERAS-CERVANTES, Mario y GUTIÉRREZ-GNECCHI, José Antonio, con adscripción en el Instituto Tecnológico de Morelia, como siguiente artículo está *Diseño y construcción de un amplificador para audio de 500 Watts mediante transistores BJT* por GUTIÉRREZ-GARCÍA, Juan Nicolás, SÁNCHEZ-LÓPEZ, Héctor Javier, ROJAS-OLMEDO, Israel Alejandro y ROJAS-RAMÍREZ, Erick con adscripción en la Universidad Tecnológica del Valle de Toluca, como siguiente artículo está *Análisis del arranque de las micro turbinas eólicas de eje horizontal de baja capacidad HAWT* por CASILLAS-FARFÁN, Christian, LÓPEZ-GARZA, Víctor, SOLORIO-DÍAZ, Gildardo y MOLINERO-HERNÁNDEZ, Daniel con adscripción en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

## Contenido

Artículo	Página
<b>Estudio termografía para el ahorro de energía y prevención de accidentes</b> DOMÍNGUEZ-NORIEGA, Alonso Rafael, CHÁVEZ-SAENZ, Velia, AYÓN-NÚÑEZ, Pedro Alexander y ROBLES-ROMERO, Román	1-8
<b>Modulación-Demodulación en amplitud para el proceso de sincronía eléctrica</b> RUEDA-GERMÁN, Clementina, RIVAS-CAMBERO, Iván de Jesús, ARROYO-NÚÑEZ, José Humberto y ELIZALDE-CANALES, Francisca Angélica	9-16
<b>Fuente sintonizable de fibra óptica para aplicaciones en Banda-C</b> PÉREZ-SÁNCHEZ, Grethell Georgina, ANDRADE-GONZÁLEZ, Edgar Alejandro, SANDOVAL-ROMERO, Gabriel Eduardo y MEJÍA-ISLAS, José Adolfo	17-23
<b>Análisis dinámico de la inclinación de colectores solares de placa plana y tubos evacuados para determinar el potencial energético-económico en las ciudades de Chihuahua y Durango</b> ESCOBEDO-BRETADO, Jorge, RÍOS-OROZCO, Carlos, NAJERA-TREJO, Mario y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio	24-33
<b>Observador lineal usado para estimar corrientes en los devanados de un aerogenerador</b> PÉREZ-BARRIOS, Carlos Ángel, TÉLLEZ-ANGUIANO, Adriana del Carmen, HERAS-CERVANTES, Mario y GUTIÉRREZ-GNECCHI, José Antonio	34-42
<b>Diseño y construcción de un amplificador para audio de 500 Watts mediante transistores BJT</b> GUTIÉRREZ-GARCÍA, Juan Nicolás, SÁNCHEZ-LÓPEZ, Héctor Javier, ROJAS-OLMEDO, Israel Alejandro y ROJAS-RAMÍREZ, Erick	43-48
<b>Análisis del arranque de las micro turbinas eólicas de eje horizontal de baja capacidad HAWT</b> CASILLAS-FARFÁN, Christian, LÓPEZ-GARZA, Víctor, SOLORIO-DÍAZ, Gildardo y MOLINERO-HERNÁNDEZ, Daniel	49-65

*Instrucciones para Autores*

*Formato de Originalidad*

*Formato de Autorización*

## Estudio termografía para el ahorro de energía y prevención de accidentes

DOMÍNGUEZ-NORIEGA, Alonso Rafael†\*, CHÁVEZ-SAENZ, Velia, AYÓN-NÚÑEZ, Pedro Alexander y ROBLES-ROMERO, Román

Recibido 3 de Abril, 2017; Aceptado 8 de Junio, 2017

### Resumen

Se presenta un proyecto en el que se observa la problemática de calentamiento en las protecciones termomagnéticas (disyuntores) en la instalación de energía eléctrica de empresa manufacturera del noroeste del país. Esta empresa tenía este problema de calentamiento en las protecciones y centros de carga del área de producción, fue necesario identificar las líneas de distribución que no lo estaban, para esto se realizaron mediciones de corriente y se buscó que coincidieran con la intensidad que marcaban los datos de placa de los equipos. Ese estudio termográfico se realizó con una cámara de termografía de la marca FLUKE modelo Ti125 la cual nos da parámetros de temperatura en escala de colores para poder así tener una imagen al momento de la interpretación de los datos, al estar estudiando sus temperaturas se sabrá si estos presentan una sobrecarga o anomalía. Obtenidos todos los datos y mediciones se realizara un reporte técnico en el cual se verán los puntos en los que se debe de actuar para evitar algún accidente o gastos innecesarios de energía eléctrica.

**Termomagnéticos, Centros de Carga, Accidentes Eléctricos, Termografía Infrarroja**

### Abstract

A project is presented in which the problem of heating in the thermomagnetic protections (circuit breakers) in the electrical installation of a manufacturing company in the northwest of the country is observed. This company had this problem of heating in the protections and loading centers of the production area, it was necessary to identify the distribution lines that were not, for this were made current measurements and were sought to match the intensity that marked the data of the equipment. This thermographic study was carried out with a thermography camera of the brand FLUKE model Ti125 which gives us parameters of temperature in color scale so as to be able to have an image at the time of the interpretation of the data, to be studying its temperatures will know if they present an overload or anomaly. Once all data and measurements have been obtained, a technical report will be made showing the points in which action must be taken to avoid any accidents or unnecessary electrical energy costs.

**Circuit breakers, load centers, electrical accidents, infrared thermography**

**Citación:** DOMÍNGUEZ-NORIEGA, Alonso Rafael, CHÁVEZ-SAENZ, Velia, AYÓN-NÚÑEZ, Pedro Alexander y ROBLES-ROMERO, Román. Análisis para la mejora en el manejo de inventarios de una comercializadora. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-2:1-8

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: dominguez.alonso@utslrc.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.



## Introducción

En las siguientes páginas se muestra el proyecto realizado en una manufacturera de textiles localizada en el noroeste de la República Mexicana, en esta empresa se realiza ropa interior para dama y caballero. La problemática que se localizó en esta manufacturera es referente al área eléctrica especialmente donde se encuentra la mayor carga que es producción.

Una forma de poder entender y localizar los diferentes problemas que se presentaban fue un proyecto de análisis termográfico y balanceo de cargas, esto con el fin de realizar un diagnóstico para que la empresa tenga un parámetro y métrica del funcionamiento de su instalación eléctrica, así ayudar a la compañía en la corrección de sus fallos en sus líneas de producción.

Este análisis fue realizado con el fin de auxiliar a la empresa con el problema que aún tiene en las líneas de producción, por lo observado calentamiento en las cajas de interruptores (disyuntores) impactando el costo de energía eléctrica y con riesgo potencial que haya sobrecalentamiento y accidentes.

Para la empresa se realizaron tablas de cada riel o línea de producción en donde se observa el consumo total de amperaje por línea, así como documentación con las especificaciones de los interruptores, para ser comparados y valorados con el que se tiene en cada línea y así poder observar en donde hay un sobre cargo eléctrico y analizado con las imágenes térmicas.

## Desarrollo del Proyecto

La problemática que presentaba en esta empresa era el calentamiento de sus interruptores termomagnéticos, por lo cual se decidió realizar un estudio termográfico, ya que en esta empresa las accidentes referentes a las cuestiones eléctricas son muy comunes, así como también el daño en sus equipos.

Durante la investigación se observó que los termomagnéticos o disyuntores se encontraban excedidos en calentamiento o aumento en su temperatura, que en el interruptor se traduce a la intensidad de este puede dejar circular sin que este abra para cortar el flujo de corriente.

Como primer paso se realizó un diagrama unifilar para conocer las instalaciones eléctricas en la empresa mostrado en la figura 1.

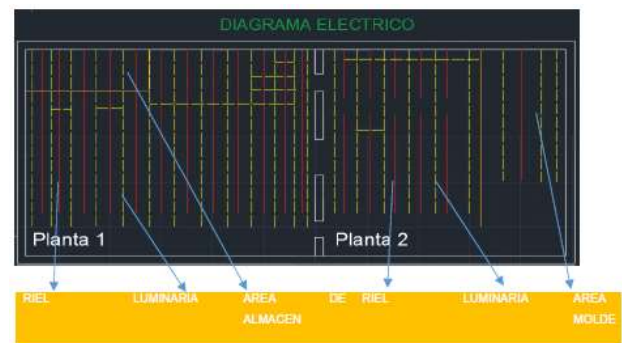
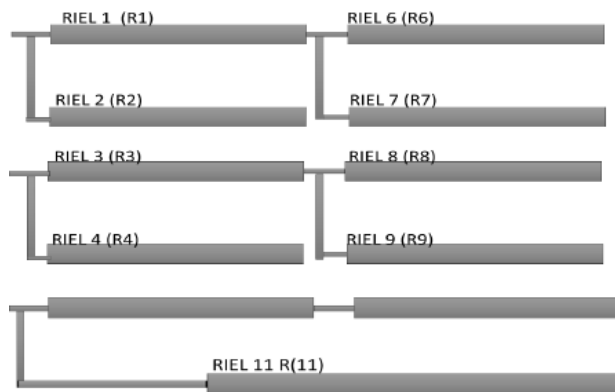


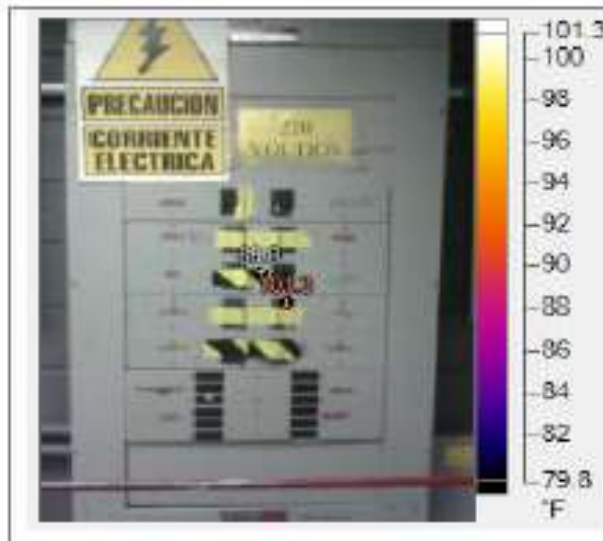
Figura 1 Diagrama unifilar realizado en AutoCAD

Así también se realizó una distribución y etiquetación de los rieles eléctricos para control en la distribución de energía eléctrica para los equipos de producción y luminarias (Figura 2).

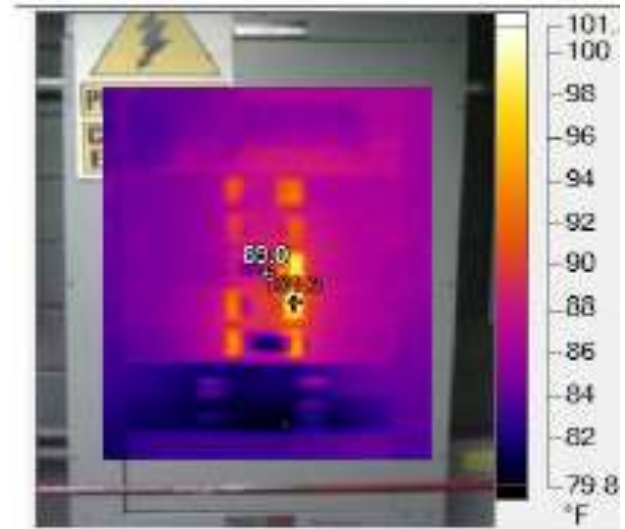


**Figura 2** Diagrama de distribución

Se tomaron muestras con la cámara termográfica que es un equipo tecnológico para la realización de pruebas no destructivas y así para tener un control medible. Cabe mencionar que las mediciones se hicieron cuando las máquinas estaban en su máximo funcionamiento. (Fig 3 y 4)



**Figura 3** Imagen de panel primario



**Figura 4** Imagen termográfica de panel primario

Las imágenes obtenidas de los tableros primarios y secundarios del área de producción se analizarán para obtener las métricas del calentamiento de los interruptores, y poderlos comparar con los datos del proveedor, conociendo si estos se encuentran trabajando a las temperaturas de operación óptimas marcadas en el equipo.

Durante este procedimiento se obtuvieron datos que al momento de ser procesados existieron irregularidades, ya que en los datos de placa de los equipos y en los datos medidos con el amperímetro fueron distintos, por lo que se observó un nivel de calentamiento mayor que en equipos donde los números sí coincidieron.

Al investigar el efecto anterior se llegó a la conclusión que los motores de algunos equipos habían sido rebobinados y reparados en algunas ocasiones, siendo que este mantenimiento correctivo modifica la eficiencia energética de estos equipos, que por lo tanto los datos de placa se modifican y no coinciden los datos medidos.

En otros motores el periodo de mantenimiento preventivo no era el correcto ya que su lubricación no se realiza adecuadamente, pero esto para solo en pocos de ellos.

### Inclusión de Graficos, Figuras y Tablas

Se procedió con la elaboración de tablas para poner la capacidad máxima de la temperatura en grados centígrados (°C) del interruptor que se medió con la cámara termográfica para la realización del análisis.

A continuación se presentan algunas tablas donde se puede observar la relación de calentamiento y amperaje que los fabricantes manejan en el flujo de corriente.

Amperes	Temperatura Max.
60 amperes	60°
70 amperes	75°
70 amperes	75°
70 amperes	75°
60 amperes	60°
70 amperes	75°
70 amperes	75°

**Tabla 1** Especificaciones de interruptores termomagnéticos

# de riel	Amperes	Temperatura Max.
Riel 1	60 amperes	75°
Riel 2	60 amperes	75°
Riel 3	60 amperes	75°
Riel 4	60 amperes	75°
Riel 5	60 amperes	75°
Riel 6	60 amperes	75°
Riel 7	60 amperes	75°
Riel 8	60 amperes	75°
Riel 9	60 amperes	75°
Riel 10	60 amperes	75°
Riel 11	60 amperes	75°
Riel 12	60 amperes	75°

**Tabla 2** Especificaciones de interruptores termomagnéticos de planta

Amperes	Temperatura Max.
30 amperes	40°
30 amperes	40°
30 amperes	40°
30 amperes	40°
30 amperes	40°
30 amperes	40°
30 amperes	40°
30 amperes	40°
30 amperes	40°
30 amperes	40°
30 amperes	40°
30 amperes	40°
30 amperes	40°

**Tabla 3** Especificaciones de interruptores termomagnéticos para luminarias

### Metodología a Desarrollar

La técnica utilizada para este estudio es la Termografía Infrarroja, en donde podemos identificar las zonas de concentración de calor en el material de estudio tenido resultados visuales y cuantitativos.

La termografía es una técnica basada en la detección de la temperatura de los cuerpos que se aplica a multitudes de áreas como la industrial, la construcción y la medicina. La primera cámara empleada en el ámbito de la industria se utilizó para inspeccionar cables de alimentación de líneas de alta tensión en 1965 (flir systems, 2011).

En la actualidad y en el campo de la industria, las cámaras termográfica son el único elemento eficaz en la detección de exactitud de la pérdida de energía de los edificios, y por ello se ha convertido en una técnica indispensable. (Domínguez, 2015, p.7).

La termografía es una técnica que permite medir temperaturas a distancia sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar. Mediante la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético.

Utilizando cámaras termográficas podremos convertir la energía radiada en información sobre temperaturas. (Fenercom, 2011, p.20).

Aunque su difusión sea un poco reducida a causa del precio alto de los equipos la termografía infrarroja es una técnica bastante utilizada en Evaluación No Destructiva (END). Este éxito está ciertamente relacionado con la gran superficie que puede abarcar y velocidad con la cual se obtienen imágenes. (Daniel balagas, 2007, P.2).

El astrónomo Sir Frederick William Herschel descubrió la existencia de la radiación infrarroja en 1800. Su curiosidad por la diferencia térmica entre los distintos colores de la luz le llevó a dirigir la luz solar a través de un prisma de cristal para crear un espectro y, a continuación, midió la temperatura de cada color. Descubrió que dichas temperaturas crecían en progresión desde la parte del violeta hacia la del rojo. Tras revelar este patrón, Herschel midió la temperatura del punto inmediatamente más allá de la porción roja del espectro, en una región sin luz solar visible. Y, para su sorpresa, halló que esa región era la que mostraba la temperatura más alta. (© Copyright 2011, FLIR Systems AB).

Para el estudio termografico se utilizó el equipo de la figura No. 5 y el software SmartView 3.5 donde se analizaron las imágenes capturadas del material (Tabique Aislante Sustentable, fig 1), y se obtuvieron los resultados.



Figura 5 Cámara termográfica

## Resultados

En este informe se presentaran las imágenes termográficas y visibles, así como las observaciones y urgencia de cada una de las actuaciones. El sistema de valoración que se ha usado es el de es el comparativo entre un punto en condiciones normales y un punto crítico o caliente presentada en la figura 6.

También se tiene en cuenta el rendimiento nominal en el momento del análisis y la temperatura máxima de trabajo para llegar a las conclusiones siguientes aunque no definitivas. Figuras 7, 8, 9.

0 a 20	Normal
20 a 40	Grave
40 A 60	Critico
60 a 80	Muy critico

Figura 6 Inducación en escala de colores y temperatura de la criticidad de la falla

Después de nombrar y mostrar todos los aspectos nombrados se llega a una conclusión de lo que se debe de hacer y que se emite de menor a mayor urgencia.

Próximo predictivo:	No es necesario ninguna actuación hasta el próximo estudio predictivo.
Realizar seguimiento:	Realiza un seguimiento para ver la evolución del punto caliente usando la metodología.
Lo antes posible:	Actuar lo antes posible teniendo en cuenta la dinámica de cada empresa y sus turnos de trabajo.
Urgente:	Estudiar la posibilidad de parar el proceso para corregir el problema.
Muy urgente:	Interrumpir el proceso inmediato para corregir el problema.

Temperatura de interruptores termomagnético	
Captación	Actuación
Panel primario planta 1	Lo antes posible
Luminarias planta 1	Urgente
Panel primario planta 2	Próximo predictivo
Luminarias planta 2	Realizar seguimiento
Luminarias área de molde	Próximo predictivo
Panel 1 planta 2	Próximo predictivo
Panel 2 planta 2	Realizar seguimiento
Panel 3 planta 2	Muy urgente

Balanceo de cargas	
Captación	Actuación
Luminarias planta 2	Realizar seguimiento
Luminarias área de molde	Próximo predictivo
Panel 1 planta 2	Lo antes posible
Panel 2 planta 2	Próximo predictivo
Panel 3 planta 2	Urgente

Figura 7 Actuacion en falla dependiento la criticidad

## Nota

Es importante actuar y tomar prioridad a lo de mayor riesgo ya que un sobrecalentamiento en el área de interruptores termomagnéticos puede desencadenar una serie de situaciones las cuales pueden ir desde lo más sencillo como es interruptor botado hasta un interruptor quemado y en el mayor de los casos un incendio provocado por un corto eléctrico a causa del calentamiento.

## Anexos

A continuación solamente esta el inicio e indicadores de dicho diagnostico. En la empresa se dejó un documento con todo el análisis.

Captación de imágenes termográficas con maquina fluke.

En este informe se presentaran las imágenes termográficas y visibles una aun lado de la otra así como las observaciones y la urgencia de cada una de las actuaciones. El sistema de valoración que se ha usado es el comparativo entre un punto en condiciones normales y un punto crítico o de calentamiento.

Aunado a la imagen se cuenta el rendimiento nominal en el momento del análisis y la temperatura máxima de trabajo para llegar al diagnóstico del análisis, subdividiendo en las siguientes categorías y escala de colores. Tabla 4.

<i>Normal</i>	
<i>Grave</i>	
<i>Crítico</i>	
<i>Muy crítico</i>	

Tabla 4 Indicador en escala de colores la criticidad de la falla

Después de nombrar y mostrar todos los aspectos nombrados se llega a una conclusión de lo que se debe de hacer y que se emite de menor a mayor urgencia. Tabla 5.

<b>Realizar seguimiento:</b>	Realiza un seguimiento para ver la evolución del punto caliente usando la metodología.
<b>Lo antes posible:</b>	Actuar lo antes posible teniendo en cuenta la dinámica de cada empresa y sus turnos de trabajo.
<b>Urgente :</b>	Estudiar la posibilidad de parar el proceso para corregir el problema.
<b>Muy urgente:</b>	Interrumpir el proceso inmediato para corregir el problema.

Tabla 5 Indicador de la criticidad de la falla y tipo de actuación de se debe de hacer

## Agradecimiento

El proyecto Estudio Termografía para el Ahorro de Energía y Prevención de Accidentes fue desarrollado con ayuda de la Universidad Tecnológica de San Luis Río Colorado, en el estado de Sonora por proporcionarlos las herramientas tecnológicas para poder realizar este estudio de una manera satisfactoria, así también a la empresa donde se nos abrió las puertas para la realización de este proyecto y todas la facilidades que esta nos dio.

## Conclusiones

La tecnología ha avanzado a pasos agigantados por lo que es necesario evolucionar con ella. Los análisis en mantenimientos predictivos son importantes para las empresas, ya que nos da parámetros medibles para saber cuando hay que actuar antes de que pase una eventualidad.

Por lo que este análisis la termografico nos ayudó para verificar los puntos más calientes en los disyuntores y centros de carga pero también es utilizable en otros tipos de análisis.

Estos estudios son de gran utilidad para las empresas ya que son considerados como pruebas no destructivas y que se pueden realizar sin que los procesos se detengan, facilitando así su estudio y diagnóstico.

La mejor que se tuvieron en la realización de este diagnóstico fueron de gran impacto, tanto en el ahorro de equipos, mantenimientos y accidentes dentro de la empresa, ya que los gerentes entendieron la importancia de mantener los equipos e instalaciones funcionando en las mejores condiciones.

Así también las mejoras que se pueden realizar en la empresa impactaran directamente en la economía de la maquiladora ya que se horraran en consumo eléctrico al saber que sus instalaciones eléctricas se encuentran en las mejores condiciones, así como en la prevención de accidentes y costos de manutención de los equipos.

## Referencias

Melgosa S. (2011). Guía de Termografía infrarroja. Madrid: Gráficas Arias Montano.

Balageas D.. (2007). Termografía Infrarroja. 2016, de Asociación argentina de Ensayos No Destructivos y estructurales Sitio web: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/128.pdf>

Centro de Formación de Infrarrojos. (2011). Guía de termografía Para Mantenimiento Predictivo. 2016, de FLIR Sitio web: [http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264\\_ES.pdf](http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264_ES.pdf)

<http://www.conevyt.org.mx/>. (2011). Uso de Instrumentos de Medición. 2016, de <http://www.conevyt.org.mx/> Sitio web: [http://www.conevyt.org.mx/educhamba/guias\\_emprendizaje/uso\\_instrumentos.pdf](http://www.conevyt.org.mx/educhamba/guias_emprendizaje/uso_instrumentos.pdf)

Carrión, J., Cuenca, J., Orellana, D.& Carvajal, r.. (2014). balanceo de circuitos de Distribución primaria. 2016, de CEDAMAZ Sitio web: [http://unl.edu.ec/sites/default/files/investigacion/revistas/2014-12-1/art\\_10.pdf](http://unl.edu.ec/sites/default/files/investigacion/revistas/2014-12-1/art_10.pdf)

Muhamad H.. (2004).Electrónica de Potencia. Estado de México. Pearson education.

Harry M.. (2011). Electricidad. México D.F. LIMUSA

Stephen D.. charles K.,& Fitzgerald A., (2003). Maquinas eléctricas. Mexico D.F: Mc Graw Hill.

Champan S., (2012). Maquinas eléctricas. México D:F,,:Mc Graw Hill.

Maloney T., (2006). Electrónica industrial moderna. México D.F, Pearson education.

## Modulación-Demodulación en amplitud para el proceso de sincronía eléctrica

RUEDA-GERMÁN, Clementina<sup>†\*</sup>, RIVAS-CAMBERO, Iván de Jesús, ARROYO-NÚÑEZ, José Humberto y ELIZALDE-CANALES, Francisca Angélica

*Departamento de Energías Renovables, Universidad Politécnica de Tulancingo*

Recibido 24 de Abril, 2017; Aceptado 19 de Junio, 2017

### Resumen

Los requisitos para la interconexión entre una fuente de generación de energía distribuida a pequeña escala y el sistema eléctrico nacional, van ligados con la sincronía eléctrica; un proceso en el que una señal de referencia interna formada por un algoritmo de control, permite que la señal de salida de un convertidor de potencia opere en sincronismo con la componente fundamental de la red. La señal conformada mediante el convertidor deberá permanecer en un rango de frecuencia entre 59.5 a 60.5 Hz sintonizada en fase. La transformada de Hilbert es una herramienta matemática que sirve para detectar la envolvente compleja de una señal modulada por una portadora, empleada en sistemas de telecomunicaciones. En este trabajo se adapta un demodulador de amplitud basado en la transformada de Hilbert, una señal de referencia es modulada empleando una senoidal de mayor frecuencia, para después demodularla y obtener su envolvente, esta contiene información de fase y frecuencia con el fin de fortalecer el proceso de enganche de un PLL (Phase Locked Loop), siendo este modelo de fácil implementación e idóneo ante cambios abruptos de amplitud, frecuencia y fase, evitando la pérdida de sintonía con la señal de referencia.

**Amplitud, modulación, Transformada de Hilbert, envolvente, PLL**

### Abstract

The requirements for the interconnection between a small-scale distributed power generation source and the national electricity system are associated to the electrical synchrony that is a process in which an internal reference signal formed by a control algorithm generates an output signal in a power converter in synchrony with the fundamental component of the electrical grid. The signal generated by the power converter must remain in a frequency range between 59.5 to 60.5 Hz, tuned in phase. The Hilbert transform is a mathematical tool that is used to detect the complex envelope of a signal modulated by a carrier; it is used in telecommunications systems. In this work, an amplitude demodulator based on the Hilbert transform is adjusted, a reference signal is modulated using a higher frequency sine signal, then use a demodulator to obtain the envelope, this contains the phase and frequency information in order to strengthen the PLL (Phase Locked Loop) tune in process, this model is easy to implement and also suitable for abrupt changes in amplitude, frequency and phase, avoiding the loss of tuning with the reference signal.

**Amplitude, modulation, Hilbert Transform, envelope, PLL**

**Citación:** RUEDA-GERMÁN, Clementina, RIVAS-CAMBERO, Iván de Jesús, ARROYO-NÚÑEZ, José Humberto y ELIZALDE-CANALES, Francisca Angélica. Modulación-Demodulación en amplitud para el proceso de sincronía eléctrica. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-2:9-16

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: clementina.rueda@upt.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.



## Introducción

La liberación del mercado eléctrico contribuye al incremento de la generación distribuida a través del empleo de energías renovables. En México con la publicación de la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE), se crea la Comisión Reguladora de Energía (CRE); la cual expide un contrato de interconexión, para que casas habitación y pequeños negocios puedan generar su propia energía eléctrica y en caso de tener algún excedente de electricidad, el particular pueda intercambiar energía con la empresa paraestatal proveedora de electricidad, compensándola contra el consumo. Sin embargo la electricidad tiene ciertas características técnicas que le diferencian de otros productos que se compran y se venden en diferentes mercados.

La problemática a la que se enfrentan los instaladores de sistemas fotovoltaicos conectados a red es que deben de considerar aspectos fundamentales de calidad de suministro en el punto de conexión, además, el ángulo de fase del voltaje de la red eléctrica y su frecuencia, contienen información crítica para poder conectar un sistema local de generación de energía con el sistema eléctrico nacional. Con el fin de lograr una interconexión exitosa, existen muchos sistemas empleados en el seguimiento de fase de una señal de referencia entre ellos es posible mencionar el detector de cruce por cero, el Phase Locked Loop (PLL), los detectores de fase basados en referencias estacionarias síncronas (SRF), entre otros.

El ángulo de voltaje de red, sirve como marco de referencia para la sincronía y se determina a través de un PLL el cual tiene como objeto la generación de una señal de salida con amplitud fija y frecuencia coincidente con la entrada, dentro de rango de un margen determinado, pero muestra algunas deficiencias cuando la señal de referencia contiene disturbios, por lo que es necesario incluir técnicas que mejoren el proceso de enganche; la técnica de modulación/demodulación es una propuesta con la que se pretende fortalecer el proceso aun con disturbios.

Existe evidencia fundamental que muchas de las señales naturales pueden ser representadas como moduladores de baja frecuencia que modulan señales portadoras de alta frecuencia. La modulación en amplitud consiste en variar la amplitud de una senoide de acuerdo al mensaje que se desea transmitir, la principal ventaja de modular en AM radica en que es posible recuperar el mensaje (demodular) con un simple detector de envolvente

En este trabajo se propone una técnica de sincronía eléctrica basada en la modulación en amplitud, la detección de su envolvente por medio de la Transformada de Hilbert (TH), la sintonía a través de un PLL y la aplicación de la función de Walsh, con el fin de crear pulsos de sincronía que pudieran ser auxiliares para la inversión de señales de corriente directa a corriente alterna y la posible conexión de sistemas locales de generación de electricidad con el sistema eléctrico, teniendo como resultados el seguimiento de fase ante la presencia de ciertos disturbios eléctricos, mejorando el desempeño comparado con un PLL de segundo grado.

Este documento contiene en la primera sección una breve descripción de la transformada de Hilbert, la cual es empleada en sistemas de telecomunicaciones con el fin de obtener los mensajes inmersos en las ondas de radio, los conceptos referentes a la modulación – demodulación en amplitud, son presentados en la segunda sección, para continuar con el desarrollo, en donde se presenta la técnica empleada con el fin de fortalecer el enganche o sintonía de igual forma se presentan las deficiencias del PLL de segundo orden. En los resultados se muestran los productos obtenidos al simular una falla denominada brinco de fase presente en la señal de referencia.

### Transformada de Hilbert

La transformada de Hilbert es también llamada filtro de cuadratura, es una herramienta matemática que permite variar el ángulo de fase de la señal de entrada entre valores de  $\pm \pi/2$  de acuerdo al valor de frecuencia, esta acción solo afecta al ángulo de fase sin modificar la amplitud de la señal. Para una señal variable real  $x(\tau)$  la transformada Hilbert (H) es definida como se muestra en la ecuación (1); donde  $P$  es el valor principal de Cauchy de la integral singular.

$$\hat{x}(t) = H(x) = \frac{P}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} dt \quad (1)$$

El valor principal de Cauchy es un método que permite asignar valores a ciertas integrales impropias que resultarían en indefinidas.

Un detector de fase de alta resolución puede ser realizado usando el concepto de señal analítica. Una señal analítica se obtiene desde una señal real empleando la transformada de Hilbert.

La transformada discreta de Hilbert es formulada a través de una convolución con una respuesta en frecuencia como en la ecuación (2)

$$H_H(e^{j\Omega}) = \begin{cases} -j & (0 < \Omega < \pi) \\ j & (-\pi < \Omega < 0) \\ 0 & (\Omega = 0) \end{cases} \quad (2)$$

En donde  $\Omega = 2\pi f/f_s$ ,  $f_s$  es la frecuencia de muestreo en Hz y  $j = \sqrt{-1}$ . El valor absoluto de la amplitud es uno para todas las frecuencias diferentes de cero, la fase es  $-90^\circ$  para todos los valores positivos y  $90^\circ$  para todas las frecuencias negativas.

Al utilizar el transformador de Hilbert, es posible generar una señal, que es ortogonal con la señal de entrada al aprovechar el hecho que la transformada de Hilbert de la función seno, es la función coseno y viceversa. Por tanto, se puede utilizar para encontrar la fase de la señal de entrada.

En líneas de energía eléctrica los disturbios pueden causar problemas en dispositivos electrónicos por lo que es fundamental el monitoreo en el campo de la calidad de energía, en se realiza la estimación de disturbios haciendo uso de dos métodos diferentes de procesamiento de señales, uno de ellos es el procesamiento de wavelets y el otro es a través de la transformada de Hilbert (TH). La detección de transitorios e interrupciones cortas de energía eléctrica se efectúa usando la transformada de Hilbert, la cual detecta la envolvente de la función original a través del tiempo.

### Demodulación

Un sistema de comunicación transmite señales con información a través de un canal que separa el transmisor del receptor.

El término banda base se utiliza para denominar la banda de frecuencias que representa la señal original que lleva la información. La utilización eficiente del canal de comunicación requiere desplazar las frecuencias banda base a otro rango de frecuencias más adecuado para la transmisión. En recepción se realizará el desplazamiento inverso en frecuencia al rango original de banda base. El desplazamiento del rango de frecuencias se consigue mediante un proceso denominado modulación con el que alguna de las características de la portadora se modifica en concordancia con la señal que tiene la información. La señal banda base se denomina señal moduladora y la señal resultante del proceso de modulación se llama modulada. En el extremo receptor se requiere devolver a la señal modulada su forma original, este proceso se denomina demodulación y es el inverso de la modulación. Para generar una señal de AM se emplea la ecuación (3) en donde  $c(t)$  es la señal portadora,  $m(t)$  la señal en banda base que contiene la información o de referencia,  $k_a$  es la constante de sensibilidad en amplitud del modulador.

$$s(t) = c(t)[1 + (k_a m(t))] \quad (3)$$

La portadora es la señal que transporta la información, la envolvente de AM es la forma de la onda modulada, cuando no hay señal modulante, la forma de onda de salida no es más que la señal de la portadora.

La función de un detector de AM es demodular la señal y recuperar o reproducir la información de la fuente original. La señal recuperada debe contener la misma frecuencia que la de información original y tener las mismas características de amplitud relativa.

## Desarrollo

Con el fin de observar el desempeño del detector de envolvente, se emplea una señal sintetizada construida a través de Matlab, capaz de generar disturbios de diferentes magnitudes, duración y fase. La señal de prueba o moduladora está compuesta de una señal sinusoidal con una frecuencia de 60 Hz y una amplitud igual a 2 Volts La modulación en amplitud se muestra en el gráfico 1.

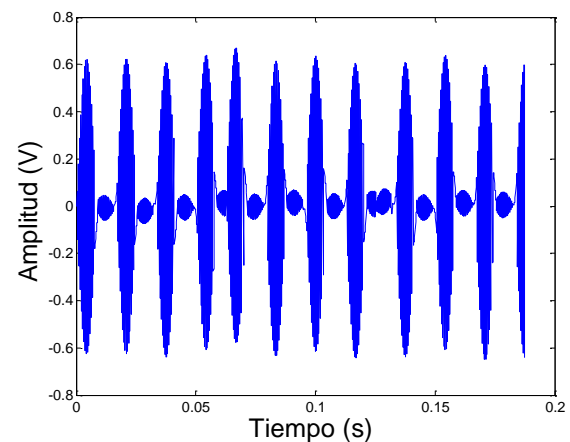
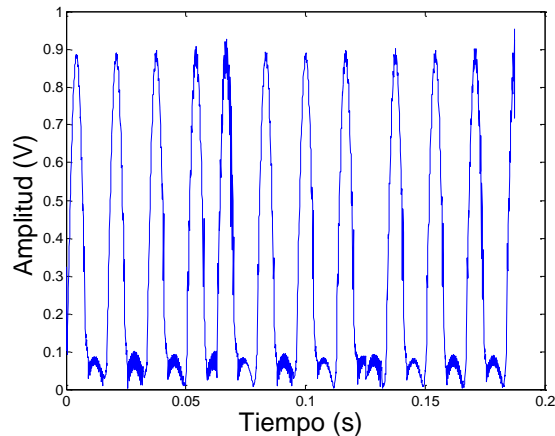


Figura 1 Señal modulada en amplitud

Fuente: Elaboración propia

Para detectar los cambios de la señal de referencia en fase y frecuencia se emplea un sistema de demodulación de la señal modulada, a través de la obtención de la envolvente empleando la transformada de Hilbert, con la cual se procesa la señal analítica en tiempo discreto  $X = X_r + i * X_i$  en donde  $X_i$  es la transformada de Hilbert de  $X_r$  y además, se obtiene la FFT de  $X_r$ , estableciendo los elementos de FFT que correspondan al rango de frecuencia  $\pi < \omega < 0$ , asignándoles un valor de cero y por último, se aplica la inversa de la FFT, extrayendo como resultado la envolvente simple de la señal ya modulada la cual se exhibe en la Figura 2.



**Figura 2** Envolvente de la señal modulada

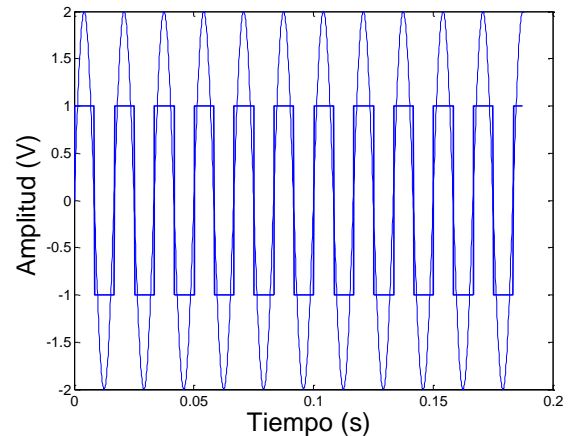
Fuente: *Elaboración propia*

Con el fin de mantener la sincronía para interconectar sistemas locales de generación de energía eléctrica, cuya frecuencia central es de 60 Hz se fortalece esta propuesta con un PLL de segundo grado modelado mediante software cuya función de transferencia está representada en (4).

$$H(s) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

En donde la variable  $\omega_n$  es la frecuencia natural de oscilación y el coeficiente de amortiguamiento elegido es de  $\zeta=0.7$  ya que con este valor el filtro converge rápidamente y no genera un gran sobretiro.

El PLL de segundo grado es suficiente en el proceso de sincronía cuando la señal de referencia no contiene ningún disturbio, como se observa en la Figura 3 en donde una onda sinusoidal, es empleada como referencia, de la cual se obtiene a través de un PLL, el pulso de sincronía (señal cuadrada). Al realizar la comparación visual entre ambas señales, se advierte que se encuentran en sintonía de fase y frecuencia.

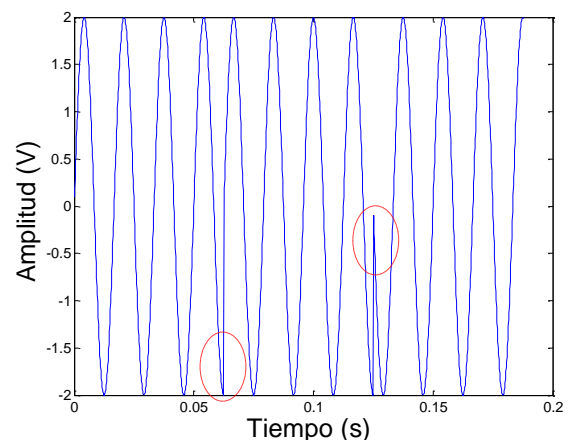


**Figura 3** Pulso de sincronía en concordancia con la señal de referencia

Fuente: *Elaboración propia*

## Resultados

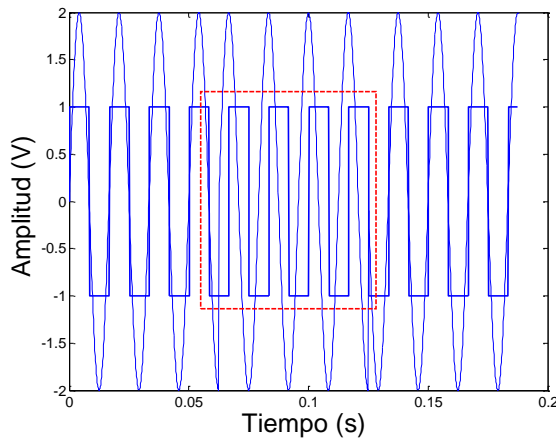
Algunas veces la red eléctrica está sometida a perturbaciones y fallos desequilibrados; un brinco de fase podría ocurrir si una gran carga es conectada de repente o si existe una falla en la red eléctrica, durante este tipo de fallos, los inversores están expuestos a problemas graves como son: una tensión excesiva del circuito intermedio, pérdida de la sincronización del voltaje de la red, entre otros. Los dos brinco de fase se exponen en la Figura 4 Brinco de fase marcados mediante círculos.



**Figura 4** Brinco de fase

Fuente: *Elaboración propia*

Ante saltos de fase, el PLL convencional pierde su estado de enganche, como se observa en la Figura 5, el recuadro indica la zona en donde ocurren las perturbaciones y se pierde la sincronía.

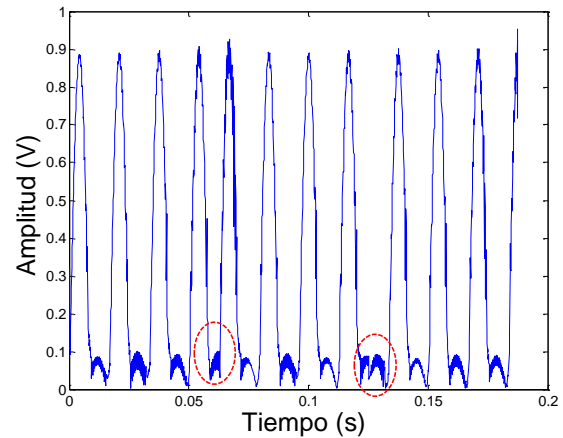


**Figura 5** Pérdida de sincronía con PLL convencional

Fuente: Elaboración propia

El proceso de enganche aun con perturbaciones, se fortalece, llevando a cabo la modulación de la señal de referencia y su demodulación a través de la transformada de Hilbert, con el fin de que la envolvente sea tomada como entrada en el PLL, con este paso se consigue que la señal de referencia permanezca en sintonía con la señal de sincronía.

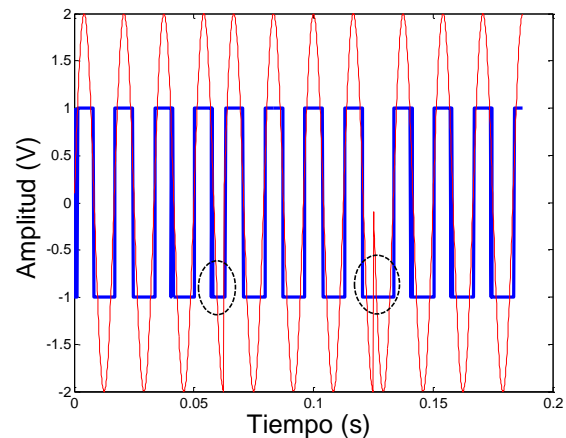
La señal modulada conseguida es expuesta en la Figura 1, la cual fue lograda mediante el proceso de multiplicar la señal de referencia con una portadora de alta frecuencia. De la señal modulada se obtiene la envolvente la cual se muestra en la Figura 6, extrayéndola con la transformada de Hilbert, dicha señal se computa como entrada de un PLL convencional de segundo orden.



**Figura 6** Envolvente de la onda modulada

Fuente: Elaboración propia

El pulso de sincronía y la señal de referencia con salto de fase se observan en la Figura 7. Es notorio que solo hay una pérdida de sincronía en el tiempo en el cual ocurre la perturbación, por un lapso pequeño de tiempo, para después continuar ambas señales en sincronía.



**Figura 7** Permanencia de sincronía del modelo propuesto

Fuente: Elaboración propia

## Conclusiones

El método de modulación-demodulación presentado para el proceso de sincronía muestra que es posible modular una señal que sirviese de referencia para crear un pulso en concordancia en fase y frecuencia. Mediante la demodulación empleando la transformada de Hilbert, se obtiene una señal denominada envolvente la cual contiene información de fase y frecuencia que sirve como entrada al lazo cerrado de segundo grado denominado PLL, con el objetivo de mejorar la sincronía aun con perturbaciones, aportando una mejoría en el seguimiento ante saltos de fase. Se pretende una implementación en un procesador digital de señales. Los resultados muestran que las fallas en fase de la señal de referencia son percibidas en la modulación y demodulación y al obtener la envolvente la cual ingresa al PLL se obtiene un pulso de sincronía que pierde el enganche solo en el tiempo que dura la perturbación para después continuar sintonizado. Se trabaja en mejoras para que este modelo funcione todas las perturbaciones.

## Referencias

- González, R., Jiménez, H. R., & Lagunas, J. (2003). Sistemas fotovoltaicos conectados a la red. *Boletín IEE*, pp. 140-144.
- Aquino, J., Fernández, C., & Corona, L. (2016). Génesis del mercado eléctrico minorista y de baja potencia, con tecnologías de microgeneración renovable en México. *Revista de Investigación y Desarrollo*, 2, pp. 1-19.
- Hernández, J. C., & Medina, A. (2006). Conexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica: calidad de suministro. *Sumuntán*, 23, pp.33-44.
- Bobrowska, M., Rafal, K., Jasinski, M., & Kazmierkowski, M. (2011). Grid synchronization and symmetrical components extraction with PLL algorithm for grid connected power electronic converters – a review. *Bulletin of the Polish academy of sciences Technical Sciences*, 59, pp. 485-497.
- Hernández, O., Mina, J., & Claudio, A. (2016). Emulador de Turbina Eólica basado en el Control Vectorial de una Máquina Eléctrica. *Revista de aplicaciones de la Ingeniería*, 3, pp. 117-130.
- Pindado, R. (1997). Lazo por enganche de fase PLL. En *Electrónica analógica integrada* (pp.424-437). Barcelona: S.A. Marcombo.
- Rueda, C., Rivas, I., & Arroyo H. (2015). Simulation of a Software Phase-Locked Loop for Typical Grid Disturbances. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 4, pp. 998-1002.
- Schimmel, S. M., & Atlas, L. E. (2005). Coherent Envelope Detection for Modulation Filtering of Speech. *Acoustics, Speech, and Signal Processing. IEEE International Conference*, 1, pp. 221-224.
- Saz, I. & Sanchis, E. (2004). *Fundamentos y Electrónica de las comunicaciones*. Valencia: Universitat de Valencia. Servei de publicacions.
- Behera, R. R., & Thakur, A. N. (2016, March). An overview of various grid synchronization techniques for single-phase grid integration of renewable distributed power generation systems. *Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), International Conference*. pp. 2876-2880.
- Kanwal P. (1996). *Linear Integral Equations: theory and technique*. Boston: Birkhäuser. p. 191

Kumm, M., & Sanjari, M. S. (2008, September). Digital Hilbert transformers for FPGA-based phase-locked loops. *International Conference on Field Programmable Logic and Applications*. pp. 251-256.

Sanabria, T., Camilo, A., Bello, G. & Delby, A. (2013). Análisis y comparación de topologías de PLL para sistemas monofásicos. *Ingenio Magno*, 4, pp. 61-67.

Caciotta, M., Giarnetti, S., Leccese, F., Leonowicz, Z., Rezmer, J., & Janik, P. (2009). Wavelets an Hilbert Transform methods for detection of voltage dips and micro interruptions.

Caciotta, M., Giarnetti, S., Leccese, F., & Leonowicz, Z. (2009). Detection of short transients and interruptions using the Hilbert transform. *19th IMEKO World Congr. Fundam. Appl. Metrol.* pp. 913-916.

Fernández, M. (2010). *Modulación en amplitud*. ETS de Ingenieros de Comunicación, Universidad de Valladolid. <http://lmi.bwh.harvard.edu/papers/pdfs/2002/martinfernandezCOURS E02.pdf>.

Tomasi, W. (2003). *Sistema de Comunicaciones Electrónicas*. Phoenix: Prentice Hall.

King, F. (2009). *Hilbert Transforms*. (Vol. 2). Cambridge: Cambridge University Press.

Bore, K., Akos, D. M., & Bertelsen, N. (2007). *A software-defined GPS and Galileo receiver*. Springer Science & Business Media.

Valderrabano A., Rosas, J. C., Tapia, R., Beltran, F., & Gomez J. F. (2013). Single phase angle tracking method for power switches gating synchronization. *Electric Power Systems Research*, 105, pp. 88-94.

Jaalam, N., Rahim, N. A., Bakar, A. H. A., Tan, C., & Haidar, A. M. (2016). A comprehensive review of synchronization methods for grid-connected converters of renewable energy source. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, pp.1471-1481.

## Fuente sintonizable de fibra óptica para aplicaciones en Banda-C

PÉREZ-SÁNCHEZ, Grethell Georgina<sup>†\*</sup>, ANDRADE-GONZÁLEZ, Edgar Alejandro, SANDOVAL-ROMERO, Gabriel Eduardo<sup>†</sup> y MEJÍA-ISLAS, José Adolfo

*Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Electrónica*  
*Universidad Nacional Autónoma de México, CCADET*

Recibido 13 de Abril, 2017; Aceptado 15 de Junio, 2017

### Resumen

En la actualidad los servicios de comunicaciones demandan altas velocidades de transmisión y altos volúmenes de información, por lo que se requieren dispositivos eficientes y de bajo costo que operen conforme a los estándares de telecomunicaciones. En este trabajo se realizó el diseño e implementación de una fuente sintonizable para aplicaciones en comunicaciones ópticas. El sistema consta de un láser de bombeo a 980nm, 40cm de fibra co-dopada con Erblio/Iterbio que genera una señal superluminiscente en la tercera ventana de comunicaciones ópticas, un acoplador óptico, una rejilla de Bragg centrada a de 1556.56nm; la cual es sometida a una tensión simétrica mediante un arreglo de poleas colocadas a cada extremo de la rejilla. Cada polea se controla con motores a pasos para obtener un estiramiento de 0.8mm de fibra. Los motores son controlados por un microcontrolador donde el usuario selecciona la longitud de onda de emisión correspondiente a las rejillas ITU-WDM dentro de la banda-C con espaciado de 100GHz, esto, mediante una interfaz que consta de un teclado y una pantalla LCD. La sintonización del sistema logra un rango dinámico de 4 longitudes de onda. La metodología de diseño y caracterización del sistema se muestran en el presente trabajo.

**Fuente sintonizable, fibra óptica, Banda-C**

### Abstract

Now a days communications services demand high transmission speeds and high volumes of information, furthermore, the development of high-efficiency, low-cost devices that operate in accordance with telecommunication standards has become essential for both service operators and researchers. This paper shows the work developed for the design and implementation of a tunable source for applications in optical communications. The system consists of a pumping laser centered at 980 nm, a 40 cm fiber section co-doped with Erbium/Ytterbium that generates a superluminescent signal in the third optical communications window, an optical coupler, and a Bragg grating centered at a 1556.56 nm wavelength. The latter is subjected to a symmetrical tension by an arrangement of pulleys placed at each end of the grating. Each pulley is controlled with stepper motors to achieve a 0.8 mm fiber stretch. The motors are controlled by a microcontroller where the system user selects the source emission wavelength corresponding to the ITU-WDM gratings within the optical communications C-band, 100 GHz channel spacing, using an interface consisting of a keyboard and a display LCD. System tuning achieves a dynamic range of 4 different wavelengths. The design methodology and characterization of the system prototype are shown in this work.

**Tunable Source, optical fiber, c-band**

**Citación:** PÉREZ-SÁNCHEZ, Grethell Georgina, ANDRADE-GONZÁLEZ, Edgar Alejandro, SANDOVAL-ROMERO, Gabriel Eduardo y MEJÍA-ISLAS, José Adolfo. Fuente sintonizable de fibra óptica para aplicaciones en Banda-C. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-2:17-23

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ggps@correo.azc.uam.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.



## Introducción

Las fuentes ópticas sintonizables y láseres sintonizables son ampliamente utilizados para la calibración de instrumentos ópticos, espectroscopía, sensores ópticos, sistemas de comunicaciones por fibras ópticas, entre otras.

Las señales utilizadas actualmente en comunicaciones ópticas, se encuentran centradas en las regiones espectrales de 1310 nm y 1550 nm, con un ancho de banda de 30 nm a 40 nm y una separación entre longitudes de onda de 100 GHz (0.8nm), 50 GHz, 25 GHz y 12.5 GHz.

El funcionamiento de las fuentes ópticas sintonizables existentes se basa en láseres de estado sólido sintonizados mediante efectos opto-acústicos, mecánicos o electro-ópticos, se han desarrollado fuentes sintonizables que constan de un amplificador de fibra óptica dopada con erbio (EDFA) y un chip CMOS integrado controlado térmicamente para la sintonización de canal. Debido a que estas fuentes emplean procesos complejos no lineales para el control de variables, el costo de éstas es elevado. No obstante, los requerimientos actuales plantean la necesidad de buscar alternativas para la sintonización de la señal de control, de fácil implementación y bajo costo, por lo que, una opción viable es el desarrollar fuentes de fibra óptica con rejillas de Bragg variables.

Las rejillas de Bragg son elementos ópticos grabados en el núcleo de una fibra óptica que tienen la capacidad de realizar funciones como: reflexión, dispersión y filtrado de señales de manera eficiente y con bajo nivel de atenuación (Figura 1). Estas pueden desempeñarse de manera óptima dentro del bloque transmisor o receptor en sistemas de comunicaciones ópticas.

La condición de Bragg es aquella donde se genera una señal en reflexión a una longitud de onda específica, dada por:

$$\lambda_{\beta} = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

Dónde

$\beta$ : Es la longitud de onda central de la luz reflejada por la rejilla de Bragg

$n_{eff}$ : Es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica

$\Lambda$ : Es el periodo de la rejilla

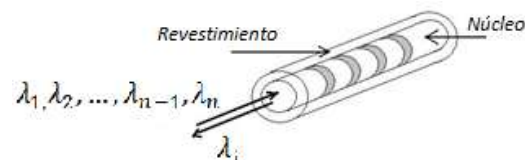


Figura 8 Rejilla de Bragg

Sin embargo la estabilidad espectral de la señal se rige por el principio de funcionamiento de cualquier dispositivo basado en fibras fotosensitivas, relacionado directamente con los cambios en la longitud de onda de Bragg como respuesta a una perturbación inducida externa.

Como se puede ver en la Ecuación (1), la  $\lambda_{\beta}$  es directamente proporcional al periodo de la rejilla y al valor del índice de refracción efectivo, por lo tanto, cualquier cambio en alguno de estos parámetros causará una alteración directa en la longitud de onda de Bragg. Téngase en cuenta que los cambios en las dimensiones a lo largo del eje longitudinal de la rejilla debido a la elongación, ocasionan los mayores cambios en la respuesta espectral.

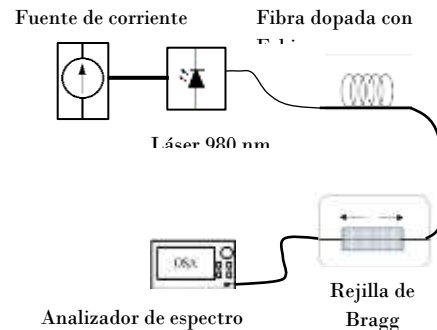
Por otro lado, la sensibilidad que presentan las rejillas a las variaciones de temperatura es relativamente baja,  $<0.02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , pero si se tiene un rango de temperatura de  $100^\circ\text{C}$ , el canal de operación estará oscilando en un factor de 2 nm, por lo que, dependiendo de los requerimientos de la aplicación, se vuelve necesario desarrollar esquemas para contrarrestar estas variaciones debidas a la temperatura.

La electrónica y la informática, se han vuelto herramientas esenciales en sistemas de comunicaciones ópticas, biofísica y fotónica. En el desarrollo de los proyectos tecnológicos se requiere de hardware personalizado, ya que las herramientas comerciales a veces son inadecuadas o demasiado costosas para un desarrollo experimental muy específico. Por lo que, la perspectiva "hazlo tú mismo" se ha convirtiendo en parte fundamental para estas ciencias interdisciplinarias en donde plataformas de código abierto son cada vez más útiles en las áreas de investigación de óptica y fotónica.

En este trabajo se propone una fuente óptica sintonizable con espaciamento de 0.8nm basada en el control de elongación de una rejilla de Bragg con Arduino UNO, motores a paso y un sistema de poleas.

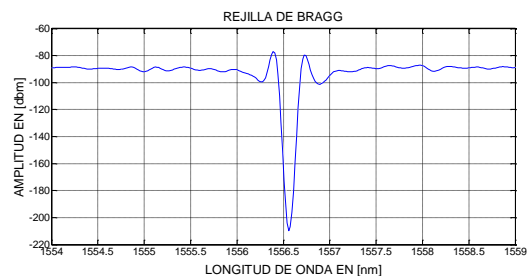
### Caracterización Óptica de la Rejilla de Bragg

La rejilla utilizada para la fuente óptica se caracterizó espectralmente con un analizador de espectros óptico véase Figura 2.



**Figura 2** Diagrama del arreglo experimental para la caracterización de la rejilla de Bragg

La longitud de onda central del filtro es 1556.56 nm, con un ancho de línea de 0.3 nm como se muestra en la Gráfica 1.



**Gráfico 1** Espectro óptico de la rejilla de Bragg

### Diseño del control de elongación

El diagrama a bloques del sistema de control de elongación diseñado para la fuente sintonizable se muestra en la Figura 3, el cual consta de:

- Rejilla de Bragg: Centrada en la longitud de onda de 1556.56 nm.
- Sistema de control: Captura los datos proporcionados por el usuario para calcular el número de pasos y activar los motores, para obtener la longitud de onda seleccionada.
- El teclado y la pantalla LCD son la interfaz entre el usuario y el sistema de control de elongación.

- Motores a paso: Producen la tensión necesaria para elongar la rejilla de Bragg y modificar el valor de la longitud de onda de Bragg.
- Sistema de poleas: diseñado para incrementar la resolución de sintonización de la longitud de onda.
- Fuente de tensión: alimenta a los circuitos impresos de control.
- Fuentes de corriente: Suministra la corriente necesaria a los motores.

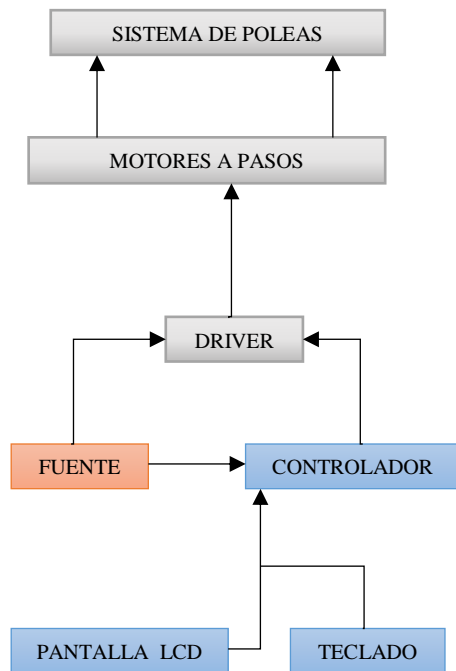


Figura 3 Diagrama físico del control de elongación

El sistema de poleas fue diseñado para obtener desplazamiento de 0.8 mm ( $\Delta s$ ) en la Rejilla de Bragg, el cual corresponde a 0.08 nm de separación entre longitudes de onda, para cada paso del motor ver Figura 4.

Considerando 200 pasos para cada motor con 1.8 grados, obtenemos la siguiente relación.

$$\Delta s = \theta * R \tag{2}$$

Dónde

$\Delta s$ : Es el desplazamiento de fibra

$\theta$ : Los grados dados para cada paso en el motor

$R$ : Es el radio de la polea

Despejando  $R$  de la ecuación (2) y reemplazando los valores, obtenemos:

$$R = \Delta s / \theta$$

$$R = (0.8\text{mm}) / 1.8(\pi/360)\theta \tag{3}$$

$$R = 50 \text{ mm}$$



Figura 4 Sistema de Poleas

En la Figura 5 se muestra el diagrama de flujo del programa utilizado para el control de elongación, para alcanzar la longitud de onda de emisión deseada.

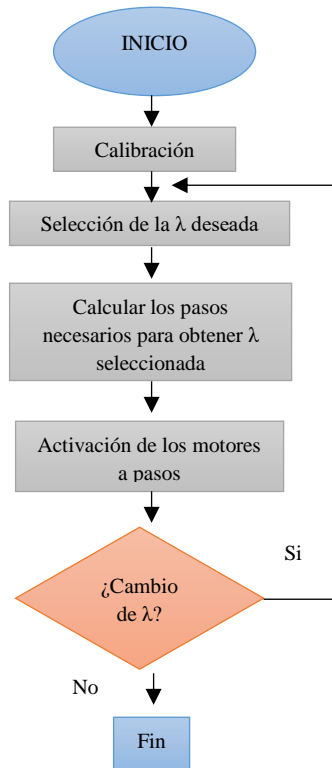


Figura 5 Diagrama a flujo del control de elongación

### Caracterización Óptica del Control de Elongación

El control de elongación diseñado para la fuente óptica se caracterizó espectralmente con un analizador de espectros óptico. Logrando sintonizar cuatro longitudes WDM-ITU Gráfica 2.

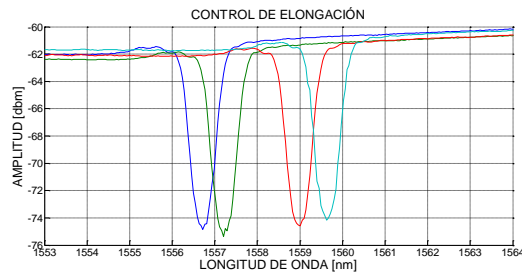


Gráfico 2 Caracterización espectral del control de elongación

La Figura 6 muestra el prototipo de la fuente óptica sintonizable con el control de elongación diseñado.



Figura 6 Control de elongación para una fuente óptica sintonizable

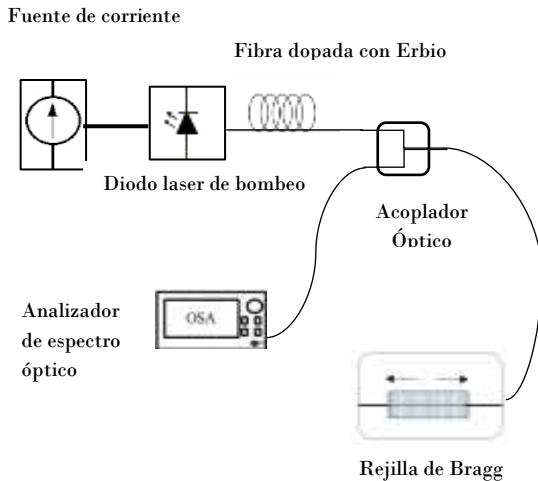
### Implementación de la Fuente Óptica Sintonizable

Utilizando un acoplador óptico conectado a la entrada de la rejilla de Bragg, como se observa en la Figura 7, se logra obtener las componentes espectrales reflejadas en núcleo de la misma, sometida al proceso de elongación para 3 distintas deformaciones generadas por los motores a pasos (paso1, paso2 y paso3). Así, la fuente óptica logra generar 4 longitudes ( $\lambda_p$ ) ver Gráfica 3; una correspondiente al valor de fabricación 1556.6 nm, más 3 que se originan por deformación.

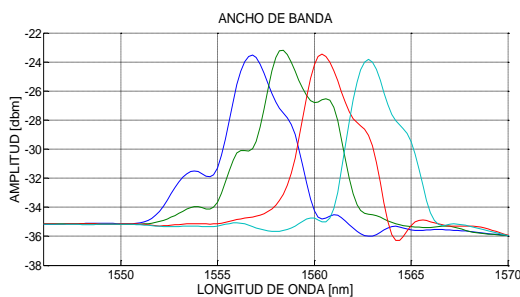
La tabla 1 muestra los valores de las longitudes sintonizadas la cuales coinciden con las longitudes homologadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones sector de Telecomunicaciones (ITU-T).

Longitudes homologadas ITU-T	Longitudes sintonizadas mediante el control de elongación
1556.56	Paso 0 = 1556.56
1557.36	Paso 1 = 1557.36
1558.98	Paso 2 = 1558.98
1559.79	Paso 3 = 1559.79

Tabla 1 Longitudes sintonizadas y homologadas por la ITU-T



**Figura 7** Diagrama de experimentación para caracterizar la fuente sintonizable



**Gráfico 3** Espectro óptico de las componentes reflejadas

## Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, al PRODEP y CONACyT por el apoyo y las becas otorgadas para la realización de este trabajo.

## Conclusiones

En este trabajo se presenta el desarrollo, implementación y caracterización de una fuente óptica sintonizable con estructura optoelectrónica, orientada a la tercera ventana de comunicaciones ópticas. La cual tiene un comportamiento estable para cuatro longitudes de onda.

Con el análisis de resultados se determina que el comportamiento del sistema presenta espaciado entre canales de 0.08 nm que corresponden a las rejillas WDM ITU-T con cuatro canales para sintonizar. Téngase en cuenta que el rango de sintonización está limitado por la máxima tensión que generan los motores a pasos seleccionados para este trabajo. Otro punto no menos importante y que respalda este trabajo, es la estabilidad que presenta en cada una de las tensiones aplicadas.

El prototipo desarrollado muestra la ventaja de ser desarrollado a un bajo costo, con una fácil implementación y repetitividad en los valores arrojados. Cabe mencionar que se puede mejorar la resolución y el rango dinámico sistema actual obteniendo mayor número de longitudes de onda, si se modifica el radio del sistema de poleas y buscando mayor fuerza de torsión cambiando los motores a pasos.

## Referencias

Ambriz, F., Avilés, J., Flores, J. & Rodríguez, M. (2016). Plataforma de Experimentación para Instrumentación y Control. Revista de Investigaciones Sociales, ECORFAN- Republic of Nicaragua, Vol. 2, No. 3, 66-70. ECORFAN. ISSN: 2414-4835

Barnes, W., Poole, S., Townsend, J., Reekie, L., Taylor, D. & Payne, D. (1989). Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup> doped fiber lasers. J. Lightwave Technology, 7(10), 1461-1465.

Bertaina, A., Sillard, P., de Montmorillon, L. & Nouchi, P. (2001). Line fibers for new transmission windows. 14th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society. USA.

Cano, M., Armenta, M., Cabal, E. & Juárez, H. (2016). Diseño y simulación de un sistema de control Smart Home. *Revista de Aplicación Científica y Técnica, ECORFAN- Spain, Vol. 2, No. 4, 13-19. ECORFAN. ISSN 2444-4928*

Ching-Fuh, L., Yi-Shin, S. & Chin-Hui, C. (September 2002). Extremely Broadband Tunable Semiconductor Lasers for Optical Communication. *Optoelectronics and semiconductor integrated Devices. Recuperado de <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1601219>*

D'Amato, F. & Dunphy, J. (1992). Tunable Semiconductor Laser Sources Using Fiber Bragg Gratings. *IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 1992 Annual Meeting. USA.*

Dewra, S., Grover, V. & Grover, A. (2015). Fabrication and Applications of Fiber Bragg Grating- A Review. *Advanced Engineering Technology and Application, 4 (2), 15-25.*

Digonnet, M. (2001). *Rare-Earth-Doped Fiber Laser and Amplifiers (2<sup>nd</sup> Edition)*. New York: Ed. Marcel Dekker Inc.

Guzmán, A., Vargas, E. & López, C. (2016). Acetylene sensor based on a fiber laser finely tunable with a silicon wafer. *ECORFAN-Bolivia Journal, Vol.3, No.4, p.p. 10-14. ECORFAN. ISSN-2410-4191.*

Hill, K. & Meltz, G. (August 1997). Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. *Journal of Lightwave Technology, 15(8), 1263-1276.*

Jheng, D., Wang, S., Ho, T., Yang, T., Hsu, K. & Huang, S. (2015). Broadband tunable laser and high-brightness light sources. *International Symposium on Next-Generation Electronics (ISNE). Taiwan.*

Jing, G., Guanghui, Y., Xin, Z., Ming, L., Tingwu, G., Siyuan, L. & Zhiyong W. (July 2015). All-Fiber Tunable Supercontinuum Laser Source. *IEEE Photonics Technology Letters, 27(14), 1553-1556*

Jung, S., Jiang, A., Jiang, Y., Vijayraghavan, K., Wang, X., Troccoli, M. & Belkin M. (2014). Widely-tunable monolithic terahertz quantum cascade laser sources based on difference-frequency generation. *2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). USA.*

Jungbluth, B., Geiger, J., Hoffmann, D., Loosen, P. & Poprawe, R. (2003). Widely Tunable, Narrow Linewidth All-Solid-state Laser System. *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe. Germany.*

Kashyap, R. (1999), *Fiber Bragg Gratings*, San Diego, USA: Optical fotonics Academic Press.

Kurobe, T., Kimoto, T., Muranushi, K., Kagimoto, T., Kagi, N., Kasukawa, A., ... Tsuji, S. (2007). Tunable laser source for fast wavelength switching using a short-cavity DBR laser packaged with wavelength locker Sign In or Purchase. *Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference. USA.*

Mašanović, M. & Johansson, L. (2015). Widely Tunable Semiconductor Lasers and Transmitters. *Photonics Conference (IPC). USA.*

## Análisis dinámico de la inclinación de colectores solares de placa plana y tubos evacuados para determinar el potencial energético-económico en las ciudades de Chihuahua y Durango

ESCOBEDO-BRETADO, Jorge†\*, RÍOS-OROZCO, Carlos', NAJERA-TREJO, Mario y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio

*Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. - Departamento de Ingeniería sustentable. CIMAV 110. Ejido Arroyo Seco 34147 Durango, Dgo. México.*

*'Instituto Tecnológico de Durango, Departamento de Metal-Mecánica. Felipe Pescador 1830, Nueva Vizcaya, 34080, Durango, Dgo. México.*

Recibido 7 de Abril, 2017; Aceptado 5 de Junio, 2017

### Resumen

El objetivo es determinar el ángulo óptimo de inclinación de colectores solares para la máxima captación de energía solar térmica mensual y anual en las ciudades de Chihuahua y Durango. A través de simulación dinámica en TRNSYS, se analiza el calentamiento de agua con colectores solares disponibles comercialmente de placa plana y tubos evacuados variando su inclinación de 0 a 90°. Se obtiene la energía acumulada mensual y anual y se presentan los ángulos óptimos de mayor generación de energía útil. Se obtiene el costo de la energía térmica ganada por los colectores comparada con haber sido obtenida con gas LP y electricidad. Uno de los resultados obtenidos fue el ángulo óptimo anual de inclinación de colectores de tubos evacuados para Durango que es de 6°, con un calor útil acumulado de 9,850 MJ, lo cual equivale a un costo estimado durante la vida útil del colector (20 años) de \$ 96,004. Se presenta un análisis económico para determinar el retorno de la inversión de la instalación de cada tipo de colector. El trabajo contribuye al conocimiento del potencial energético-económico basado en los ángulos óptimos anual y mensuales para aplicaciones y perfiles de carga específicos a lo largo del año.

**Colectores solares, inclinación óptima, simulación dinámica, análisis económico**

### Abstract

The objective is to determine the optimal angle of inclination of solar collectors for the maximum monthly and annual solar thermal energy capture in the cities of Chihuahua and Durango. Through dynamic simulation in TRNSYS, water heating is analyzed with commercially available flat plate and evacuated tubes solar collectors varying their inclination from 0 to 90°. Monthly and annual accumulated energy is obtained and the optimal angles of higher useful energy generation are presented. We obtain the cost of the thermal energy gained by the collectors compared to having been obtained with LP gas and electricity. One of the results obtained was the optimum annual angle of inclination of evacuated tube collectors for Durango which is 6°, with accumulated useful heat of 9,850 MJ, which is equivalent to an estimated cost during the life of the collector (20 years) of \$ 96,004. An economic analysis is presented to determine the return on investment of the installation of each type of solar collector. The work contributes to the knowledge of the energy-economic potential based on the optimum annual and monthly angles for specific applications and load profiles throughout the year.

**Solar collectors, optimum tilt, dynamic simulation, economic analysis**

**Citación:** ESCOBEDO-BRETADO, Jorge, RÍOS-OROZCO, Carlos, NAJERA-TREJO, Mario y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio. Análisis dinámico de la inclinación de colectores solares de placa plana y tubos evacuados para determinar el potencial energético-económico en las ciudades de Chihuahua y Durango. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-2:24-33

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jorge.escobedo@cimav.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

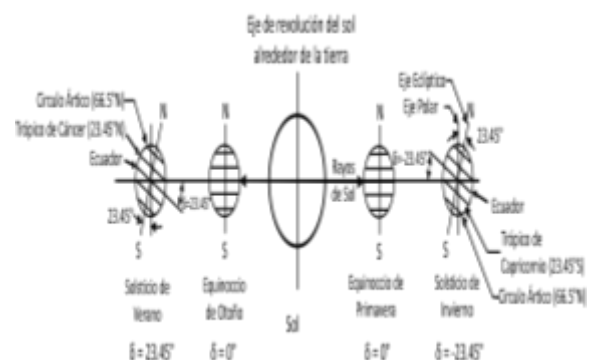
Captar la mayor cantidad posible de energía solar a través de colectores solares de placa plana y de tubos evacuados se logra cuando la superficie de estas tecnologías es perpendicular a la radiación solar. Lograr que la perpendicularidad permanezca durante la trayectoria aparente del sol en el cielo puede lograrse mediante un sistema de seguimiento solar cuyo costo, en general, es relativamente alto. La mayoría de los colectores solares disponibles en México, actualmente no cuentan con sistemas de seguimiento, limitándose a tener un solo ángulo durante toda su vida útil. Estos colectores solares son utilizados por la mayoría de los usuarios domésticos e industriales a nivel nacional. Se utilizan para sustituir combustibles convencionales como Gas LP, gas natural y electricidad, principalmente para producir energía térmica. Sin embargo, los perfiles de consumo de los usuarios son variados a lo largo del año. Existen usuarios que su necesidad energética térmica más elevada puede ser en los meses de invierno como el calentamiento de agua sanitaria para hoteles, hospitales y albergues, o como fluidos de trabajo para calentar espacios como invernaderos o naves industriales. Por otra parte, existen usuarios cuya necesidad de energía térmica más elevada puede ser en verano, como en sistemas de refrigeración por absorción. Y existen usuarios que utilizan un perfil de carga térmica constante a lo largo del año. Para cada caso particular se debe diseñar un campo de colectores solares con la inclinación óptima. Actualmente la única medida que se toma para determinar el ángulo de inclinación de un colector solar es dotándolo del mismo ángulo que la latitud de lugar por ejemplo  $\approx 24^\circ$  para el caso de la ciudad capital del estado de Durango y de  $\approx 28^\circ$  para el caso de la ciudad capital del estado de Chihuahua.

El estudio para analizar el comportamiento de la captación de energía térmica solar por medio de colectores solares para diferentes ángulos de inclinación se basa en la plataforma computacional del software TRNSYS. Este software puede mostrar diferentes escenarios para poder comparar el comportamiento de las diferentes configuraciones y dimensiones de tecnología para aprovechamiento de energía solar con un error menor del 5% (Almeida P, et al., 2014).

El trabajo contribuye al conocimiento del potencial energético-económico basado en los ángulos óptimos anual y mensuales para aplicaciones y perfiles de carga específicos a lo largo del año.

## Geometría solar

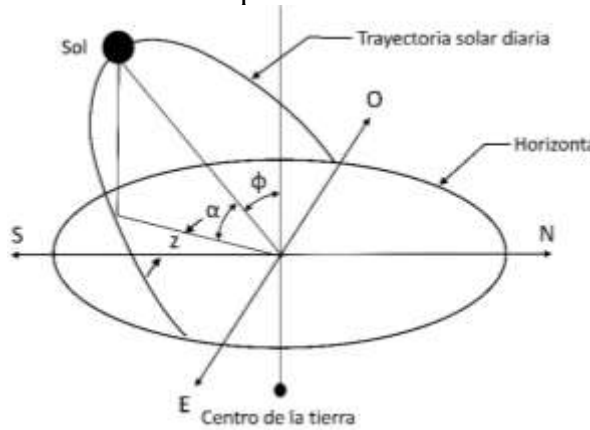
Para el análisis de inclinaciones de superficies sobre el planeta, se deben tomar en cuenta los ángulos de incidencia de la luz solar sobre la superficie terrestre. La Figura 1 muestra la inclinación del eje polar con respecto a la normal al plano elíptico ( $23.45^\circ$ ), conocido como "ángulo de declinación  $\delta$ " (Kalogirou, 2009).



**Figura 9** Ángulos de declinación por estaciones de año (Kalogirou, 2009)



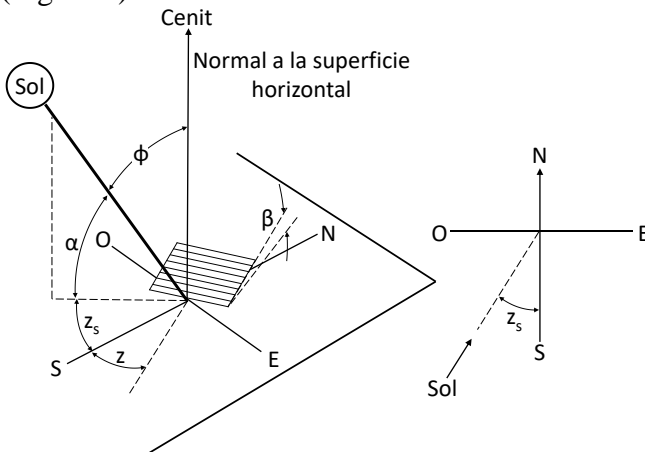
Además, se debe tener en cuenta la posición relativa del sol respecto a un punto de referencia en la tierra para saber la posición en la que se debe colocar un colector solar. La Figura 2 muestra los ángulos astronómicos, altitud solar ( $\alpha$ ), acimut ( $z$ ) y cenit ( $\phi$ ), que pueden describir completamente la posición del sol en cualquier instante sobre ese punto de referencia.



**Figura 10** Trayectoria solar aparente a través del cielo desde el amanecer hasta el atardecer (Kalogirou, 2009).

En el hemisferio norte, los colectores solares se colocan orientados al sur con un ángulo azimutal de  $0^\circ$ ,  $z_s = 0^\circ$

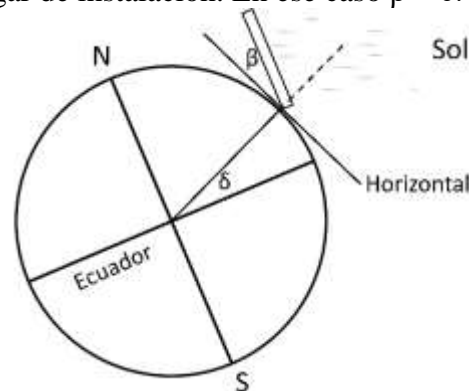
En el presente trabajo se analiza el comportamiento de la energía anual captada cuando cambia la inclinación  $\beta$  del colector (Figura 3).



**Figura 11** Descripción de ángulos con respecto a una superficie inclinada (Duffie y Beckman 1991)

### Inclinación de colectores

Normalmente la posición de los colectores solares tiene una orientación hacia el sur, con un grado de inclinación  $\beta$  similar al de la latitud del lugar de instalación. En ese caso  $\beta = \delta$ .



**Figura 12** Relación geométrica entre un plano con cualquier orientación particular relativa a la Tierra (Paz, 2006).

Para el análisis de la captación de energía solar, cuando cambia el grado de inclinación, se utiliza la tecnología de colectores solares de placa plana y de tubos evacuados.

### Colector solar de placa plana

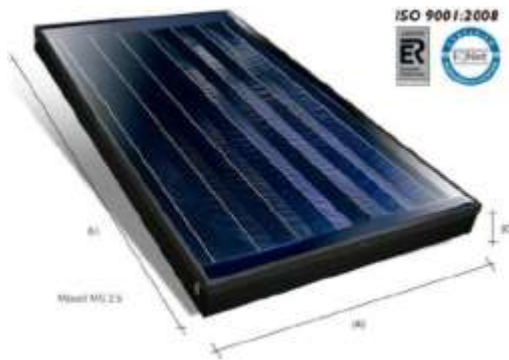
El colector solar de placa plana que se utiliza corresponde a un modelo disponible comercialmente en México, pero con fabricación y prueba en Estados Unidos (Figura 5). Alcanza temperaturas de entre  $30^\circ\text{C}$  y  $90^\circ\text{C}$  dependiendo del modo de uso y de la localización geográfica del país en donde se instale.

Los componentes principales son los siguientes:

- Absorbedor de cobre con superficie selectiva BLACK, BLUE o de aluminio con superficie selectiva color negro
- Vidrio templado solar prismático

- Aislamiento de poliuretano y lana mineral

Este colector tiene la certificación europea UNE-12975, Solar Keymark y la certificación estadounidense Solar Rating & Certification Corporation (SRCC, por sus siglas en Inglés).



**Figura 13** Colector solar de placa plana MS 2.4

El colector cuenta con un área total de 2.506 m<sup>2</sup>. La tasa de flujo de prueba del colector fue de 0.0215 kg/s·m<sup>2</sup>. La curva de eficiencia térmica se representa por la siguiente ecuación:

$$\eta = 0.697 - 3.14480 \frac{P}{G} - 0.01650 \frac{P^2}{G} \quad (1)$$

Donde  $\eta$  es la eficiencia térmica del colector,  $P$  es la diferencia entre la temperatura del agua de entrada ( $T_i$ ) y la temperatura del aire ambiente ( $T_a$ ) y  $G$  es la radiación solar incidente sobre el colector solar. Los coeficientes numéricos fueron obtenidos por medio de experimentación.

### Colector solar de tubos evacuados

En el caso del colector de tubos evacuados, se utiliza el modelo AP 30 (Figura 6), el cual cuenta con un área de 4.158 m<sup>2</sup>. La tasa de flujo de prueba del colector fue de 0.02 kg/s·m<sup>2</sup>.



**Figura 14** Colector solar de tubos evacuados AP30

La curva de eficiencia térmica se representa por la siguiente ecuación:

$$\eta = 0.456 - 1.35090 \frac{P}{G} - 0.00380 \frac{P^2}{G} \quad (2)$$

### Ciudades de estudio

Se han elegido las ciudades capitales de Chihuahua y Durango debido a la alta velocidad de la instalación de tecnología de colectores solares de placa plana y de tubos evacuados. También se eligieron por su alta incidencia de radiación solar, llegando a tener valores superiores a los 1,100 W/m<sup>2</sup> durante algunos minutos (Estación meteorológica propia). Finalmente se eligieron por tener como prioridad utilizar energías renovables, como la solar, en sus planes estatales de desarrollo para aplicaciones domésticas e industriales.

Los datos climáticos utilizados en la simulación para la ciudad de Chihuahua se obtuvieron de bases de datos de un año típico meteorológico (TMY por sus siglas en Inglés), desarrollada por la National Renewable Energy Laboratory y que viene incluidas en la librería del software de simulación.

Los datos climáticos correspondientes a la ciudad de Durango, son tomados de un TMY desarrollado por el software Meteonorm, a partir de 7,000 estaciones meteorológicas disponibles alrededor del mundo y de métodos matemáticos de interpolación (Meteonorm V7.1)( Ruslan Botpaev, et al., 2008).

El software de simulación es capaz de leer archivos TMY en intervalos regulares de tiempo y los pone a disposición para otros componentes con un paso de simulación menor a una hora si así se desea.

**Objetivo**

El objetivo es determinar el ángulo óptimo de inclinación de colectores solares para la máxima captación de energía solar térmica mensual y anual en las ciudades de Chihuahua y Durango.

**Metodología**

Se desarrolló un modelo de un sistema solar térmico para analizar el comportamiento de la inclinación de colectores solares de placa plana y tubos evacuados en las ciudades capitales de Chihuahua y Durango.

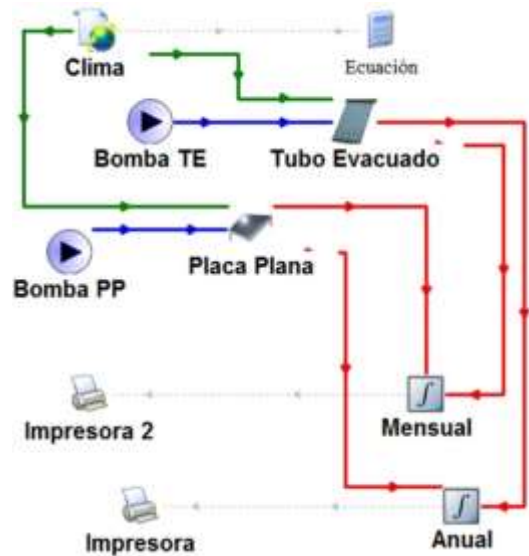
La simulación se desarrolla con las variables ambientales representativas de ambas ciudades y se hacen cálculos cada 15 minutos (paso).

Se colocan los colectores solares orientados al sur y se hace una simulación por cada grado de inclinación desde 0° a 90° en intervalos de uno, obteniendo la energía total integrada en kJ cuando el colector opera durante un año.

Se obtienen resultados anuales y mensuales y se obtienen los ángulos óptimos correspondientes.

**Simulación propuesta**

Se utiliza el software de simulación TRNSYS, que provee un ambiente de simulación por medio de módulos (Types) que representan a los colectores solares, una bomba y el generador de clima principalmente. También cuenta con módulos periféricos que ayudan al desarrollo de la simulación como controladores, calculadoras, integradoras, graficadores e impresoras (Figura 7).



**Figura 15** Modelo de simulación en TRNSYS de colectores solares

**Análisis paramétrico**

La simulación contiene las variables ciudades y ángulos que se describen en la Tabla 1:

Variable	Cantidad	Descripción
Ciudades	2	Chihuahua y Durango
Ángulos	91	0,1,2,3,...90

**Tabla 1** Variables de la simulación

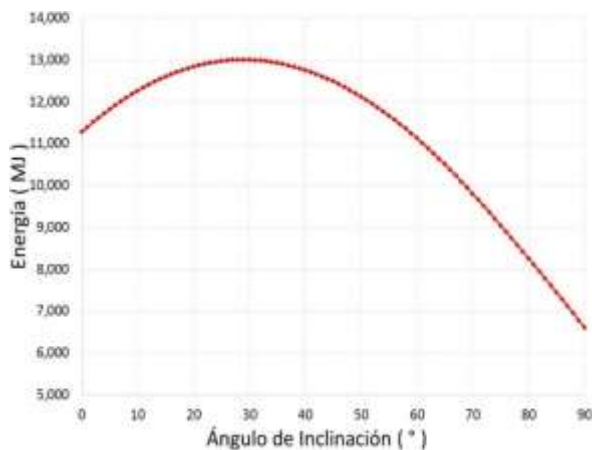
Se obtendrán 182 resultados anuales y 2,184 resultados mensuales

**Resultados**

En esta sección se muestran los resultados del análisis de la captación de energía solar térmica integrada anual y mensualmente, por los colectores solares de placa plana y de tubos evacuados, cuando cambia su inclinación. Se divide el análisis de los resultados por ciudades.

**Comportamiento de colectores en Chihuahua**

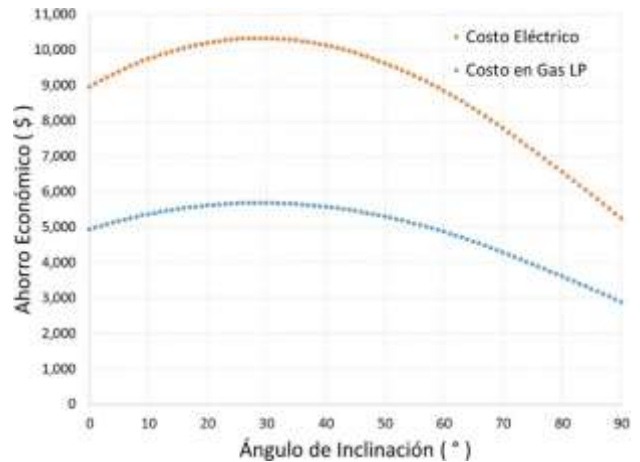
La Gráfica 1, muestra el comportamiento de la energía captada, durante un año, por el colector solar de placa plana cuando se incrementa el grado de inclinación. Se muestra que, sin inclinación, es decir, cero grados, se obtiene un valor mayor a los 11,000 MJ. Se observa una tendencia de aumento de captación de energía conforme aumenta el grado de inclinación hasta un máximo de 13,000 MJ con un grado de inclinación de 29°. Cuando aumenta el grado de inclinación, la energía captada por el colector decrece hasta valores cercanos a los 6,500 MJ con un ángulo de 90°.



**Gráfico 2** Energía anual acumulada para cada grado de inclinación del colector de placa plana para Chihuahua.

Si la energía térmica de la Gráfica 1 fuese obtenida por combustibles convencionales como gas licuado de petróleo (LP) o mediante electricidad, se obtiene el comportamiento mostrado en la Gráfica 2

Para obtener la energía térmica por medio de Gas LP, se sabe que: La eficiencia promedio de una caldera es del orden del 80 %, la capacidad calorífica es de 47.07 MJ/kg, y que el precio del kilogramo de Gas LP es de \$ 16.43.



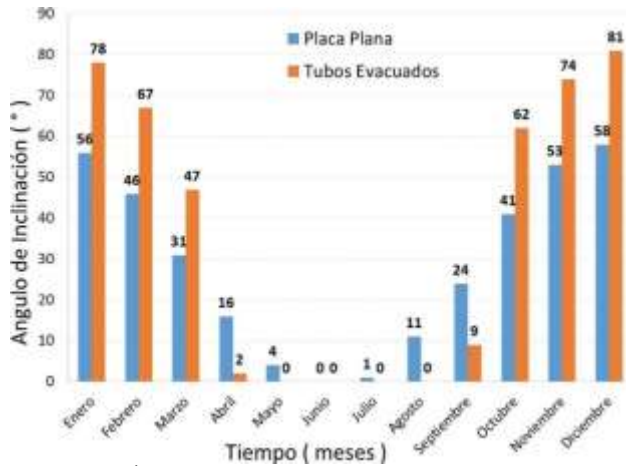
**Gráfico 3** Costo de la energía obtenida por el colector de placa plana para Chihuahua

Para obtener la energía térmica por medios eléctricos, se considera un sistema de calentamiento a través de resistencias eléctricas con una eficiencia del 100 % y el precio del kWh es de \$ 2.859, la cual es una tarifa industrial (CFE, 2016).

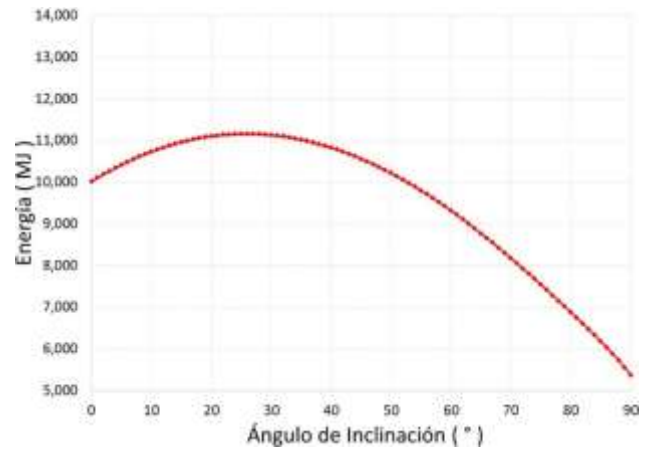
Para el ángulo óptimo de 29° con 13,000 MJ colectados, con gas LP se ahorraría \$5,680 y con electricidad se ahorraría \$10,325.

El comportamiento del colector de tubos evacuados es similar que el de placa plana.

En la Gráfica 3, se presentan los ángulos óptimos de los colectores de placa plana y tubos evacuados para cada mes para la ciudad de Chihuahua. Es decir, es el ángulo donde se obtiene la mayor energía durante ese periodo.



**Gráfico 4** Ángulos óptimos para cada mes en la ciudad de Chihuahua



**Gráfico 5** Energía anual acumulada para cada grado de inclinación del colector de placa plana para Durango

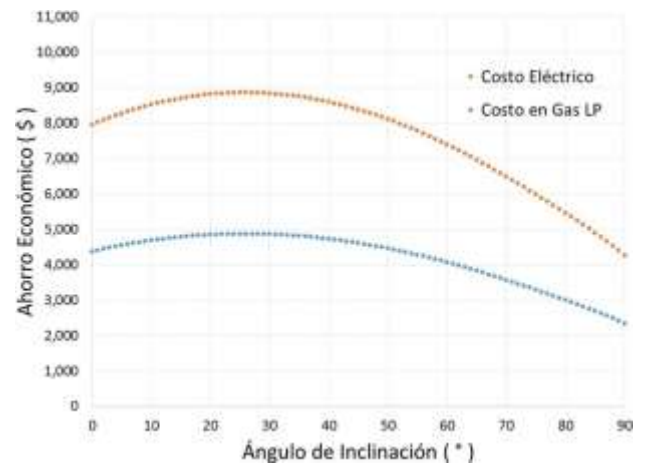
**Comportamiento de colectores en Durango**

La Gráfica 4, muestra el comportamiento de la energía captada, durante un año, por el colector solar de placa plana cuando se incrementa el grado de inclinación.

Se muestra que, sin inclinación, es decir, cero grados, se obtiene un valor alrededor de 10,000 MJ. Se observa una tendencia de aumento de captación de energía conforme aumenta el grado de inclinación hasta un máximo de 11,163 MJ con un grado de inclinación de 25°.

Cuando aumenta el grado de inclinación, la energía captada por el colector decrece hasta valores cercanos a los 5,500 MJ con un ángulo de 90°.

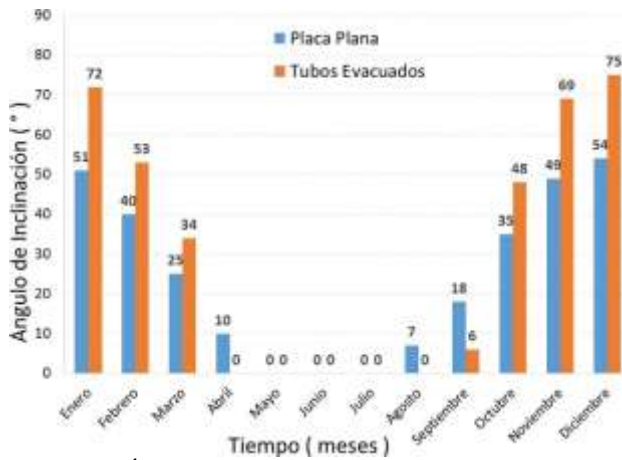
Si la energía térmica de la Gráfica 4 fuese obtenida por los combustibles convencionales antes mencionados, se obtiene el comportamiento mostrado en la Gráfica 5.



**Gráfico 6** Costo de la energía obtenida por el colector de placa plana para Durango

Para el ángulo óptimo de 25° con 11,163 MJ colectados, con gas LP se ahorraría \$4,878 y con electricidad se ahorraría \$8,866.

El comportamiento del colector de tubos evacuados en la ciudad de Durango, es semejante al de placa plana en el mismo lugar.



**Gráfico 7** Ángulos óptimos para cada mes en la ciudad de Durango

Finalmente, en la Gráfica 6, se presentan los ángulos óptimos de los colectores de placa plana y tubos evacuados para cada mes para la ciudad de Durango.

Se muestra que, para ambos colectores solares, durante los meses de mayo a julio, el ángulo óptimo es de 0°.

**Análisis económico**

Este trabajo se basa en el potencial de aprovechamiento de la energía solar térmica para posibles aplicaciones industriales. Actualmente no se tiene un perfil de consumo definido y al análisis económico se da un enfoque hacia un posible ahorro.

Dentro de este análisis económico se toma en cuenta el ahorro de un proyecto donde se utiliza un colector solar durante su vida útil. Este estudio se realiza obteniendo el ahorro llevado al valor presente.

Se toma en cuenta la tasa de interés (*i*) del 5%, en aumento anual de los combustibles (*G*) del 10%, el ahorro de la energía del primer año (*PC*), y la vida útil de los equipos (*n*) de 20 años, por medio de la siguiente expresión matemática.

$$GPWF = PC \cdot \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right] + PC \cdot G \cdot \frac{1}{i} \cdot \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} - \frac{n}{(1+i)^n} \right] \quad (3)$$

En la Tabla 2 se muestran los resultados más importantes de los posibles ahorros cuando se utilizan dos tipos de colectores solares, dos ciudades, y dos tipos de combustibles.

Características	Ahorro del proyecto @ 20 años
Chihuahua - Gas – Placa Plana	126,727
Chihuahua - Eléctrico – Placa Plana	230,362
Durango - Gas - Placa Plana	108,833
Durango - Eléctrico - Placa Plana	197,810
Chihuahua - Gas - TE	109,391
Chihuahua - Eléctrico - TE	198,814
Durango - Gas - TE	96,004
Durango - Eléctrico - TE	174,495

**Tabla 2** Ahorros acumulados en la vida útil del proyecto

**Conclusiones**

Se determinó el ángulo óptimo de inclinación de colectores solares para la máxima captación de energía solar térmica mensual y anual en las ciudades de Chihuahua y Durango.

Para colectores solares de placa plana en Chihuahua, el ángulo óptimo es de 29°

Para colectores solares de tubos evacuados en Chihuahua, el ángulo óptimo es de 11°

Para colectores solares de placa plana en Durango, el ángulo óptimo es de 25°

Para colectores solares de tubos evacuados en Durango, el ángulo óptimo es de 6°

Los ángulos óptimos para cada mes pueden tener variaciones hasta de  $81^\circ$ , como es el caso del colector solar de tubos evacuados cuando opera en Chihuahua.

En general, los colectores solares pueden ser pagados, con los ahorros, en un periodo de alrededor de 2 años.

### Recomendaciones

Se recomienda profundizar en el análisis de colectores de tubos evacuados debido a que son los más utilizados en la industria.

### Agradecimientos

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del:

Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol), A través del Proyecto:

P13 “Laboratorios de pruebas para baja y media temperatura, laboratorio para el diseño e integración de sistemas termo solares asistido por computadora”

Pertenciente a la Convocatoria 2013-02, del:

Fondo SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA.

Para el desarrollo y presentación de éste trabajo.

### Referencias

Almeida P., Carvalho M.J., Amorim R., Mendes J.F., Lopes V. (2014). Dynamic testing of systems – Use of TRNSYS as an approach for parameter identification. *Solar Energy*, 104, 60-70.

Carrillo-Rivas J. Y. (2016). Determinación de la Rentabilidad Anual de Colectores Solares de Tubos Evacuados en la Ciudad de Durango. Tesis de Licenciatura, 68.

Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2016). Consulta. 2016, Sitio web: <http://www.cfe.gob.mx/paginas/home.aspx>

Gobierno del estado de Chihuahua. (2017). Plan estatal de desarrollo 2017-2021. 30/07/2017, de Gobierno del estado de Chihuahua Sitio web: <http://congresochihuahua.gob.mx/biblioteca/iniciativas/archivosIniciativas/6266.pdf>

Gobierno del estado de Durango. (2016). Plan estatal de desarrollo 2016-2022. Gobierno del estado de Durango, 212.

Duffie J.A, Beckman W.A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York.: Wiley

Escobedo-Bretado, Jorge. A., Martín-Domínguez, Ignacio R. (2016). Determinación del requerimiento energético para calefacción en un invernadero agrícola y dimensionamiento del sistema Termosolar-Gas L.P. requerido para su suministro óptimo. *Aplicaciones de la Ingeniería*, 3, 9.

Hernández-Flores, L. M. (2016). Simulación dinámica en TRNSYS de colectores solares de Placa Plana para determinar la inclinación óptima de mayor rentabilidad para la Ciudad de Durango. Tesis de Licenciatura, 67.

Kalogirou, S. A. (2009). *Solar energy engineering: processes and systems*. 1<sup>st</sup> Ed. Annual motion of the earth about the sun.

Módulo Solar. (2016). Catálogo de colectores solares. 30/07/2017, de Módulo solar Sitio web: <http://www.modulosolar.com.mx/MAXOL/InformacionTecnica.php>

Paz Gutiérrez J.C. (2006). Colectores solares planos tratamiento teórico. Tesis doctoral, 116.

Ruslan Botpaev, Alaibek Obozov, Janybek Orozaliev, Christian Budig, Klaus Vajen. (2008). Comparison of meteorological data from different sources for Bishkek city, Kyrgyzstan. Proc. EuroSun 2008, Lisbon (PT), 7. - 10.10.2008, 7.

Solar Rating and Certification Corporation. (2016). Ficha técnica. 2016, de SRCC Sitio web: <https://secure.solar-rating.org/Certification/Ratings/RatingsSummaryPage.aspx?type=1>

Solar Rating and Certification Corporation. (2016). Ficha técnica. 2016, de SRCC Sitio web: <https://secure.solar-rating.org/Certification/Ratings/RatingsReport.aspx?device=1230&units=METRICS>

Transient System Simulation Program (TRNSYS). (2005). Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison. 1500 Engineering Drive, 1303 Engineering Research Building. Madison, WI 53706 – U.S.A.



## Observador lineal usado para estimar corrientes en los devanados de un aerogenerador

PÉREZ-BARRIOS, Carlos Ángel†\*, TÉLLEZ-ANGUIANO, Adriana del Carmen, HERAS-CERVANTES, Mario y GUTIÉRREZ-GNECCHI, José Antonio

*Departamento de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Morelia*

Recibido 17 de Abril, 2017; Aceptado 26 de Junio, 2017

### Resumen

La energía limpia y renovable ha tomado gran relevancia en los últimos años debido a la demanda energética del mundo moderno. Una energía alternativa viable es la proveniente del viento, obtenida a través de aerogeneradores. Existen diversos problemas en el uso de aerogeneradores ocasionados por desgaste o por fallas humanas, entre otros factores. Por lo anterior, es conveniente utilizar diversos mecanismos y técnicas para el monitoreo y control del sistema y aislamiento de las fallas. Las técnicas de aislamiento de fallas se pueden basar en dos enfoques, la redundancia material y la redundancia analítica, esta última se basa en algoritmos matemáticos para estimar variables de la planta. Las técnicas basadas en redundancia analítica se proponen como una opción viable de implementación, por su simplicidad y mínima inversión. Uno de los algoritmos utilizados para estimar variables dentro de una planta son los observadores, los cuales también son conocidos como sensores virtuales. Los observadores representan una atractiva solución para estimar las variables complejas de medir. En este trabajo se presenta un observador de Luenberger que estima las corrientes ( $I_d$  e  $I_q$ ) en los devanados de un aerogenerador, para el que se implementa un modelo eléctrico en dos fases debido al análisis de dos subcircuitos (marcos de referencia  $d-q$ ) debido a la naturaleza en movimiento del aerogenerador. El observador se basa en un modelo eléctrico lineal del aerogenerador y se valida en simulación en Matlab empleando mediciones reales. El objetivo principal es proporcionar información de las corrientes de los devanados útiles para tareas de monitoreo y control.

### Aerogenerador, modelo lineal, observador de Luenberger

**Citación:** PÉREZ-BARRIOS, Carlos Ángel, TÉLLEZ-ANGUIANO, Adriana del Carmen, HERAS-CERVANTES, Mario y GUTIÉRREZ-GNECCHI, José Antonio. Observador lineal usado para estimar corrientes en los devanados de un aerogenerador. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-2:34-42

### Abstract

Clean and renewable energy has become a very important issue in recent years due to the energy demand of the modern world. A viable alternative energy is obtained from the wind through wind turbines. There are several problems in the use of wind turbines caused by wear or human failures, among other factors. Therefore, several mechanisms and techniques should be used for their monitoring, control and fault isolation. Fault detection techniques can be based on two approaches, material redundancy and analytical redundancy, the last based on mathematical algorithms to estimate plant variables. The techniques based on analytical redundancy are proposed as a viable implementation option, due to its simplicity and minimal investment. One of the algorithms used to estimate variables in a plant is the observer, also known as virtual sensor. Observers represent an attractive solution for estimating complex measurement variables. In this paper a Luenberger observer to estimate the currents ( $I_d$  and  $I_q$ ) in the windings of a wind turbine, for which an electric model in two phases is implanted due to the analysis of two subcircuits (frames of reference  $d-q$ ) corresponding the moving nature of the wind turbine is presented. The observer is based on a linear electric model of the wind turbine and validated in simulation in Matlab using real measurements. The main objective is to provide information on winding currents useful for monitoring and control tasks.

### Wind turbine, linear model, Luenberger Observer

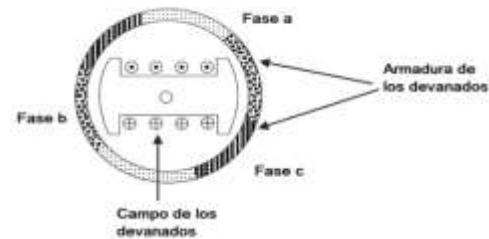
\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: caperezb@tecmor.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

En años recientes, las fuentes de energía renovable han adquirido mayor relevancia debido a las diversas consecuencias negativas que ha conllevado el uso de combustibles fósiles y a su innegable agotamiento. Una de las alternativas de energía limpia, renovable y económicamente rentable es la energía proveniente del viento, es decir, la energía eólica. El aerogenerador es el equipo encargado de transformar la energía eólica en energía eléctrica, en los últimos años esta energía se ha aplicado con éxito en procesos industriales y domésticos. Sin embargo, el creciente uso de sistemas eólicos ha puesto de manifiesto diversos problemas, desde aquellos que pueden ser ocasionados por el propio desgaste del aerogenerador hasta aquellos relacionados con fallas humanas. Estimar las corrientes en los devanados de un aerogenerador ( $I_d$  e  $I_q$ ) sin utilizar hardware especializado, implementando modelos matemáticos, ayuda a un posterior análisis de las fallas que se pudieran presentar. Los observadores como sensores virtuales representan una opción viable ya que no se necesita un hardware especial para conocer el comportamiento de las variables monitoreadas. Un aerogenerador puede analizarse utilizando distintos modelos matemáticos; diversos autores plantean modelos que se basan en una perspectiva mecánica, donde el par de torsión, la velocidad del viento y el giro de las aspas son las variables de entrada más importantes. Otros modelos realizan la conjunción de modelos híbridos, donde combinan un modelo mecánico con uno eléctrico, donde las variables de entrada pueden ser los voltajes de los devanados o las corrientes de los mismos, considerando los parámetros eléctricos del aerogenerador y como variables a observar las corrientes de los devanados o hasta el par de torsión.

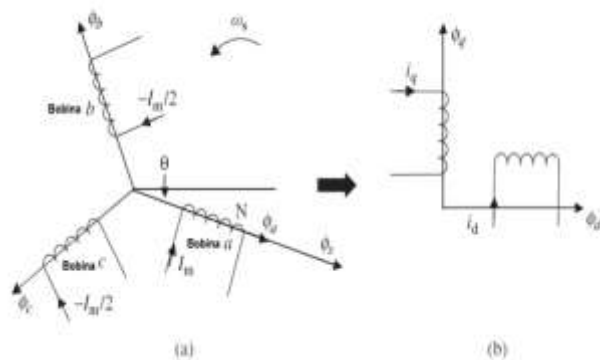
En este artículo, se aborda el tema de un modelo eléctrico de un aerogenerador, para el cual se considera en la Figura 1, que representa el esquema de un generador síncrono de imán permanente.



**Figura 1** Esquema de un generador síncrono trifásico

El rotor en el aerogenerador es movido por una fuerza motriz (viento), el campo magnético producido por la rotación de los devanados en el espacio es ocasionado por la velocidad de desplazamiento  $\omega_s$ . Este campo magnético corta a los conductores del estator produciendo tres voltajes, los cuales están defasados en el tiempo  $120^\circ$ .

Si se tiene un sistema balanceado, se puede tener una representación comúnmente usada para el estudio del aerogenerador como una máquina eléctrica bajo condiciones dinámicas, si la corriente en las tres fases de los devanados cambia en magnitud y fase, la posición del vector de campo magnético resultante cambia, por lo que manejar un sola bobina como representación del sistema no es del todo correcto. Por ello, para estudios dinámicos se utiliza un modelo basado en la representación de dos fases, la cual se muestra en la Figura 2

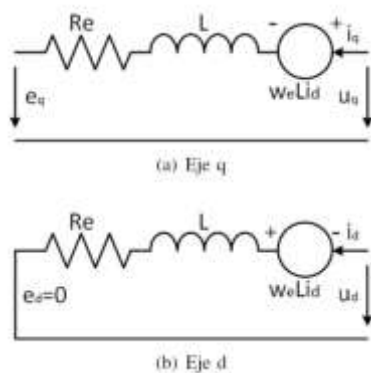


**Figura 2** Transformación del modelo trifásico a dos fases: a) representación trifásica con tres bobinas b) representación con dos bobinas

Para definir el sistema trifásico, dos bobinas ortogonales son seleccionadas, una situada en el eje d, la cual se elige en línea con la posición de campo del devanado y la otra sobre el eje q, que está desplazada del eje d por 90°.

Caso de Estudio

En la Figura 3 se presenta un circuito eléctrico simplificado equivalente para un generador PSMG (Generador Síncrono de Imán Permanente) en el marco de referencia de rotación-dq.



**Figura 3** Circuito equivalente para un generador PSMG

Este modelo de PSMG considera derivar el sistema de una referencia de dos fases, donde el eje q está adelantado 90° al eje d con respecto a la dirección de rotación. El modelo está representado eléctricamente en el marco de referencia síncrono por la ecuación (1) [11].

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= U_d L - R_a L i_d - w_e L^2 i_q \\ \frac{di_q}{dt} &= U_q L - R_a L i_q - w_e L^2 i_d \end{aligned} \tag{1}$$

donde los subíndices d y q se referencian al marco síncrono dq, Ra es la resistencia del armazón, we es la velocidad de rotación eléctrica, la cual se relaciona con la velocidad de rotación mecánica del generador y L es la sumatoria de las inductancias del generador y del transformador. La representación en espacio de estados del modelo eléctrico se presenta en la ecuación (2), donde los estados definidos son id e iq (x1 = id y x2 = iq).

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= \begin{bmatrix} -R_a L & -w_e L^2 \\ -w_e L^2 & -R_a L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{2}$$

El modelo eléctrico simplificado presenta variaciones con respecto al comportamiento de un aerogenerador real, sin embargo, es posible diseñar un observador que, dado su principio de funcionamiento, converja al sistema real teniendo como referencia una salida o estado del sistema. El caso de estudio de este trabajo es un aerogenerador doméstico Air 30 de Southwest Windpower. Dicho aerogenerador utiliza un alternador sin escobillas de imán permanente. Se elige el modelo eléctrico debido a la simplicidad para medir sus parámetros internos.

## Observador de Luenberger

Los observadores son llamados sensores virtuales debido a que su algoritmo de programación tiende a realizar la misma función que un sensor físico. Un observador requiere, sin embargo, que el sistema a describir sea observable [6].

La aproximación basada en observadores necesita de un modelo del sistema para operar de forma paralela con el proceso (diagnóstico del observador) en lazo abierto [2], por lo cual se garantiza el conocimiento pleno de lo que está pasando en el sistema. La diferencia entre la medición de salida y las señal estimada por el observador debe ser diferente de cero cuando un error ocurre [12].

En el diseño del observador para el aerogenerador se elige un observador de Luenberger debido a las características específicas del modelo eléctrico ya que a lo largo del tiempo el modelo eléctrico presentado tiende a tener un comportamiento lineal considerando un sistema observable, siendo un observador lineal suficiente para estimar las variables deseadas. Para un sistema representado en (3), (se omite la dependencia del tiempo por simplicidad de representación).

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\quad (3)$$

siendo las matrices A, B y C conocidas, se propone la estructura genérica para el observador representada en 4 [13].

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) \\ y(t) &= C\hat{x}(t)\end{aligned}\quad (4)$$

El error de estimación del observador se determina por (5).

$$E_x(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (5)$$

Por lo tanto

$$\dot{\hat{E}}_x(t) = (A - LC)E(t) \quad (6)$$

El observador de Luenberger considera la realimentación el error de salida, como se muestra en la ecuación (7), para compensar el error de estimación

$$\hat{y}(t) - y(t) = Cx(t) - C\hat{x}(t) \quad (7)$$

Por lo tanto el observador de Luenberger queda definido en la ecuación (8)

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(C\hat{x}(t) - Cx(t)) \quad (8)$$

La dinámica del error definido por la diferencia entre los estados del sistema y los estados del observador se expresa en (9) [14].

$$\dot{E}_x(t) = (A - LC)(x(t) - \hat{x}(t)) = (A - LC)E_x(t) \quad (9)$$

donde A y L deben ser diseñadas para cumplir con el objetivo de forzar la convergencia de los estados del observador [15]. Los eigenvalores de la matriz A deben estar ubicados al semiplano izquierdo para garantizar la estabilidad del sistema. La Figura 4 muestra el diagrama a bloques de un observador.

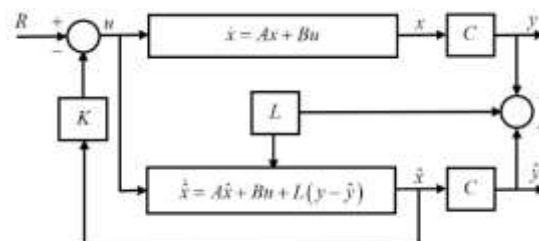


Figura 4 Diagrama a bloques de un observador

Fuente: Elaboración propia

### Implementación y validación del observador

Con base en las matrices representadas en espacio de estados para el modelo del aerogenerador con forma similar a la presentada en (4), se calculan los eigenvalores y las ganancias  $k$  correspondientes al observador que tiene como entrada de referencia a la corriente  $i_d$ .

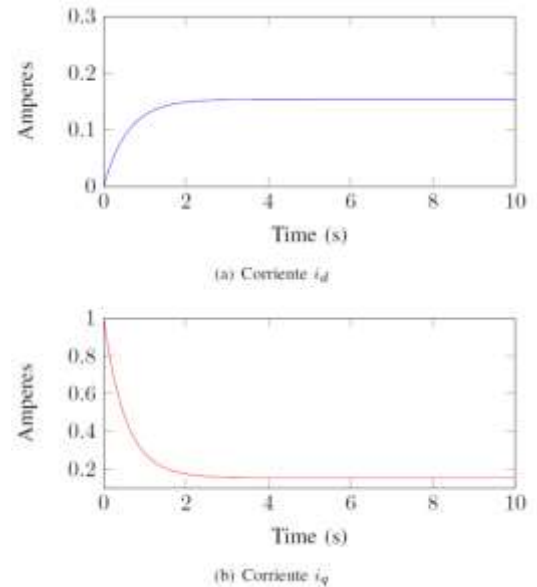
El sistema considerado tiene como salida al estado  $x_1$  de tal forma que el vector  $C_1 = [1 \ 0]$  y la salida y está determinada por (10).

$$y = C_1 x = [1 \ 0] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Para el segundo observador se tiene como referencia a  $i_q$  y como salida al estado  $x_2$ , por lo que el vector  $C_2 = [0; 1]$  y la salida y se expresa como se muestra en 11.

$$y = c_2 x = [0 \ 1] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

De manera previa a la implementación del observador, se valida inicialmente el desempeño del modelo eléctrico del aerogenerador en *Matlab*. Los valores de los parámetros requeridos del aerogenerador se obtienen mediante mediciones del sistema. Los datos medidos y empleados en el modelo son  $R_a = 31.27\Omega$ ,  $L = 0.060H$ ,  $W_e = 10\text{rps}$ ,  $U_d$  y  $U_q = 4.9\text{Vrms}$ . En la Figura 5, se presentan los resultados obtenidos por el modelo eléctrico del aerogenerador, tanto para la corriente  $i_d$  como para la corriente  $i_q$ .



**Figura 5** Resultados del modelo eléctrico del aerogenerador

Fuente: Elaboración propia

Una vez validado el modelo, el diseño del observador se reduce a encontrar una matriz  $L$  que asigne sus eigenvalores en:

El semiplano izquierdo, lo cual asegura la estabilidad del observador.

La izquierda de los eigenvalores del sistema para asegurar que la dinámica del error sea más rápida que el sistema.

Se continua con el diseño de un observador de Luenberger, para lo cual se toman en cuenta el modelo en espacio de estado expresado en (3) y los parámetros medidos del aerogenerador:  $R_a = 31.27\Omega$ ,  $L = 0.060H$ ,  $W_e = 10\text{rps}$ ,  $U_d$  y  $U_q = 4.9\text{Vrms}$ . El modelo presentado en (3) se expresa numéricamente en (12)

$$\begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -16(0.036) & -10(0.036)^2 \\ -10(0.036)^2 & -16(0.036) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.036 & 0 \\ 0 & 0.036 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} \quad (12)$$

El vector de ganancias  $k$  para el observador que tiene a  $i_d$  como entrada de referencia está expresado por 13

$$K = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Las ganancias son calculadas a partir de los eigenvalores expresados en 14.

$$E = (A - KC) - \lambda I$$

$$\det|E| = \frac{12k_1}{25} - \frac{81k_2}{6250} + \frac{24\lambda}{25} + k_1\lambda + \lambda^2 + \frac{8993439}{39062500} \quad (14)$$

Considerando como valor característico a  $s=-10$ , se tiene que  $(s + 10)^2 = s^2 + 20s + 100$ , por lo tanto los valores obtenidos para las ganancias del vector  $k$  son expresados en 15.

$$K = \begin{bmatrix} 19.04 \\ -699.09 \end{bmatrix} \quad (15)$$

De manera similar, para el observador 2 se considera como referencia a  $i_q$ ; se propone el valor característico en  $s = -5$  obteniendo  $(s + 5)^2 = s^2 + 10s + 25$ .

El vector de ganancias  $k$  es expresado en 16:

$$K = \begin{bmatrix} -120.43 \\ 20.04 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Ambos observadores son de orden reducido ya que solo estiman una sola variable  $I_d$  e  $I_q$  respectivamente.

1) Validación del observador: Tomando en cuenta los valores obtenidos en la sección anterior, se valida el funcionamiento del observador bajo condiciones de anomalía en la corriente de los devanados del aerogenerador.

En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos al presentarse una alteración en un devanado en  $t = 2$ seg, esta falla incide directamente en las corrientes  $i_d$  e  $i_q$ , incrementando su valor. Dado que el observador 1 únicamente considera como entrada de referencia el valor de la corriente  $i_d$ , sólo tiene la capacidad de converger adecuadamente con esta corriente. Hay una diferencia de la corriente estimada por el observador para la corriente  $i_q$ , el valor estimado no converge con el valor medido dado que su entrada de referencia no corresponde a  $i_q$ . En la Figura 7 se presenta el comportamiento del observador con señal de referencia  $i_q$ , bajo condiciones similares a las usadas en el caso anterior (Figura 4). Se presenta una falla que incrementa la corriente en el devanado en  $t = 2$ seg.

Se puede apreciar que el observador 2 converge con la señal de  $i_q$ , la cual es su entrada de referencia. En lo referente a la corriente  $i_d$ , el observador, al no tener esta señal como referencia, no logra converger.

Finalmente, en la Figura 6 se presentan los resultados obtenidos de la simulación al integrar los dos observadores al sistema, considerando entonces las dos corrientes de salida, ( $i_d$  e  $i_q$ ). Se presenta una falla que decrementa ambas corrientes en  $t = 2$ seg; como se puede observar las corrientes estimadas por ambos observadores convergen con las señales medidas para ambas corrientes, esto garantiza que los observadores están trabajando adecuadamente.

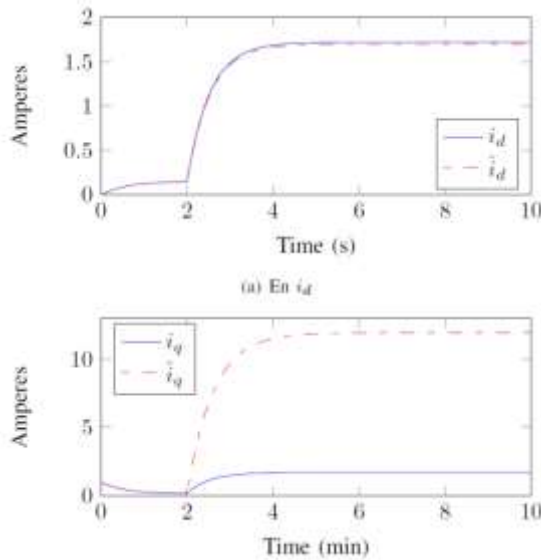


Figura 6 Observador para  $i_d$ , con falla

Fuente: Elaboración propia

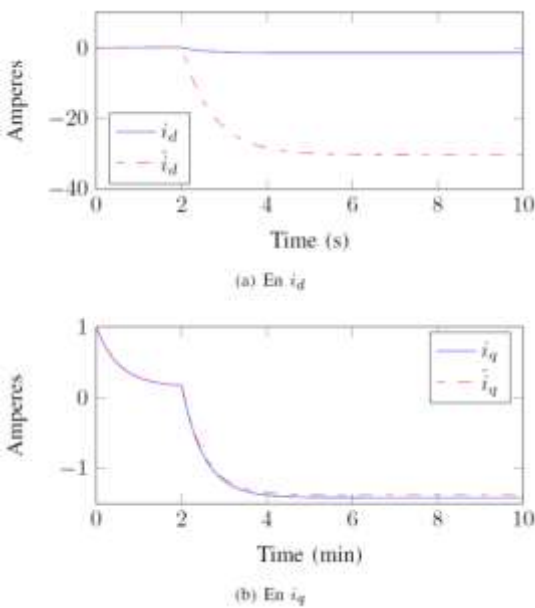


Figura 7 Observador para  $i_q$ , con falla

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8 se presenta a los dos observadores de orden reducido

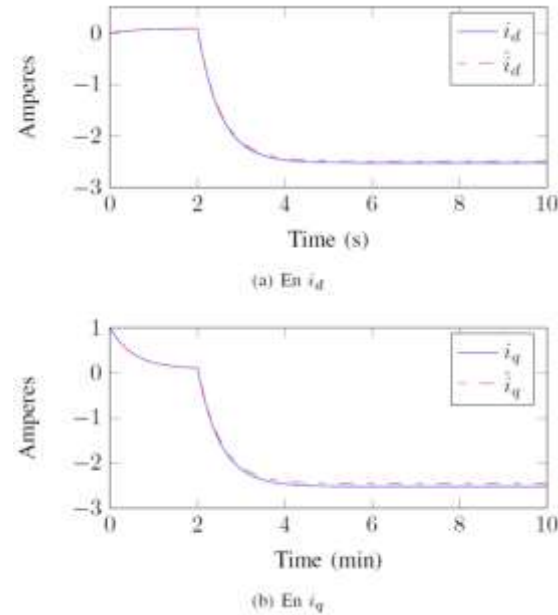


Figura 8 Observador completo para  $i_d$  e  $i_q$ , con falla

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

En este trabajo se presenta el desarrollo y validación de un observador o sensor virtual implementado a un modelo eléctrico simple en espacio de estados para un aerogenerador doméstico, el cual permite estimar la corriente en los devanados del rotor. El modelo sirve como base para el desarrollo de dos observadores, el primero considera como referencia a la corriente  $I_q$  del devanado del aerogenerador; el segundo observador utiliza como referencia a la corriente  $I_d$  en dicho devanado. Los observadores son validados empleando parámetros medidos en el aerogenerador, considerando las ganancias calculadas para cada uno de los observadores; los resultados obtenidos presentan una adecuada convergencia de las corrientes estimadas por los observadores con las corrientes correspondientes medidas en el devanado.

Se elige un modelo eléctrico simple con el que se puede tener parámetros reales medidos del aerogenerador. Debido al comportamiento lineal del modelo eléctrico en las corrientes de los devanados se implementó el observador de Luenberger que es un observador de tipo lineal. Además de que el diseño de los observadores es de orden reducido pues en cada uno de ellos se contempla una sola variable a observar ( $I_d$  e  $I_q$ ). El presente trabajo sirve como base para estimar las corrientes de los devanados, sin embargo esto puede servir para futuros trabajos en los que se desee implementar un sistema de detección de fallas basado en observadores, para lo cual el observador planteado puede servir como generador de residuos para el sistema.

### Referencias

- Youssef, S. K. El Khil, and I. Slama-Belkhodja. (2013). State observerbased sensor fault detection and isolation, and fault tolerant control of a single-phase pwm rectifier for electric railway traction. *IEEE transactions on Power Electronics*, 28, 5842-5853.
- Cristina Verde, S. Gentil, and R. Morales-Menendez. (2013). Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos. Mexico D.F.: Trillas.
- Andras Vargas. (2010). Integrated algorithm for solving h 2-optimal fault detection and isolation problems. *Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol)*, 353-358.
- M. Zaggout, M. Elsherif, and F. Yahia. (2014). Impact of generator control parameters on wind generator fault detection. *Renewable Power Generation Conference (RPG 2014)*, 3, 1-5.
- M. Zaggout, M. Elsherif, and F. Yahia. (2014). Impact of generator control parameters on wind generator fault detection. *Renewable Power Generation Conference (RPG 2014)*, 3, 1-5.
- (2012). Investigación, desarrollo e innovación tecnológica de sistemas de control de aerogeneradores. *Boletín IIE*.
- B. Patel. (2014). Getting power to 12 billion people. *IEEE Spectrum*, 6-8.
- E. Alizadeh. (2013). Fault detection and isolation of the wind turbine based on the real-valued negative selection algorithm. *IEEE*, 1.
- Chuanbo Wen Lei Wang. (2015). Fault Diagnosis of Wind Turbine Blade Based on Robust Residual Error Design. *IEE, Spectrum*.
- Teresa Escobet, Vicenç Puig, and Peter Fogh Odgaard Hector Sánchez. (2015). Fault Diagnosis of an Advanced Wind Turbine Benchmark Using Interval-Based ARRs and Observers. *IEE, Transactions on industrial electronics*, 62, no. 6.
- Daniel Veintimilla Ramos. (2016). Evaluación en laboratorio de un sensor para el monitoreo on-line del desgaste en multiplicadoras de aerogenerador. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería del diseño, Universidad Politécnica de Valencia*, 1, 1.
- Efrain Alcorta-Garcia Patricia Acosta Santana. (2012). Modelbased fault isolation in an aerogenerator benchmark. *IEEE Spectrum*, 1-6.
- Guillermo, Rossi, and Bocero Hamdi Prátula. (2012). Turbinas eólicas: Optimización en el pre-diagnóstico de fallas en el generador. *Información tecnológica*, 23, no.1, 153-162.



Jakub Osusky Teofana Puleva. (2016). Wind Turbine Power Control Based on Aero Dynamical Torque Estimation. Department of Systems and Control, Faculty of Automatics Technical University of Sofia Sofia, Bulgaria, 1.

Nikolay Djagarov. (2016). Adaptive Control of Wind PMSG. Faculty of Engineering Varna, 1.

Richard McMahon, Danilo Llano. (2015). Torque observer and extended H8 filter for sensorless control of permanent magnet generators tested on a wind turbine emulator. IEEE, 123-128.

S. Alireza Davari. (2015). Voltage Model Observer Based Encoderless Predictive Control of DFIG for Wind Tubine Applications. IEEE.

Shuzhi Sam Ge Wei He. (2015). Vibration Control of a Nonuniform Wind Turbine Tower via Disturbance Observer. IEEE Asme transactions on mechatronics, 20, no.1, 237-244.

S. Alireza Davari. (2015). Voltage Model Observer Based Encoderless Predictive Control of DFIG for Wind Tubine Applications. IEEE.

M. Taherzadeh. (2015). On-Line Observer Modification of a Six-Phase Induction Generator in Faulted Mode. IEEE Spectrum.

## Diseño y construcción de un amplificador para audio de 500 Watts mediante transistores BJT

GUTIÉRREZ-GARCÍA, Juan Nicolás†\*, SÁNCHEZ-LÓPEZ, Héctor Javier, ROJAS-OLMEDO, Israel Alejandro y ROJAS-RAMÍREZ, Erick

*Universidad Tecnológica del Valle de Toluca*

Recibido 19 de Abril, 2017; Aceptado 6 de Junio, 2017

### Resumen

El presente trabajo muestra el diseño, la construcción, pruebas de funcionamiento y rendimiento en la institución ITeCA para un prototipo de un amplificador de audio con potencia máxima de 500 W empleando en la etapa de potencia transistores BJT. El prototipo consta de una fuente de alimentación simétrica, una etapa impulsora con sensibilidad de entrada desde 100 mVpp hasta 1 Vpp y una etapa denominada paso potencia encargada de transmitir la señal total del amplificador de audio. Por último, se mencionan los resultados obtenidos después de realizar la prueba de rendimiento del prototipo con +/-10 % de tolerancia para cargas máximas de trabajo y de 1 % de distorsión armónica.

**Amplificador, audio, fuente de alimentación lineal, transistores BJT**

### Abstract

This paper details the design, construction, performance tests and performance at the ITeCA institution for a prototype of an audio amplifier with a maximum power of 500 W using in the stage of power transistors BJT. The prototype consists of a symmetrical power supply, a drive stage with input sensitivity from 100 mVpp to 1 Vpp and a stage called power step in charge of transmitting the total signal of the audio amplifier. Finally, we mention the results obtained after performing the prototype performance test with +/-10 % of tolerance for maximum working loads and 1 % of harmonic distortion.

**Amplifier, audio, linear power supply, BJT transistor**

**Citación:** GUTIÉRREZ-GARCÍA, Juan Nicolás, SÁNCHEZ-LÓPEZ, Héctor Javier, ROJAS-OLMEDO, Israel Alejandro y ROJAS-RAMÍREZ, Erick. Diseño y construcción de un amplificador para audio de 500 Watts mediante transistores BJT. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-2:43-48

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: al221410008@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

### Introducción

Las etapas del amplificador de audio son: Fuente de alimentación lineal simétrica, es decir entregará a su salida una tensión positiva ( $V_{cc+}$ ) y una negativa ( $V_{cc-}$ ) con respecto a su punto neutro (GND) [1], la segunda etapa denominada impulsora tiene la función específica de adaptar la señal de audio de entrada no amplificada, y la tercera etapa de potencia es donde se entrega la señal de audio amplificado para adicionar la corriente que dará como resultado la potencia total del amplificador de audio [2] (Figura 1).

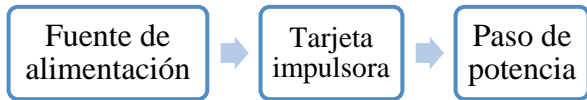


Figura 1 Etapas del amplificador de audio.

La elaboración del amplificador discreto de 500W permite reducir considerablemente el costo y tiempo de producción, gracias a que se ha evitado la inclusión de componentes que no estén disponibles en los mercados fácilmente accesibles. Así también gracias al diseño de las placas de circuito impreso de una sola capa estas se pueden fabricar más rápido con costos más reducidos y se optimiza también la posición de los componentes en el circuito con lo cual el proceso de ensamble se realiza sin operaciones complejas en menor tiempo.

### Fuente de alimentación

Para la construcción de la fuente se utilizó un transformador con una relación de 1:0.909, un puente rectificador, un banco de capacitores, dos resistencias en serie de 10 kΩ y tomando como referencia el punto central para tener un voltaje bipolar simétrico de +/-70 VDC. La fuente presenta una eficiencia menor al 80% [3] (ver figura 2).

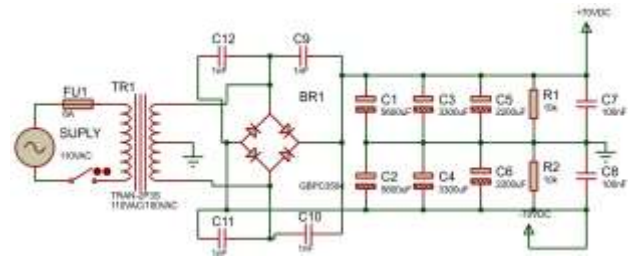


Figura 2 Fuente de alimentación de voltaje simétrica.

### Tarjeta impulsora

Tiene la función específica de tomar la señal de audio de entrada no amplificada a un rango máximo 1 Vpp y amplificarla a un voltaje máximo de 140 Vpp. Sin embargo, los semiconductores actuales están muy lejos de lograr rendimiento tan alto debido que al aumentar la temperatura los transistores se saturan con menos corriente [4]. Para el diseño de esta etapa y para evitar la distorsión por saturación conocida como clip [5], se amplificó al 75% del voltaje total cuando a la entrada se tenga 1 Vpp.

De la tarjeta propuesta según la planeación estratégica del proyecto [6] (ver figura 3) en la parte izquierda está el punto en donde se conecta la señal de audio no amplificado, en la parte derecha los puntos de Bases NPN y PNP así como el center point que van conectados directamente a la tarjeta de potencia.

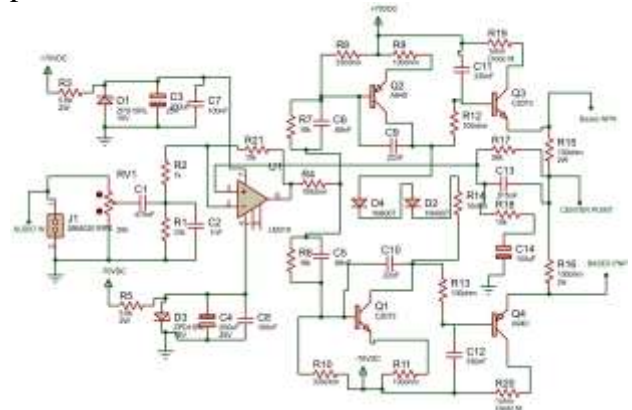


Figura 3 Tarjeta impulsora

El conector J1 de la etapa impulsora es el elemento donde la señal de audio externo se acopla al primer paso de control conformado por el potenciómetro (RV1) el cual permite ajustar la sensibilidad de entrada desde 100 mVpp hasta 1 Vpp. Haciendo adaptable el sistema a prácticamente cualquier dispositivo reproductor que de acuerdo la ley de Ohm [7] pueda entregar al menos 150  $\mu$ A.

La derivación central del potenciómetro RV1 está conectado a un filtro pasabanda con el objetivo de permitir sólo el paso de las frecuencias audibles, éste filtro está conformado por dos filtros en serie, un filtro pasa altas y pasa bajas [8]. El primer filtro está conformado por R1 y C1 que tiene la función de permitir el paso de las bajas frecuencias audibles. El segundo filtro conformado por R2 y C2 eliminar las frecuencias altas correspondientes al ruido eléctrico generado en los conductores de conexión utilizados.

La salida del filtro pasa banda se conecta al amplificador operacional LM319 que separa por completo la señal de entrada y las etapas subsecuentes [9], para su alimentación se utilizaron dos diodos Zener (D1 y D3) a 15 V con su respectiva resistencia de polarización (R3 y R5) [10].

Los transistores Q1 y Q2, son los encargados de elevar la amplitud de la señal de audio hasta un nivel de voltaje que será entregado en la etapa de salida, estos están configurados en montaje de emisor común, por lo cual el valor de su corriente de entrada multiplicado por la ganancia de corriente ( $h_{fe}$ ) [11]; típico del transistor; proporciona valores ideales de la corriente entregada por este par complementario de transistores, cuando se polariza a R12 y R13 con las corrientes producidas por Q1 y Q2 se obtienen los voltajes equivalentes a la amplitud de la señal de audio[12].

El  $h_{fe}$  de un semiconductor depende de su temperatura como de su corriente, por tal motivo, es necesario separar esta sección de la etapa de potencia con otro paso intermedio de transistores compuesto por Q3 y Q4, estos se encuentran en montaje seguidor de emisor llevando al mínimo la exigencia de ésta etapa y evitar la distorsión.

**Paso de potencia**

El paso de potencia se ha configurado como seguidor de emisor, dado que es la configuración más estable ante cambios de temperatura [12]. Considerando que los parámetros de ganancia de un transistor se ven drásticamente afectados por la temperatura cuando se usa la conexión emisor común. En la figura 4 se observan las uniones de las bases NPN y PNP así como el punto central (center point) a la izquierda, estas líneas son entregadas directamente a la tarjeta impulsora. En la parte derecha la conexión para un parlante de 4  $\Omega$  o 8  $\Omega$ . Los elementos L1 y R21 comprenden lo que se conoce como red zobel [5], la cual tiene la función de amortiguar los pulsos de retorno que genera la bobina del parlante cuando la señal aplicada disminuye abruptamente, con ello se protege a los transistores de salida y se prolonga su vida útil.

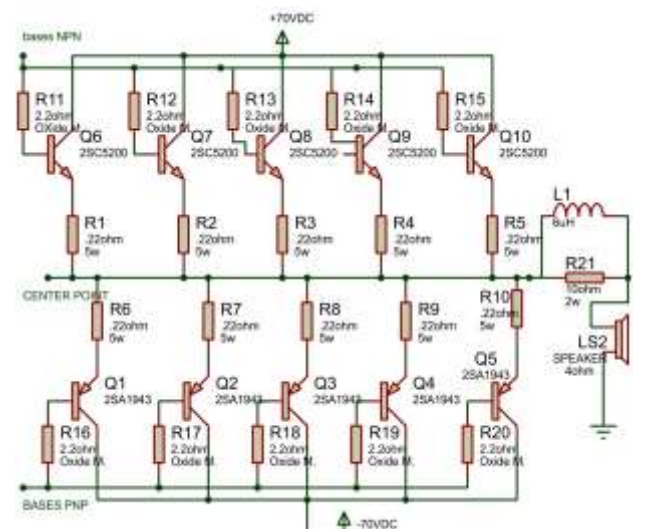


Figura 4 Paso de potencia

Los transistores de Q1 a Q5 tipo PNP trabajan de forma paralela a fin de proporcionar la cantidad apropiada de corriente a la carga cuando se generan la onda variante en el tiempo negativa, y los transistores de Q6 a Q10 hacen lo mismo pero para a onda variante en el tiempo positiva. Las resistencias de base de  $2.2 \Omega$  son un desacople entre la señal de entrada y las líneas de potencia, como medida de protección estas se han seleccionado de óxido metálico, asegurando que si un transistor genera un corto circuito estas resistencias se abrirán aislándolo de la excitación. Y por la parte de los emisores se colocaron resistencias de piedra de 5 W de un valor bajo en Ohm; las cuales tienen la función de evitar que los transistores se destruyan con la existencia de algún pulso que polarice ambas líneas al encender o apagar el equipo, también balancean las diferencias de ganancia entre cada transistor y consumen la corriente que fluye cuando el amplificador trabaja en configuración AB. Para esta aplicación se utilizaron resistencias de  $0.22 \Omega$  que evita la pérdida de potencia. Si la impedancia de salida es de  $4 \Omega$  se necesitarán 11.18 A en cada polaridad para lograr los 500 W y si la impedancia es de  $8 \Omega$  se necesitarán 7.9 A para lograr los mismos 500 W entonces trabajando a  $4 \Omega$  a cada uno de los 5 transistor le toca manejar 2.23 A.

La potencia disipada por la resistencia de emisor es de 1.09 W, si se colocan resistencias de  $0.22 \Omega$  a 3 W estas tendrán un elevado tiempo de vida gracias a la buena disipación térmica.

Se utilizaron los transistores BJT 2SC5200 y 2SA1943 los cuales tienen voltajes de operación de hasta 230 VCD y corrientes de 15 A sin sobrepasar la potencia recomendada de 100 W [13,14]. Estos transistores son los más apropiados tanto por disponibilidad y precio como por sus respectivos parámetros de trabajo.

### Etapas ensambladas

La placa de circuito impreso (PCB) diseñadas se muestra en la figura 5, éstas han sido recubiertas con una capa de estaño, típica en placas fenólicas basadas en baquelita. Las tres etapas fabricadas han sido construidas de manera modular con la finalidad de que sean extraídas del sistema de audio de forma simple y sin operaciones complejas en caso de mantenimiento o de pruebas adicionales.



Figura 5 Las 3 etapas del amplificador de audio proyecto

### Resultados

La prueba principal se realiza alimentando el dispositivo mediante un transformador de 600 W dando así más del 10 % de tolerancia para cargas máximas de trabajo, para la evaluación de la carga se ha implementado un parlante de 12" marca PIONER (ver figura 6) que maneja consumos alrededor de 600 W en carga máxima.



**Figura 6** Transformador y altavoz de 600W

La fidelidad y nivel de distorsión fueron evaluados por personal de la institución ITeCA y clientes del gremio, observando niveles iguales a amplificadores que trabajan a menos de 1% de distorsión armónica, mediante la técnica de espectro de frecuencia. Como parte del desarrollo de la tarjeta impulsora se ha detectado que el uso de capacitores de alto voltaje (1 KV) provoca niveles de distorsión sumamente elevados, esto debido a que la corriente de fuga presente en todos los capacitores, es considerablemente mayor en estos elementos de alta tensión. La opción idónea es la implementación de capacitores cerámicos de 63 V o capacitores de poliéster de 100 V.

Finalmente la fuente de alimentación asegura el rendimiento en todo el rango de frecuencia del audio, evita interferencias eléctricas que deformen la señal de audio, problema que es muy común de los sistemas actuales.

### Agradecimiento

Hector Sánchez y Juan Gutiérrez, agradecen el apoyo económico brindado por el Programa para el desarrollo profesional docente, tipo superior (PRODEP), carta PROMEP/157879/108762, de la misma forma los autores agradecen a la Universidad Tecnológica del Valle de Toluca así como a la Institución ITeCA el desarrollo del presente trabajo.

### Conclusiones

En México el recubrimiento de las pistas con una capa de estaño resulta al menos 80% más barato que el uso de pintura "anti solder" de secado UV dado que actualmente hay pocos distribuidores y además exige el uso de una insoladora de rayos UV.

La etapa de salida no conlleva complejidad elevada en el diseño implementando transistores BJT, lo que debe cuidarse es la disposición y el enfriamiento de esta etapa.

Los elementos semiconductores en la etapa de potencia al trabajar a menos de 90% de su capacidad total (500 W) garantizan la prolongación en su tiempo de vida del prototipo. Al realizar la prueba a los transistores con disipador de 10 cm<sup>3</sup> con un pulsador que debe accionarse por 5 segundos y luego abrirse por 1 segundo para encender una lámpara incandescente, los transistores se pone en corto cuando son falsificado; debido a que la pastilla de semiconductor interno es correspondiente a un voltaje y corriente mucho menor según la especificación, concluyendo que los transistores originales cuentan con una pastilla más grande y no presenta temperatura al realizar las pruebas.

El método de planchado para la elaboración de PCB resulta muy fácil de implementar, pero provoca que las tarjetas se curven por el exceso de calor obtenido, la opción más práctica consiste en dejar que estas se enfríen entre dos superficies lisas que mediante presión la mantengan totalmente recta.

### Referencias

Brown M (2001). Power Supply Cookbook. USA: Newman.

Valero D. (1993). Amplificadores de potencia, teoría y problemas. Ed. Paraninfo. España.

Brown M. (1990). Practical switching power supplies desing. Motorola. Series in solid state electronics.

Malvino A. P. (2000). Principio de electronica. Ed. Mc. Graw Hill. 6ta edición. España.

Foros de electronica. (2016). Detector de clip. [En red]. Disponible en: <http://www.forosdeelectronica.com/f30/detector-clip-potencia-75864>

Instituto nacional de tecnología industrial. (2016). Proceso de diseño, fases para el desarrollo de productos. Disponible en: [https://www.inti.gob.ar/prodiseno/pdf/n141\\_proceso.pdf](https://www.inti.gob.ar/prodiseno/pdf/n141_proceso.pdf).

Floyd T. (2007). Principios de circuitos eléctricos. Pearson Educación. Octava Edición. México.

Malvino A. (2000). Principios de electrónica. Pearson Educación. Octava Edición. México

Floyd T. (2008). Dispositivos Electrónicos. Pearson Educación. Octava Edición. México

Parra, L. Orozco F. (1995). Fuentes de alimentación reguladas y conmutadas. México D.F. BECANOR.

Hambley A. (2001). Electrónica. Ed. Pearson Educación. Segunda edición.

Slone R. (1999). High power audio amplifier. Ed. McGraw-Hill.

Datasheet transistor 2SC5200. Disponible en: <http://www.profusionplc.com/images/data%20sheets/2sc5200.pdf>.

Datasheet transistor 2SC5200. Disponible en: <http://belchip.by/sitedocs/00014884.pdf>

Muhammad H. R. (2011). Power Electronics Handbook. USA: Elsevier.

## Análisis del arranque de las micro turbinas eólicas de eje horizontal de baja capacidad HAWT

CASILLAS-FARFÁN, Christian†\*, LÓPEZ-GARZA, Víctor, SOLORIO-DÍAZ, Gildardo y MOLINERO-HERNÁNDEZ, Daniel

*Posgrado Maestría en Ciencias Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*

Recibido 11 de Abril, 2017; Aceptado 23 de Junio, 2017

### Resumen

Las turbinas eólicas son dispositivos que transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica. Son de eje horizontal cuando el eje de rotación de la turbina se encuentra en dirección paralela a las corrientes incidentes de viento, y son de baja capacidad porque la generación de potencia eléctrica es menor a 5 KW. Estas turbinas generalmente se colocan en lugares remotos, donde no necesariamente existen las condiciones óptimas de viento (corrientes continuas y velocidades mayores a 8 m/s). Cuando existen corrientes de viento incidentes, las turbinas arrancan de manera autónoma y pueden comenzar a operar. Poseen deficiencias en la etapa de arranque a bajas velocidad de viento, provocando que se pierda energía útil aprovechable. El objetivo del presente análisis, es determinar los parámetros que influyen de forma directa en la optimización del arranque de manera que se pueda mejorar el torque aerodinámico y empuje, parámetros importantes para mejorar el arranque. Se utilizará la teoría BEM (Blade Element Moment) para diseñar aerodinámicamente las aspas y mediante un análisis aerodinámico con la técnica de dinámica de fluidos computacional permitirá conocer en que medida la raíz del aspa aporta en el torque de arranque de la micro turbina

### Turbinas, aerodinámica, arranque de turbina

**Citación:** CASILLAS-FARFÁN, Christian, LÓPEZ-GARZA, Víctor, SOLORIO-DÍAZ, Gildardo y MOLINERO-HERNÁNDEZ, Daniel. Análisis del arranque de las micro turbinas eólicas de eje horizontal de baja capacidad HAWT. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-2:49-65

### Abstract

The eolic turbines are devices that transform kinetic energy from wind into electrical energy. We are interesting on eolic turbines with horizontal axis (their axis of rotation is on parallel direction to incident flowing wind) and low capacity (their generation of electrical power is lower 5 KW). Eolic turbines are situated in remoted places, where conditions are not necessary optimum from wind (continuous flowing and velocities higher than 8 m/s). While the wind is flowing incidentally, the turbines can itself starting and begin to operate. They have problems with starting in low wind velocities, inducing a loss of useful electrical energy. The aim of this analysis is to define the parameters that influence in direct form for optimum starting, so that aerodynamic torque and thrust can be improvement, these are parameters important for the starting turbine. The BEM theory (Blade Element Moment) will be used for aerodynamically design blades of turbine. We propose to use the computational fluids dynamic technique to calculate the aportation of the blade root zone to the starting torque of micro turbine.

### Turbines, aerodynamic, turbine starting

† Investigador contribuyendo como primer autor.



## Introducción

En la actualidad las turbinas eólicas de eje horizontal de baja capacidad (HAWT por sus siglas en inglés) son muy comunes en algunos países como medida alterna de suministro de energía eléctrica en casas habitación, ranchos y comunidades apartadas. El uso de estas turbinas se ha incrementado debido a que es energía limpia y la fuente de obtención de la energía eólica es hasta ahora inagotable. Según el reporte del 2016 emitido por GWEC (Global Wind Energy Council) indicó que el uso de la energía eólica tiene una tendencia al alza. Este reporte indica que hasta diciembre de 2015 se tienen contabilizados 432.9 GW de potencia eólica instalada, los cuales 125 MW son generados por turbinas de baja capacidad.

La problemática principal de las turbinas eólicas de baja capacidad recae en que generalmente son instaladas en regiones donde las velocidades del viento son relativamente bajas (2-8 m/s) y en algunas ocasiones nulas.

Otro problema al que las turbinas HAWT se enfrentan es que son de autoarranque. Requieren de ciertas velocidades de viento para comenzar a generar electricidad, es decir que no toda la corriente del viento es aprovechada para la generación de electricidad, pues existen ciertos factores de diseño que impiden el aprovechamiento de esa energía en el rango de estas velocidades de viento. Si la velocidad de viento no es constante o disminuye de manera abrupta, la turbina puede permanecer en fase de arranque por grandes periodos de tiempo sin que se vea reflejado en la producción de energía eléctrica.

Estas limitaciones de no operar eficientemente a bajas velocidades de viento, representan pérdidas para los sistemas eólicos, pues es energía disponible que no se puede aprovechar.

En los desarrollos de estudios actuales no se ha puesto mucho énfasis para hacer que estas turbinas de baja capacidad aprovechen la energía del viento en esos rangos de velocidad. Los parámetros que se pueden mejorar para lograr un diseño óptimo vienen dados principalmente por las características de los álabes, ya que son los responsables de generar el torque estático para el arranque mediante la incidencia de la corriente de viento sobre estos, este valor de torque debe ser mayor que el torque resistivo que opone el generador para poder arrancar. El proceso de arranque de una turbina de baja capacidad se produce como se menciona a continuación. El viento incide sobre el ángulo de ataque en la superficie de los álabes, provocando que giren debido a la fuerza resultante, debido a la sustentación y arrastre sobre las superficies de los álabes, de manera que el rotor en conjunto provoca un torque estático necesario para vencer el torque resistivo y generar potencia eléctrica útil. La figura 1 muestra una turbina eólica de eje horizontal de baja capacidad.



**Figura 1** Turbina eólica de eje horizontal de baja capacidad HAWT

*Fuente: libro small wind turbines*

Existen varios factores por los cuales una HAWT debe detener su operación. Algunas razones son: mantenimiento a componentes, revisión de sus partes, condiciones de clima no apropiadas, etcétera. Otra razón es cuando la turbina experimenta un proceso transitorio, es decir que algunos parámetros de operación se encuentran muy cambiantes, provocando que la turbina no genere potencia, corriendo el riesgo de una sobrecarga en el rotor y un descontrol en el giro de los álabes, es entonces cuando el sistema de protección de la turbina detiene el funcionamiento de esta, saliendo de operación. Cuando las condiciones ya se han restablecido, el sistema de control ordena al sistema que se ponga en funcionamiento nuevamente. Es en esta fase donde tiene que comenzar a operar de nuevo y es en el arranque donde se concentran los mayores esfuerzos para caracterizar esta fase de las turbinas eólicas.

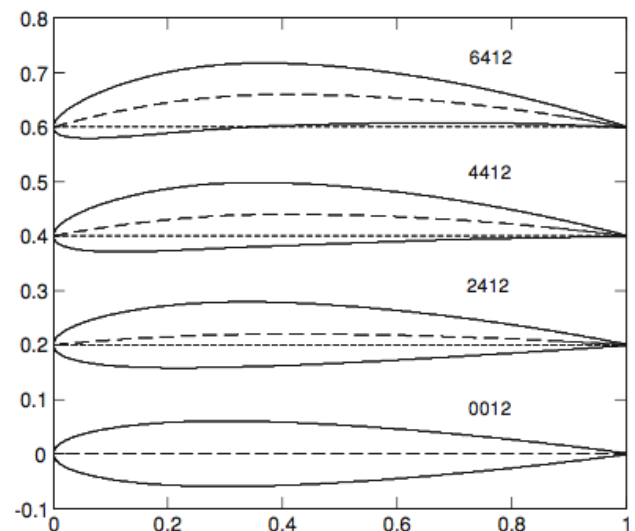
La fase de arranque de HAWT es una fase crítica, esto debido a que, si la velocidad de viento no genera el torque necesario para que arranque la turbina, esta puede estar girando de manera improductiva durante una buena cantidad de tiempo, provocando que esa energía no sea aprovechable. La secuencia de arranque se puede prolongar de manera indefinida y nunca comenzar a producir energía. Se deben analizar los parámetros que involucran el arranque, pues son importantes para caracterizar el problema y proponer soluciones.

La aportación que se hará en el presente trabajo consiste en determinar mediante la técnica de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) que porcentaje del torque de arranque es proporcionado por la zona de la raíz, ya que muchos de los trabajos encontrados únicamente cuantifican el torque total de toda la sección de las aspas.

### Perfiles aerodinámicos

Los perfiles aerodinámicos son secciones transversales con determinada configuración geométrica, que, al tener contacto con fluidos en movimiento, como el agua o el aire, son capaces de crear distribución de presiones adecuadas para crear fuerzas de sustentación y fuerzas de arrastre. Estas fuerzas resultantes se aplican en el diseño de las turbinas eólicas para provocar la rotación del conjunto.

Existe una gran variedad de formas, tamaños y configuraciones de perfiles aerodinámicos, cuyos perfiles de acuerdo a estas características se agrupan en familias de perfiles, siendo las familias más comunes: NACA de 4 y 5 dígitos, SG, perfiles OA, perfiles RAE etc. Cada familia de perfiles posee características y configuraciones importantes de acuerdo a la aplicación en la que se usará. Un parámetro importante para tomar en cuenta en la selección del perfil es la relación  $Cl/Cd$ , entre más grande sea es mejor. También se debe de cuidar que esta relación tenga un comportamiento lineal basado en el régimen de Reynolds que se trabajará, de manera que garantice la operación, aunque el régimen cambie



**Figura 2** Distintos perfiles aerodinámicos de la familia NACA de 4 dígitos

Fuente: libro *small wind turbine*

La sustentación y arrastre aerodinámico generados por los perfiles, son las fuerzas resultantes que generan los gradientes de presión. Estos son los parámetros más importantes en las turbinas HAWT, ya que son las encargadas de generar diferenciales de presión para que se produzca el giro.

En base al rango de número de Re de operación y la aplicación en turbinas eólicas para generación de electricidad, se seleccionó el perfil simétrico NACA 4412, (Rocha, Rocha, Carneiro, Vieira, & Andrade, 2016) en su estudio demuestra que para bajas velocidades de viento el perfil NACA 4412 es el mejor perfil de sus familiares cercanos. El diseño además está basado en este perfil pues presenta una buena relación Cl/Cd en los rangos de operación basados en el número adimensional de Reynolds (Re). La figura 2 muestra varios perfiles de la familia de perfiles NACA.

La teoría BEM, supone que todas las secciones de análisis a lo largo del rotor son independientes y pueden ser tratadas por separado. Así, las fuerzas de sustentación y arrastre a las que se somete cada elemento son responsables de los cambios de momento axial y angular del aire que pasa a través del anillo que describe el álabe al girar. (Lanzafame, Mauro, & Messina, 2015) realiza una corrección al coeficiente de sustentación debido a la fuerza de coirolis, debido al pequeño tamaño del rotor de esta turbina, este ajuste se puede despreciar.

(Luiz, Freitas, Patrícia, & Gonçalves, 2017) en su diseño utiliza la teoría BEM como diseño base y posteriormente optimiza su diseño en base al factor de desviación axial considerando el arrastre producido en el perfil, de esta manera se asegura de tener la mejor aerodinámica posible para tener un coeficiente de potencia máximo, basándose principalmente en las características del perfil.

El número adimensional que cuantifica en que medida un cuerpo está experimentando sustentación y arrastre son los coeficientes de sustentación y arrastre respectivamente, los cuales están definidos por las ecuaciones 1 y 2.

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U_\infty A_p} \quad (1)$$

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty A_p} \quad (2)$$

Donde L es la fuerza de sustentación, D fuerza de arrastre en el perfil,  $A_p$  es el área de exposición al fluido

Se utilizó el software de Xfoil para hacer el cálculo correspondiente de los coeficientes, basado en el ángulo de ataque alfa, número de Reynolds Re y número de Match, ya que (Wata et al., 2011) en el desarrollo de su trabajo valida los resultados obtenidos mediante este software, mediante la medición de los valores reales en pruebas de túnel de viento.

### Diseño Aerodinámico HAWT, basado en la teoría BEM

Existen varias alternativas y metodologías para establecer el diseño aerodinámico de un rotor. Se selecciona la mejor técnica en base a ciertas características que se quieren lograr en el conjunto rotor-aspas (reducción de turbulencia, velocidades de rotación del conjunto, velocidad de arranque etc). (Shen, Yang, Chen, Zhu, & Du, 2016) realizan una función multi objetivo para optimizar las características geométricas de su rotor para mejorar el parámetro de arranque, la principal desventaja de este estudio es que requiere de una amplia capacidad de cómputo.

El diseño está basado en la teoría BEM (Blade Element Moment), ya que la mayoría de las turbinas eólicas de baja capacidad de mejor rendimiento general, están basados en esta metodología.

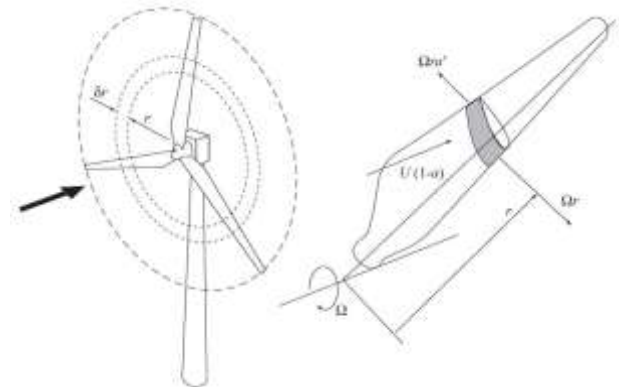
Si bien es una metodología antigua, la ventaja de utilizar esta teoría recae en que, a partir de sus resultados, se pueden optimizar cualquier aspecto operacional del rotor. (Mahmuddin, 2017),(Sun, Chen, Zhong, & Jun, 2016) proponen sus diseños basados en la teoría BEM pero de acuerdo a las consideraciones y requisitos de diseño, utilizan diversas función objetivo para optimizarlas.

Varios autores han desarrollado el conjunto de ecuaciones necesarias para diseñar las características del rotor en base a diversas consideraciones tomadas.

Se utilizan el conjunto de ecuaciones que desarrolla (Burton, Tony, Sharpe, David, Jenkins, Nick, 2001), porque la metodología usada permite una mejor manipulación y apreciación de las formulas usadas en comparación con otros autores. Los conjuntos de ecuaciones se enumeran en el desarrollo del capítulo.

La teoría BEM consiste en aplicar las ecuaciones que se han desarrollado, proponer un número  $n$  (secciones de análisis) de divisiones a lo largo del aspa para aplicar las formulas de la teoría y determinar los parámetros geométricos y de operación del rotor.

La figura 3 nos muestra las características generales de un rotor calculadas con la teoría BEM



**Figura 3** Análisis de los parámetros geométricos y operacionales mediante el diseño basado en la teoría BEM

*Fuente: libro wind energy handbook*

El primer parámetro a considerar para diseñar una HAWT, es la cantidad de recurso eólico disponibles en la zona donde se quiere colocar.

Este análisis se hace mediante un análisis estadístico de los historiales de viento de los últimos años, o mediante la medición con anemómetros en la zona de interés, de manera que se pueda caracterizar la velocidad de viento promedio, la dirección, así como sus características de densidad, presión y temperatura, importantes para hacer un cálculo más preciso de la potencia disponible que se puede extraer. En base a las necesidades de suministro y al recurso eólico disponible, se determina la potencia de salida necesaria.

En este análisis se propone un diseño de turbina de laboratorio, por cuestiones de espacio y condiciones de instrumentación, se determinó que sea de 50 W para poder caracterizar la fase de arranque.

Se utiliza la ecuación 3 para determinar el área de barrido de la turbina:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} U_{\infty}^3 \rho A_d} \quad (3)$$

Donde  $P$  es la potencia requerida en watts,  $U_{\infty}$  la velocidad nominal de viento en m/s,  $\rho$  es la densidad en  $\text{kg/m}^3$ ,  $A_d$  es el área de barrido en  $\text{m}^2$ .  $C_p$  es el coeficiente de potencia y se calcula de la siguiente ecuación:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (4)$$

Donde  $a$  es el valor adimensional de factor de desviación axial. De aquí podemos conceptualizar al límite de BETZ, que es el valor máximo de eficiencia de una turbina. Este valor se encuentra resolviendo la ecuación 4, nos damos cuenta que  $C_p$  es máximo cuando  $a=1/3$ , el valor de  $C_p$  entonces es 0.593.

Un parámetro importante para el desarrollo del rotor de la turbina eólica es la velocidad específica, que cuantifica la relación existente entre la velocidad nominal de viento  $U_{\infty}$  y la velocidad de rotación del conjunto. La ecuación 5 nos representa esta relación.

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U_{\infty}} \quad (5)$$

Donde  $\lambda$  es la velocidad específica, para turbinas de generación de electricidad toma un valor de 9-11,  $R$  es el radio del aspa y  $\Omega$  es la velocidad de rotación en rad/s. De la ecuación 3 se conoce la velocidad de rotación del conjunto

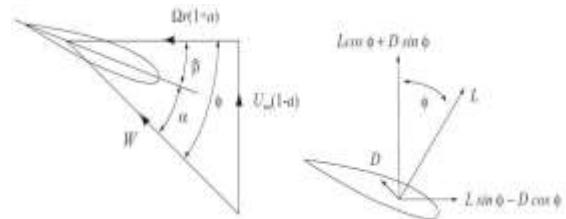
La relación de radios  $\mu$ , es un parámetro adimensional para posicionar la zona de análisis en el aspa. La ecuación 6 nos muestra esta relación

$$\mu = \frac{r}{R} \quad (6)$$

Dónde:  $r$  es el radio de acuerdo a la zona de análisis en cuestión medido desde el hub,  $R$  es el radio total del aspa.

La teoría BEM se basa en los triángulos de velocidades, estos triángulos son necesarios para encontrar valores resultantes de velocidad y determinar las condiciones aerodinámicas de cada una de las secciones del aspa.

En estos triángulos de velocidad se involucran el vector de la velocidad de viento nominal en un componente vertical, y la velocidad tangencial (producto de la velocidad rotacional por el radio) en forma perpendicular al vector velocidad de viento, este vector determina el sentido de giro del rotor. El vector resultante de estas dos velocidades es  $W$ , es la velocidad resultante que se ejerce sobre cada sección de análisis. La figura 4 muestra los triángulos de velocidades que se forman en cada sección de análisis.



**Figura 4** Triángulos de velocidades formados en los perfiles para determinar las velocidades resultantes

Fuente: libro wind energy handbook

Aplicando trigonometría para resolver el triángulo de la figura 4, se obtiene la ecuación 7 para calcular la resultante.

$$W = \sqrt{U_{\infty}^2 (1 - a)^2 + \Omega^2 r^2 (1 - a')^2} \quad (7)$$

Donde la variable  $a'$  es el factor de desviación radial y toma su valor de acuerdo a la zona en que se está analizando el perfil.

Del triángulo de velocidades se pueden encontrar también los ángulos de flujo de cada sección.

El ángulo de flujo  $\phi$ , se despeja de las ecuaciones 8 y 9, donde los valores restantes son todos conocidos.

$$\sin \phi = \frac{U_{\infty}(1 - a)}{W} \quad (8)$$

$$\cos \phi = \frac{\Omega r(1 + a')}{W} \quad (9)$$

En la Figura 4 se puede observar la relación entre los ángulos de ataque  $\alpha$ , de paso  $\beta$  y de flujo  $\phi$ , con las velocidades y fuerzas actuantes.

Finalmente se calcula la cuerda en cada una de las zonas de análisis, para conocer la dimensión en cada posición a lo largo del radio del aspa. Se aplica la ecuación 10 para obtenerla:

$$\frac{Nc}{2\pi R} = \frac{4\lambda\mu^2 a'}{\frac{W}{U_{\infty}} C_l} \quad (10)$$

Dónde: N es el número de aspas del rotor y  $C_l$  es el coeficiente de sustentación del perfil seleccionado (NACA 4412).

El valor de Cl varía de acuerdo al número adimensional de Re y al ángulo de ataque  $\alpha$  de cada sección. Se calcula con el software de Xfoil. El número de Re en cada sección, se calcula con la velocidad resultante W del triángulo de velocidades, la cuerda del perfil c, la densidad del viento  $\rho$ , y la viscosidad dinámica del viento  $\mu$ . La ecuación 11 muestra esta relación.

$$Re = \frac{Wc\rho}{\mu} \quad (11)$$

Se debe realizar un proceso iterativo debido a que Cl está en función del Re, y Re está en función de la cuerda, de manera que al calcular la cuerda c, el nuevo número de Re no cambie, y se encuentre la convergencia de las distribuciones de cuerda.

Con la cuerda obtenida mediante la aplicación de la teoría BEM, se vuelve importante optimizar el parámetro de interés para cada diseñador. En este trabajo se está estudiando el arranque, por esta razón la función objetivo se concentra en obtener mayor torque con determinada distribución de cuerdas.

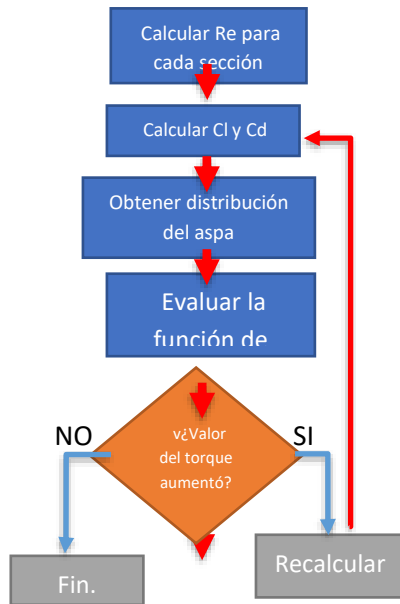
La función objetivo es la optimización del torque de arranque, esta función se muestra a continuación en la ecuación 12. Las restricciones de esta optimización obedecen a restricciones geométricas que tiene que ver con la distribución del ángulo de ataque alfa, por tal motivo alfa no puede tomar valores distintos entre el siguiente intervalo de  $8.24 < \alpha < 4.23$ .

La figura 5 muestra la metodología iterativa que se siguió para obtener el máximo valor teórico de torque de arranque.

$$Q = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \pi R^3 \lambda \left[ \int_0^R \mu^2 \left[ 8a'(1 - a)\mu - \frac{W N c}{R U_{\infty} \pi} C_d \right] (1 + a') \right] d\mu \quad (12)$$

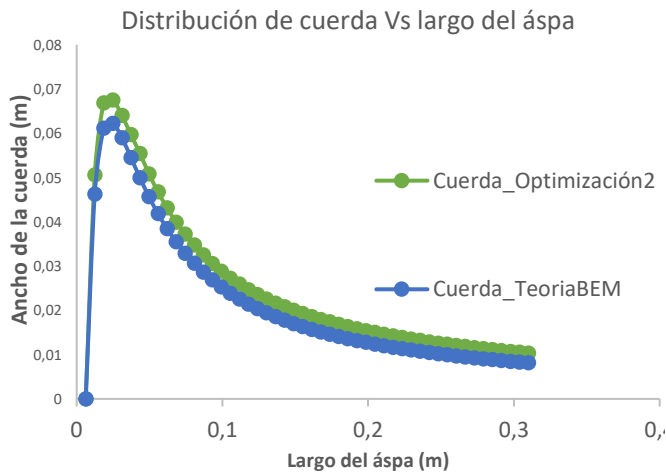
(Karthikeyan, Kalidasa Murugavel, Arun Kumar, & Rajakumar, 2015) menciona en el desarrollo de su trabajo la importancia que tiene la distribución de cuerdas en las aspas para mejorar el desempeño general de la turbina.

La grafica 1 muestra el cambio de distribuciones de la cuerda, pasando de la teoría BEM a la optimización para tener el mayor torque de arranque. La optimización mejoró en 16% el torque respecto a la obtenida con teoría BEM.



**Figura 5** Metodología seguida para la obtención del máximo torque de arranque

Fuente: elaboración propia



**Gráfico 1** Cambio de distribución de cuerda, de la teoría BEM a la optimización de torque de arranque

Fuente: elaboración propia

**Modelado**

Cada perfil aerodinámico tiene sus ecuaciones características de construcción, que mediante el valor de la cuerda previamente calculado y el ángulo de asiento nos proporciona los puntos característicos, así como la inclinación del perfil. El conjunto de ecuaciones para generar la geometría del perfil NACA 4412 son:

$$\begin{aligned}
 X_U &= X - Y_t \text{sen}\phi \\
 Y_U &= Y_c + Y_t \text{cos}\phi \\
 X_L &= X + Y_t \text{sen}\phi \\
 Y_L &= Y_c - Y_t \text{cos}\phi
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Donde  $X_U, Y_U$  representa la coordenadas x,y de la parte superior del perfil,  $X$  la posición relativa dentro del rango de la cuerda,  $Y_t$  es la curva con los puntos de la curvatura,  $Y_U, Y_L$  representa las coordenadas x,y de la parte inferior del perfil,  $Y_t$  la distribución de espesores a lo largo del perfil y  $\phi$  es el ángulo de inclinación respecto a la horizontal.

Las ecuaciones de las curvas de combadura son basadas en la distancia donde se están calculando los puntos del perfil en relación con la cuerda máxima:

$$\begin{aligned}
 Y_c &= \frac{m}{P^2} (2PX - X^2) \\
 0 &\leq X \leq P
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 Y_c &= \frac{m}{(1-P)^2} [1 - 2P + 2PX - X^2] \\
 P &\leq X \leq C
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

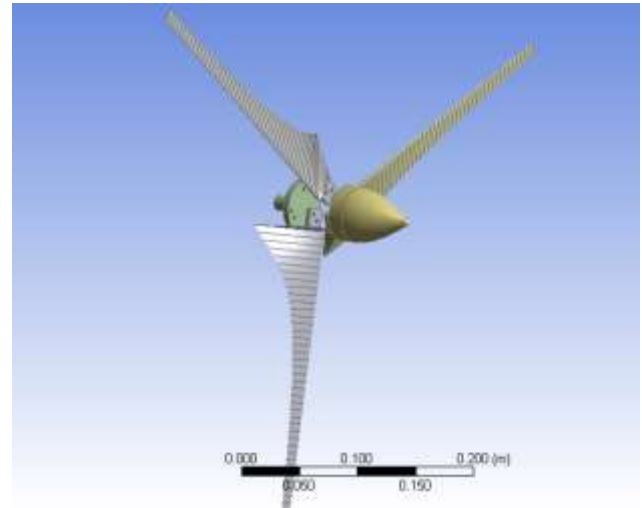
Finalmente, la ecuación calcula la distribución de espesores a lo largo de la cuerda máxima:

$$Y_t = \frac{t}{0.2} C \left[ 0.2969 \sqrt{\frac{x}{c}} - 0.1260 \frac{x}{c} - 0.3516 \left(\frac{x}{c}\right)^2 + 0.2843 \left(\frac{x}{c}\right)^3 - 0.1015 \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right] \quad (16)$$

Donde  $Y_c$  representa las coordenadas de la línea de combadura del perfil basado en la cantidad de puntos que desea obtener,  $m$  es la combadura máxima (primer dígito del perfil),  $P$  es la posición de la combadura máxima en relación a la cuerda (segundo dígito),  $C$  es el valor máximo de cuerda (últimos dos dígitos)

Estos perfiles cambian de configuración (cuerda y ángulo de flujo) a lo largo del aspa a medida que se calcula con la teoría BEM a lo largo del mismo.

Se registraron las ecuaciones en una hoja de cálculo con el fin de evaluar y que nos den como resultado el total de coordenadas que forman la geometría del perfil (35 puntos de la geometría), así como su inclinación respecto al eje horizontal. Se decidió que fueran 35 puntos para evitar problemas de ajustes de curvas cuando se modelen los perfiles con el software de diseño ANSYS. Se obtuvieron un total de 50 archivos con las geometrías de los 50 perfiles, que van desde la zona de la raíz hasta la zona de la punta, para poder configurar un aspa de la turbina.



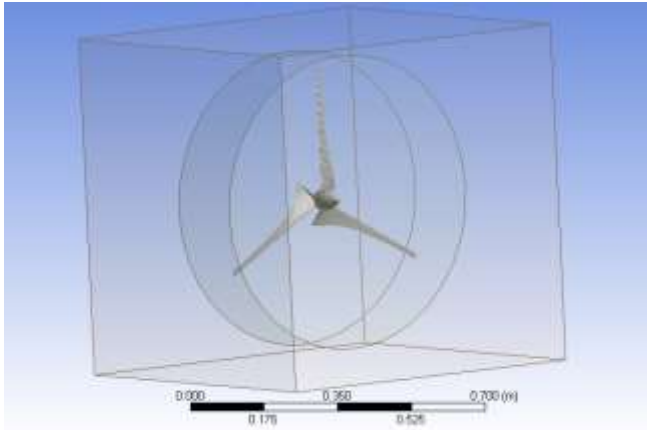
**Figura 6** Geometría obtenida mediante el software de diseño de ANSYS

*Fuente: elaboración propia*

Se utilizó el software de diseño de ANSYS, Design Modeler, para procesar los 50 archivos con la geometría de los perfiles y mediante la función de SWEPT dentro del programa, se logran unir las superficies de todos los perfiles en un solo cuerpo rígido. Posteriormente y por separado se diseñó la zona de ensamblaje para poder unir las aspas diseñadas al hub. Se utilizaron las geometrías de hub propuestas por (Jimenez, Alan, Garza, Víctor, Molinero Daniel y Casillas, 2016) ya que sus estudios arrojaron que ese diseño evita en buena medida la creación de turbulencia en esa zona de interés.



Finalmente, la geometría de la turbina eólica diseñada con sus tres aspas y su hub se visualiza en la figura 6



**Figura 7** Topología propuesta para el análisis del movimiento del fluido

*Fuente: elaboración propia*

### Simulación con la técnica de dinámica de fluidos computacional

El software ANSYS provee un conjunto de herramientas optimizadas para resolver problemas que involucran el movimiento de fluidos y poder caracterizar sus propiedades, dicha herramienta es FLUENT. También posee la herramienta de mallado de Meshing, está optimizada para ser utilizada en el proceso de análisis de volúmenes finitos de FLUENT.

La topología del problema implica un análisis en 3D y por lo tanto el mallado se vuelve una parte crucial para optimizar la solución del problema.

El mallado del dominio computacional se dividió en dos marcos de referencia, ambos fijos, uno con forma rectangular que representa las paredes del túnel de viento, cuyo método de mallado fue por zonas separadas con elementos tetraédricos y ajustes de tamaño de malla de acuerdo a la configuración general.

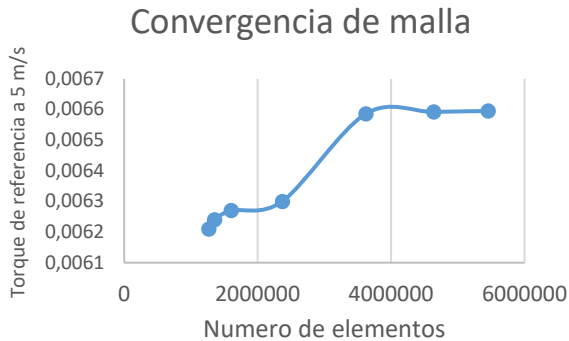
El otro marco de referencia es de forma cilíndrica en el que se incluye el área del rotor y cuyo método de mallado fue por zonas independientes, con elementos tetraédricos y configuraciones de malla general. Ambos marcos son estáticos ya que para el análisis del arranque son necesarias estas condiciones iniciales.

Se hizo también un refinamiento en las zonas de la raíz para garantizar buenos resultados.

El modelo de turbulencia es importante en el análisis del movimiento del fluido, ya que una correcta selección del modelo se ve reflejado en la obtención de resultados confiables. Se realizó la simulación empleando el modelo de turbulencia k-ε estándar para el rotor estático, ya que (Molinero, Daniel, López, Víctor, Cervantes, 2016) han demostrado que este modelo sirve para el análisis estático del rotor y poder determinar el torque de arranque.

El total de elementos en la malla es de  $5.45 \times 10^6$ , con un tamaño de  $1.5 \times 10^{-5}$  m. El criterio de convergencia para el modelo de turbulencia k-ε estándar es con todos los residuales en el orden de  $1 \times 10^{-6}$ . El tiempo aproximado de convergencia del modelo fue de 43 min, con un procesador Core i7, de 2.7 GHz de quinta generación y 8 gb de memoria RAM. La gráfica 2 muestra la convergencia de malla para validar los resultados de las pruebas de campo.

El propósito de utilizar la técnica de CFD en el análisis del arranque, es para cuantificar el aporte de torque de las zonas del aspa que generan el arranque, la raíz se considera como  $1/3$  de L, la punta el  $2/3$  L restante.



**Gráfico 2** Análisis de convergencia de malla para validar el modelo de turbulencia

*Fuente: elaboración propia*

## Fabricación y Pruebas

La fabricación de las aspas diseñadas es una problemática importante relacionada con la fabricación de prototipos, ya que la mayoría de los métodos de fabricación, requieren una gran variedad de costosos equipos y cierta experiencia en el tema para poder garantizar una manufactura exacta de los alabes.

(Tummala, Kishore, Kumar, Indraja, & Krishna, 2016) hacen una recopilación de los métodos que se han desarrollado en los últimos años para la manufactura de los alabes de turbinas de baja capacidad. Es por esta razón que se decidió fabricar las aspas de la turbina de 50 W mediante la tecnología de impresión en 3D, debido a la relativa facilidad de fabricación de la técnica. La figura 8 muestra el rotor de 50 W fabricado con la técnica de impresión en 3D.

El rotor fue construido en material PLA. Es un polímero de fácil conformación con buenas propiedades mecánicas, cuya resistencia a la flexión ronda 50-70 Mpa, según datos del fabricante. Estas propiedades mecánicas son adecuadas para ensayar el prototipo en el túnel de viento y garantizar la integridad estructural del rotor.

El rotor tiene un diámetro de 0.62 m, que genera una potencia nominal de 50 W a una velocidad de viento de 8 m/s, además de una relación de velocidad específica de 9.



**Figura 8** Turbina de 50 W, fabricada en material PLA mediante impresión en 3D

*Fuente: elaboración propia*

Se hizo una caracterización del túnel de viento con la ayuda de un anemómetro de propela, con el objetivo de conocer la magnitud de velocidades en la sección transversal a distintas distancias del ventilador del túnel, de manera que se pudiera conocer la velocidad real en la zona de colocación de la turbina y así minimizar el error producido por una mala lectura de la velocidad de viento. (Lee, Shiah, & Bai, 2016) en su estudio utilizan el perfil de velocidades del túnel utilizado para mejorar sus resultados de CFD. Debido a que el túnel utilizado para estas pruebas es muy corto y el perfil de velocidad no se desarrolla completamente, por esta razón se decidió hacer el ajuste necesario de velocidades en las secciones transversales del túnel para minimizar errores de medición

Se utilizaron equipos auxiliares para cuantificar el arranque del rotor, estos equipos son: anemómetro, tacómetro, voltímetro y torquímetro, para medir respectivamente los parámetros de velocidad de viento en m/s, giros del rotor en rev/min, voltaje del generador en V y torque estático de arranque en N\*m.

La adquisición de datos se llevó a cabo mediante puertos USB de todos los instrumentos conectados a una computadora. Para cada secuencia de arranque, se generaban archivos de cada uno de los instrumentos y posteriormente se guardaban en carpetas con nombres secuenciales para su posterior análisis.

El parámetro que servirá para realizar las gráficas es el tiempo de medición. La figura 9 muestra la instrumentación de las pruebas en las secuencias de arranque.



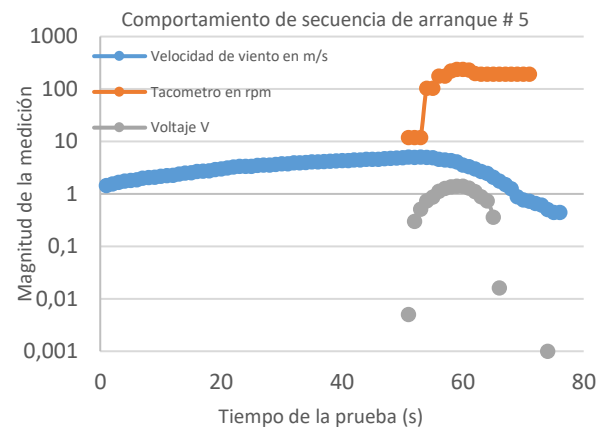
**Figura 9** Equipos usados en las secuencias de arranque para obtener las magnitudes de los parámetros involucrados en el arranque

*Fuente: elaboración propia*

En total se realizaron 40 secuencias de arranque, ya que se encontró que la fase de arranque de este rotor de 50 W, estaba bien definida y no se tenían variaciones sustanciales.

### Análisis de Resultados

Las gráficas 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10, muestran las secuencias de arranque de 8 pruebas con número de identificación 5,10,15,20,25,30,35,40, donde se visualiza el comportamiento de los parámetros de velocidad de viento, rpm del rotor y el voltaje registrado en el generador.



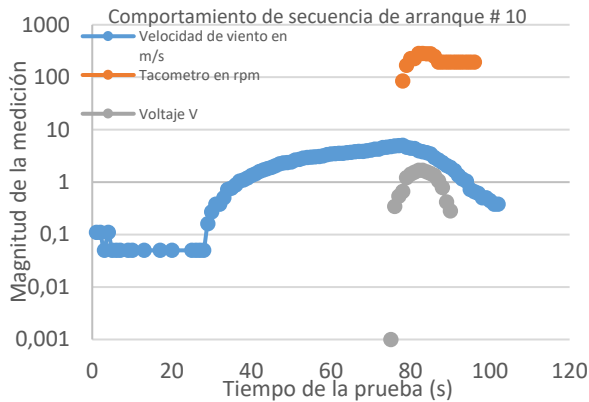
**Gráfico 3** Secuencia de arranque #5 de la turbina de 50 W

*Fuente: Elaboración propia*

La grafica 3 muestra que el arranque se produjo a 4.7 m/s basado en la lectura del anemómetro. Al llegar a una velocidad máxima de 5 m/s se disminuye la velocidad del túnel de viento para observar el comportamiento de aceleración del rotor, encontrando que en el valor de velocidad de viento de 4.05 alcanza 263 rpm para comenzar desacelerarse. El voltaje máx. generado fue de 1.4 V.

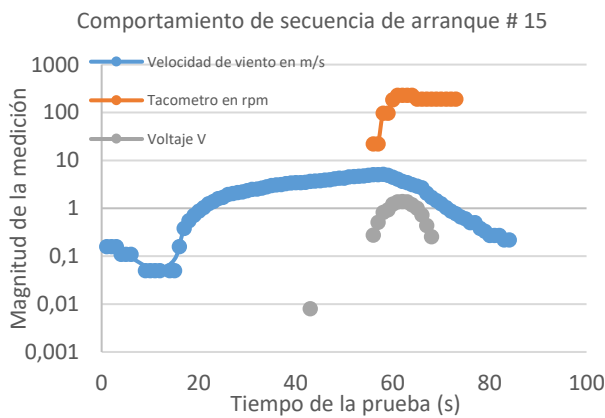
Las gráficas 4,5 y 6 muestran que el arranque se produjo a 4.71, 5.09 y 4.72 m/s respectivamente, basado en la lectura del anemómetro.

Al llegar a una velocidad máxima de 5, 5.14 y 5,14 m/s respectivamente, se disminuye la velocidad del túnel de viento para observar el comportamiento de aceleración del rotor, encontrando los siguientes valores máximos en el tacómetro de 283.23, 230.45 y 231.86 rpm para comenzar a desacelerarse. El voltaje máximo generado fue de 1.6, 1.38 y 1.3843 V.



**Gráfico 4** Secuencia de arranque #10 de la turbina de 50 W

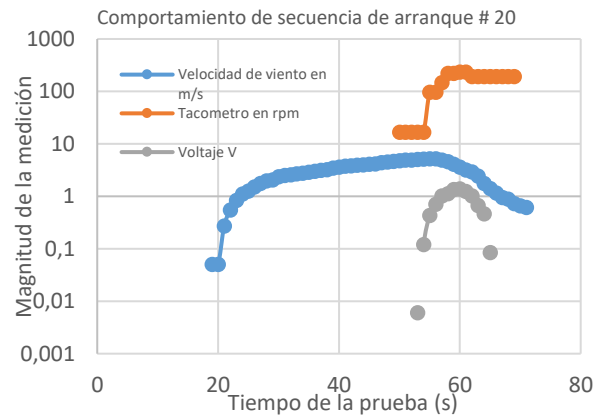
Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 5** Secuencia de arranque #15 de la turbina de 50 W

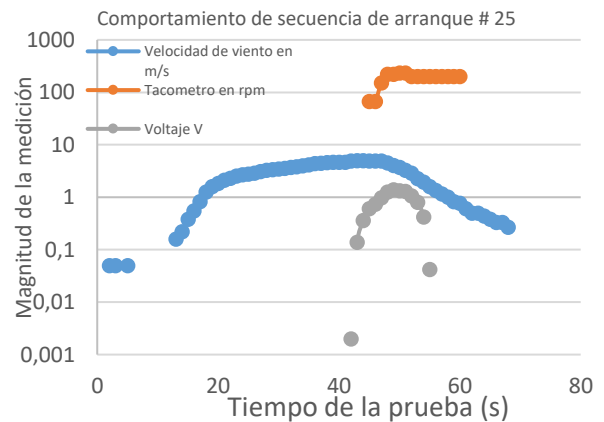
Fuente: Elaboración propia

Las gráficas 7 y 8 muestran que el arranque se produjo a 4.91 y 4.77 m/s respectivamente, basado en la lectura del anemómetro. Al llegar a una velocidad máxima de 5 y 4.95 m/s se disminuye la velocidad del túnel de viento para observar el comportamiento de aceleración del rotor, encontrando los siguientes valores máximos en el tacómetro de 235.81 y 387.56 rpm para comenzar a desacelerarse. El voltaje máximo generado fue de 1.337 y 1.161 V.



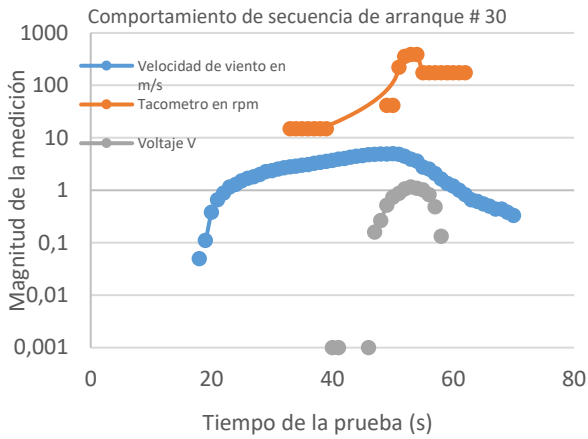
**Gráfico 6** Secuencia de arranque #20 de la turbina de 50 W

Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 7** Secuencia de arranque #25 de la turbina de 50 W

Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 8** Secuencia de arranque #30 de la turbina de 50 W

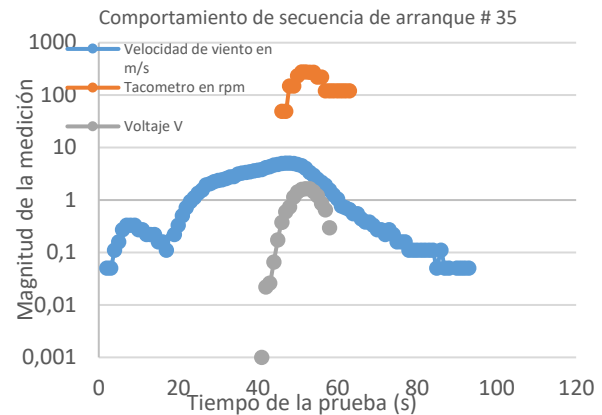
Fuente: Elaboración propia

La tabla 1 enlista los valores encontrados en las secuencias de arranque analizadas.

Arranque	Velocidad arranque	Vel. Max.	Rpm max	
5	4.84	5	223.45	1.2
10	4.71	5	283.23	1.0
15	5.09	5.14	230.45	1.2
20	4.73	5.14	231.86	1.2
25	4.91	5	235.81	1.2
30	4.77	4.95	387.56	1.2
35	3.83	5.04	270.07	1.0
40	4.37	4.64	190.4	1.2

**Tabla 1** Valores de las secuencias de arranque analizadas

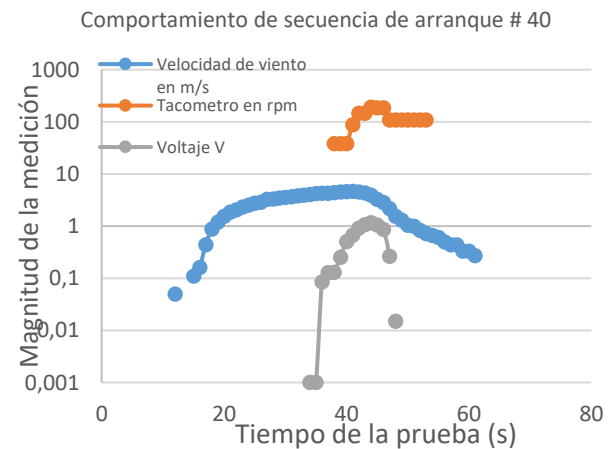
Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 9** Secuencia de arranque #35 de la turbina de 50 W

Fuente: Elaboración propia

Las gráficas 9 y 10, muestran que el arranque se produjo a 3.83 y 4.37 m/s respectivamente, basado en la lectura del anemómetro. Al llegar a una velocidad máxima de 5.04 y 4.64 m/s se disminuye la velocidad del túnel de viento para observar el comportamiento de aceleración del rotor, encontrando los siguientes valores rpm para comenzar a desacelerarse. El voltaje máximo generado fue de 1.643 y 1.161 V.

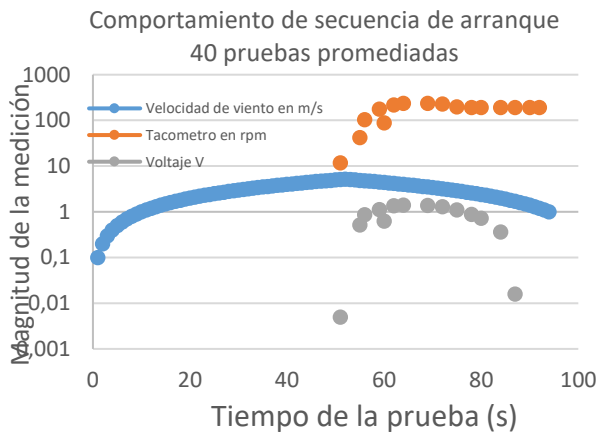


**Gráfico 10** Secuencia de arranque #40 de la turbina de 50 W

Fuente: Elaboración propia

La gráfica 11 muestra el comportamiento promediado de los parámetros mencionados, de manera que permita visualizar de manera general el comportamiento en el arranque de la turbina de 50 W, encontrando que arranca a una velocidad de viento de entre 4.7 y 4.9 m/s, con una rotación del rotor de 236.93 rpm y un voltaje de 1.4 V.

(Ebert & Wood, 1997; Mayer C. Wood D., 2004) hacen estudios de secuencias de arranque para turbinas con diámetros de 5 metros y velocidades de 10 m/s, pero con la diferencia de que esas turbinas se encontraban en sitio y no en laboratorio como el presente análisis. (Wright & Wood, 2004) en sus resultados describe que su turbina era de 2 m de diámetro y sus secuencias de arranque tienen mayor concentración alrededor del margen de 4-5.5 m/s.



**Gráfico 11** Secuencias de arranque promediadas de la turbina de 50 W

Fuente: *Elaboración propia*

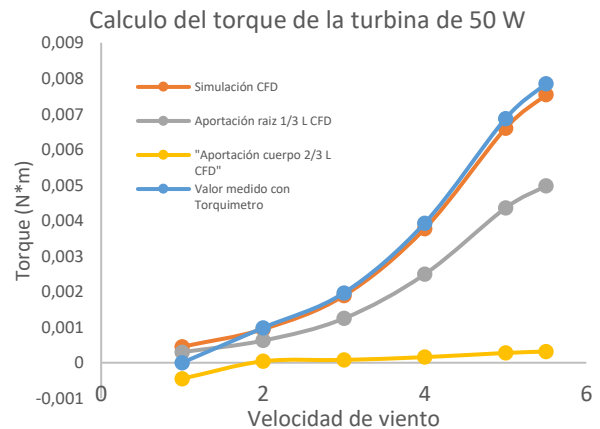
La teoría BEM indica que, a menor tamaño del diámetro del rotor, la generación de torque de arranque se vuelve más problemático, pues el pequeño tamaño de las turbinas micro repercute en la inercia del conjunto para provocar un torque suficiente para arrancar.

Con esta comparación se demuestra el buen diseño de la turbina de 50 W, ya que arranca con velocidades de viento muy similares.

Para el análisis mediante la técnica de dinámica de fluidos computacional, se ha validado el modelo CFD basándose en el torque estático medido en las pruebas con el tacómetro, encontrando que existe una diferencia del 4% entre el valor real y el valor obtenido con la simulación.

La gráfica 12 muestra los resultados medidos por el torquimetro durante las pruebas así como los valores obtenidos con la técnica de CFD.

Con el modelo de CFD validado, nos permite entonces encontrar la cantidad de torque estático que aporta la zona de la raíz del aspa para generar el torque total y que la turbina de 50 W rompa el par estático opositor del generador y comience a funcionar. La raíz aporta entre un 60%-68% del torque de arranque.



**Gráfico 12** Resultados obtenidos de torque, se muestran los valores de las pruebas, los valores obtenidos con CFD y el aporte de la raíz al torque de arranque

Fuente: *elaboración propia*

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero brindado para la culminación de este proyecto, así como a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por el prestamos de sus instalaciones y equipos. Con un agradecimiento especial al Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica, CEMIE Eólico, por su incondicional apoyo en el desarrollo de la experimentación y adquisición de los instrumentos de medición.

## Conclusiones

Caracterizar la fase de arranque de una turbina eólica nos ayuda a determinar los tiempos, parámetros y condiciones necesarias de arranque, dadas ciertas condiciones cambiantes de viento. Desde la fase de diseño se deben hacer las consideraciones necesarias para garantizar que la turbina arranque a bajas velocidades de viento. El arranque de la turbina eólica de baja capacidad está altamente influenciado por la forma del perfil aerodinámico.

También es importante un buen diseño aerodinámico basado en la teoría BEM, pues se observa claramente en los resultados obtenidos que mientras la velocidad de viento disminuye, el rotor continúa acelerándose. La medición de parámetros en las secuencias de arranque ayudo a visualizar de mejor manera el comportamiento de la turbina cuando las condiciones de viento se encuentran cambiantes.

Un análisis que completaría este trabajo de mejor manera seria diseñar nuevamente el rotor de 50 W, pero con otra familia de perfiles aerodinámicos, para estudiar su comportamiento y proponer mejoras.

Lograr el arranque de una turbina eólica de baja capacidad a la más baja velocidad de viento posible, se verá reflejado en el aprovechamiento mayor del recurso eólico en zonas donde las masas de viento no son las ideales

La validación del modelo de turbulencia con los datos de las pruebas de ensayo ayudo en gran medida para calcular los aportes inerciales de cada zona de las aspas en el rotor, se encontró que la zona de la raíz aporta el 60%-68% del torque inicial de arranque. Esta técnica propuesta de definir el porcentaje de aportación de torque servirá posteriormente para analizar el arranque de muchas turbinas eólicas y proponer soluciones más radicales para optimizar las secuencias de arranque.

El presente trabajo servirá de base para modificar aerodinámicamente los alabes de esta turbina de 50 W y mediante la propuesta de analizar el torque aportado por la raíz mediante la técnica de CFD, se podrá validar nuevas modificaciones aerodinámicas para determinar si estas mejorarán las prestaciones de arranque del conjunto.

## Referencias

- Burton, Tony, Sharpe, David, Jenkins, Nick, B. E. (2001). *Wind Energy Handbook*.
- Ebert, P. R., & Wood, D. H. (1997). Observations of the Starting Behaviour of a Small Horizontal- Axis Wind Turbine. *Renewable Energy*, 12(3), 1-13. [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(97\)00035-9](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(97)00035-9)
- Jimenez, Alan, Garza, Víctor, Molinero Daniel y Casillas, C. (2016). Metodología de Diseño del Perfil Aerodinámico de Hub para Turbinas de Viento de Eje Horizontal de Baja Capacidad, 3(9), 9-25.

- Karthikeyan, N., Kalidasa Murugavel, K., Arun Kumar, S., & Rajakumar, S. (2015). Review of aerodynamic developments on small horizontal axis wind turbine blade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 801–822. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.086>
- Lanzafame, R., Mauro, S., & Messina, M. (2015). HAWT Design and Performance Evaluation: Improving the BEM theory Mathematical Models, 82, 172–179. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.015>
- Lee, M., Shiah, Y. C., & Bai, C. (2016). Journal of Wind Engineering Experiments and numerical simulations of the rotor-blade performance for a small-scale horizontal axis wind turbine. *Jnl. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 149, 17–29. <http://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.12.002>
- Luiz, R., Freitas, U. De, Patrícia, B., & Gonçalves, F. (2017). A revised theoretical analysis of aerodynamic optimization of horizontal-axis wind turbines based on BEM theory. *Renewable Energy*, 105, 625–636. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.076>
- Mahmuddin, F. (2017). Rotor Blade Performance Analysis with Blade Element Momentum Theory. *Energy Procedia*, 105, 1123–1129. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.477>
- Mayer C. Wood D. (2004). Observations of the Starting Behaviour of a Small Horizontal- Axis Wind Turbine. *Renewable Energy*, 12(3), 1–13. [http://doi.org/10.1016/S0960-1481\(97\)00035-9](http://doi.org/10.1016/S0960-1481(97)00035-9)
- Molinero, Daniel, López, Victor, Cervantes, Al. (2016). Propuesta de Diseño Aerodinámico para Reducción de Turbulencia en la Estela de Rotación en Turbinas Eólicas de Baja Capacidad HAWT, 1(1), 1–11.
- Rocha, P. A. C., Rocha, H. H. B., Carneiro, F. O. M., Vieira, M. E., & Andrade, C. F. De. (2016). A case study on the calibration of the  $k-\epsilon$  SST ( shear stress transport ) turbulence model for small scale wind turbines designed with cambered and symmetrical airfoils. *Energy*, 97, 144–150. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.081>
- Shen, X., Yang, H., Chen, J., Zhu, X., & Du, Z. (2016). Aerodynamic shape optimization of non-straight small wind turbine blades. *Energy Conversion and Management*, 119, 266–278. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.008>
- Sun, Z., Chen, J., Zhong, W., & Jun, W. (2016). Improved blade element momentum theory for wind turbine aerodynamic computations. *Renewable Energy*, 96, 824–831. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.035>
- Tummala, A., Kishore, R., Kumar, D., Indraja, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351–1371. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>
- Wata, J., Faizal, M., Talu, B., Vanawalu, L., Sotia, P., & Ahmed, M. R. (2011). Studies on a low Reynolds number airfoil for small wind turbine applications, 54(7), 1684–1688. <http://doi.org/10.1007/s11431-011-4411-3>
- Wright, A. K. Ñ., & Wood, D. H. (2004). The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine, 92, 1265–1279. <http://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.08.003>



## Instrucciones para autores

---

### [Título en Times New Roman y Negritas No.14]

Apellidos en Mayúsculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayúsculas -2do Nombre de Autor  
*Correo institucional en Times New Roman No.10 y Cursiva*

(Indicar Fecha de Envío: Mes, Día, Año); Aceptado (Indicar Fecha de Aceptación: Uso Exclusivo de ECORFAN)

---

#### **Resumen**

Título

Objetivos, metodología

Contribución

(150-200 palabras)

#### **Abstract**

Title

Objectives, methodology

Contribution

(150-200 words)

#### **Keywords**

**Indicar (3-5) palabras clave en Times New Roman  
y Negritas No.11**

---

**Cita:** Apellidos en Mayúsculas -1er Nombre de Autor †, Apellidos en Mayúsculas -2do Nombre de Autor. Título del Artículo.  
Título de la Revista. 2017, 1-1: 1-11 – [Todo en Times New Roman No.10]

---

---

† Investigador contribuyendo como primer autor.

# Instrucciones para autores

## Introducción

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

¿Cuál es su valor agregado respecto de las demás técnicas?

Enfocar claramente cada una de sus características

Explicar con claridad el problema a solucionar y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del artículo

## Desarrollo de Secciones y Apartados del Artículo con numeración subsecuente

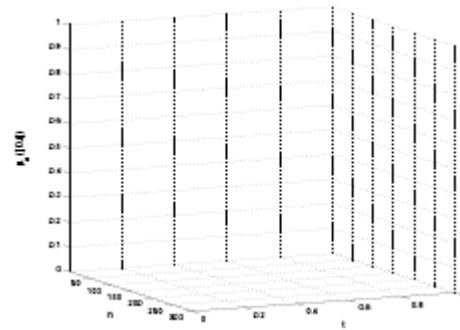
[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

Desarrollo de Artículos en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

## Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

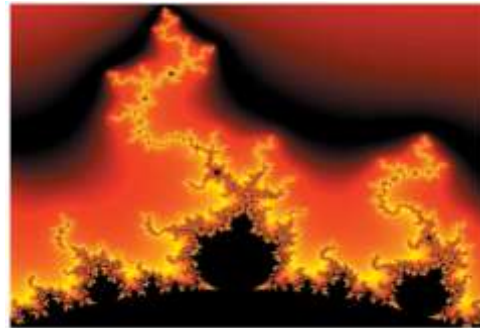
En el *contenido del artículo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

[Indicando el título en la parte inferior con Times New Roman No.10 y Negrita]



**Grafico 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.



**Figura 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.


**Tabla 1** Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberán ser imágenes- todo debe ser editable.

Cada artículo deberá presentar de manera separada en **3 Carpetas**: a) Figuras, b) Gráficos y c) Tablas en formato .JPG, indicando el número en Negrita y el Titulo secuencial.

## Instrucciones para autores

---

**Para el uso de Ecuaciones, señalar de la siguiente forma:**

$$Y_{ij} = \alpha + \sum_{h=1}^r \beta_h X_{hij} + u_j + e_{ij} \quad (1)$$

Deberán ser editables y con numeración alineada en el extremo derecho.

### Metodología a desarrollar

Dar el significado de las variables en redacción lineal y es importante la comparación de los criterios usados

### Resultados

Los resultados deberán ser por sección del artículo.

### Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

### Agradecimiento

Indicar si fueron financiados por alguna Institución, Universidad o Empresa.

### Conclusiones

Explicar con claridad los resultados obtenidos y las posibilidades de mejora.

### Referencias

Utilizar sistema APA. **No** deben estar numerados, tampoco con viñetas, sin embargo en caso necesario de numerar será porque se hace referencia o mención en alguna parte del artículo.

### Ficha Técnica

Cada artículo deberá presentar un documento Word (.docx):

Nombre de la Revista

Título del Artículo

Abstract

Keywords

Secciones del Artículo, por ejemplo:

1. *Introducción*
2. *Descripción del método*
3. *Análisis a partir de la regresión por curva de demanda*
4. *Resultados*
5. *Agradecimiento*
6. *Conclusiones*
7. *Referencias*

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor

Referencias

**Formato de Originalidad**



Cusco, Perú a \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del 20\_\_\_\_

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables por lo que deberán firmar los autores antes de iniciar el proceso de revisión por pares con la reivindicación de ORIGINALIDAD de la siguiente Obra.

Artículo (Article):

---

Firma (Signature):

---

Nombre (Name)

### Formato de Autorización



Cusco, Perú a \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del 20\_\_\_\_

Entiendo y acepto que los resultados de la dictaminación son inapelables. En caso de ser aceptado para su publicación, autorizo a ECORFAN- Perú a difundir mi trabajo en las redes electrónicas, reimpresiones, colecciones de artículos, antologías y cualquier otro medio utilizado por él para alcanzar un mayor auditorio.

I understand and accept that the results of evaluation are inappealable. If my article is accepted for publication, I authorize ECORFAN- Perú to reproduce it in electronic data bases, reprints, anthologies or any other media in order to reach a wider audience.

Artículo (Article):

\_\_\_\_\_  
Firma (Signature)

\_\_\_\_\_  
Nombre (Name)

# Revista de Ingeniería Innovativa

“Estudio termografía para el ahorro de energía y prevención de accidentes”

**DOMÍNGUEZ-NORIEGA, Alonso Rafael, CHÁVEZ-SAENZ, Velia, AYÓN-NÚÑEZ, Pedro Alexander y ROBLES-ROMERO, Román**

“Modulación-Demodulación en amplitud para el proceso de sincronía eléctrica”

**RUEDA-GERMÁN, Clementina, RIVAS-CAMBERO, Iván de Jesús, ARROYO-NÚÑEZ, José Humberto y ELIZALDE-CANALES, Francisca Angélica**

*Universidad Politécnica de Tulancingo*

“Fuente sintonizable de fibra óptica para aplicaciones en Banda-C”

**PÉREZ-SÁNCHEZ, Grethell Georgina, ANDRADE-GONZÁLEZ, Edgar Alejandro, SANDOVAL-ROMERO, Gabriel Eduardo y MEJÍA-ISLAS, José Adolfo**

*Universidad Autónoma Metropolitana*

*Universidad Nacional Autónoma de México*

“Análisis dinámico de la inclinación de colectores solares de placa plana y tubos evacuados para determinar el potencial energético-económico en las ciudades de Chihuahua y Durango”

**ESCOBEDO-BRETADO, Jorge, RÍOS-OROZCO, Carlos, NAJERA-TREJO, Mario y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio**

*Centro de Investigación en Materiales Avanzados*

*Instituto Tecnológico de Durango*

“Observador lineal usado para estimar corrientes en los devanados de un aerogenerador”

**PÉREZ-BARRIOS, Carlos Ángel, TÉLLEZ-ANGUIANO, Adriana del Carmen, HERAS-CERVANTES, Mario y GUTIÉRREZ-GNECCHI, José Antonio**

*Instituto Tecnológico de Morelia*

“Diseño y construcción de un amplificador para audio de 500 Watts mediante transistores BJT”

**GUTIÉRREZ-GARCÍA, Juan Nicolás, SÁNCHEZ-LÓPEZ, Héctor Javier, ROJAS-OLMEDO, Israel Alejandro y ROJAS-RAMÍREZ, Erick**

*Universidad Tecnológica del Valle de Toluca*

“Análisis del arranque de las micro turbinas eólicas de eje horizontal de baja capacidad HAWT”

**CASILLAS-FARFÁN, Christian, LÓPEZ-GARZA, Víctor, SOLORIO-DÍAZ, Gildardo y MOLINERO-HERNÁNDEZ, Daniel**

*Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*

