

Volumen 3, Número 9 — Octubre — Diciembre -2016

ISSN 2410-3454

Revista de
Aplicaciones de la
Ingeniería

ECORFAN[®]



ECORFAN-Bolivia

Indización

Google Scholar

Research Gate

REBID

Mendeley

RENIECYT

ECORFAN-Bolivia

Directorio

Principal

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Regional

IGLESIAS-SUAREZ, Fernando. BsC

Director de la Revista

SERRUDO-GONZALES, Javier. BsC

Edición de Logística

PERALTA-CASTRO, Enrique. PhD

Diseñador de Edición

TREJO-RAMOS, Ivan. BsC

Revista de Aplicaciones de la Ingeniería, Volumen 3, Número 9, de Octubre a Diciembre -2016, es una revista editada mensualmente por ECORFAN-Bolivia. Loa 1179, Cd. Sucre. Chuquisaca, Bolivia. WEB: www.ecorfan.org, revista@ecorfan.org. Editora en Jefe: RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD, Co-Editor: IGLESIAS-SUAREZ, Fernando. ISSN-En línea: 2410-3454 Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN, Imelda. PhD, LUNA-SOTO, Vladimir. PhD, actualizado al 31 de Diciembre 2016.

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 Servicio Nacional de Propiedad Intelectual.

Consejo Editorial

GALICIA-PALACIOS Alexander. PhD
Instituto Politécnico Nacional- México

NAVARRO-FRÓMETA Enrique. PhD
Instituto Azerbaidzhan de Petróleo y Química Azizbekov-Rusia

BARDEY, David. PhD
University of Besançon-Francia

IBARRA-ZAVALA, Darío. PhD
New School for Social Research-U.S.

COBOS-CAMPOS, Amalia. PhD
Universidad de Salamanca-España

ALVAREZ-ECHEVERRÍA, Francisco. PhD
University José Matías Delgado-El Salvador

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

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

ROCHA-RANGEL, Enrique. PhD
Oak Ridge National Laboratory-U.S.

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

TUTOR-SÁNCHEZ, Joaquín. PhD
Universidad de la Habana-Cuba

VERDEGAY-GALDEANO, José. PhD
Universidad de Granada-España

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-Pari- Francia

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

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

FRANZONI-VELAZQUEZ, Ana. PhD
Instituto Tecnológico Autónomo de México-México

OROZCO-GUILLÉN, Eber. PhD
Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica-México

QUIROZ-MUÑOZ, Enriqueta. PhD
El Colegio de México-México

SALAMANCA-COTS, María. PhD
Universidad Anáhuac-México

Consejo Arbitral

MTT, PhD

Universidad de Granada-España

AH, PhD

Simon Fraser University-Canadá

AG, PhD

Economic Research Institute – UNAM-México.

MKJC MSc

Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca-Bolivia

MRCY, PhD

Universidad de Guadalajara-México

MEC, PhD

Universidad Anáhuac-México

AAB, PhD

Universidad Autónoma de Sinaloa-México

EDC, MSc

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey-México

JRB, PhD

Universidad Panamericana-México

AGB, PhD

Instituto de Biotecnología UNAM-México

ACR, PhD

Universidad Nacional Autónoma de México- México

ETT, PhD

CICATA-Instituto Politécnico Nacional-México

FVP, PhD

GHC, PhD

JTG, PhD

MMG, PhD

Instituto Politécnico Nacional-Escuela Superior de Economía-México

FNU, PhD

Universidad Autónoma Metropolitana-México

GLP, PhD
Centro Universitario de Tijuana-México

GVO, PhD
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo- México

IAA, MsC
Universidad de Guanajuato-México.

IGG, MsC
Centro Panamericano de Estudios Superiores-México

TCD, PhD
Universidad Autónoma de Tlaxcala-México

JCCH, MsC
Universidad Politécnica de Pénjamo-México

JPM, PhD
Universidad de Guadalajara-México

JGR, PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla-México

JML, PhD
El Colegio de Tlaxcala-México

JSC, PhD
Universidad Juárez del Estado de Durango-México

LCL Ureta, PhD
Universidad de Guadalajara-México

MVT, PhD
Instituto Politécnico Nacional-México

MLC, PhD
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada-México

MSN, PhD
Escuela Normal de Sinaloa-México

MACR, PhD
Universidad de Occidente-México

MAN, MsC
Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato-México

MTC, PhD

Instituto Politécnico Nacional –UPIICSA-México

MZL, MsC

Universidad del Valle de México-México

MEC, PhD

Universidad Autónoma de San Luis Potosí-México

NGD, PhD

UDLA Puebla-México

NAL, MsC

Universidad Politécnica del Centro- México

OSA, PhD

Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos-México

OGG, PhD

Universidad Autónoma Metropolitana-México

PVS, PhD

Universidad Politécnica de Tecámac-México

MJRH, PhD

Universidad Veracruzana-México

SCE, PhD

Universidad Latina-México

SMR, PhD

Universidad Autónoma Metropolitana-México

VIR, PhD

Instituto Mexicano del Transporte-México

WVA, PhD

Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo-México

YCD, PhD

Centro Eleia-México

ZCN, MsC

Universidad Politécnica de Altamira-México

Presentación

ECORFAN, es una revista de investigación que publica artículos en las áreas de: Aplicaciones de la Ingeniería.

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 del Editor en Jefe.

Como primer artículo está *Metodología de Diseño del Perfil Aerodinámico de Hub para Turbinas de Viento de Eje Horizontal de Baja Capacidad* por JIMÉNEZ-RAMÍREZ, Alan, LÓPEZ-GARZA, Víctor, MOLINERO-HERNÁNDEZ, Daniel y CASILLAS-FARFÁN, Christian con adscripción en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, como siguiente artículo está *Análisis armónico de un aerogenerador y un STATCOM basado en una técnica mejorada para la obtención de la solución periódica* CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y JIMÉNEZ-BETANCOURT, Ramón. con adscripción en la Universidad de Colima, como siguiente artículo está *Análisis numérico del flujo asimétrico variando la posición axial del impulsor* por LIZARDI, Arturo, LÓPEZ, Raymundo, TERRES, Hilario y MORALES, Juan con adscripción en la Universidad Autónoma Metropolitana, como siguiente artículo está *Diseño y construcción de comal Tolokatsin de concentrador solar a partir de materiales alternativos* por DÍAZ-ZAMORANO, Ana, LUNA-PADILLA, Ivo, LAGUNA-PÉREZ, Emmanuel y OLIVARES-RAMÍREZ, Juan.

Contenido

Artículo	Página
Metodología de Diseño del Perfil Aerodinámico de Hub para Turbinas de Viento de Eje Horizontal de Baja Capacidad JIMÉNEZ-RAMÍREZ, Alan, LÓPEZ-GARZA, Víctor, MOLINERO-HERNÁNDEZ, Daniel y CASILLAS-FARFÁN, Christian	9-25
Análisis armónico de un aerogenerador y un STATCOM basado en una técnica mejorada para la obtención de la solución periódica CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y JIMÉNEZ-BETANCOURT, Ramón	34-47
Análisis numérico del flujo asimétrico variando la posición axial del impulsor LIZARDI, Arturo, LÓPEZ, Raymundo, TERRES, Hilario y MORALES, Juan	49-71
Diseño y construcción de comal Tolokatsin de concentrador solar a partir de materiales alternativos DÍAZ-ZAMORANO, Ana, LUNA-PADILLA, Ivo, LAGUNA-PERÉZ, Emmanuel y OLIVARES-RAMÍREZ, Juan	72-82
<i>Instrucciones para Autor</i>	
<i>Formato de Originalidad</i>	
<i>Formato de Autorización</i>	

Metodología de Diseño del Perfil Aerodinámico de Hub para Turbinas de Viento de Eje Horizontal de Baja Capacidad

JIMÉNEZ-RAMÍREZ, Alan†*, LÓPEZ-GARZA, Víctor, MOLINERO-HERNÁNDEZ, Daniel y CASILLAS-FARFÁN, Christian.

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Gral. Francisco J. Mugica S/N, Ciudad Universitaria, 58030 Morelia, Mich., México

Recibido Octubre 6, 2016; Aceptado Noviembre 9, 2016

Resumen

El hub, localizado en el rotor de las turbinas de viento, es el encargado de sujetar los álabes y conectarlos con el eje principal del generador eléctrico, también de desviar el flujo de aire; que impacta en el rotor, hacia la raíz de los álabes (sección encargada de hacer que las turbinas giren con bajas velocidades de viento). En el presente trabajo se analizan diferentes geometrías para el hub de una turbina de viento de baja capacidad de eje horizontal, para determinar cómo afecta en la eficiencia aerodinámica; geometrías tales como un hub en forma de cono, semicírculo, entre otras, y en comparación con una turbina con hub plano. Esto se realizó mediante simulaciones en CFD (dinámica de fluidos por computadora) y posteriormente se obtuvieron las curvas de presión de cada geometría y se dio una propuesta de hub con determinadas características deseadas. Finalmente se proponen unas funciones matemáticas para el modelado geométrico del hub.

Energías Renovables, Turbina Eólica, Aerodinámica, Hub, Optimización, Simulación, Experimentación.

Abstract

The hub, located in the rotor of wind turbines, is responsible for attaching the blades and connect the main shaft of the electric generator, also deflect the air flow; impacting the rotor, to the root of the blades (section responsible for making turbines spin with low wind speeds). In this work different geometries for the hub of a wind turbine low-capacity horizontal axis are analysed to determine how it affects the aerodynamic efficiency; a hub geometries such as cone-shaped, semi-circular, among others, and compared to a turbine hub flat. This was done by simulations CFD (computational fluid dynamics) and then the pressure curves were obtained for each geometry and a proposal hub occurred with certain desired characteristics. Finally some mathematical functions for geometric modelling are proposed hub.

Renewable Energy, Wind Turbine, Aerodynamics, Hub, Optimization, Simulation, Experimentation.

Citación: JIMÉNEZ-RAMÍREZ, Alan, LÓPEZ-GARZA, Víctor, MOLINERO-HERNÁNDEZ, Daniel y CASILLAS-FARFÁN, Christian. Metodología de Diseño del Perfil Aerodinámico de Hub para Turbinas de Viento de Eje Horizontal de Baja Capacidad. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2016, 3-9: 9-25

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: nepesh@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Actualmente la demanda de energía eléctrica es un reto constante en la sociedad en la que vivimos. Esto nos obliga a buscar diferentes maneras de abastecer esa necesidad, todo ello intentando mantener bajos los niveles de contaminación que se generan al producir electricidad. Las energías alternas representan una alternativa limpia para el suministro de la demanda eléctrica y la solución al problema de contaminación. Un tipo de energía alterna es la eólica, la cual utiliza la energía obtenida de las corrientes de aire. Dicha energía es de carácter inagotable, ya que es cíclica (el aire siempre está en movimiento). Esta energía se genera por las variaciones de temperatura en la atmósfera del planeta.

La forma más común de obtener energía del viento es utilizando generadores eólicos, también conocidos como turbinas de viento. En la energía eólica, el tamaño del aerogenerador y en especial del diámetro del rotor se ha convertido en un factor clasificatorio. Aunque el principio de funcionamiento y diseño de todas las turbinas eólicas es similar, su construcción, concepción y aplicaciones son totalmente distintas. Dando como resultado turbinas de baja potencia o capacidad como las empleadas para hogares, hasta las de alta potencia empleadas para satisfacer la demanda de energía eléctrica de una parte del país.

La norma europea IEC 61400-2:2006 Parte 2: Requisitos de diseño para pequeños aerogeneradores, define Aerogenerador Pequeño (AP) como: Sistema con área de barrida del rotor de 200 m² o menor que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Por su parte la misma norma define al buje o hub como: *Elemento de unión de las palas o del conjunto de palas al eje del rotor*. Efectivamente, localizado en el rotor de las turbinas de viento, el hub es el encargado de sujetar las palas o álabes y conectarlos con el eje principal del generador eléctrico; pero también es el encargado de desviar el flujo de aire; que impacta en la parte central del rotor, hacia la raíz de los álabes (sección encargada de hacer que las turbinas giren con bajas velocidades de viento). En el presente trabajo, se analizan diferentes geometrías para el hub de una turbina de viento de baja capacidad de eje horizontal, a fin de determinar cómo afecta éste en la eficiencia aerodinámica del rotor; geometrías tales como un hub en forma de cono, de semicírculo, de secante, entre otras, se comparan con un hub plano. A fin de realizar el diseño aerodinámico óptimo del hub se realizan simulaciones numéricas mediante CFD (Dinámica de Fluidos por Computadora) validándolas en el túnel de viento. Posteriormente, se obtuvieron las curvas de presión y velocidad de cada geometría, de las cuales se seleccionaron aquellas que mostraban características aerodinámicas que incidían en el desempeño mecánico de la turbina. Por último se propone una función matemática para el diseño del hub de turbinas de eje horizontal de baja capacidad.

En la primera sección, se introduce al lector en una definición de viento, el origen de éste y la energía que se puede aprovechar de él. En la segunda sección, se describe de manera general un generador eólico, su principio de funcionamiento y la cantidad de energía máxima que pueden extraer del viento. En la tercera sección, se hace relación de las bases teóricas del diseño de turbinas eólicas y de perfiles aerodinámicos, las ecuaciones gobernantes del fenómeno estudiado y los patrones de flujo del hub. Por su parte, en la cuarta sección se establecen las condiciones de simulación y experimentación de los perfiles aerodinámicos diseñados. Con lo anterior se establece el método de diseño a través de las curvas de presión de los perfiles. Finalmente, en la sección de resultados se establecen los perfiles que satisfacen las necesidades de diseño.

Objetivo general

Diseñar y optimizar el perfil aerodinámico del hub de una turbina de viento de baja capacidad.

Justificación

Existe la necesidad de lograr un aumento en la eficiencia de las turbinas de viento para hacer aún más rentable su uso. Por lo anterior, es necesario proponer una familia de perfiles aerodinámicos para el hub de turbinas de baja capacidad.

Hipótesis

Es posible diseñar y optimizar el perfil aerodinámico del hub de una turbina de viento de baja capacidad, así como proponer una familia de perfiles aerodinámicos de hub para turbinas de baja capacidad.

Metodología

La investigación parte de una amplia revisión del estado del arte que proporciona elementos necesarios para analizar la pertinencia del problema planteado y junto con el marco teórico, elaborar una propuesta de diseño; la cual es analizada con la ayuda de simulación numérica en CFD. Una vez obtenida una propuesta satisfactoria, se procede a manufacturar, la que se somete a pruebas de laboratorio que incluyen pruebas en túnel de viento con el generador de humos y pruebas de arranque de la turbina. Posteriormente se somete a una etapa de análisis y perfeccionamiento que concluye con una propuesta final de diseño. Ver figura 1.

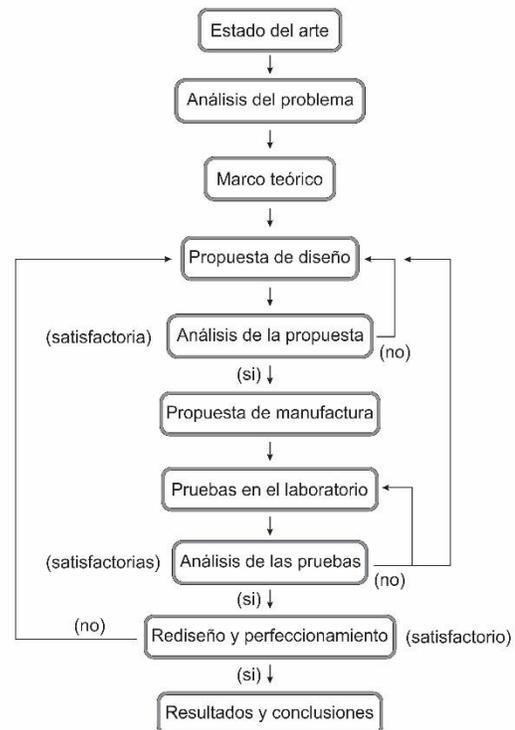


Figura 1 Metodología de investigación y diseño empleada.

El viento

El viento es aire en movimiento y aunque en general su movimiento es tridimensional, normalmente sólo se considera la velocidad y dirección de su componente horizontal. Puede verse como una corriente de aire que se genera en la atmósfera por diferentes causas naturales.

El viento es causado por las diferencias de temperatura existentes al producirse un desigual calentamiento de las diversas zonas de la tierra y de la atmósfera. Las masas de aire más caliente tienden a ascender, y su lugar es ocupado entonces por las masas de aire circundante, más frío y por ende más denso.

Para las aplicaciones eólicas, el conocimiento de la presión atmosférica resulta de vital importancia. Ésta es la presión que ejerce la atmósfera sobre los cuerpos sumergidos en ella. El aire frío pesa más que el caliente, y éste es uno de los factores que influyen en las diferencias de presión atmosférica a un mismo nivel. Los anticiclones y las borrascas generan corrientes de aire en sentido vertical que modifican sustancialmente el valor de la presión atmosférica, circunstancia que afecta de forma notable la potencia de generación de un aerogenerador.

La disposición que adoptan las isobaras configura unas formas denominadas campos de presión. Los campos de presión estables en el tiempo, o poco variables, se denominan centros de acción, ya que son los que regulan las masas de aire y la circulación de los vientos.

El viento está definido por dos parámetros: dirección horizontal y la velocidad, y se usaran más frecuentemente al tratar el potencial eólico disponible en un emplazamiento.

La dirección del viento depende de la distribución y evolución de los centros isobáricos; se desplaza de los centros de alta presión (anticiclones) hacia los de baja presión (depresiones) y su fuerza es tanto mayor cuanto mayor es el gradiente de presiones. En su movimiento, el viento se ve alterado por diversos factores tales como el relieve y la aceleración de Coriolis.

La velocidad del viento es un vector. La unidad de velocidad del viento en el sistema internacional es m/s, sin embargo, aún se usan los nudos (kt) y km/h ($1\text{kt}=1.8\text{km/h}$ ó $1\text{kt}=0.5\text{ m/s}$).

La energía del viento

La primera aplicación práctica de la energía eólica fue la navegación; el primer molino de viento del que se tiene noticia histórica aparece en Persia, y se utilizó para pulverizar granos. La rica historia de los molinos de viento se desenvuelve hasta nuestros días a través de distintas religiones y culturas.

La era moderna de los molinos de viento viene de la mano del desarrollo de la teoría de la aerodinámica, que primeramente encontraron aplicaciones en la fabricación de alas y hélices utilizadas en aviación y posteriormente en las palas de los rotores de los molinos.

Actualmente la energía cinética contenida en el viento se utiliza fundamentalmente en la generación de energía eléctrica. Una vez transformada en energía eléctrica puede consumirse directamente, en tiempo real o acumularse para su posterior consumo o transporte.

La energía contenida en el viento es inagotable debido a su carácter cíclico. Para obtener el máximo aprovechamiento energético del viento es de vital importancia una correcta evaluación y caracterización del mismo. Para ello se utilizan estaciones meteorológicas y torres de medición provistas de sensores en diferentes alturas, lo cual permite conocer entre otros aspectos: la velocidad media del viento, distribución de frecuencias en las diferentes direcciones, variación del viento con respecto a la altura y posición, estadísticas de ráfagas, velocidad máxima, distribución del día típico medio, etcétera.

La energía del viento susceptible de ser captada es proporcional al cubo de la velocidad;

$$P = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

Donde P es la potencia, E_c la energía cinética A el área, v la velocidad y ρ la densidad.

Generadores eólicos

Aun cuando el término “maquina eólica” abarca a cualquier maquina capaz de transformar la energía cinética del viento en energía útil, se puede hacer distinción y clasificarlas en distintos grupos de acuerdo a sus características, por ejemplo, de eje horizontal o de eje vertical, etc.

Un generador eólico está integrado por varios componentes. El rotor, que convierte la fuerza del viento en energía rotatoria del eje y que a su vez está formado por el hub y los álabes, una caja de engranajes que aumenta la velocidad y un generador que transforma la energía mecánica del eje en energía eléctrica. Los componentes fundamentales de un aerogenerador de eje horizontal se ilustran en la figura 2.

El aerogenerador más empleado en la actualidad es el de eje horizontal, considerado el más eficiente.

Podemos distinguir dos formas de funcionamiento en las turbinas eólicas, por arrastre; en las que el viento empuja las aspas, y por sustentación, en las que las aspas se mueven de un modo parecido a las alas de un avión a través de una corriente de aire. Siendo estas últimas las que giran a mayor velocidad y por su diseño son más eficientes.

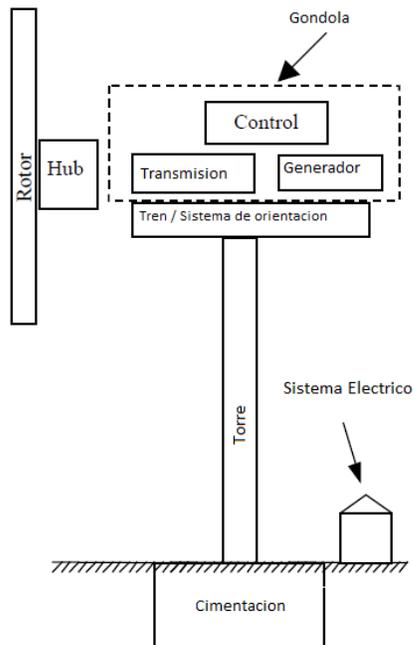


Figura 2 Esquema de un generador eólico. (Manwell, J.F., McGowan J.G. and Rogers A.L.,2009)

Funcionamiento de un aerogenerador

Los aerogeneradores de eje horizontal además de trabajar con el empuje del viento, utilizan la fuerza de sustentación para obtener un mejor rendimiento. Y en el diseño de los aerogeneradores se busca la combinación de ángulos y formas para evitar turbulencias y sacar el máximo partido a la combinación de las fuerzas del viento.

Potencia generada y pérdidas

La potencia suministrada por un aerogenerador depende de la superficie barrida por la hélice y, por lo tanto, de la longitud de las palas, y es independiente del número de palas. Como el área barrida de un generador eólico de eje horizontal es circular, donde D es el diámetro, podemos reescribir la potencia disponible como;

$$P = \frac{\pi}{8} \rho \cdot D^2 \cdot v^3 \quad (2)$$

Desafortunadamente no se puede extraer toda la energía del viento. Albert Betz demostró en 1919 que para extraer la energía del viento debemos reducir su velocidad, en otras palabras, deberíamos detener completamente el aire en movimiento. Pero al hacer esto, el aire estaría parado e impediría la entrada de más aire al rotor de la turbina y no podríamos captar más energía.

Según el teorema de Betz, la energía máxima que podrá captarse del viento para que el rendimiento sea máximo es del 59% ($C_p = 16/27$). Lo cual equivaldría a reducir la velocidad del viento que pasa a través de las hélices hasta 1/3 de su velocidad inicial, y solo podríamos aprovechar hasta un máximo de 2/3 de la energía del viento, siendo esta la primer gran pérdida del rendimiento de la turbina.

Si tomamos todas estas pérdidas en cuenta podemos definir una ecuación para determinar la potencia que podemos extraer del viento;

$$P = C_p \frac{\rho}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V^3 \quad (3)$$

Donde C_p es el coeficiente de potencia, el cual varía en función de la calidad y diseño del aerogenerador, alcanzando en un generador de altas prestaciones un valor de 0.25. (Manwell, J.F., McGowan J.G. and Rogers A.L.,2009)

3. Aerodinámica de la turbinas de viento

Para estudiar la aerodinámica de las turbinas de viento se requiere un poco de conocimiento de dinámica de fluidos en general y en particular, conocimiento de aerodinámica de aeronaves. Conocimiento sobre el teorema de Bernoulli para flujo estable e incompresible junto con el concepto de continuidad.

Existen varios modelos matemáticos de diseño de turbinas eólicas. El modelo matemático utilizado con mayor frecuencia por las comunidades científicas e industriales es el basado en la teoría de elemento impulso de pala (BEM). Ofrece la posibilidad de realizar el diseño de la dinámica de fluidos de los álabes del rotor, y para evaluar el rendimiento de la turbina de viento. Con la implementación de este modelo es posible diseñar el rotor, para elegir las características geométricas de la turbina (diámetro rotor, perfiles aerodinámicos, cuerdas, los ángulos de ataque y torsión), para evaluar las fuerzas que actúan sobre los álabes, así como el par de torsión y la potencia en el eje del rotor. Con este modelo matemático es posible también evaluar el rendimiento de la turbina de una amplia gama de velocidades del viento. (Gordillo Arias de Saavedra, José Manuel, 2012).

La teoría BEM se basa en la teoría de la hélice de Glauert (Glauert, E. 1946), modificada para la aplicación a las turbinas eólicas. En los últimos años la teoría BEM ha sido optimizada y modificada para proporcionar resultados cada vez más precisos.

Para la estabilidad numérica del modelo matemático las mayores dificultades se encuentran en la determinación de los factores de inducción axial y tangencial, la falta de mediciones experimentales en los coeficientes de sustentación y arrastre a altos ángulos de ataque, y su representación en tres dimensiones. A fin de tener la representación tridimensional en cuenta, las mediciones experimentales en túnel de viento deben ser modificados con el fin de considerar el flujo radial a lo largo de los álabes.

Es de notar que la teoría BEM establece los parámetros de diseño de los álabes de las turbinas eólicas pero no así del hub aerodinámico.

3.1 Diseño de perfiles aerodinámicos.

Los métodos de diseño de perfiles se pueden clasificar en dos tipos: Diseño directo y diseño mediante ingeniería inversa.

Diseño directo: el diseño directo parte de tener las especificaciones de la geometría, el cálculo de presiones y rendimiento. Se evalúa la geometría y se modifica de tal forma que se pueda mejorar el rendimiento mediante procesos de optimización. Esta optimización se realiza teniendo como meta la minimización de alguna función objetivo que caracterice el rendimiento del perfil. Ver figura 3. Así el diseño directo parte de una geometría ya establecida y se debe calcular su distribución de presiones en la superficie de dicha geometría. Posteriormente se ajusta sucesivamente la forma hasta que se obtienen los resultados de rendimiento deseados. (Flores Galindo, Diego Rodrigo, 2006).

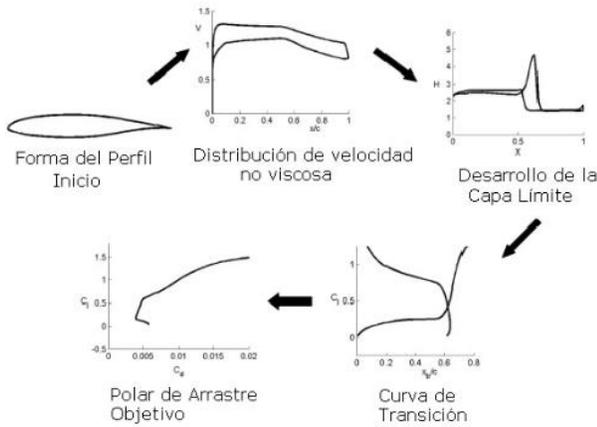


Figura 3 Diagrama de diseño directo de perfiles aerodinámicos. (Flores Galindo, Diego Rodrigo, 2006).

Diseño inverso: El diseño inverso se realiza en sentido contrario al diseño directo, en este se debe llegar a determinar una geometría partiendo de las distribuciones de presión de superficie, dicha presión integra el rendimiento del perfil que se desea ya con sus características mejoradas. Estas condiciones ya están diseñadas de tal forma que por ejemplo se evite cavitaciones, velocidades no deseadas, desprendimiento de la capa límite, incluso que dicho perfil satisfaga especificaciones de carácter aerodinámico y geométrico, como tamaños y espesores de materiales. Así el rendimiento final de los perfiles diseñados con ingeniería inversa puede ser controlado de manera indirecta mediante el control directo en las distribuciones de velocidad y especificaciones en el desarrollo de capa límite. (Flores Galindo, Diego Rodrigo, 2006).

Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes modelan con gran precisión el flujo de gases en las condiciones de interés para la Aerodinámica.

Donde el objetivo es darles solución para la superficie del perfil, Σ_s , a las fuerzas, F_{fs} , y a los momentos, M_{fs} que ejerce el fluido en movimiento con respecto al sólido. Figura 4.

$$F_{fs} = \int_{\Sigma_s} (p - p_{\infty})(-n_s) + \int_{\Sigma_s} n_s \cdot \tau' d\sigma \quad (4)$$

$$M_{fs} = \int_{\Sigma_s} (x - x_0) \times (-n_s \cdot \tau') d\sigma + \int_{\Sigma_s} (x - x_0) \times (-n_s)(p - p_{\infty}) d\sigma \quad (5)$$

donde p es la presión, p_{∞} es la presión de referencia (muy aguas arriba), n_s es la normal exterior al sólido, $\tau' = 2\mu\gamma + I(\mu_v - \frac{2}{3}\mu)\nabla \cdot v$ es el tensor de esfuerzos, dado por la ley de Navier-Poisson para fluidos Newtonianos, x_0 es el vector posición del punto respecto al que se toman los momentos, μ y μ_v son los coeficientes de viscosidad y viscosidad volumétrica respectivamente, v es el vector que denota el campo de velocidades, I es la matriz identidad, $\gamma = \frac{1}{2}(\nabla v + (\nabla v)^T)$ es el tensor de velocidad de deformación. (Gordillo Arias de Saavedra, José Manuel, 2012)

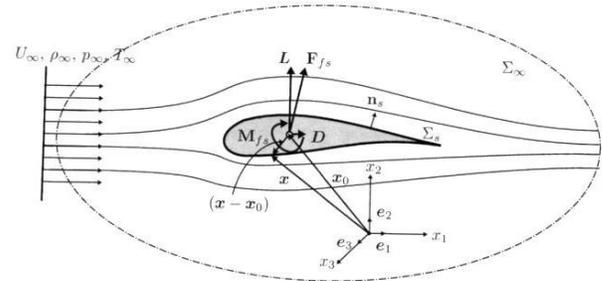


Figura 4 Perfil aerodinámico y su flujo relativo. (Gordillo Arias de Saavedra, José Manuel, 2012)

Los valores de presión y del tensor de esfuerzos sobre la superficie necesarios para calcular la ecuación 4 y necesarios para calcular los coeficientes C_d y C_l pueden encontrarse de forma experimental o bien dando solución a las ecuaciones de Navier-Stokes sujetas a las condiciones iniciales y de contorno adecuadas. Si no se quiere recurrir a la experimentación para solucionar la ecuación 4, se debe resolver el sistema de ecuaciones no lineal en derivadas parciales de Navier-Stokes, integrado por:

La ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (6)$$

La ecuación de cantidad de movimiento

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}' + \rho \mathbf{f}_m \quad (7)$$

La ecuación de la energía

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_v \mathbf{v} \cdot \nabla T = -p \nabla \cdot \mathbf{v} + \boldsymbol{\tau}' : \nabla \mathbf{v} + Q_r + Q_q + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (8)$$

Donde t denota el tiempo, \mathbf{f}_m es el vector de fuerzas másicas, c_v es la capacidad calorífica del gas a volumen constante, k es su conductividad térmica, $\boldsymbol{\tau}' : \nabla \mathbf{v} > 0$ es el término de disipación de energía cinética e interna y Q_r y Q_q son las potencias caloríficas. Todo esto considerando el gas como perfecto. Por lo que este sistema de ecuaciones debe ser completado con la ecuación de estado de los gases perfectos.

$$\frac{p}{\rho} = R_g T \quad (9)$$

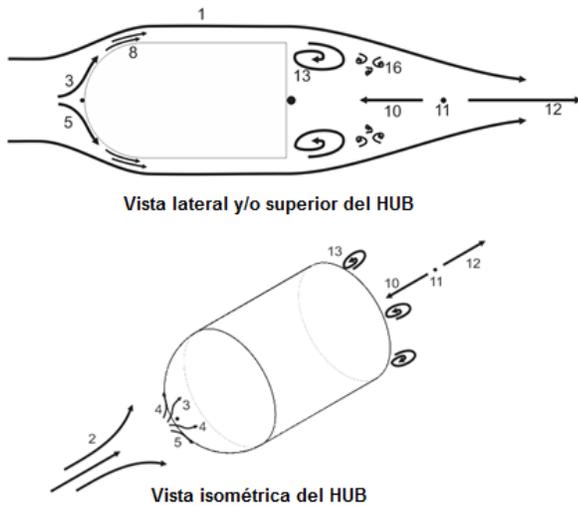
Donde p es la presión, ρ es la densidad, R_g es la constante general de los gases ideales y T la temperatura. (Gordillo Arias de Saavedra, José Manuel, 2012).

Patrón de flujo de viento

A fin de validar las simulaciones y partiendo de la teoría de flujo de aire en cuerpos romos, se puede determinar qué tipo de flujo se espera sobre los perfiles analizados. (B. Blocken, 2014). En la Figura 5 se presenta el patrón de flujo que se espera ver en el túnel de viento y en las simulaciones numéricas con un perfil de hub semicircular. El énfasis en el estudio será en el flujo entrante y en las esquinas.

El método de diseño del perfil del hub es el método directo, por lo que las geometrías seleccionadas para iniciar el proceso de diseño y optimización son: semicírculo, elíptica, parábola, ojiva secante y una variación, ojiva tangente, cono y hub plano. Como funciones objetivo se tiene: la disminución de la presión en la punta del hub, la disminución de la turbulencia y el aumento de la velocidad de flujo en las esquinas (ver figura 5).

Los perfiles se diseñan partiendo de un tamaño de góndola en forma de cilindro de 10cm de radio x 25cm de largo; Siendo estas las medidas del generador eléctrico de una turbina de 600 W comercial seleccionada.



Nomenclatura: 1. Flujo sobre el perfil. 2. Flujo entrante al perfil. 3. Flujo desde el punto de estancamiento por encima del perfil. 4. Flujo desde el punto de estancamiento alrededor del perfil. 5. Flujo descendente desde el punto de estancamiento. 8. Flujo en las esquinas. 10. Flujo de recirculación. 11. Región de estancamiento detrás del perfil. 12. Dirección del flujo restaurado. 13. Grandes vórtices detrás del perfil. 16. Pequeños vórtices detrás del perfil.

Figura 5 Patrón de Flujo en un hub de geometría semicircular.

Simulación, Experimentación y Diseño

Las simulaciones se realizan tomando en cuenta el área de barrido de una turbina de 1.6 metros de diámetro. La experimentación se realiza en un túnel de viento físico de medidas de 60cm x 60cm x 90cm (mismas dimensiones del túnel de viento virtual).

Las condiciones de viento importantes para una turbina eólica real son, velocidad de arranque, velocidad nominal y velocidad de paro, siendo aproximadamente 3m/s, 12m/s y 24 m/s respectivamente. Las demás condiciones para la simulación son: Densidad del aire de 1.0151 kg/m³, Temperatura 25°C, Viscosidad dinámica 1.83e05 Pa·s, Viscosidad cinemática 1.57e-05 m²/s, Modelo de turbulencia k-ε estándar.

Por citar una de las simulaciones realizadas, en la figura 6 superior se muestra una simulación que se realizó con las siguientes características: velocidad de entrada del viento 8 m/s, número de elementos 308070, número de nodos 35896, tipo de elemento tetraedro, tiempo de simulación aproximado de 5 min; procesamiento en paralelo con 4 núcleos.

Para realizar una correcta experimentación y asegurar que el sistema se encuentra en el mismo régimen turbulento que existe bajo condiciones reales; se toma como parámetro adimensional el número de Reynolds (para la sección transversal de la turbina eólica) y se utiliza para recalculer las velocidades de viento del túnel de viento real, las cuales se muestran en la tabla 1.

Velocidad de viento (m/s)	Reynolds	velocidad túnel (m/s)	rpm
0	0.00E+00	0	0
2.5	2.22E+05	6.6666	716.1972
3	2.67E+05	8	859.4366
4	3.56E+05	10.6666	1145.9155
5	4.45E+05	13.3333	1432.3944
6	5.34E+05	16	1718.8733
7	6.23E+05	18.6666	2005.3522
8	7.12E+05	21.3333	2291.8311
9	8.01E+05	24	2578.3100
10	8.90E+05	26.6666	2864.7889
11	9.79E+05	29.3333	3151.2678
12	1.07E+06	32	3437.7467
14	1.25E+06	37.3333	4010.7045
15	1.33E+06	40	4297.1834

Tabla 1 Cálculo del número de Reynolds y velocidades de viento.

Comparación modelo con álabes completos y seccionados

Se simuló una turbina con los álabes completos y una turbina de álabes seccionados; de los resultados obtenidos se concluye que no es necesario simular todo el largo de los álabes ya que prácticamente los contornos de presión cercanos y en la zona del hub (zona de interés) son iguales. El no tener que simular la turbina eólica de álabes completos es favorable computacionalmente ya que los tiempos de simulación se reducen a la mitad.

Experimentación en el túnel de viento.

Se realizan pruebas en el túnel de viento, considerando la velocidades de viento de 6.66 m/s, 8.00 m/s, 10.66 m/s y 13.33 m/s que corresponden a 716.1972 rpm, 859.4366 rpm, 1145.9155 rpm y 1432.3944 rpm respectivamente a las revoluciones del generador eólico.

De igual forma, para validar la simulación se estudia el contorno de presiones y se compara con lo obtenido con el generador de humo en el túnel de viento. En la parte inferior de la figura 6 se pueden apreciar las zonas donde el flujo del viento se “estira” debido a la baja presión (A), también el punto de estancamiento en la parte frontal del perfil (B), siendo la zona donde hay mayor presión; a su vez el flujo del fluido por sobre y hacia los lados a partir del punto de estancamiento, los vórtices creados en la parte trasera del perfil (C) y la zona de desprendimiento de la capa limite debida a la baja presión que se presenta en la zona verde de la simulación (figura 6 parte superior).

Método de Diseño

Para el diseño los perfiles se obtienen las curvas de la presión sobre todo su contorno. En la gráfico 1, se muestra en una gráfica la distribución de la presión sobre el contorno del perfil con forma de semicírculo.

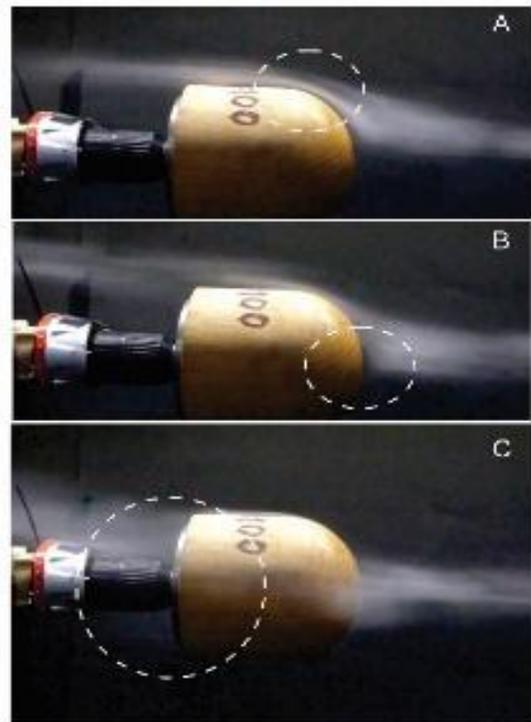
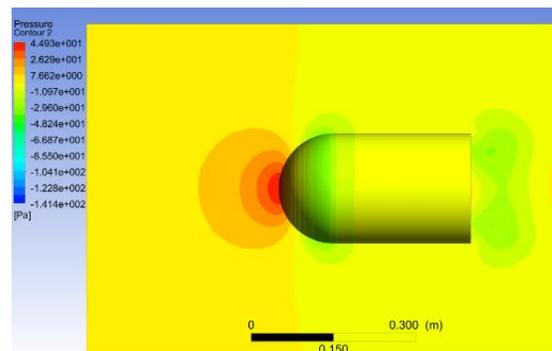


Figura 0 Comparación de las regiones obtenidas en simulación con la experimentación, obteniendo un patrón de flujo con las zonas: A) Zona de aumento del flujo sobre el perfil, B) Punto de estancamiento, Flujo desde el punto de estancamiento sobre el perfil, C) Vórtices, zona de recirculamiento.

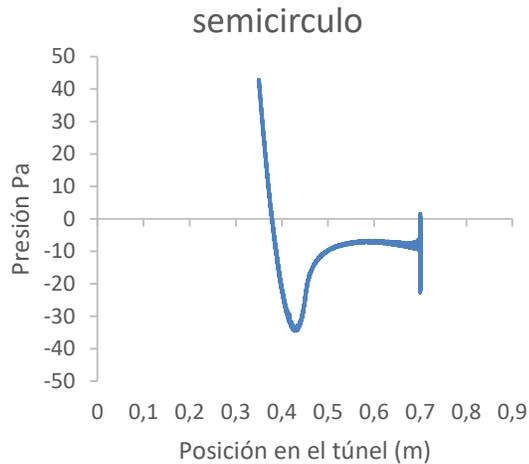


Gráfico 1 Curva de presiones a través del contorno del hub con perfil en semicírculo.

De igual forma se obtiene las curvas de presión para los demás perfiles, obteniendo la gráfica 2. Dichas curvas sirven como punto de partida para el diseño y optimización del resto de las geometrías.

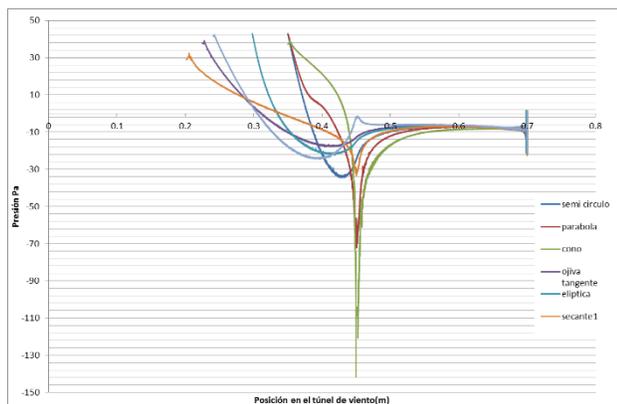


Gráfico 2 Curvas de presión de los diferentes perfiles de hub simulados.

Resultados

Tomando en cuenta las curvas de presión de los perfiles (gráfica 2) y que las turbinas eólicas trabajan por medio de una diferencia de presiones en el perfil de sus álabes; se selecciona la curva que presenta una menor presión en la parte trasera del hub (cono) y la curva que conserva de manera más estable la presión en la parte frontal del hub; (ojiva secante1) para evitar frenar el aire anticipadamente. Así se toman las regiones de interés y se unen ambos perfiles en la parte donde se cruzan ambas curvas de presión. Debido a que la geometría obtenida tiene una transición de ángulos demasiado pronunciada (lo cual propicia la turbulencia), se optimiza esa región, agregando un arco tangente para reducir el cambio tan súbito en la presión. Posteriormente se modifica ese arco tangente para tratar de optimizar más el comportamiento de presiones (aunque ello repercute en una pérdida significativa de la presión negativa del perfil), obteniendo tres propuestas llamadas S-C1, S-C2 y S-C3. Ver figura 7a, 7b y 7c.

Como la mejor geometría, para el caso particular de estudio, se selecciona el perfil S-C2, el cual conserva ambas ventajas de los perfiles secante1 y cono, sin tener un impacto tan significativo en la turbulencia (como el perfil S-C1) y sin tener una disminución tan significativa en el pico de presión negativa característico del perfil en forma de cono. Ver gráfico 3.

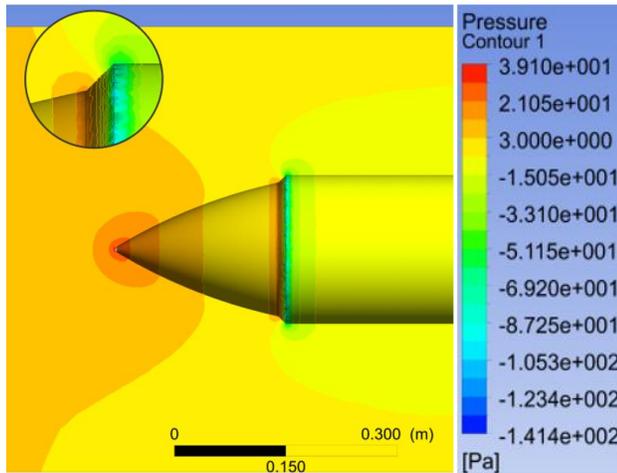


Figura 7 Contornos de presión del perfil S-C1.

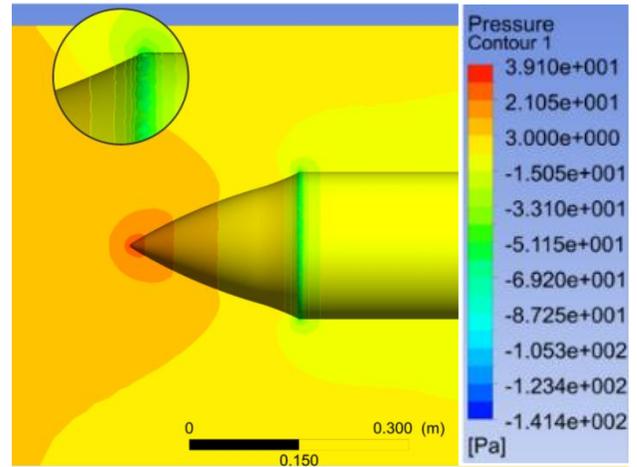


Figura 9 Contornos de presión del perfil S-C3.

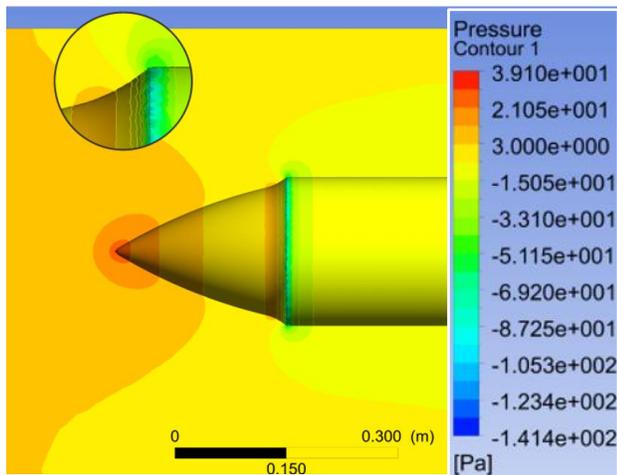


Figura 8 Contornos de presión del perfil S-C2.

En la figura 10 se presentan los contornos de presión para los perfiles semicircular y S-C2, es de resaltar que la región de diferencial de presiones en los álabes se encuentra más definida y aislada en el perfil S-C2 en comparación con el semicircular, teniendo las regiones de presión más concentradas sobre los álabes y no sobre hub.

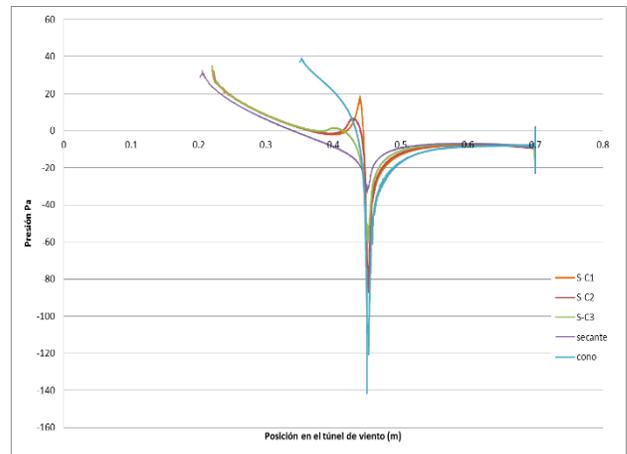


Gráfico 3 Curvas de presión para las diferentes modificaciones de la propuesta de HUB comparadas con las curvas de la geometría tipo secante y cono.

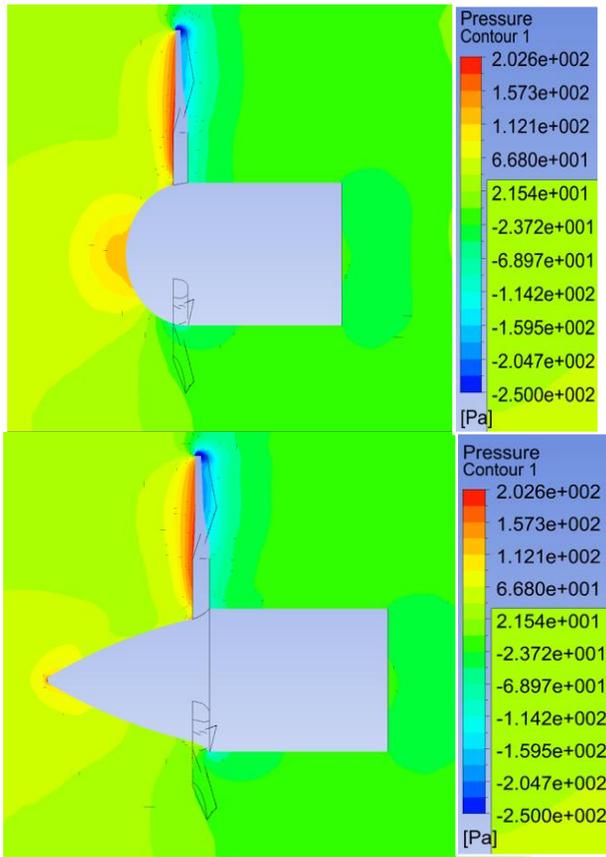


Figura 10 Contorno de presiones vista lateral de la comparación entre una turbina con hub semi circular (superior) y con el hub denominado S-C2 (inferior).

Las pruebas del perfil S-C2 se realizan sobre un aerogenerador comercial de 600W de potencia nominal, al cual se trabajó sobre velocidades de viento desde 2m/s hasta los 15m/s, siendo esta última la velocidad nominal promedio para la mayoría de los aerogeneradores comerciales de baja capacidad.

Se prueba el aerogenerador con el hub aerodinámico de fábrica, posteriormente se prueba el hub S-C2 (manufacturado mediante impresión 3d) y finalmente se realizan pruebas del mismo tipo sin tener un hub aerodinámico (perfil plano). Figura 11.

Los resultados obtenidos de la experimentación sobre el aerogenerador físico se presentan en la gráfica 4, en la cual se muestran, para las diferentes velocidades de viento, la frecuencia generada de línea a línea del generador eléctrico (tipo *brushless*) de imanes permanentes. Se aprecia también, que la propuesta de perfil llamada S-C2 propicia que el aerogenerador arranque a una velocidad de viento de 4.105 m/s, siendo 0.471 m/s antes que el perfil de hub con el que venía de fábrica la turbina, el cual hizo girar la turbina con 4.576 m/s. A su vez, comparando el perfil S-C2 contra el caso en el que no se utiliza ningún hub aerodinámico, la turbina con la propuesta de perfil empezó a girar a una velocidad de viento 0.884 m/s antes. En la misma gráfica 4, la curva perteneciente al perfil S-C2 se mantiene por encima de la curva del perfil original de la turbina y este a su vez del caso en el que no se use ningún perfil. Dichas curvas son de la frecuencia de generación del generador eléctrico, la cual depende de las revoluciones a las que gire el rotor.

Distribución de presiones del perfil S-C2

La distribución de presiones del perfil S-C2, considerando velocidad de viento de viento de 13.3m/s, se puede representar con las ecuaciones:

Para la sección del cono:

$$P = -9E+07x^6 + 3E+08x^5 - 5E+08x^4 + 4E+08x^3 - 2E+08x^2 + 4E+07x - 4E+06 \tag{10}$$

Para la sección de la secante:

$$P = 4E-08x^6 - 2E-05x^5 + 0.0021x^4 - 0.1495x^3 + 5.8674x^2 - 123.07x + 1157.4 \tag{11}$$

Modelado geométrico del perfil S-C2

Para el modelado geométrico de considera la ecuación:

$$x^2+y^2+280x+1214y-118895=0 \tag{12}$$

Con centro en (-140, -607) y radio=712 mm.

Y para la curva tangente (a la curva anterior) la ecuación:

$$x^2+y^2-86.8x-494.8y+63025.9=0 \tag{13}$$

Con centro en (43.4, 247) y radio=64.3 mm.



Figura11 Aerogenerador de 600 W con hub de perfil S-C2 (izquierda), perfil de fábrica (centro) y sin hub aerodinámico (derecha).

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Coordinación de Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (CIC) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), así como a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por su apoyo para el desarrollo de este proyecto.

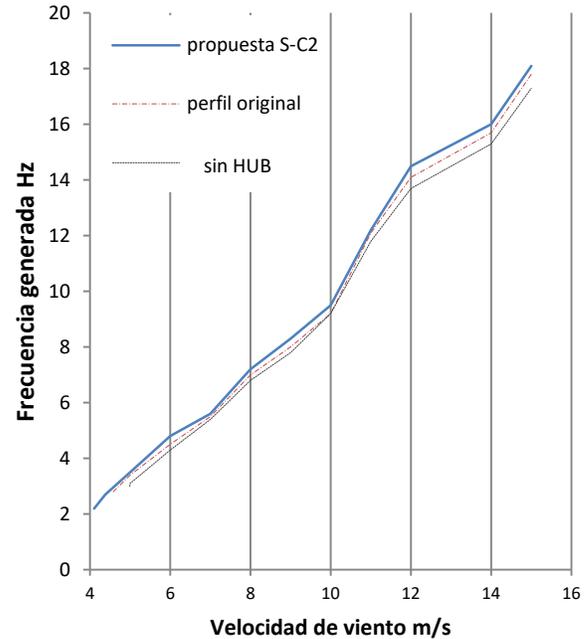


Gráfico 5 Frecuencia generada (hz) por el aerogenerador de 600 W, con el perfil S-C2, el perfil original (de fábrica) y sin hub aerodinámico.

Conclusiones

Se puede concluir que es posible diseñar y optimizar una geometría para el hub aerodinámico de una turbina de viento por medio de la curva de presión su perfil y simulaciones numéricas.

Se cumplió con los objetivos y se presenta una familia de perfiles aerodinámicos conformados por el S-C1 y sus variaciones S-C2 y S-C3.

Al confirmar que la turbina empieza a girar a una velocidad de viento 0.471 m/s antes con el perfil S-C2 que con el perfil de fábrica, ó .884 m/s antes que si no poseyera algún tipo de perfil, se obtiene un aumento en la generación de potencia eléctrica que aun cuando pudiera parecer pequeño es relevante en términos de potencia anual generada.

Finalmente, los autores consideramos que en el diseño de turbinas eólicas no debería de dejarse sin analizar el hub aerodinámico, pues como se demostró en el presente trabajo, éste elemento puede contribuir de manera significativa en la eficiencia de la maquina eólica.

Referencias

Agüera-Pérez, J. C. Palomares-Salas, J. J. González de la Rosa, J. G. Ramiro-Leo, & A. Moreno-Muñoz (2012), Basic meteorological stations as wind data source: A mesoscalar test, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 107–108, pp. 48–56.

D. LEGOURIÉRÉS (1983), *Energía eólica, Teoría, concepción y cálculo práctico de las instalaciones*; Masson,S.A.

Manwell, J.F., McGowan J,G. & Rogers A,L. (2009), *Wind Energy Explained; Theory, Design and Application*; University of Massachusetts, Amherst, USA; John Wiley & Sons, Ltd

Renewables 2014 Global Status Report, REN21

Flores Galindo, Diego Rodrigo (2006). *Diseño de perfiles aerodinámicos*. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Ticoman. Tesis. México D.F.

Gordillo Arias de Saavedra, José Manuel (2012). *Introducción a la Aerodinámica Potencial*. Ed. Paraninfo.

T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi (2001), *Wind Energy Handbook*. John Wiley and Sons.

B. Blocken (2014), 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 129, pp. 69–102, 2014.

J. Johansen, H. A. Madsen, N. N. Sørensen and C. Bak (2007), Numerical Investigation of a Wind Turbine Rotor with an aerodynamically redesigned hub-region. *Wind Energy Dept. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark*.

F. Wang, L. Bai, J. Fletcher, J. Whiteford, D. Cullen (2008), Development of small domestic wind turbine with scoop and prediction of its annual power output, *Renewable Energy*, Volume 33, Issue 7, July, Pages 1637-1651, ISSN 0960-1481.

Gomez-Rivera, William; Aperador-Chaparro, William and Delgado-Tobon, Emilio (2011). Rotor Development for a Small Wind Turbine (200 watts) through Local Technology Implementation. *Ing. Univ.*, vol.15, n.2, pp. 303-318. ISSN 0123-2126.

P.R. Ebert, D.H. Wood (2001); The near wake of a model horizontal-axis wind Turbine Part 3: properties of the tip and hub vortices; *Renewable Energy* 22, pp. 461–472.

Z. Simic, J. G. Havelka, & M. Bozicevic Vrhovcak (2013), Small wind turbines - A unique segment of the wind power market, *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 1027–1036.

R. Ramponi and B. Blocken (2012), CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters, *Build. Environ*, vol. 53, pp. 34–48.

B. Blocken and C. Gualtieri (2012), Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics, *Environ. Model. Softw.*, vol. 33, pp. 1–22.

N. J. Mulvany, L. Chen, J. Y. Tu, and B. Anderson (2004), Steady-State Evaluation of ' Two-Equation ' RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) Turbulence Models for High-Reynolds Number Hydrodynamic Flow Simulations, DSTO Platform Sciences Laboratory.

Gaona Hernández, Fredy (2010). Diseño y construcción de un generador eléctrico para un aerogenerador de baja potencia. UMSNH. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Tesis. Morelia, Mich. 2010.

Gómez Urieta, Erick Yuvaniel (2011). Diseño y manufactura del HUB y álabes de una turbina de viento, Facultad de Ingeniería Mecánica UMSNH.

International Standard IEC 61400-2. Wind turbines – Part 2: Design requirements for small wind turbines. IEC.

Glauert, E. (1946), Teoría del Ala y de la Hélice, Ministerio del Aire.

Análisis armónico de un aerogenerador y un STATCOM basado en una técnica mejorada para la obtención de la solución periódica

CONTRERAS-AGUILAR, Luis†*, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y JIMÉNEZ-BETANCOURT, Ramón.

Universidad de Colima, campus Coquimatlán, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Km 9 carretera Colima-Coquimatlán, Coquimatlán, Colima, México, C.P. 28400, Tel. 01 (312)316 11 65, Ext. 51451. luisc@ucol.mx.

Recibido Octubre 26 2016; Aceptado Noviembre 4, 2016

Resumen

Debido al cambio climático el interés sobre el uso de energías renovables se ha incrementado. Respecto a ello, los aerogeneradores son los que han cobrado mayor importancia debido a las grandes capacidades de recurso eólico y tecnologías disponibles para su aplicación. Por tal motivo, el interés sobre el modelado y las técnicas de análisis de estos dispositivos de generación de energía está en auge. De tal forma, que en este artículo se lleva a cabo un análisis de armónicos en un aerogenerador y un STATCOM, utilizando un procedimiento mejorado para la localización de soluciones periódicas de sistemas eléctricos. El proceso de la localización de soluciones periódicas está basado en la discretización del sistema de ecuaciones diferenciales con el mapa de Poincaré y un método tipo Newton es usado para obtener la solución periódica de forma rápida y eficiente. En adición, en esta propuesta se desarrolla una alternativa para mejorar el proceso de localización de soluciones periódicas, con el fin de impactar directamente en el rendimiento computacional requerido para determinar la solución.

Mapa de Poincaré, Método de Newton, Solución Periódica, Aerogenerador y STATCOM.

Abstract

Due to climate change the interest on the use of renewable resources has increased. In this regard, the wind turbines have become more important due to the large capacities of wind resources and technologies available for this application. Therefore, the interest on the modeling and analysis of these devices is growing. In this way, in this paper a harmonic analysis is carried out for a wind turbine and a STATCOM system by using an improved method for to compute periodic solutions of electric systems. The process for locating periodic solutions is based on a discretization of the ordinary differential equations with the Poincaré map and the efficient solution is carried out with the application of Newton's method. In addition, in this proposal a new alternative is developed for improve the process for locating periodic solutions in order to impact directly on the computational effort required to determine the solution.

Poincaré map, Newton Method, Periodic Solution, wind power and STATCOM.

Citación: CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y JIMÉNEZ-BETANCOURT, Ramón. Análisis armónico de un aerogenerador y un STATCOM basado en una técnica mejorada para la obtención de la solución periódica. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2016, 3-9: 34-47

*Correspondencia al Autor:(Correo Electrónico: luisc@ucol.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Debido al gran crecimiento en la demanda de energía eléctrica a nivel mundial durante las últimas décadas, fue necesario construir un número considerable de plantas generadoras de electricidad, que en su mayoría se basan en la quema de combustibles fósiles. Este hecho ha contribuido directamente sobre el cambio climático, debido a las emisiones de CO₂ y de gases de efecto invernadero que se producen en tal proceso. Por tal motivo, en muchos países los apoyos gubernamentales para el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan generar energía eléctrica con menor impacto sobre el medio ambiente se ha incrementado.

Actualmente las tecnologías de energías renovables tienen más presencia en los sistemas eléctricos de potencia de todo el mundo. En este contexto, la generación de energía eólica es la tecnología que ha experimentado el crecimiento más rápido entre todos los tipos de tecnologías renovables que actualmente se investigan (T. Ackermann, 2005). De tal forma que, la integración de grandes parques eólicos sobre el sistema eléctrico de potencia afectará considerablemente el comportamiento dinámico, ya que los sistemas de generación eólicos y los sistemas convencionales de generación presentan diferentes características dinámicas (Slootweg, 2003).

Respecto a las investigaciones sobre la energía eólica se han direccionado en diferentes vertientes. Por ejemplo, mejoras en los modelos de turbinas de viento (R. Piwko et al., 2005), características de operación de los parques eólicos (Energy, GE, 2005), impacto de la integración al sistema eléctrico (Charles Smith, Milligan, DeMeo, & Parsons, 2007), predicción de los recursos eólicos y su impacto en el sistema eléctrico (M. Ahlstrom et al., 2005), estrategias de control (Charles Smith, Milligan, DeMeo, & Parsons, 2007) y entre otros.

Por otro lado, la demanda de potencia reactiva en parques eólicos es un tema de interés, principalmente por el tipo de tecnología que se utiliza como generador (generador de inducción). Por lo tanto, los bancos de capacitores o dispositivos capaces de suministrar potencia reactiva como el STATCOM (Compensador estático síncrono) y SVC (Compensador estático de VARs) juegan un rol muy importante en este tipo de instalaciones. Contribuciones como (Xu, Yao, & Sasse, 2006), (Hasan & Farooq, 2012), (Fadaeinedjad, Moschopoulos, & Moallem, 2008), (Qi, Langston, & Steurer, 2008) y (Saad Saoud, Lisboa, Ekanayake, Jenkis, & Strbac, 1998) muestran las ventajas y desventajas de utilizar estos tipos de dispositivos en sistemas con generación eólica, donde se expone la ventaja de utilizar el STATCOM sobre el uso del SVC, razón por la cual se opta en este trabajo incluir el STATCOM como dispositivo de compensación de potencia reactiva.

Respecto al modelado, la importancia y viabilidad de contar con modelos matemáticos apropiados que permitan comprender la operación en estado estable y dinámico, así como su interacción con diferentes dispositivos ha sido un tema de interés (Saad Saoud & Jenkins, Simple Wind Farm Dynamic Model, 1995) y (Ekanayake, Holdsworth, Wu, & Jenkins, 2003). Además, se debe tener en cuenta el incremento de los problemas asociados a la calidad de energía, principalmente armónicos, cuando se incluyen dispositivos basados en electrónica de potencia. De tal forma, que herramientas para determinar la solución periódica de forma eficiente son de gran utilidad cuando se involucran múltiples dispositivos que tienen dinámicas y constantes de tiempo diferentes.

Bajo el contexto anterior, el uso del método de mapa de Poincaré ha sido extensamente usado para determinar la solución periódica de sistemas eléctricos de forma rápida y eficiente. Algunos intentos en la aplicación de esta metodología sobre parques eólico se han reportado en (Peña Gallardo, Medina, & Anaya Lara, 2013). En esta contribución se aplican técnicas de procesamiento en paralelo para el cálculo eficiente de la solución periódica de un modelo de parque eólico en el marco de referencia de las fases. En (Charles Smith, Milligan, DeMeo, & Parsons, 2007) la metodología del mapa de Poincaré es aplicada a un modelo de parque eólico en el marco de referencia síncrono (qd0) y se realizan estudios post-disturbio. En este trabajo se considera un modelo de generador de inducción de velocidad fija en el marco de referencia de las fases, así como un modelo de STATCOM y su transformador incluyendo la no linealidad del núcleo. Además, se logra aplicar el método de mapa de Poincaré sobre el modelo considerando distintos periodos entre las variables de estado, por ejemplo los periodos asociados a las variables de estado del rotor y estator del generador. En base a esta aplicación se realiza un estudio enfocado al análisis de armónicos del sistema bajo prueba. Más aun, en esta contribución se logran mejorar los rendimientos computacionales para el cálculo eficiente de la solución periódica, esto basado en un enfoque de transformación del método de mapa de Poincaré con la bien conocida transformada de Park.

Método de mapa de Poincaré

La representación en el dominio de tiempo de un sistema eléctrico no lineal puede ser descrito como:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(t, \mathbf{x}), \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \tag{1}$$

Donde \mathbf{x} es un vector de estado n -dimensional y \mathbf{x}_0 es la condición inicial. Si el conjunto de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (EDO) tiene entradas periódicas, tal $f(t, \cdot)$ es también T -periódica, entonces puede ser representado como un ciclo límite para \mathbf{x}_∞ en términos de otro elemento periódico o en términos de una función arbitraria de período T (T. S. Parker and L. O. Chua, 1989).

Si se asume una órbita transitoria simple que comienza en x_i y termina en x_{i+1} después de un periodo de integración conocido como Ciclo Base (BC), su comportamiento dinámico es convenientemente descrito por sus interceptos en el mapa de Poincaré (Σ) como se muestra en la Figura 1,

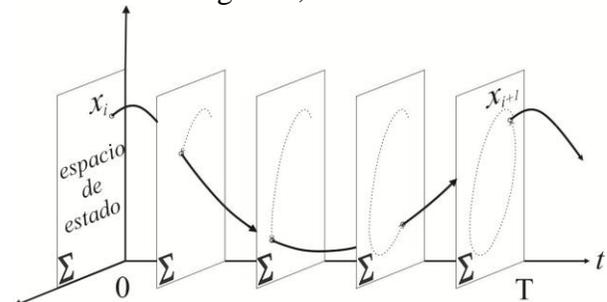


Figura 1 Órbita transitoria simple sobre el mapa de Poincaré.

Ahora si una perturbación Δx de la variable de estado se aplica al ciclo límite x_∞ , entonces (1) toma la forma,

$$\dot{\mathbf{x}} + \Delta \dot{\mathbf{x}} = f(t, \mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) \tag{2}$$

La linealización de (2) tomando los términos de primer orden en la expansión de las series de Taylor resulta en,

$$\dot{\mathbf{x}} + \Delta \dot{\mathbf{x}} \approx f(t, \mathbf{x}) + J(t, \mathbf{x})\Delta \mathbf{x} \tag{3}$$

Donde la matriz de derivadas parciales $J(t, \mathbf{x})$ representa la matriz jacobiana de (3). Simplificando (3) se conserva que,

$$\Delta \dot{x} \approx J(t, x) \Delta x \quad (4)$$

Y la perturbación Δx evoluciona de acuerdo a (T. S. Parker and L. O. Chua, 1989),

$$\Delta \dot{x}_i = \Phi(t, x) \Delta x_0 \quad (5)$$

Donde Φ es llamada la matriz de transición de estado.

Entonces, las variables de estado se pueden extrapolar al ciclo límite utilizando un método tipo Newton,

$$\mathbf{x}_\infty = \mathbf{x}_i + (\mathbf{I} - \Phi)^{-1}(\mathbf{x}_{i+T} - \mathbf{x}_i) \quad (6)$$

Donde \mathbf{x}_∞ son las variables de estado en el ciclo límite, \mathbf{I} es la matriz identidad, \mathbf{x}_i son las variables de estado al principio del CB y \mathbf{x}_{i+1} son las variables de estado al final del CB.

Con el cálculo de las variables de estado en el ciclo límite se puede obtener, por integración directa, la solución T -periódica en $\mathbf{x}_\infty(t)$ en $t = T$. Más allá, el mayor esfuerzo computacional para determinar la solución periódica es requerido en el cálculo de la matriz de transición Φ , ya que para una aplicación del método se requiere integrar sobre un periodo n -veces dependiendo del espacio del sistema. De tal forma, que algunas estrategias para mejorar dicho calculo ya se han reportado y van desde métodos mejorados considerando simetría de medio ciclo (Segundo Ramírez & Medina, 2010) y procesamiento en paralelo (García, N., and E. Acha, 2004).

A. Procedimiento de diferenciación numérica

Hay tres formas de determinar la matriz de transición de estados Φ (Semlyen & Medina, 1995), estos son: procedimiento de Diferenciación Numérica (DN), procedimiento de Aproximación Directa (AD) y procedimiento de Expansión de matriz Exponencial Discreta (EED) (Segundo Ramírez & Medina, 2010). En este trabajo se usa el método de diferenciación numérica por su simplicidad en la formulación y algoritmo.

En esta aproximación para determinar la matriz de transición Φ por columnas requiere de la aplicación de una perturbación secuencial en el vector de variables de estado determinadas en el ciclo base, donde la perturbación se expresa como,

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_0 + \xi \mathbf{e}_i = \mathbf{x}_0 + \xi [0 \dots 1 \dots 0]_i^T \quad (7)$$

Donde ξ es un pequeño valor de $1e^{-6}$.

La aproximación se basa en la diferenciación numérica definida como,

$$\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_0 = \xi \mathbf{e}_i \quad (8)$$

Usando (8) en la expresión para un problema n -dimensional descrito en (5), se mantienen la siguiente relación,

$$\Delta \mathbf{x}_{i+1} = \Phi \xi \mathbf{e}_i \quad (9)$$

Consecuentemente, si $i = 1, 2, \dots, n$, entonces Φ puede ser obtenida desde (9) como,

$$\Phi = \frac{1}{\xi} \Delta \mathbf{x}_{i+1} \quad (10)$$

B. Técnica mejorada del mapa de Poincaré.

Cuando se trabaja con modelos matemáticos de sistema eléctricos trifásicos en el marco de referencias de las fases pueden convenientemente ser descritos por modelos más simples en otros marcos de referencia. Aprovechando esta peculiaridad, en esta propuesta se desarrolla un proceso de transformación sobre el método de mapa de Poincaré y preservando las características de los modelos matemáticos en el marco de referencias de las fases de los dispositivos. Más importante, con la propuesta de transformación se logra unificar múltiples periodos entre las variables de estado de los modelos para converger a una solución y después transformarla a la solución periódica por medio de su anti-transformada. Para lograr lo anterior, se hace uso de la bien conocida transformada de Park, la cual permite la transformación directa entre las variables de estado de un sistema eléctrico trifásico preservando el orden del sistema n -dimensional. De tal forma, que la solución de (6) para esta nueva propuesta es,

$$\mathbf{x}_{\infty}^{abc} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{x}_{\infty}^{qd0} \quad (11)$$

Donde \mathbf{K}^{-1} es la transformada inversa de Park (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 1994) definida por,

$$\mathbf{K}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Con la solución mediante el método tipo Newton como,

$$\mathbf{x}_{\infty}^{qd0} = \mathbf{x}_i^{qd0} + (\mathbf{I} - \Phi^{qd0})^{-1} (\mathbf{x}_{i+T}^{qd0} - \mathbf{x}_i^{qd0}) \quad (13)$$

Y la transformación de las variables de estado \mathbf{x}_i^{abc} para cualquier instante de tiempo t_i es,

$$\mathbf{x}_i^{qd0} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{x}_i^{abc} \quad (14)$$

Donde \mathbf{K} es la transformada de Park definida por,

$$\mathbf{K} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \text{sen}(\theta) & \text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Modelo del aerogenerador incluyendo un STATCOM

La Figura 2 muestra la configuración general del caso de estudio desarrollado en este trabajo. El sistema consiste de un aerogenerador y un STATCOM. El STATCOM se implementa mediante el uso de un transformador incluyendo la saturación del núcleo y conexión Y- Δ con el fin de acoplar el convertidor de la fuente de voltajes conmutados (VSC, por sus siglas en inglés) hasta el punto de acoplamiento común (PCC).

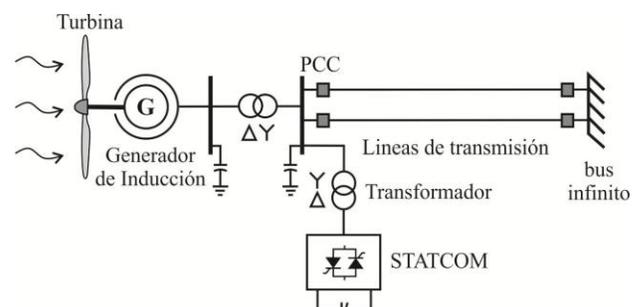


Figura 2 Esquema de aerogenerador y STATCOM.

A. Modelo de la turbina eólica

La relación entre la potencia mecánica extraída desde una turbina eólica y la velocidad del viento es (T. Ackermann, 2005),

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \rho A v_w^3 \quad (16)$$

Donde P_m es la potencia mecánica de salida de la turbina, C_p se conoce como el coeficiente de eficiencia de potencia, ρ es la densidad del aire, A es el área de la turbina y v_w es la velocidad del viento.

Cuando se utilizan valores por unidad, la ecuación (16) puede ser normalizada como,

$$P_{m_pu} = k_p C_{p_pu} v_{w_pu}^3 \quad (17)$$

Donde los valores en pu se calculan mediante el uso de cantidades base y k_p es una ganancia de potencia con un valor de $k_p \leq 1$, y para este trabajo $k_p = 0,73$ obtenido desde Simulink/MATLAB.

El coeficiente de eficiencia $C_p(\lambda, \beta)$, el cual es una relación entre la velocidad específica λ y el ángulo de los alabes β , se calcula,

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (18)$$

Con

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (19)$$

Donde c_{1-6} son coeficientes constantes con valores tomados de Simulink/MATLAB. De la característica $C_p - \lambda$, con $\beta = 0^\circ$ y $\lambda = 8.1$ el valor nominal de c_{p_nom} es igual a 0.48 Simulink / MATLAB, entonces,

$$C_{p_pu} = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{C_{p_nom}} \quad (20)$$

El par mecánico de la turbina eólica se define como (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 1994),

$$T_{m_pu} = \frac{P_{m_pu}}{\omega_{r_pu}} \quad (21)$$

Por otro lado, para los aerogeneradores de gran capacidad la topología más común es la turbina eólica de eje horizontal. En esta configuración, el sistema de acoplamiento mecánico de la turbina-generador se puede describir por medio de un sistema equivalente de una masa (Pérez, 2011),

$$\frac{1}{H_{total}} = \frac{1}{H_{tur}} + \frac{1}{H_{gen}} \quad (22)$$

Donde H_{tur} es la inercia de la turbina eólica, H_{gen} es la inercia del generador y H_{total} es la inercia total equivalente.

B. Modelo del generador

La Figura 3 muestra el circuito equivalente del generador de inducción jaula de ardilla implementado en este trabajo. Las ecuaciones de voltaje para las fases a, b, c en valores por unidad se expresan como (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 1994),

$$\mathbf{v}_{s,r}^{abc} = \mathbf{r}_{s,r} \mathbf{i}_{s,r}^{abc} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \Psi_{s,r}^{abc} \quad (23)$$

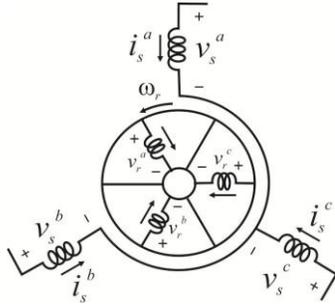


Figura 3 Circuito equivalente de la máquina de inducción jaula de ardilla con conexión estrella.

Donde el superíndice abc denota las fases del sistema, el subíndice s,r indica las variables del estator y el rotor, $\Psi_{s,r}^{abc}$ es el vector de flujo, $\mathbf{i}_{s,r}^{abc}$ es el vector de corrientes, $\mathbf{r}_{s,r}$ es la matriz diagonal de resistencias, $\mathbf{v}_{s,r}^{abc}$ es el vector de voltajes de entrada y ω_b es la velocidad angular base. Los flujos Ψ se relacionan con las corrientes a través de la inductancia \mathbf{L} de la siguiente forma,

$$\Psi_{s,r}^{abc} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{i}_{s,r}^{abc} \quad (24)$$

Con

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{sr}^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \quad (25)$$

Y

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{ls} + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_{ls} + L_m \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{L}_{sr} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (28)$$

Donde θ_r es la posición actual del rotor, L_{ls} , L_{lr} y L_m son las inductancias de dispersión del estator, rotor y la inductancia de magnetización, respectivamente, (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 1994). Mediante la combinación de (23) y (24) se obtiene la siguiente formulación en términos de corriente,

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i}_{s,r}^{abc} = \omega_b [\mathbf{L}^{-1} (\mathbf{v}_{s,r}^{abc} - (\mathbf{r}_{s,r} + \mathbf{G}_{s,r}) \cdot \mathbf{i}_{s,r}^{abc})] \quad (29)$$

Con la matriz

$$\mathbf{G}_{s,r} = \omega_{r_pu} \left[\frac{d}{d\theta_r} \mathbf{L} \right] \quad (30)$$

Donde \mathbf{L} es la matriz de inductancias y ω_{r_pu} es la velocidad del rotor en pu.

El torque electromagnético, la velocidad y la posición el rotor asociadas a las ecuaciones mecánicas del sistema se definen como (Krause, Wasynczuk, & Sudhoff, 1994),

$$T_{e_pu} = \left(\frac{2}{3} \right) \mathbf{i}_s^{abcT} \frac{d}{d\theta_r} [\mathbf{L}_{sr}] \mathbf{i}_r^{abc} \quad (31)$$

$$\frac{d}{dt} [\omega_{r_pu}] = \frac{(T_{e_pu} - T_{m_pu})}{2H_{total}} \quad (32)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = [\omega_{r_pu}] \omega_b \quad (33)$$

Donde T_{e_pu} es el torque electromagnético en pu y T_{m_pu} es el torque mecánico calculado desde (21).

C. Modelo del STATCOM

El circuito equivalente del STATCOM es mostrado en la Figura 4. Este consiste de un convertidor de fuentes de voltaje conmutadas (VSC), con un esquema de conmutación basado en técnicas de modulación por ancho de pulso. Además, un transformador conexión Y-Δ es utilizado para acoplar la VSC con el PCC.

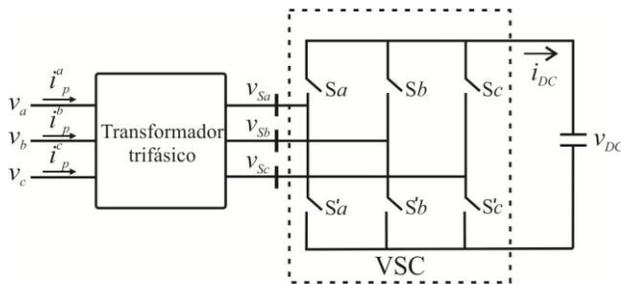


Figura 4 Circuito equivalente para el STATCOM.

Transformador: El modelo del transformador no lineal utilizado en este trabajo está basado en (García, Madrigal, & Acha, 2001). De tal forma, que las ecuaciones que representan a una unidad monofásica del transformador están dadas por,

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{\omega_b}{L_p} \left[v_p - (r_p + r_c)i_p + r_c \left(\frac{i_s}{a} + i_m \right) \right] \quad (34)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{\omega_b}{L_s} \left[r_c(i_p - i_m) - (r_s + r_c)i_s - a^2(v_{Sa} - v_{Sb}) \right] \quad (35)$$

Los flujos asociados a la característica no lineal del núcleo ferromagnético se pueden expresar como,

$$\frac{d\phi_m}{dt} = \omega_b r_c \left[i_p - \frac{i_s}{a} - i_m \right] \quad (36)$$

Donde, i_p , i_s y i_m son las corrientes en el lado primario, secundario y la corriente de magnetización, respectivamente.

La característica no lineal del transformador es representada por un polinomio de la forma (García, Madrigal, & Acha, 2001),

$$i_m = 0.7576\phi_m + 0.69\phi_m^7 \quad (37)$$

Una expansión al modelo trifásico con las diferentes conexiones puede ser desarrollada a partir de (35), (36) y (37).

Modelo VSC: Un convertidor bidireccional trifásico de seis pulsos es utilizado para construir una fuente de voltaje conmutada de dos niveles. Cada switch es un arreglo de un GTO, IGBT o MOSFET en anti-paralelo con un diodo. Además, las pérdidas en los semiconductores se desprecian, por tal motivo, el modelo ideal de los switches es usado en este trabajo. Entonces, las discontinuidades en las funciones de conmutación bidireccionales se identifican por S y S' para cada fase, que puede ser encendido o apagado (1 o 0), respectivamente. También, S y S' son complementarios para cada fase, por lo que $S + S' = 1$. Entonces los voltajes $v_{S_{abc}}$ a tierra en el lado de corriente alterna son,

$$v_{Sa} = \left[S_a - \frac{(S_a + S_b + S_c)}{3} \right] v_{dc} \quad (38)$$

$$v_{Sb} = \left[S_b - \frac{(S_a + S_b + S_c)}{3} \right] v_{dc} \quad (39)$$

$$v_{Sc} = \left[S_c - \frac{(S_a + S_b + S_c)}{3} \right] v_{dc} \quad (40)$$

Donde v_{dc} es el voltaje del capacitor en el lado de corriente directa y S_{abc} son 1 o 0 de acuerdo al control basado en las técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM).

Enlace de corriente directa del capacitor: El comportamiento dinámico del voltaje del capacitor en el lado de corriente directa es,

$$\frac{d}{dt} v_{dc} = \frac{\omega_b i_{dc}}{B_{dc}} \quad (41)$$

Con

$$i_{dc} = [(i_p^a - i_p^c) \quad (i_p^b - i_p^a) \quad (i_p^c - i_p^b)] \times \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (42)$$

D. Modelo de la línea de transmisión

En este trabajo, se considera una línea de transmisión corta, por tanto, se utiliza un modelo de parámetros concentrados simple,

$$\frac{d}{dt} i_L = \frac{\omega_b (v_k - r_L i_L - v_m)}{x_L} \quad (43)$$

Donde v_k y v_m son los voltajes en el lado k y m respectivamente, r_L y x_L son la resistencia y reactancia de la línea de transmisión.

Casos de estudio

El caso de estudio es el mostrado en la Figura 2. El sistema es conformado por 49 ecuaciones diferenciales. Las condiciones iniciales, para todas las simulaciones, son establecidas en cero. El método de integración seleccionado para resolver las ecuaciones diferenciales es el Runge-Kutta de cuarto orden con un paso de integración de $1 \mu s$. El paso de integración es muy pequeño debido principalmente a que el sistema conformado resulta ser un sistema rígido.

Esto ocurre cuando se involucran constantes de tiempo de diferente proporción y principalmente cuando se incluyen modelos discretos y alta no-linealidad, como el transformador con saturación. El bus infinito es representado por una fuente equivalente cosenoidal de 1 pu. Los parámetros asociados al caso de estudio están dados en la tabla I,

Generador eólico		Turbina eólica	
n_p	6	R	27 m
X_{ls}	0.1248 pu	ρ	1.225 Kg/m ³
X_{lr}	0.0884 pu	c_1	0.5176
X_m	1.8365 pu	c_2	116
r_r	0.0073 pu	c_3	0.4
r_s	0.0076 pu	c_4	5
H_{gen}	0.250 pu	c_5	21
H_{tur}	2.410 pu	c_6	0.0068
Transformador		Parámetros adicionales	
$r_s = r_r$	0.005 pu	r_L	0.01
$x_s = x_r$	0.05 pu	x_L	0.1 pu
a	$1/\sqrt{3}$	Bc	0.2 pu

Tabla 1 Parámetros del sistema de prueba.

Validación: Con el fin de validar el esquema implementado, se utiliza el simulador por medio de bloque en Simulink de MATLAB. Una simulación muy corta (0.1 seg.) incluyendo el arranque del aerogenerador es realizada. Los modelos incluidos en esta simulación son: bloque de turbina eólica, teniendo en cuenta un ángulo $\beta=0^\circ$, un promedio de velocidad del viento de 13 m/s. Un bloque de la máquina asíncrona donde se selecciona el modo de jaula de ardilla. Un bloque transformador trifásico operado como transformador no-lineal. Un bloque de puente universal en combinación con un generador PWM, a una frecuencia base de 60 Hz y una señal triangular portadora de 900 Hz, un índice de modulación de 0.8 y un ángulo de fase del generador PWD de 60° .

Los parámetros de simulación en Simulink son: método de integración ode15s, el tamaño máximo de paso es de $1e-6$ y la tolerancia relativa máxima se ajusta en $1e-6$. Para comparar las señales se seleccionan las variables de estado de corriente de la fase *a* en el estator y voltaje del capacitor en el lado de dc del STATCOM, Figura 5. La respuesta transitoria durante para el arranque del sistema presenta una excelente concordancia entre el modelo de los bloques de Simulink.

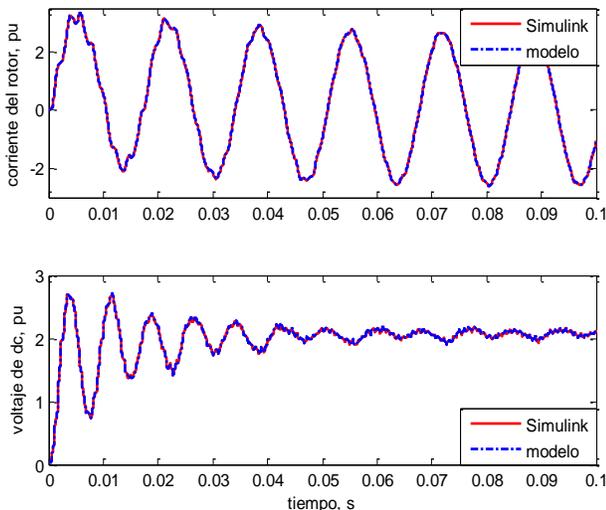


Figura 5 Respuesta transitoria del sistema bajo prueba.

Técnica mejorada para determinar la solución periódica: En esta sección se analiza la solución al estado estacionario periódico. El estudio se lleva a cabo con el aerogenerador interactuando con el STATCOM, una velocidad de viento de 13 m/s es usada como entrada para determinar el torque mecánico de entrada al generador. 30 ciclos iniciales se toman para determinar el ciclo base y a ese tiempo inician las aplicaciones del método tipo Newton. El error máximo para determinar la solución periódica del sistema se toma en 1×10^{-10} .

El esfuerzo computacional fue medido con una PC con procesador Intel Core i5 y 8 GB de Memoria. Además, para el caso base se utiliza un periodo de discretización en el mapa de Poincaré de $T = 1/f$, donde f es la frecuencia base del sistema, para este caso 60 Hz. La Tabla II muestra el número de aplicaciones que toma al método para determinar una solución periódica al periodo base de discretización. Es importante notar que el tiempo requerido para lograr la convergencia fue de 21.337 min.

NA	error
CB	3.909732e-002
1	3.518666e-002
2	1.184015e-005
3	1.248596e-011

Tabla 2 Numero de aplicaciones (NA) del método mapa de Poincaré para el caso base.

Con el objetivo de probar computacionalmente las mejoras de la propuesta se seleccionan los periodos de discretización de $T = 1/af$, donde a es un numero entero y $a = [1, 2, 3, 4, 5]$. La Figura 6 muestra el tiempo de cómputo requerido para cada factor analizado, así como el número de aplicaciones requeridas para determinar la solución periódica con la técnica propuesta. Es importante notar que el menor número de aplicaciones del método es cuando se usa el factor de 1, es decir la discretización del mapa de Poincaré en el periodo base, mientras que para factores de hasta 5 se requieren 4 aplicaciones del método, lo cual produce un esfuerzo computacional extra, que no es notorio debido a que la discretización disminuye requiriendo un tiempo menor para lograr cada aplicación del método. De tal forma, que en base a los resultados obtenidos se observan reducciones en tiempo de computo de hasta un 72.42 % con respecto al caso base.

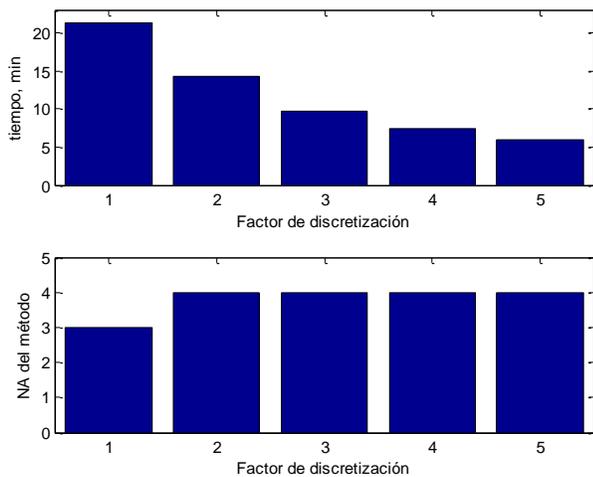


Figura 6 Tiempo de cómputo y número de aplicaciones del método de mapa de Poincaré.

Análisis armónico: Teniendo en cuenta la naturaleza de la distorsión armónica en el dispositivo STATCOM, y el transformador no línea bajo ciertas circunstancias de operación, un estudio orientado a armónicos se efectúa al caso de estudio. Una vez que calcula la solución periódica de forma eficiente con la nueva propuesta, la transformada discreta de Fourier es aplicada a un conjunto de variables seleccionadas. Las variables son, las corrientes del estator en el aerogenerador, el voltaje en terminales del aerogenerador, las corrientes en el lado de la estrella del transformador que acopla el aerogenerador y el sistema, los voltajes del PCC, las corrientes del lado estrella del transformador STATCOM y las corrientes de una línea de transmisión. Con la finalidad de observar el efecto del índice de modulación de frecuencia mf , sobre el contenido armónico de las variables seleccionadas se realizan 3 casos para $mf = [9, 15, 27]$. Las figuras 7, 8 y 9 muestran el contenido armónico de las variables para estos tres casos de estudio. Ahí se observa que para índices de modulación de frecuencia menor el contenido armónico es mayor en las variables. En el caso cuando $mf = 27$ para las corrientes del aerogenerador el 5to armónico es el mayor con 0.0164 pu.

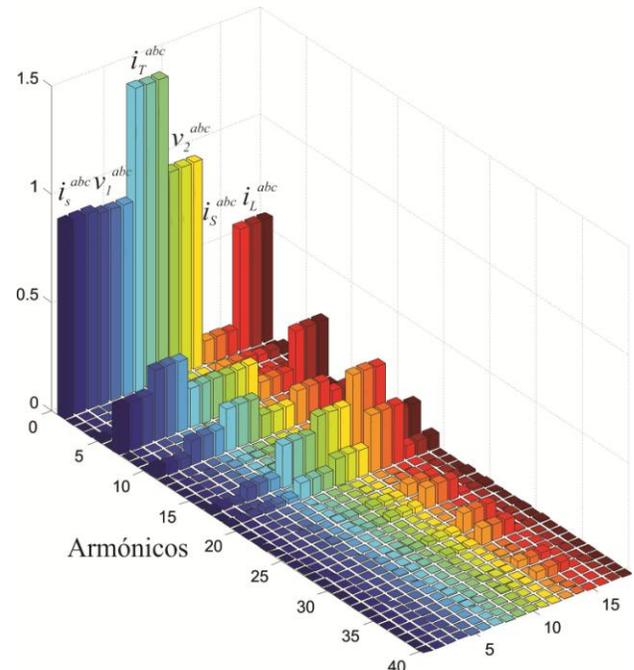


Figura 7 Armónicos de variables seleccionadas con $mf=9$.

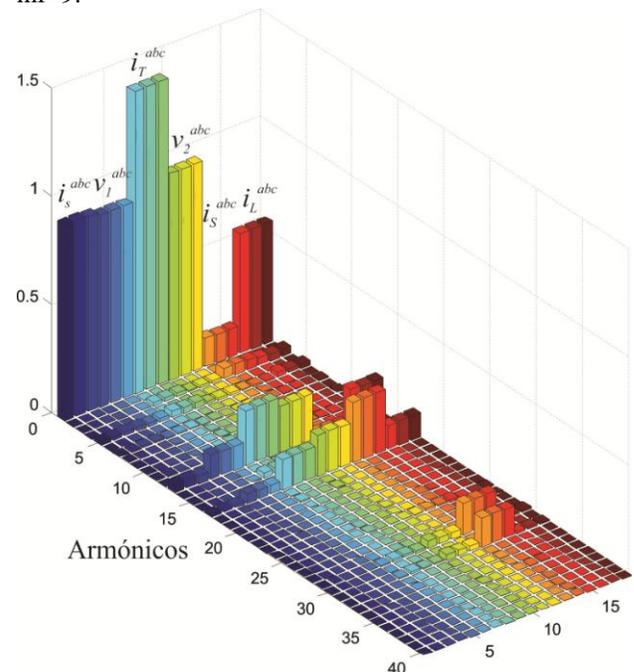


Figura 8 Armónicos de variables seleccionadas con $mf=15$.

La Figura 10 muestra la distorsión armónica total con respecto a la fundamental. Especialmente se ha detectado la mayor distorsión en las corrientes del STATCOM.

La mayor distorsión armónica encontrada es del orden de los 500%, esto en las corrientes del STATCOM. Mientras que la menor es 2.14 % y se encuentra en los voltajes del aerogenerador.

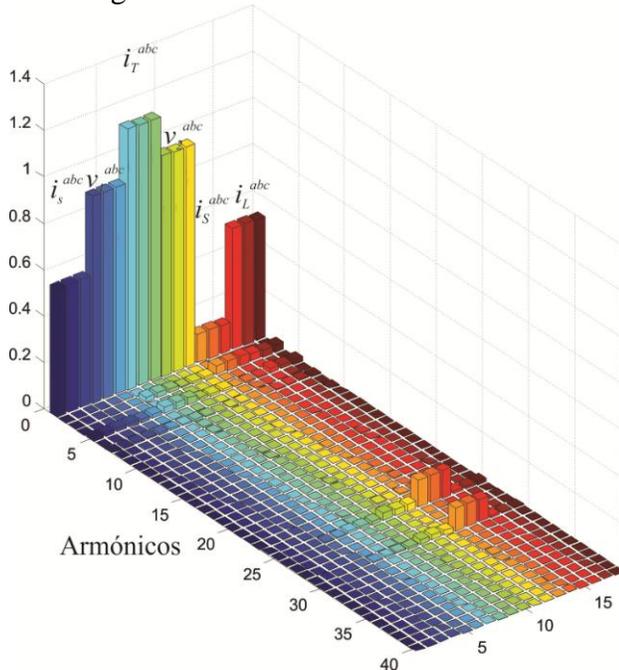


Figura 9 Armónicos de variables seleccionadas con $mf=27$.

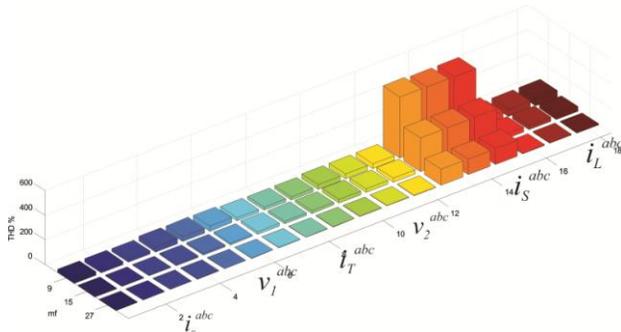


Figura 10 Porcentaje de la distorsión armónica total.

Agradecimiento

Los autores agradecen al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por el apoyo financiero recibido para llevar a cabo esta investigación, bajo el proyecto PRODEP No. DSA-103.5-15-6897.

Conclusiones

En este trabajo se presentó una nueva propuesta para determinar la solución periódica de sistemas eléctricos trifásicos que pueden estar operando con distintas frecuencias entre sus variables de estado. El objetivo de esta propuesta es poder preservar los modelos matemáticos en el marco de referencia de las fases. Un caso de estudio que consiste en un aerogenerador y un sistema STATCOM fue presentado para probar la nueva propuesta. El orden del sistema es de 39 ecuaciones diferenciales en la cual incluye inherentemente alta rigidez debido a los modelos matemáticos no lineales del transformador y STATCOM. La nueva propuesta muestra reducciones de hasta 72 % en esfuerzo computacional requerido para obtener la solución periódica es logrado. Más aun, se pudo logra obtener la solución periódica y aplicar la transformada discreta de Fourier para obtener el contenido armónico y el porcentaje de la distorsión total en el sistema. Además se mostró que entre mayor índice de modulación de frecuencia menor contenido armónico en el sistema. Distorsiones en las formas de onda de hasta 500 % son detectadas en las corrientes del STATCOM.

Referencias

Ackermann, T. (2005). *Wind Power in Power Systems*. England: John Wiley & Sons.

Charles Smith, J., Milligan, M. R., DeMeo, E. A., & Parsons, B. (2007). *Utility wind integration and operating impact state of the art* (Vol. 22). IEEE Trans. Power Syst.

Ekanayake, J. B., Holdsworth, L., Wu, X., & Jenkins, N. (2003, May). *Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines* (Vol. 18). IEEE Transactions on Power Systems.

Energy, GE. (2005). *The Effects of Integrating Wind Power on Transmission System Planning, Reliability, and Operations: Report on Phase 2*. Prepared for The New York State Energy Research and Development Authority.

Fadaeinedjad, R., Moschopoulos, G., & Moallem, M. (2008). *Using STATCOM to Mitigate Voltage Fluctuations Due to Aerodynamic Aspects of Wind Turbines*. Canadá: School of Engineering Science, Simon Fraser University, Surrey.

García, N., Madrigal, M., & Acha, E. (2001). *Interaction of the STATCOM and its associated transformer non-linearity: time domain modelling and analysis*. University of Glasgow, Scotland, U.K.

García, N., & E. Acha, (2004) "Periodic Steady-State Analysis of Large-Scale Electric Systems Using Poincaré Map and Parallel Processing", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 19, No. 4, pp. 1784-1793, Nov.

Hasan, N., & Farooq, S. (2012). *Dynamic Performance Analysis of DFIG based Wind Farm with STATCOM and SVC* (Vol. 2). International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering,.

Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. (1994). *Analysis of Electric Machinery*. New York: McGraw-Hill.

M. Ahlstrom *et al.* (2005). The future of wind forecasting and utility operations. *Working With Wind; Integrating Wind into the Power System*.

Parker, T. S., & L. O. Chua, (1989) "Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems", NY: Springer Verlag.

Peña Gallardo, R., Medina, A., & Anaya Lara, O. (2013). *A Methodology for the Efficient Computer Representation of Dynamic Power Systems: Application to Wind Parks* (Vol. 13). Wind Energy.

Peña, R., Medina, A., Anaya Lara, O., & McDonald, J. R. (2011). *Steady-State Solution of Fixed-Speed Wind Turbines Following Fault Conditions Through Extrapolation to the Limit Cycle* (Vol. 57). IETE Journal of Research.

Pérez, C. (2011). *Análisis de la Respuesta de Estado Estable de Parques Eólicos de Generación Usando el Método de Diferencias Finitas*. tesis de maestría, UMSNH.

Qi, L., Langston, J., & Steurer, M. (2008). *Applying a STATCOM for Stability Improvement to an Existing Wind Farm with Fixed-Speed Induction Generators*. EUA: U.S. Department of Energy.

R. Piwko *et al.* (2005). Wind energy delivery issues. *Working With Wind; Integrating Wind into the Power System*.

Saad Saoud, Z., & Jenkins, N. (1995). *Simple Wind Farm Dynamic Model* (Vol. 142). IEE Proc. Gener. Trans. Distrib.

Saad Saoud, Z., Lisboa, M. L., Ekanayake, J. B., Jenkis, N., & Strbac, G. (1998). *Application of a STATCOMs to Winds Farms* (Vol. 145). England: IEE, Proc. Gener. Trans. Distrib.

Segundo Ramírez, J., & Medina, A. (2010). *An Enhanced Process for the Fast Periodic Steady State Solution of Nonlinear Systems by Poincaré Map and Extrapolation to the Limit Cycle*. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation.

Segundo Ramírez, J., & Medina, A. (2010). *Computation of the Steady-State Solution of Nonlinear Power Systems by Extrapolation to the Limit Cycle Using a Discrete Exponential Expansion Method*. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation.

Semlyen, A., & Medina, A. (1995). *Computation of the Periodic Steady State in Systems with Nonlinear Components Using a Hybrid Time and Frequency Domain Methodology* (Vol. 10). IEEE Transactions on Power System.

Slootweg, J. G. (2003). *Wind Power: Modelling and Impact on Power System*. PhD thesis, Technische Universiteit Delft.

Xu, L., Yao, L., & Sasse, C. (2006). *Comparison of Using SVC and STATCOM for Wind Farm Integration*. Reino Unido: International Conference on Power System Technology.

Análisis numérico del flujo asimétrico variando la posición axial del impulsor

LIZARDI, Arturo†*, LÓPEZ, Raymundo, TERRES, Hilario y MORALES, Juan.

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Avenida San Pablo Xalpa 180, Azcapotzalco, Reynosa Tamaulipas, 02200 Ciudad de México, CDMX, México

Recibido Octubre 7, 2016; Aceptado Noviembre 16, 2016

Resumen

Se presenta el análisis numérico de la función corriente (Ψ) y de las componentes de velocidad radial (u) y axial (w) originadas por el movimiento de un fluido incompresible que gira en el interior de un depósito cilíndrico cerrado y que es producido por un disco impulsor. Se modelan y resuelven las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento en estado permanente. Los resultados son para un radio del impulsor, ocho posiciones del mismo sobre el eje axial y dos tipos de fluido: agua y gasolina, que corresponden a un Reynolds de 2.74×10^4 y 0.63×10^4 , respectivamente. Algunos resultados muestran que el flujo se compone de dos zonas: una que gira en sentido horario, ubicada por debajo del disco rotatorio, y otra que gira en sentido anti horario, ubicada por encima del mismo. Al variar la posición axial del impulsor de manera ascendente, sobre el eje del cilindro, se encontró que: la componente de velocidad radial positiva (u) disminuyó 24.94% para $Re=2.74 \times 10^4$ y 10.99% para $Re=0.63 \times 10^4$; la componente de velocidad axial positiva (w), por debajo del disco giratorio, disminuyó 22.85% y 28.55%, para los mismos Reynolds; y la componente de velocidad axial positiva (w), por encima del impulsor, aumentó 105.3% y 118.30%, para los mismos Reynolds.

Flujo asimétrico, líneas de corriente, velocidad radial y axial.

Abstract

In this work the streamlines, the velocity components radial (u) and axial (w) produced by the moving of a fluid inside a closed cylindrical deposit with a rotating impeller are obtained by a numerical methods. The equations of continuity and conservation of momentum steady state for an incompressible fluid are modeled and solved numerically together with the appropriate boundary conditions. The results for a radius of the impeller, eight positions thereof on the axial axis and two different fluids, water and gasoline, are presented. The corresponding Reynolds number for the physical situation is: 2.74×10^4 and 0.63×10^4 respectively. Some results indicate that the flow structure presents two zones; the one located underneath the impeller rotates clockwise, whereas the one located above de impeller moves counter-clockwise. By varying the axial position of impeller ascending manner on the cylinder axis, it was found that: the positive radial velocity component (u) decreased 24.94% for $Re=2.74 \times 10^4$ and 10.99% for $Re=0.63 \times 10^4$; the positive axial velocity component (w) underneath of the impeller decreased 22.85% and 28.55% for the same Reynolds numbers; and the positive axial velocity component (w) above the impeller increased 105.3% and 118.30% for the same Reynolds numbers.

Asymmetric flow, streamlines, radial and axial velocity.

Citación: LIZARDI, Arturo, LÓPEZ, Raymundo, TERRES, Hilario y MORALES, Juan. Análisis numérico del flujo asimétrico variando la posición axial del impulsor. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2016, 3-9: 59-71

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

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Nomenclatura

i	punto discreto en la dirección radial
j	punto discreto en la dirección axial
g	aceleración gravitatoria (m/s^2)
Renúmero de Reynolds	
r	coordenada radial adimensional
z	coordenada axial adimensional
Δr	espacio de la malla en dirección radial
Δz	espacio de la malla en dirección axial
u	componente de velocidad radial adimensional
v	componente de velocidad tangencial adimensional
w	componente de velocidad axial adimensional
P	presión [Pa]
R	coordenada radial dimensional [m]
Z	coordenada axial dimensional [m]
U	componente de velocidad radial [m/s]
V	componente de velocidad tangencial [m/s]
W	componente de velocidad axial [m/s]
γ	función circulación dimensional [m^2/s]
ζ	función vorticidad dimensional [1/s]
ψ	función corriente dimensional [m^3/s]
ν	viscosidad cinemática [m^2/s]
ρ	densidad [kg/m^3]
Ω	velocidad angular del impulsor [rad/s]
Γ	función circulación adimensional
ξ	función vorticidad adimensional
Ψ	función corriente adimensional

Introducción

El flujo rotatorio confinado en una cámara cilíndrica vertical, que es generado por un impulsor radial, es importante por las diversas aplicaciones prácticas que tiene en el campo de la ingeniería y por el análisis teórico que presenta al resolver sus ecuaciones rectoras. Entre las aplicaciones prácticas se pueden mencionar el flujo en maquinaria centrífuga tal como bombas y compresores, cámaras de mezclado, aireadores tipo turbina para plantas de tratamiento de agua, etc.

Las expresiones matemáticas que describen el comportamiento dinámico del flujo rotatorio parten de las ecuaciones de Navier-Stokes, ecuación diferencial parcial no lineal y elíptica. La no linealidad y el acoplamiento de sus términos hacen que su solución sea compleja. La característica de segundo grado de la ecuación de Navier-Stokes, genera problemas de implementación de las condiciones de frontera para definir el problema en estudio. Las primeras derivadas restringen el uso de aproximaciones de bajo orden debido a la difusión numérica. Adicionalmente el relevante comportamiento elíptico de las ecuaciones para fluidos incompresibles, complican la determinación del campo de presiones que definen la correcta descripción del flujo. Por ello la simulación numérica, al paso del tiempo, se ha desarrollado ampliamente.

El objetivo de este trabajo es conocer la estructura del movimiento de un fluido viscoso, incompresible, en el interior de un recipiente cilíndrico vertical, movimiento que se genera por un disco rotatorio. Las ecuaciones de continuidad y de conservación de la cantidad de movimiento se expresan y resuelven en función de la vorticidad, la circulación y la función de corriente meridional. Los resultados obtenidos permiten describir el movimiento radial y axial del fluido girando en el interior de la cámara cilíndrica, en términos del número de Reynolds, y el factor de forma, dado por la relación alto/radio del recipiente. Se analiza el campo de la función corriente meridional (Ψ) y las componentes de velocidad radial (u) y axial (w) para un radio del impulsor, ocho posiciones del mismo sobre el eje axial y dos tipos de fluido: agua y gasolina que, de acuerdo a la situación física del problema, corresponden a un número de Reynolds de 2.74×10^4 y 0.63×10^4 , respectivamente.

Algunos trabajos reportados en la literatura sobre el flujo rotatorio, desde el punto de vista numérico, son: Pao H-P [1] propuso un método numérico para estudiar un fluido viscoso incompresible confinado en una cámara cilíndrica donde la tapa superior está rotando a una velocidad angular constante y las paredes y fondo del recipiente permanecen fijos. Se analiza la función corriente y circulación, la distribución de velocidades y el coeficiente de par para un rango del número de Reynolds de 1 a 400. Bertelá y Gori [2] presentaron un método numérico que permite resolver el flujo estable y transitorio de un fluido dentro de una cámara cilíndrica con la cubierta rotando. En el estudio se analizan las componentes de velocidad, líneas de corriente y coeficiente de torque para un número de Reynolds de 100 y 1000, y para una relación geométrica de 0.5, 1 y 2. Lang *et al.* [3] estudiaron numéricamente el flujo laminar estable en un cilindro fijo con un disco rotando en la tapa superior. El trabajo resalta el análisis del coeficiente de torque y de los flujos volumétricos primario y secundario para un rango del número de Reynolds de 1 a 10^5 y para una relación geométrica de 0.02 a 3. Valentine, D. T. y Jahnke, C. C. [4] describieron el campo de flujo dentro de un contenedor cilíndrico inducido por la rotación de las tapas superior e inferior, manteniendo la pared lateral fija. En el trabajo se demuestra que se generan puntos de estancamiento a lo largo del eje de rotación entre el plano medio de simetría y las tapas en rotación. Las relaciones geométricas analizadas fueron 0.5, 0.8, 1.0, y 1.5, se examinaron en un intervalo de números de Reynolds de 100 a 2000. Khalili *et al.* [5] proveyeron una solución numérica para un flujo laminar inducido por un disco rotatorio situado asimétricamente respecto a la altura, dentro de un cilindro.

Presentaron el análisis de las líneas de corriente y componentes de velocidad tangencial así como el coeficiente de torque para los distintos posicionamientos del disco para una relación geométrica de 1 a 2 y un rango de números de Reynolds de 1 a 5000. Yu P., *et al.* [6] estudiaron numéricamente el flujo en una cámara cilíndrica cerrada con un disco giratorio en el fondo y cuyo radio es menor al de la cámara. El comportamiento del flujo se investigó para una amplia gama de parámetros. Se analizaron, en el plano meridional, las líneas de corriente, momento angular y vorticidad, para diferentes Reynolds (1000, 1500 y 2000), relación geométrica H/R (1.5) y relación de radios R/rd (1.5, 1.8, 2.0, 2.2, 2.6, 3.0, 5.0). Sturzenegger J. C., *et al.* [7] estudiaron el flujo axisimétrico dentro de un recipiente cilíndrico con una varilla a lo largo de su eje de simetría. El flujo se produce por la rotación de uno de los extremos del cilindro, de ambos extremos, o de la pared lateral. Se presentan expresiones analíticas (para números de Reynolds bajos) del campo de velocidad azimutal, extendiendo la solución para el caso sin varilla.

Modelo Físico

El sistema a estudiar consiste en un recipiente cilíndrico cerrado de 0.045 m de radio y 0.09 m de altura, que tiene un disco impulsor de 0.005 m de espesor y 0.035 m de radio, y cuya posición vertical se variará en ocho posiciones distintas sobre el eje de la cámara. El impulsor se sujeta, desde la parte superior, por medio de un eje de 0.01 m de radio, que gira a una velocidad angular constante de 13.61 rad/s. En el interior del depósito se tiene un fluido viscoso e incompresible de propiedades físicas constantes, Fig.1.

Planteamiento Matemático

El modelo matemático que describe el flujo axisimétrico en estado permanente de un fluido viscoso, incompresible, que gira en el interior de un recipiente cilíndrico, se expresa a través de las ecuaciones continuidad y conservación la cantidad de movimiento en coordenadas polares cilíndricas (R, Φ, Z) [8].

$$\frac{\partial U}{\partial R} + \frac{U}{R} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial R} - \frac{V^2}{R} + W \frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial R} + v \left[\frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} - \frac{U}{R^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right] \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial R} + \frac{U V}{R} + W \frac{\partial V}{\partial Z} = v \left[\frac{\partial^2 V}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial V}{\partial R} - \frac{V}{R^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right] \quad (3)$$

$$U \frac{\partial W}{\partial R} + W \frac{\partial W}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Z} + v \left[\frac{\partial^2 W}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial W}{\partial R} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right] - g \quad (4)$$

En este sistema de ecuaciones dimensionales las incógnitas son las tres componentes de velocidad (U, V, W) y la presión (P).

Pero se tiene el problema de que la presión en cualquier punto del fluido depende de las componentes de velocidad. Para salvar esta dificultad, eliminando el término de la presión, se hace una transformación de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento en función de la vorticidad (ζ), circulación (γ) y función corriente meridional (ψ). Una vez hecha la transformación de las ecuaciones, éstas se adimensionalizan, discretizan y resuelven. La forma adimensional

$$u \frac{\partial \Gamma}{\partial r} + w \frac{\partial \Gamma}{\partial z} = \frac{1}{\text{Re}} \left[\nabla^2 \Gamma - \frac{2}{r} \frac{\partial \Gamma}{\partial r} \right] \quad (5)$$

resultante es [1]

$$u \frac{\partial \xi}{\partial r} + w \frac{\partial \xi}{\partial z} - \frac{u \xi}{r} - \frac{1}{r^3} \frac{\partial (\Gamma^2)}{\partial z} = \frac{1}{\text{Re}} \left[\nabla^2 \xi - \frac{\xi}{r^2} \right] \quad (6)$$

$$\nabla^2 \Psi - \frac{2}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} = r \xi \quad (7)$$

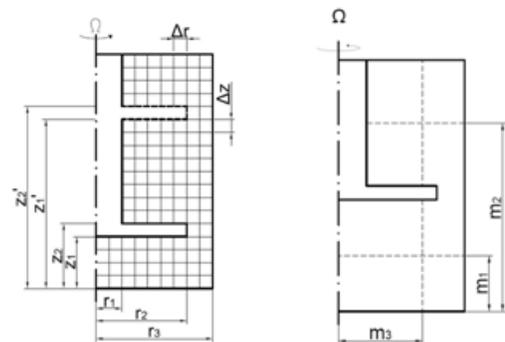


Figura 1 Representación física del sistema a analizar, malla generada y ejes de referencia para el análisis

Los parámetros que relacionan las variables adimensionales ($r, z, u, v, w, \Psi, \Gamma, \xi$) con las dimensionales ($R, Z, U, V, W, \psi, \gamma, \zeta$) están definidos por las siguientes ecuaciones [8, 9]

$$\begin{aligned} \frac{R}{r_3} &= r, \quad \frac{Z}{r_3} = z, \quad \frac{U}{\Omega r_3} = u, \quad \frac{V}{\Omega r_3} = v, \\ \frac{W}{\Omega r_3} &= w, \quad \frac{\Psi}{\Omega r_3^3} = \Psi, \quad \frac{\gamma}{\Omega r_3^2} = \Gamma, \\ \frac{\zeta}{\Omega} &= \xi, \quad Re = \frac{\Omega r_3^2}{\nu} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \gamma &= 2\pi VR, \quad \zeta = \frac{\partial U}{\partial Z} - \frac{\partial W}{\partial R}, \\ U &= \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial Z}, \quad W = -\frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} \end{aligned} \quad (9)$$

En donde r_3 es el radio interior del recipiente, Ω es la velocidad angular del impulsor y Re es el número de Reynolds definido para este sistema. Las ecuaciones de transporte de la circulación (5) y de la vorticidad tangencial (6) son ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden no lineales de tipo parabólico. La ecuación de Poisson para la función corriente meridional (7) es una ecuación diferencial parcial de segundo orden de tipo elíptico [10]. Las condiciones de frontera son [11]

$$\begin{aligned} r = 0, \quad \Psi = 0, \quad \Gamma = 0, \quad \xi = 0 \\ 0 \leq z \leq z_1 \\ r = r_3, \quad \Psi = 0, \quad \Gamma = 0, \quad \xi = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} \\ 0 \leq z \leq z_3 \\ z = z_1, \quad \Psi = 0, \quad \Gamma = r^2, \quad \xi = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \\ 0 \leq r \leq r_2 \\ z = z_2, \\ r_1 \leq r \leq r_2 \\ z_1 \leq z \leq z_2 \quad \Psi = 0, \quad \Gamma = r^2, \quad \xi = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} \\ r = r_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_2 \leq z \leq z_3, \\ r = r_1, \\ z = 0, \quad \Psi = 0, \quad \Gamma = 0, \quad \xi = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \\ 0 \leq r \leq r_3 \\ z = z_3, \\ r_1 \leq r \leq r_3 \end{aligned} \quad (10)$$

Solución numérica

Para resolver las ecuaciones que rigen en el interior del sistema (5), (6) y (7), junto con las condiciones de frontera (10), es necesario transformarlas a un espacio discreto, el cual es el espacio manejado por las computadoras. En el método numérico se aplica un esquema de diferencias finitas para reemplazar las ecuaciones diferenciales parciales por expresiones algebraicas aproximadas. La aproximación empleada en el método numérico para las ecuaciones que rigen en el depósito y las fronteras del mismo son de segundo y cuarto orden, respectivamente. En la Fig. 1 se representa la malla en el plano meridional continuo (r, z) para el flujo axisimétrico. Las ecuaciones en diferencias finitas que rigen el movimiento del fluido en el interior del sistema se muestran en la referencia [12].

Para obtener los campos de las funciones corriente meridional (Ψ), circulación (Γ) y vorticidad tangencial (ξ) se elaboró un programa de cómputo en lenguaje de programación C++. El programa realiza el mallado en el plano (r, z), aplica las ecuaciones (5), (6) y (7), en diferencias finitas, a cada nodo interno del sistema y las ecuaciones (10), previamente discretizadas, a cada nodo ubicado en la frontera del mismo. Posteriormente, por medio de una subrutina, resuelve el sistema de ecuaciones en forma iterativa hasta encontrar la convergencia.

El criterio de convergencia utilizado es del tipo de error relativo, de la forma: $\max \left[\frac{\Psi^{\sigma+1} - \Psi^{\sigma}}{\Psi^{\sigma}} \right] < \varepsilon$. El orden de precisión de ε , en este trabajo, fue de 0.0001. Para determinar las componentes de velocidad radial (u) y axial (w), se adimensionalizan y discretizan las ecuaciones que definen a la función corriente (9), y se emplean los resultados obtenidos en el sistema de ecuaciones anterior. Las expresiones resultantes en diferencias finitas son:

$$\begin{aligned} u_{i,j} &= \frac{\Psi_{i,j-2} - 8\Psi_{i,j-1} + 8\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j+2}}{12 \Delta r \Delta z i}; \\ w_{i,j} &= \frac{\Psi_{i+2,j} - 8\Psi_{i+1,j} + 8\Psi_{i-1,j} - \Psi_{i-2,j}}{12 \Delta r^2 i} \end{aligned} \quad (11)$$

Resultados y discusión

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones junto con las condiciones de frontera se hicieron corridas para dos tipos de fluido: agua y gasolina que, junto con la geometría del sistema, corresponden a un número de Reynolds de 2.74×10^4 y 0.63×10^4 , respectivamente. El sistema se acotó con los siguientes valores: $r_1=0.01$ m, $r_2=0.035$ m, $r_3=0.045$ m, $z_3=0.09$ m, $z_2=z_1+0.005$ m y $\Omega=13.61$ rad/s. La posición del impulsor, z_1 , se varió en ocho posiciones distintas sobre el eje axial. La distribución de las líneas de corriente (Ψ), para los dos fluidos, se muestran en las Figs. 2 y 3.

En la Fig. 2, sistema con número de Reynolds 2.74×10^4 y posición del impulsor z_1 de 0.01, 0.05, y 0.075 m, se observa que las partículas de fluido son impulsadas por el disco hacia la pared del recipiente.

Al acercarse a ella el flujo generado se divide en dos: una parte se dirige hacia la zona inferior del depósito, formando una circulación en sentido horario, y otra parte se dirige hacia la zona superior del cilindro, formando una circulación en sentido anti horario. El campo de la función corriente muestra que lejos de los núcleos formados el flujo volumétrico va disminuyendo, haciéndose presente la condición de frontera de gasto cero en las paredes de la cámara, eje de rotación, fondo del depósito y superficie rígida. Los valores máximos que toma la función corriente en los núcleos, para el flujo horario (+) y anti horario (-), para Reynolds 2.74×10^4 y para ocho posiciones en el eje axial se presentan en la Tabla 1.

Los resultados indican que el valor máximo de la función corriente meridional, para el flujo horario (+), se va reduciendo conforme el impulsor va ascendiendo sobre el eje axial, alcanzando una magnitud máxima y mínima de 0.1336 y 0.1011, respectivamente, es decir hay un decremento del 24.33%. Lo anterior es debido a que cuando el disco giratorio se encuentra en la parte inferior, las partículas de fluido ubicadas por debajo del mismo se distribuyen en un área pequeña, provocando que la cantidad de movimiento que traen consigo se manifieste en un valor más alto del flujo volumétrico. Por otro lado, cuando el disco rotatorio se encuentra en la parte superior de la cámara, el flujo se distribuye en una zona más grande, provocando un descenso del flujo de volumen. Este mismo fenómeno se manifiesta para el flujo anti horario (-), pero de manera inversa.

Es decir, cuando el impulsor se encuentra en la parte inferior, el flujo por encima del mismo se distribuye en un área mayor y el gasto volumétrico es pequeño, y cuando el disco se encuentra en la parte superior, el flujo se distribuye en una zona menor y el gasto de volumen es grande. Las magnitudes mínima y máxima, para el flujo anti horario (-), son -0.1027 y -0.1774, respectivamente, es decir hay un incremento del 72.74%.

La disminución del valor de la función corriente respecto al caso anterior es consecuencia del incremento de la viscosidad cinemática del fluido.

Posición z_1 (m)	$\Psi_{\text{mín}} (+)$		$\Psi_{\text{mín}} (-)$	
	Agua	Agua	Gasolina	Gasolina
0.01	0.1336	-0.1027	0.1327	-0.0941
0.02	0.1191	-0.1042	0.1163	-0.0965
0.03	0.1130	-0.1090	0.1085	-0.1013
0.04	0.1075	-0.1155	0.1021	-0.1084
0.05	0.1033	-0.1259	0.0972	-0.1187
0.06	0.1026	-0.1481	0.0944	-0.1335
0.07	0.1018	-0.1716	0.0923	-0.1546
0.075	0.1011	-0.1774	0.0915	-0.1693

Tabla 1 Función corriente meridional en los núcleos para $Re=2.74 \times 10^4$ (agua) y $Re=0.63 \times 10^4$ (gasolina)

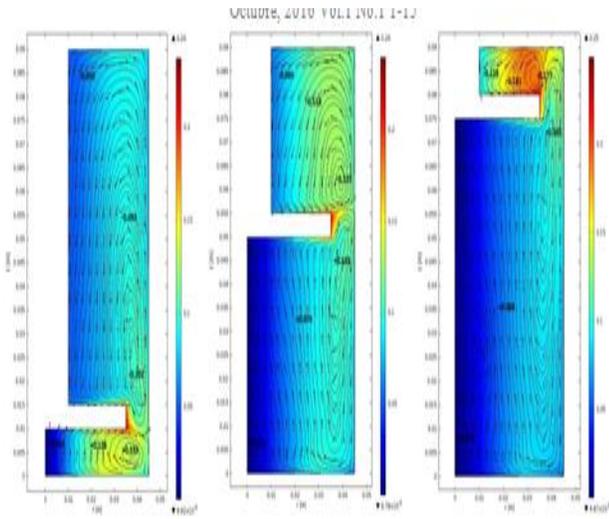


Figura 2 Líneas de función corriente adimensional (Ψ) para $Re=2.74 \times 10^4$ (agua) y posiciones del impulsor z_1 de 0.01, 0.05, y 0.075 m.

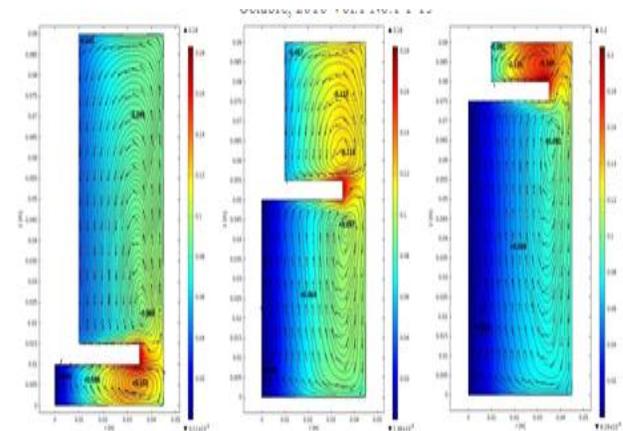


Figura 3 Líneas de función corriente adimensional (Ψ) para $Re=0.63 \times 10^4$ (gasolina) y posiciones del impulsor z_1 de 0.01, 0.05, y 0.075 m

El comportamiento para el sistema con número de Reynolds 0.63×10^4 , Fig. 3, es parecido aunque con magnitudes menores. Para este caso el valor máximo y mínimo que toma la función corriente, Tabla 1, para el flujo horario (+), es 0.1327 y 0.0915, es decir hay un decremento del 31.05%. Por otro lado la magnitud mínima y máxima, para el flujo anti horario (-), es -0.0941 y -0.1693, es decir hay un incremento del 79.91%. En este caso los resultados también muestran que cambiar el impulsor de posición vertical de manera ascendente, el flujo volumétrico disminuye para el caso horario (+) y aumenta para el caso anti horario (-).

En la Fig. 4, se muestra el comportamiento de la componente de velocidad radial (u) al variar “z”, para un Reynolds de 2.74×10^4 , en un radio de referencia $m_3=0.03$ m y en ocho ubicaciones del impulsor (z_1). Se precia para $z_1=0.01$ m que la componente de velocidad radial comienza en cero debido a la condición de frontera de no deslizamiento que hay sobre el fondo del depósito.

Posteriormente se observa la zona de la capa límite hidrodinámica donde el flujo se dirige horizontalmente hacia la pared del recipiente, esto se indica por el signo positivo de la velocidad. Se aprecia que el valor de la velocidad radial va aumentando hasta un máximo positivo de 9.66×10^{-3} y de allí comienza a disminuir hasta cero, al situarse sobre el disco rotatorio. Posteriormente se observa una zona con velocidad cero, que es la parte que ocupa el impulsor. A partir de este punto, se aprecia la zona de la otra capa límite hidrodinámica donde ahora el flujo se dirige hacia el eje del sistema, esto se indica por el signo negativo de la velocidad. En esta parte se observa que la velocidad radial va aumentando hasta un máximo negativo de -6.70×10^{-3} y de allí nuevamente disminuye su magnitud hasta llegar a cero, cuando se ubica sobre la tapa del cilindro. Para las otras posiciones del disco giratorio se tiene el mismo comportamiento pero con valores distintos. Las magnitudes máximas positivas y negativas para ocho ubicaciones del impulsor se muestran en la Tabla 2.

Los resultados indican que el valor máximo positivo de la componente de velocidad radial (u), para el radio de referencia de $m_3=0.03$ m y las ocho posiciones de z_1 , se va reduciendo conforme el disco giratorio va ascendiendo sobre el eje axial, alcanzando una magnitud máxima y mínima de 9.66×10^{-3} y 7.25×10^{-3} , respectivamente, es decir hay un decremento del 24.94%. Lo anterior es debido a que el centro de los núcleos positivos de las líneas de corriente también reduce su valor al variar de manera ascendente la posición axial del impulsor.

Para el número de Reynolds de 0.63×10^4 , Fig. 5, se aprecia el mismo comportamiento pero con magnitudes distintas, en este caso los valores máximos positivos y negativos de la componente de velocidad radial para $z_1=0.01$ m son de 7.82×10^{-3} y -6.90×10^{-3} . En la Tabla 2 se muestran los valores máximos positivos y negativos de la componente de velocidad radial para otras posiciones del disco giratorio (z_1). Los resultados indican, como en el caso anterior, que el valor máximo positivo de la componente de velocidad radial (u), se va reduciendo conforme el impulsor va ascendiendo sobre el eje axial. Para este caso la magnitud máxima y mínima es de 7.82×10^{-3} y 6.96×10^{-3} , respectivamente, es decir hay un decremento del 10.99%. Finalmente, al tomar como referencia el número de Reynolds de 2.74×10^4 y compararlo con el de 0.634×10^4 , se encontró que los valores máximos positivos de la componente de velocidad radial (u) se redujeron en promedio 10.83%.

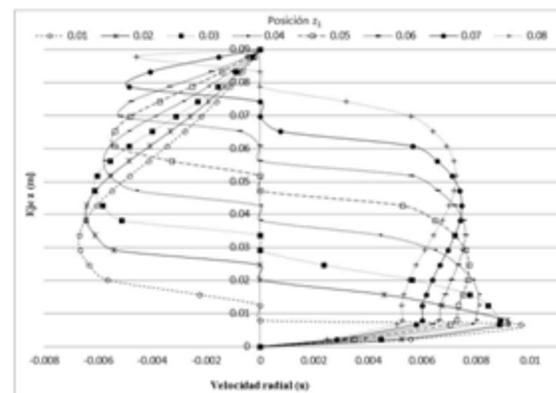


Figura 4 Componente de velocidad radial (u) para $Re=2.74 \times 10^4$ y distintas posiciones del impulsor (z_1)

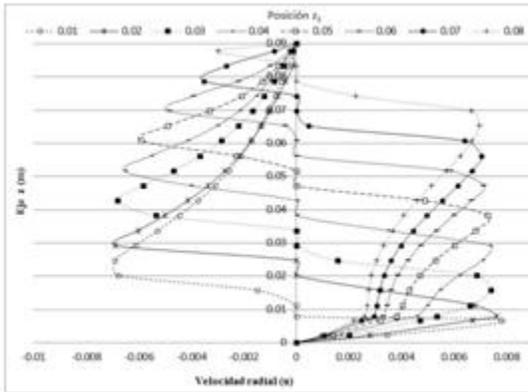


Figura 5 Componente de velocidad radial (u) para $Re=0.63 \times 10^4$ y distintas posiciones del impulsor (z_1)

Posición z_1 (m)	$u_{m\acute{a}x}$ (+) Agua	$u_{m\acute{a}x}$ (-) Agua	$u_{m\acute{a}x}$ (+) Gasolina	$u_{m\acute{a}x}$ (-) Gasolina
0.01	9.66×10^{-3}	-6.70×10^{-3}	7.82×10^{-3}	-6.90×10^{-3}
0.02	9.23×10^{-3}	-6.44×10^{-3}	7.63×10^{-3}	-6.88×10^{-3}
0.03	8.91×10^{-3}	-6.15×10^{-3}	7.41×10^{-3}	-6.80×10^{-3}
0.04	8.10×10^{-3}	-5.80×10^{-3}	7.36×10^{-3}	-6.55×10^{-3}
0.05	7.74×10^{-3}	-5.39×10^{-3}	7.28×10^{-3}	-5.91×10^{-3}
0.06	7.61×10^{-3}	-5.17×10^{-3}	7.13×10^{-3}	-4.86×10^{-3}
0.07	7.48×10^{-3}	-4.85×10^{-3}	7.05×10^{-3}	-3.51×10^{-3}
0.08	7.25×10^{-3}	-4.58×10^{-3}	6.96×10^{-3}	-2.97×10^{-3}

Tabla 2 Componente de velocidad radial (u) máxima para distintas ubicaciones del impulsor (z_1), para $Re=2.74 \times 10^4$ (agua) y $Re=0.63 \times 10^4$ (gasolina)

En la Fig. 6, se muestran los resultados de la componente de velocidad axial (w) al variar “r”, para un Reynolds de 2.74×10^4 , en una posición axial de referencia dada por $m_1=(z_1/2)$ m y distintas ubicaciones del impulsor (z_1). Para $z_1=0.01$ m se aprecia que la componente de velocidad vertical comienza en cero sobre el eje de simetría, posteriormente se observa la zona de la capa límite hidrodinámica donde el flujo se dirige verticalmente hacia el disco giratorio, esto se indica por el signo positivo de la velocidad. Se aprecia que el valor de la velocidad axial va aumentando hasta un máximo positivo de 9.45×10^{-3} y de allí comienza a disminuir hasta cero, donde a partir de este punto se presenta un cambio en el sentido del flujo.

A partir de allí se observa la zona de la otra capa límite hidrodinámica donde ahora el flujo se dirige hacia el fondo del sistema, esto se indica por el signo negativo de la velocidad. En esta parte se aprecia que la velocidad vertical va aumentando hasta un máximo negativo de -21.35×10^{-3} y de allí nuevamente disminuye su magnitud hasta llegar a cero cuando se ubica sobre la pared del cilindro. Para las otras posiciones del disco rotatorio se tiene el mismo comportamiento pero con valores distintos. Las magnitudes máximas positivas y negativas para ocho ubicaciones del impulsor se muestran en la Tabla 3.

Los resultados indican que el valor máximo positivo de la componente de velocidad axial (w), para la posición vertical de referencia dada por $m_1=(z_1/2)$ m y las ocho posiciones de z_1 , se va reduciendo conforme el disco giratorio va ascendiendo sobre el eje axial, alcanzando una magnitud máxima y mínima de 9.45×10^{-3} y 7.29×10^{-3} , respectivamente, es decir hay un decremento del 22.85%. Lo anterior es debido a que, como en el caso de la componente radial (u), el centro de los núcleos positivos de las líneas de corriente también reduce su valor al variar de manera ascendente la posición axial del disco giratorio.

Para el número de Reynolds de 0.63×10^4 , Fig. 7, se aprecia el mismo comportamiento pero con magnitudes distintas, en este caso los valores máximos positivos y negativos de la componente de velocidad axial para $z_1=0.01$ son de 8.30×10^{-3} y -12.76×10^{-3} . En la Tabla 3 se muestran los valores máximos positivos y negativos de la componente de velocidad axial para otras posiciones del disco giratorio (z_1).

Los resultados indican, como en el caso anterior, que el valor máximo positivo de la componente de velocidad axial (w), se va reduciendo conforme el impulsor va ascendiendo sobre el eje vertical. Para este caso la magnitud máxima y mínima es de 8.30×10^{-3} y 5.93×10^{-3} , respectivamente, es decir hay un decremento del 28.55%. Finalmente, al tomar como referencia el número de Reynolds de 2.74×10^4 y compararlo con el de 0.634×10^4 , se encontró que los valores máximos positivos de la componente de velocidad axial (w) se redujeron en promedio 14.30%.

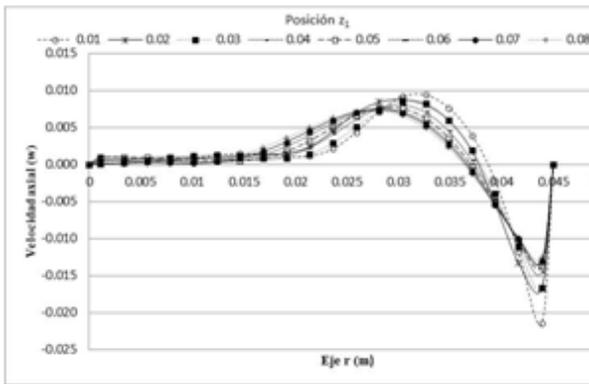


Figura 6 Componente de velocidad axial (w) para $Re=2.74 \times 10^4$, y distintas posiciones del impulsor (z_1)

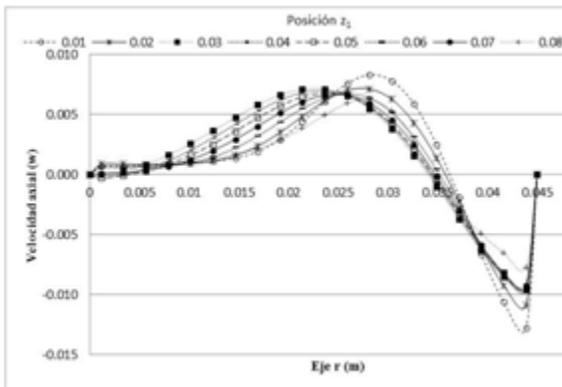


Figura 7 Componente de velocidad axial (w) m para $Re=0.63 \times 10^4$, y distintas posiciones del impulsor (z_1)

Posición z_1 (m)	$w_{m\acute{a}x}$ (+) Agua	$w_{m\acute{a}x}$ (-) Agua	$w_{m\acute{a}x}$ (+) Gasolina	$w_{m\acute{a}x}$ (-) Gasolina
0.01	9.45×10^{-3}	-21.35×10^{-3}	8.30×10^{-3}	-12.76×10^{-3}
0.02	8.79×10^{-3}	-16.67×10^{-3}	7.13×10^{-3}	-10.83×10^{-3}
0.03	8.64×10^{-3}	-16.57×10^{-3}	7.12×10^{-3}	-9.60×10^{-3}
0.04	8.07×10^{-3}	-14.50×10^{-3}	6.99×10^{-3}	-9.48×10^{-3}
0.05	7.65×10^{-3}	-13.65×10^{-3}	6.81×10^{-3}	-9.31×10^{-3}
0.06	7.52×10^{-3}	-13.13×10^{-3}	6.74×10^{-3}	-9.14×10^{-3}
0.07	7.49×10^{-3}	-13.02×10^{-3}	6.63×10^{-3}	-8.93×10^{-3}
0.08	7.29×10^{-3}	-12.56×10^{-3}	5.93×10^{-3}	-7.72×10^{-3}

Tabla 3 Componente de velocidad axial (w) máxima para distintas ubicaciones del impulsor, para $Re=2.74 \times 10^4$ (agua) y $Re=0.63 \times 10^4$ (gasolina)

En la Fig. 8, se muestran los resultados de la componente de velocidad axial (w) al variar "r", para un Reynolds de 2.74×10^4 , en una posición axial de referencia dada por $m_2 = (z_1 + 0.005) + (z_3 - z_2) / 2$ y distintas ubicaciones del impulsor (z_1). Para $z_1 = 0.01$ m se aprecia que la componente de velocidad vertical comienza en cero sobre el eje del disco rotatorio, posteriormente se observa la zona de la capa límite hidrodinámica donde el flujo se dirige verticalmente hacia el disco giratorio, esto se indica por el signo negativo de la velocidad. Se aprecia que el valor de la velocidad axial va aumentando hasta un máximo negativo de -3.80×10^{-3} y de allí comienza a disminuir hasta llegar a cero, donde a partir de este punto se presenta un cambio en el sentido del flujo. A partir de allí se observa la zona de la otra capa límite hidrodinámica donde ahora el flujo se dirige hacia la tapa del sistema, esto se indica por el signo positivo de la velocidad. En esta parte se aprecia que la velocidad vertical va aumentando hasta un máximo positivo de 7.92×10^{-3} y de allí nuevamente disminuye su magnitud hasta llegar a cero, cuando se ubica sobre la pared del cilindro. Para las otras posiciones del impulsor se tiene el mismo comportamiento pero con valores distintos. Las magnitudes máximas positivas y negativas para ocho ubicaciones del impulsor se muestran en la Tabla 4.

Los resultados indican que el valor máximo positivo de la componente de velocidad axial (w), para la posición vertical de referencia dada por $m_2=(z_1+0.005)+(z_3-z_2)/2$ y las ocho posiciones de z_1 , va aumentando conforme el disco giratorio va ascendiendo sobre el eje axial, alcanzando una magnitud mínima y máxima de 7.92×10^{-3} y 16.26×10^{-3} , respectivamente, es decir hay un aumento del 105.3%. Lo anterior es debido a que el centro de los núcleos negativos de las líneas de corriente también aumenta su valor al variar de manera ascendente la posición axial del disco giratorio.

Para el número de Reynolds de 0.63×10^4 , Fig. 9, se aprecia el mismo comportamiento pero con magnitudes distintas, en este caso los valores máximos positivos y negativos de la componente de velocidad axial para $z_1=0.01$ son de 5.68×10^{-3} y -5.51×10^{-3} . En la Tabla 4 se muestran los valores máximos positivos y negativos de la componente de velocidad axial para otras posiciones del disco giratorio (z_1). Los resultados indican, como en el caso anterior, que el valor máximo positivo de la componente de velocidad axial (w), va aumentando conforme el impulsor va ascendiendo sobre el eje vertical. Para este caso la magnitud mínima y máxima es de 5.68×10^{-3} y 12.40×10^{-3} , respectivamente, es decir hay un incremento del 118.30%. Finalmente, al tomar como referencia el número de Reynolds de 2.74×10^4 y compararlo con el de 0.634×10^4 , se encontró que los valores máximos positivos de la componente de velocidad axial (w) se redujeron en promedio 12.32%.

Cabe mencionar que el análisis de la componente de velocidad axial (w) se hizo para dos posiciones en el eje vertical con el objeto de observar su comportamiento por encima y por debajo del impulsor.

Los resultados obtenidos en esta investigación han mostrado ser congruentes con los reportados en la literatura. Para este trabajo se ha encontrado que el movimiento del fluido se compone de dos flujos: uno que gira en sentido anti horario, ubicado en la parte superior del impulsor, y otro que gira en sentido horario, ubicado en la parte inferior del mismo. Los valores más altos de la función corriente meridional, Ψ , se encontraron en el centro de los flujos. Este comportamiento es congruente con el trabajo de Khalili *et al.* [5] y Yu *et al.* [6] aunque las magnitudes de la función corriente son diferentes, debido al rango del número de Reynolds que ellos analizaron. La diferencia de este trabajo con otros reportados en la literatura es el valor del número de Reynolds y el detalle del análisis de las componentes de velocidad radial (u) y axial (w), lo que permite comprender de mejor manera el comportamiento del flujo en el interior del cilindro al variar la posición axial del impulsor.

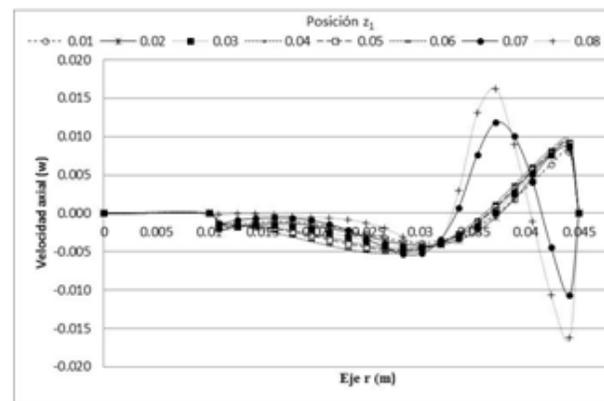


Figura 8 Componente de velocidad axial (w) para $Re=2.74 \times 10^4$ (agua), y distintas posiciones del impulsor (z_1)

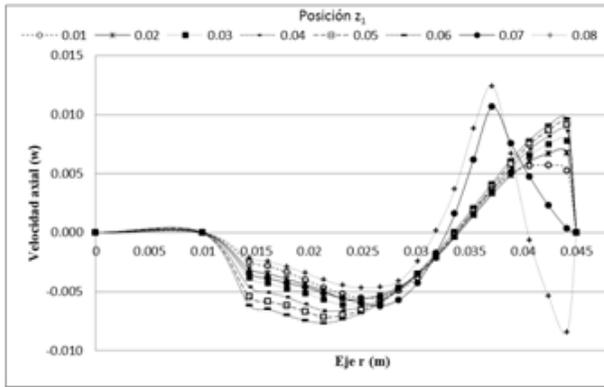


Figura 9 Componente de velocidad axial (w) para $Re=0.63 \times 10^4$ (gasolina), y distintas posiciones del impulsor (z_1)

Posición z_1 (m)	$u_{m\acute{a}x} (+)$ Agua	$u_{m\acute{a}x} (-)$ Agua	$u_{m\acute{a}x} (+)$ Gasolina	$u_{m\acute{a}x} (-)$ Gasolina
0.01	7.92×10^{-3}	-3.80×10^{-3}	5.68×10^{-3}	-5.51×10^{-3}
0.02	8.31×10^{-3}	-3.99×10^{-3}	6.77×10^{-3}	-5.58×10^{-3}
0.03	8.72×10^{-3}	-4.40×10^{-3}	7.77×10^{-3}	-6.09×10^{-3}
0.04	8.94×10^{-3}	-4.67×10^{-3}	8.58×10^{-3}	-6.61×10^{-3}
0.05	9.06×10^{-3}	-4.81×10^{-3}	9.17×10^{-3}	-7.16×10^{-3}
0.06	9.46×10^{-3}	-5.24×10^{-3}	9.61×10^{-3}	-7.44×10^{-3}
0.07	11.85×10^{-3}	-10.6×10^{-3}	10.64×10^{-3}	-6.20×10^{-3}
0.08	16.26×10^{-3}	-16.25×10^{-3}	12.40×10^{-3}	-8.39×10^{-3}

Tabla 4 Componente de velocidad axial (w) máxima para distintas ubicaciones del impulsor, para $Re=2.74 \times 10^4$ (agua) y $Re=0.63 \times 10^4$ (gasolina)

Conclusiones

Los resultados indican que la estructura del movimiento del fluido en el sistema se compone de dos flujos: uno que gira en sentido horario, ubicado por debajo del disco impulsor y otro que gira en sentido anti horario ubicado por encima del mismo.

Al variar la posición axial del impulsor de manera ascendente sobre el eje del cilindro se encontró que: la componente de velocidad radial positiva (u) disminuyó 24.94% para $Re=2.74 \times 10^4$ y 10.99% para $Re=0.63 \times 10^4$; la componente de velocidad axial positiva (w), por debajo del disco giratorio, disminuyó 22.85% y 28.55%, para los mismos números de Reynolds; y la componente de velocidad axial positiva (w), por encima del impulsor, aumentó 105.3% y 118.30%, para los mismos números de Reynolds. Al tomar como referencia el número de Reynolds de 2.74×10^4 y compararlo con el de 0.63×10^4 , se encontró que: los valores máximos positivos de la componente de velocidad radial (u) se redujeron en promedio 10.83%; las magnitudes máximas positivas de la componente de velocidad axial (w), por debajo del disco impulsor, se redujeron en promedio 14.30%; y los valores máximos positivos de la componente de velocidad axial (w), por encima del disco impulsor, se redujeron en promedio 12.32%. Estos resultados revelan la dependencia que tiene la posición axial del impulsor y el número de Reynolds en el desarrollo del flujo y muestran que la variación de estos parámetros no es proporcional al cambio en las componentes de velocidad y la función corriente.

Referencias

[1] Pao, H-P. (1972). “Numerical solution of the Navier Stokes equations for flows in the disk-cylinder system”. Phys. Fluids. 15 (1):4-11.

[2] Bertelá, M., Gori, F. (1982). “Laminar flow in a cylindrical container with a rotating cover”. J. Fluids Eng. 104 (1):31-39. doi:10.1115/1.3240849.

- [3] Lang, E., Sridhar, K., Wilson, N. W. (1994). "Computational study of disk driven rotating flow in a cylindrical enclosure". *Journal of fluids engineering*. 116 (4):815-820.
- [4] Valentine, D. T., Jahnke, C. C. (1994). "Flows induced in a cylinder with both end walls rotating". *Physics of fluids*. 2702-2710. doi:10.1063/1.868159.
- [5] Khalili, A., Adabala, R. R., Rath H. J. (1995). "Flow induced by a asymmetrically placed disk rotating coaxially inside a cylindrical casing". *Acta Mechanica*. Springer-Verlag. 9-19. Vol 113. [6] Yu, P., Lee, T. S., Zeng, Y., Low, H. T. (2007). "Characterization of flow behavior in an enclosed cylinder with a partially rotating end wall". *Physics of fluids* 19, 057104, doi: 10.1063/1.2731420.
- [7] Sturzenegger, J. C., Sarasúa, L. G., Martí, A. C. (2012). "Analytical solutions for the axisymmetric flow inside a cylindrical container with a rod along the axis at low Reynolds numbers". *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 28, pp. 473-479.
- [8] Landau y Lifshitz. (1982). *Fluids Mechanics*. Vol. 6, Pergamon Press.
- [9] Gerber N. (1975). "Properties of rigidly rotating liquids in closed partially filled cylinders". *ASME, Transactions, Series E- Journal of Applied Mechanics*. 42:734,735.
- [10] Tjonov, A. N., Samarsky, A. A. (1980). *Ecuaciones de la física matemática*. Edit. MIR, Moscú, pp 1-29.
- [11] A. Lizardi, H. Terres, R. López, M. Vaca, J. Flores, A. Lara, S. Chávez, J. R. Morales. (2014). "Efecto del Reynolds en el flujo rotatorio asimétrico generado en el interior de un cilindro". *XX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*.
- [12] A. Lizardi R., H. Terres P., R. López C., M. Vaca M., J. Flores R., A. Lara V., S. Chávez S., J. R. Morales G. 7 al 11 de Septiembre 2015. "Flujo asimétrico en cámaras cilíndricas para distintos radios y fluidos". *Primer Congreso Internacional de Energía (CIE 2015)*. Pp. 31-38. México, D. F.

Diseño y construcción de comal Tolokatsin de concentrador solar a partir de materiales alternativos

DÍAZ-ZAMORANO, Ana†*, LUNA-PADILLA, Ivo, LAGUNA-PÉREZ, Emmanuel y OLIVARES-RAMÍREZ, Juan.

Recibido Octubre 6, 2016; Aceptado Noviembre 21, 2016

Resumen

En la presente investigación se diseñó un concentrador solar con un ángulo de aceptación de 5° y una razón de concentración de 4 soles. El concentrador solar fue construido con madera para su soporte mecánico y se utilizaron materiales alternativos de fácil acceso en cualquier parte del país para permitir la réplica del modelo. Se construyeron tres concentradores solares para validar la reflexión y absorción de la irradiancia en el mismo instante. Los materiales reflejantes utilizados fueron papel metálico, cinta aluminio y envoltura de frituras. Se construyeron tres absorbedores de irradiancia de acero al carbono, pintando una cara con aerosol negro mate, ahumado y natural. Los resultados muestran que podemos alcanzar una temperatura de hasta 121.8 °C.

Concentrador, Energía Solar, Material de uso común.

Abstract

In this research a solar concentrator was designed with an acceptance angle of 5° and a concentration ratio of 4 suns. The solar concentrator was built with wood for mechanical support and easily accessible alternative materials were used anywhere in the country to allow replication of the model. Three solar concentrators were constructed to validate the reflection and absorption of irradiance at the same instant. The materials used were reflective foil, aluminum tape and wrap fritters. Three absorbers of carbon steel irradiance were built, painting a face with matte black, smoked and natural aerosol. The results show that we can attain a temperature up to 121.8 °C.

Concentrator, Solar Energy, Material commonly used.

Citación: DÍAZ-ZAMORANO, Ana, LUNA-PADILLA, Ivo, LAGUNA-PÉREZ, Emmanuel y OLIVARES-RAMÍREZ, Juan. Diseño y construcción de comal Tolokatsin de concentrador solar a partir de materiales alternativos. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería 2016, 3-9: 72-82.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jmolivar01@yahoo.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La energía solar es uno de los recursos energéticos más aprovechables en la tierra. México es uno de los países con alta incidencia de energía solar [1].

Se cuenta con una posición geográfica privilegiada en cuanto a irradiación solar, con un promedio anual de 5.3 kWh/m² por día [2-5]. Dicho potencial en energía solar aun no es aprovechado al máximo debido al elevado precio de las tecnologías desarrolladas para el uso de la energía solar. Ver Fig. 1.

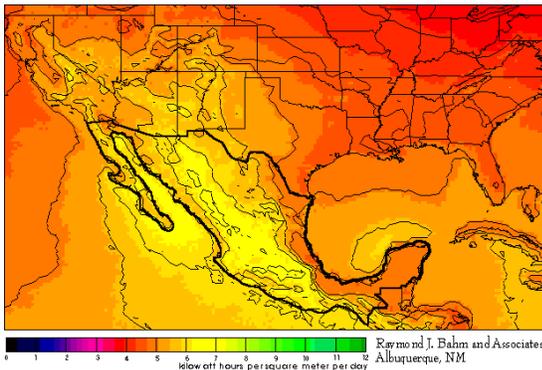


Figura 1 Mapa de irradiación solar en México.

Usos posibles de la energía solar:

Calefacción domestica

Refrigeración

Calentamiento de agua

Destilación

Generación de energía

Fotosíntesis

Hornos solares

Cocinas

Evaporación

Acondicionamiento de aire

Control de heladas

Secado de hierbas y frutas

Una de las principales áreas de oportunidad para el aprovechamiento del recurso solar en México, es la cocción y procesamiento de alimentos por medio de concentradores, hornos, deshidratadores y comales solares.

Uno de estos artefactos es el comal Tolokatsin El nombre es una palabra Nahuatl que significa «toluqueñita», por haber sido diseñadas en Toluca [6].

Este comal consiste en una placa de acero inoxidable, un concentrador y un reflector [7-9]. Se puede construir con diversos materiales; acero, madera, vidrio, aluminio, etc. Una de las principales ventajas de este dispositivo es la cocción de alimentos sin el uso de combustibles fósiles, lo cual representa un ahorro en el consumo de gas LP y contribuye al cuidado del medio ambiente [10].

Metodología

La figura 2 muestra los pasos a seguir para la construcción y caracterización del sistema de concentración solar, siendo este el mismo para los tres prototipos construidos.



Figura 2 Metodología de la caracterización.

a) Teoría y diseño.

Para el diseño se aplican los principios de la óptica geométrica, la cual se ocupa de las trayectorias de los rayos luminosos bajo las leyes de Snell de la reflexión y refracción, además se aplican la ecuación de la parábola y la recta para calcular la superficie del concentrador.

Ley de reflexión

Nos dice que el ángulo incidente es igual al ángulo reflejado con la perpendicular al espejo. La figura 3 muestra el comportamiento de los rayos solares al incidir primeramente en el espejo y posteriormente en el concentrador parabólico compuesto (CPC).

$$\theta_r = \theta_i \tag{1}$$

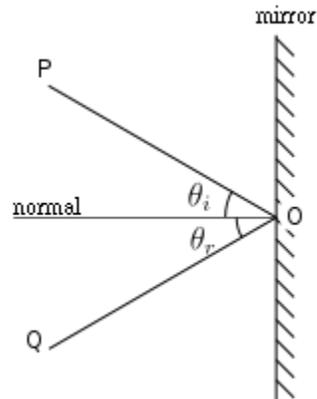


Figura 3 Fenómeno de reflexión

Ecuación de la parábola

La parábola está definida como el conjunto de puntos cuya distancia del foco (punto fijo) y la directriz (línea fija) son iguales. Ver figura 4.

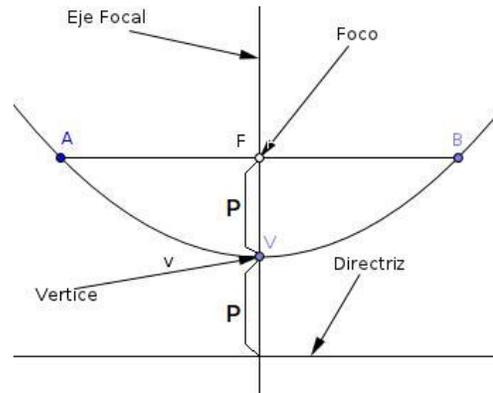


Figura 4 Esquema de la parábola.

Para la construcción del concentrador partimos del diseño realizado en AutoCAD. Ver figura 5

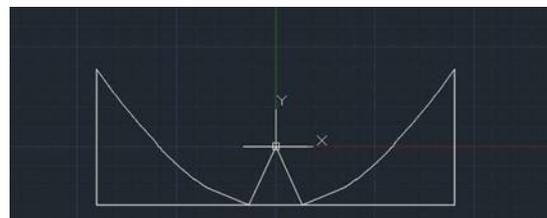


Figura 5 Plano del concentrador.

Resultados

Materiales alternativos

Para la construcción de los dispositivos se utilizó materiales de fácil obtención como la madera de triplay y el MDF (aglomerado elaborado con fibras de madera aglutinadas con resinas sintéticas).

Como superficie reflectora se experimentó con 3 materiales: cinta de aluminio (48 mm), papel metálico común y envolturas de frituras (polipropileno biorientado –BOPP).

El comal fue de acero al carbono, para experimentar se utilizó dos recubrimientos; pintura en aerosol negro mate y ahumado. Se cortaron tres placas de acero y solo un comal quedó al natural (sín recubrimiento). Ver figura 7.

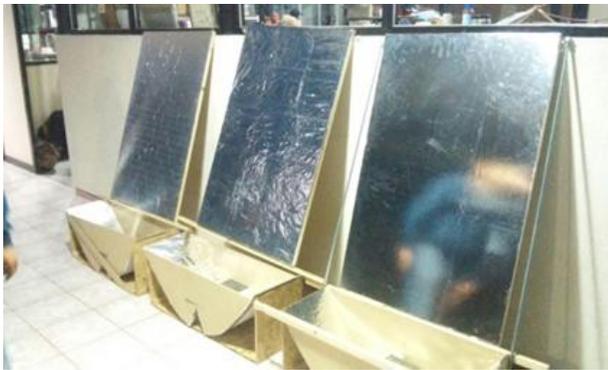


Figura 7 Concentradores y reflectores armados.

Pruebas de campo

Para validar la experimentación se pusieron a prueba los tres concentradores bajo las mismas condiciones de radiación solar.

Las variables a medir fueron; temperatura en la superficie del comal (70 puntos de medición) y radiación solar (3 mediciones; al comenzar la toma de temperatura del comal, a la mitad y al final.

Los 70 puntos de medición del comal son las intersecciones de la cuadrícula trazada sobre su superficie, esto para obtener una mayor precisión en los datos. Ver figura 7.



Figura 7 Vista superior del concentrador y reflector.

Concentrador de papel metálico y comal ahumado

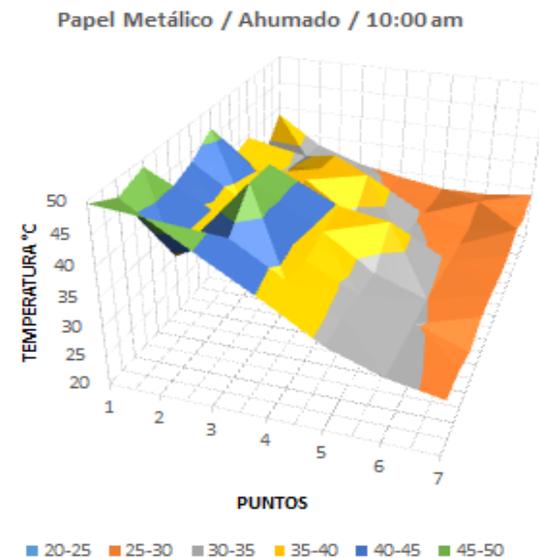


Gráfico 1 Comportamiento de la superficie del comal ahumado.

Con una temperatura promedio de 35.11 °C, este prototipo no alcanza una temperatura uniforme debido a la presencia de nubes al momento de la medición. Ver Gráfico 1.

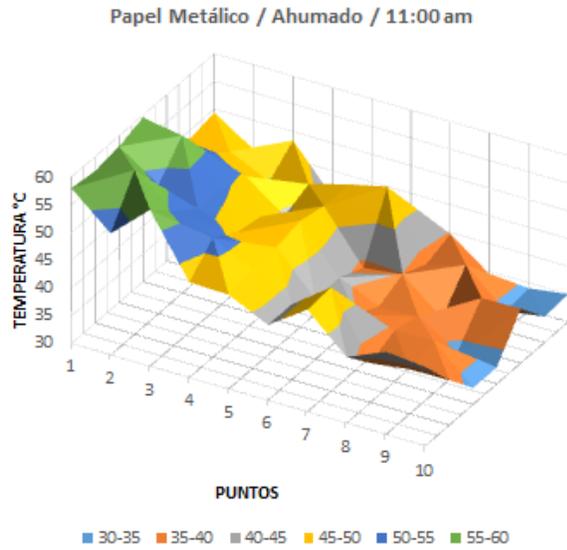


Gráfico 2 Comportamiento a las 11:00 am.

Con una temperatura promedio de 44.77 °C, y una irradiancia promedio de 801.66 W/m² a las 11:00 a.m. Cuando se alcanzó una radiación de 1090 W/m², el prototipo tuvo un mejor comportamiento con temperaturas altas (59.60°C) en la totalidad del comal. Ver Gráfico 2.

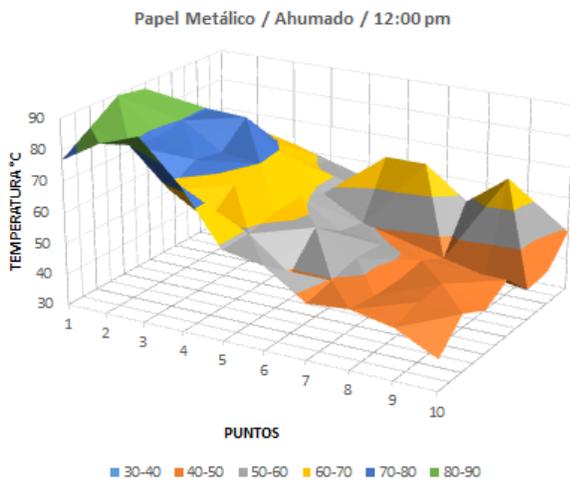


Gráfico 3 Temperatura obtenida a las 12:00 pm.

Con una temperatura promedio de 59.96 °C y una radiación de 1025 W/m² el prototipo mejoro su comportamiento alcanzando temperaturas de 70°C a 89°C en su parte superior. Ver Gráfico 3.

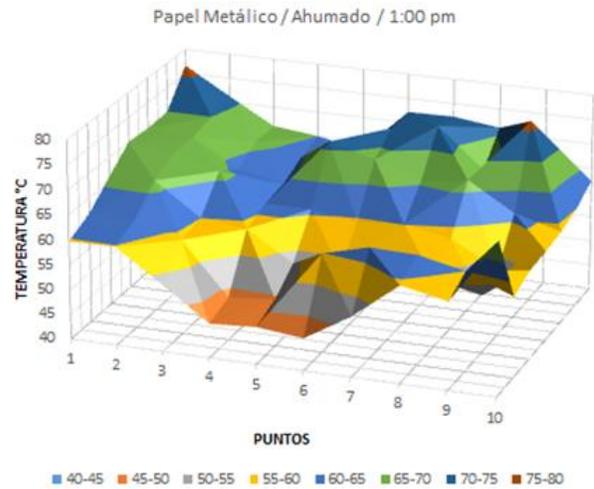


Gráfico 4 Comportamiento a la 1:00 pm.

Con una temperatura promedio de 62.16 °C y una irradiancia de 869 W/m² el comal mostró una temperatura que oscilo entre los 50 y 70 °C. Ver Gráfico 4.

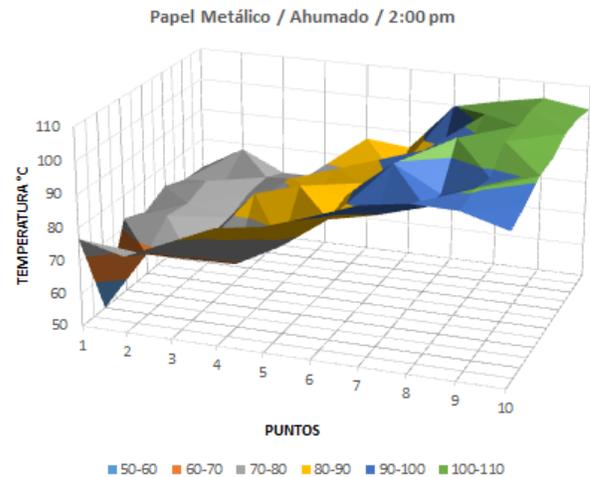


Gráfico 1 Temperaturas registradas a las 2:00 pm.

Con una temperatura promedio de 85.62, y una radiación cercana a los 1000 W/m² el comal mejoro con respecto a las temperaturas previamente alcanzadas. Ver Gráfico 5.

Este comal presento una temperatura promedio de 80.20°C y comportándose de una manera muy similar al anterior pero con una irradiación menor que oscilo entre los 700 y 800 W/m². Ver Gráfico 6.

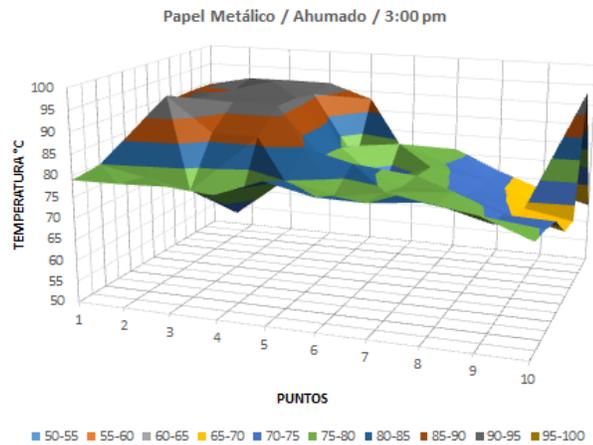


Gráfico 6 Temperatura registrada a las 3:00 pm.

Este comal presento una temperatura promedio de 74.29°C, con la particularidad que en la zona izquierda se presentaron las mayores temperaturas además de una radiación cercana a los 1000 W/m². Ver Gráfico 7.

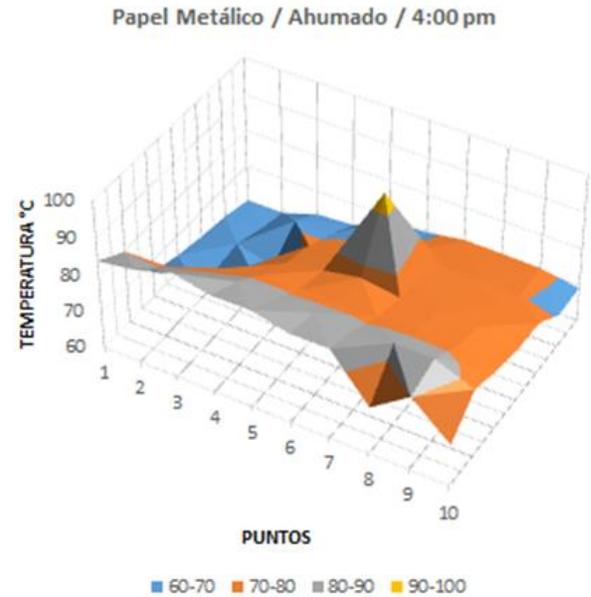


Gráfico 7 Comportamiento del comal a las 4:00 pm.

El papel metálico resulto ser un excelente reflejante al tener una superficie casi lisa, sin imperfecciones, pero el recubrimiento ahumado no obtuvo temperaturas altas en la totalidad de su superficie.

Concentrador de cinta de aluminio y comal natural

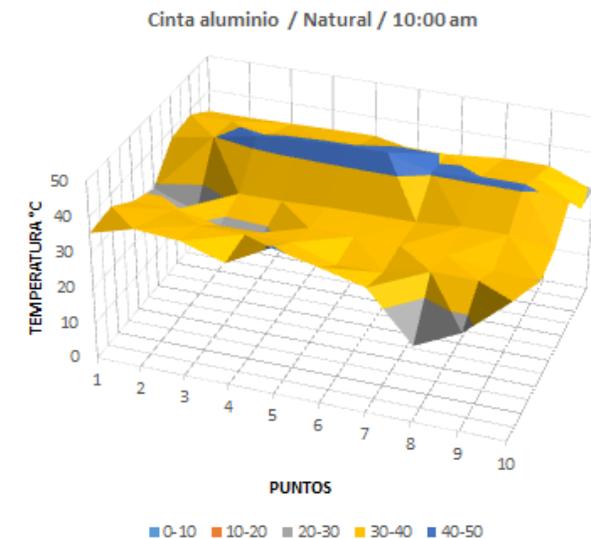


Gráfico 8 Comportamiento del comal sin recubrimiento.

El siguiente concentrador obtuvo una temperatura promedio de 34.88 °C, con el comal natural. La temperatura fue uniforme en casi toda su superficie. Ver Gráfico 8.

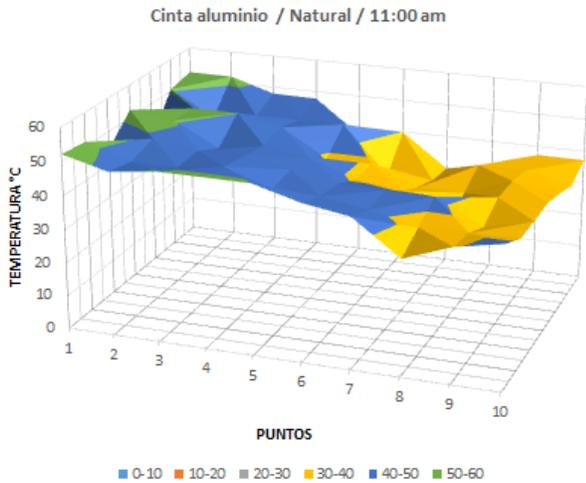


Gráfico 9 Temperatura registrada a las 11:00 am.

Con una temperatura promedio de 42.32 °C este comal fue uniforme aunque sin llegar a los 55°C, con una radiación por encima de los 1100 W/m². Ver Gráfico 9.

El comal obtuvo una temperatura promedio de 57.17 °C, con una radiación por encima de los 1000 W/m². Una alta temperatura en la parte superior del comal y menor en la parte de inferior. Ver Gráfico 10.

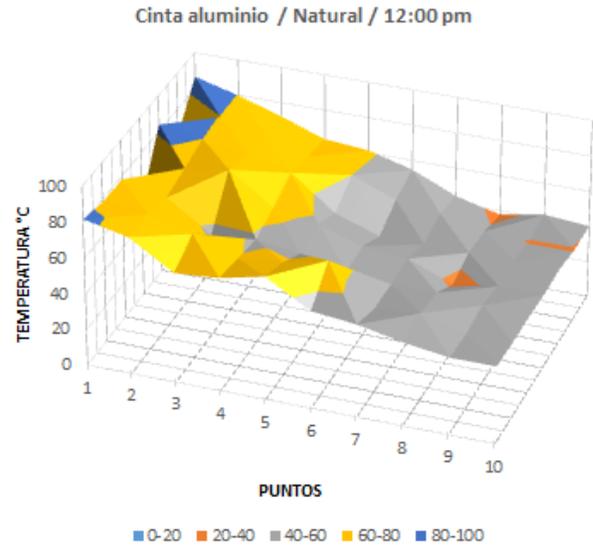


Gráfico 10 Medición de la superficie del comal.

El comal obtuvo una temperatura promedio de 71.86°C, las mejores temperaturas se observaron en el centro del comal. La radiación no superó los 900 W/m². Ver Gráfico 11.

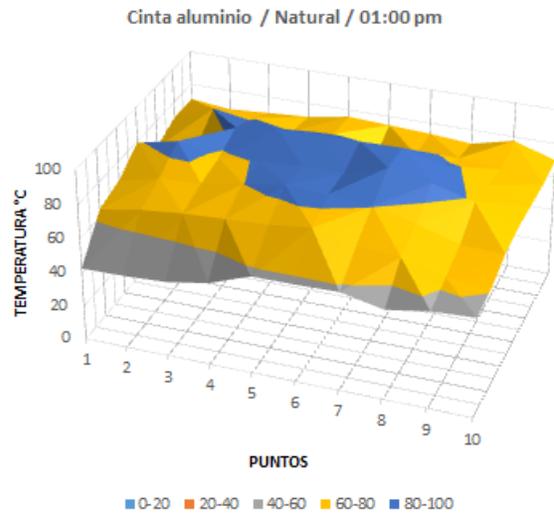


Gráfico 11 Temperatura registrada en el comal sin recubrimiento.

Este comal obtuvo una temperatura promedio de 80.12°C, y en la parte inferior derecha se presentaron las temperaturas más altas que fueron cercanas a los 100°C. Ver Gráfico 12.

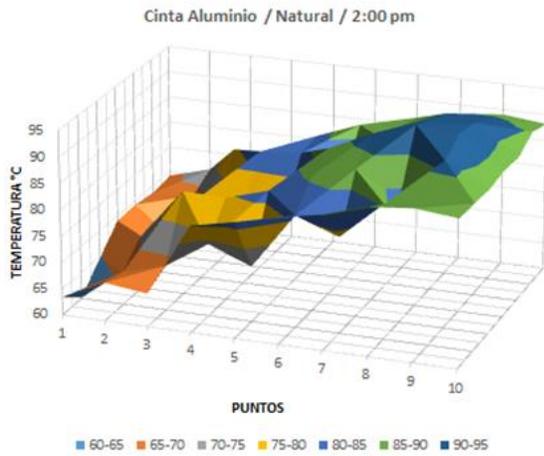


Gráfico 12 Comportamiento de la temperatura en la superficie del comal.

Este comal tuvo una temperatura promedio de 59.11 °C, siendo de los de menor eficiencia en la prueba, notar que es el comal sin modificar y el reflejante de cinta. La radiación se mantuvo por encima de los 1000 W/m². Ver Gráfico 13.

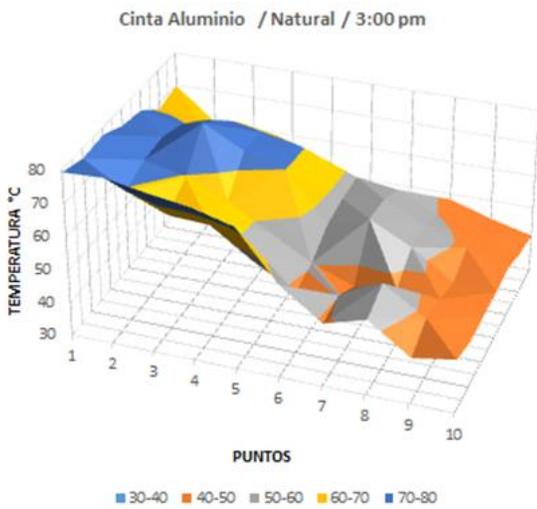


Gráfico 13 Temperaturas registradas a las 3:00 pm.

Concentrador de envoltura y comal pintado

En este concentrador no se superó los 40°C pero mantuvo temperaturas uniformes, a pesar de que los niveles de radiación fueron superiores a 1000 W/m² la reflexión de los rayos solares no fue la óptima. Promedio de temperatura 28.65°C. Ver Gráfico 14.

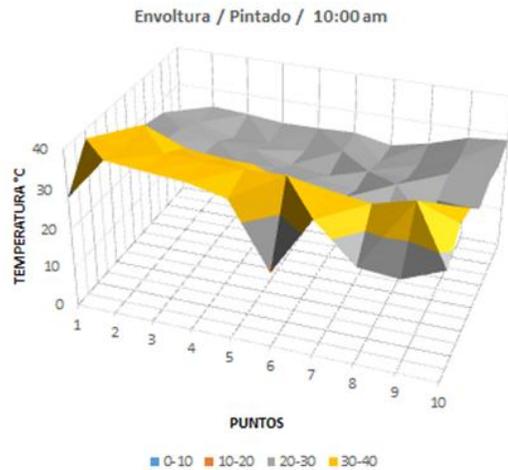


Gráfico 14 Temperaturas registradas en la superficie del comal.

En esta medición se obtuvieron valores entre 39 y 49 °C en casi toda la superficie del comal con una radiación de 1040 W/m². El promedio de temperatura fue de 41.71°C. Ver Gráfico 15.

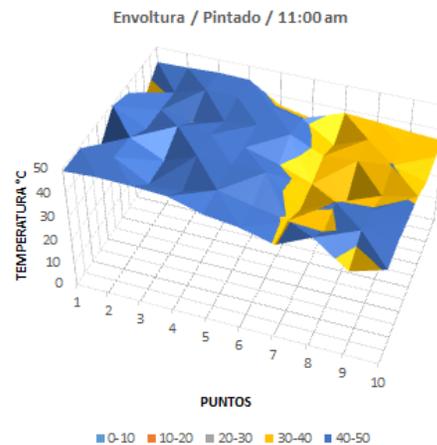


Gráfico 15 Comportamiento de la temperatura a las 11:00 am.

Alcanzado casi los 80°C en algunos puntos del comal y con una radiación superior a los 1000 W/m², mejoro la temperatura en la parte superior. Promedio de temperatura 58.01°C. Ver Gráfico 16.

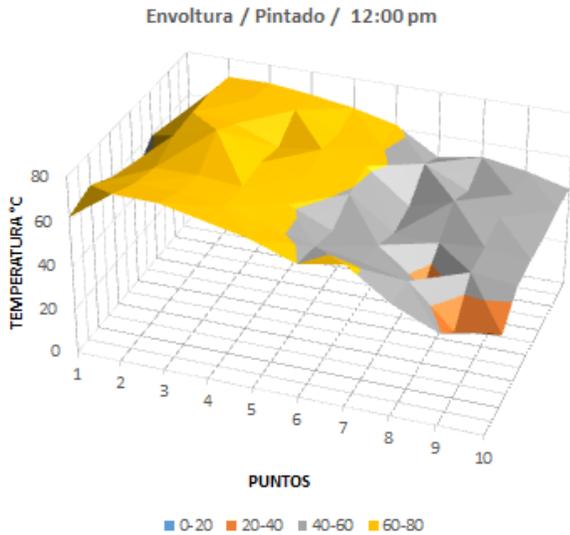


Gráfico 16 Temperatura registrada en la superficie del comal.

A la 01:00 pm se registraron temperaturas de 50 a 79 °C, principalmente en la parte izquierda del comal con una radiación de 1024 W/m². Promedio de temperatura 63.30°C. Ver Gráfico 17.

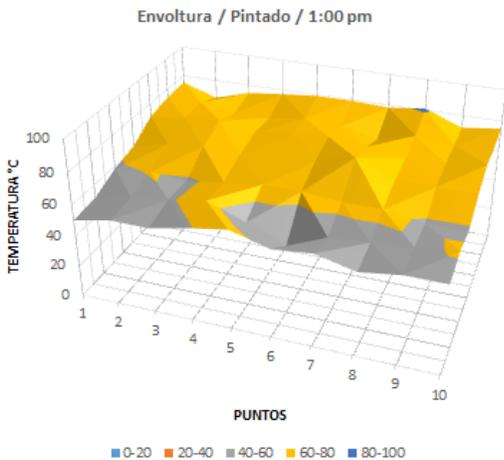


Gráfico 17 Registro de temperatura a la 1:00 pm.

Con un promedio de 76.37°C, el comal en algunos puntos de la parte izquierda alcanzaron los 90°C con una radiación de 1003 W/m². Ver Gráfico 18.

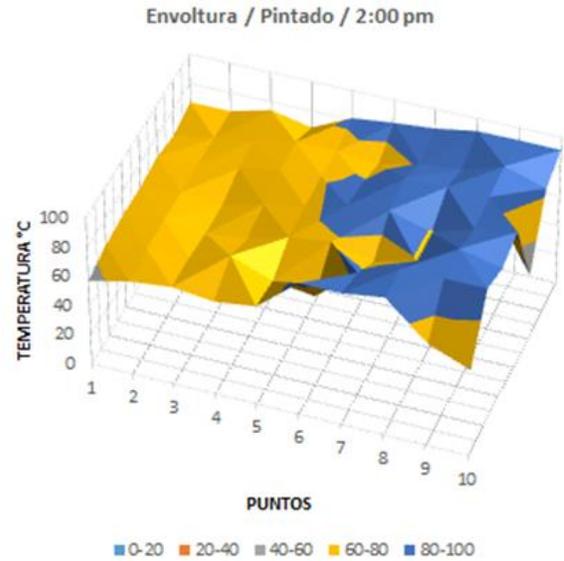


Gráfico 2 Temperatura de la superficie del comal con recubrimiento en negro mate.

La temperatura más alta fue de 92.3°C, el resto de la superficie se mantuvo entre 60 y 80°C. Promedio de temperatura 71.84°C. Ver Gráfico 19.

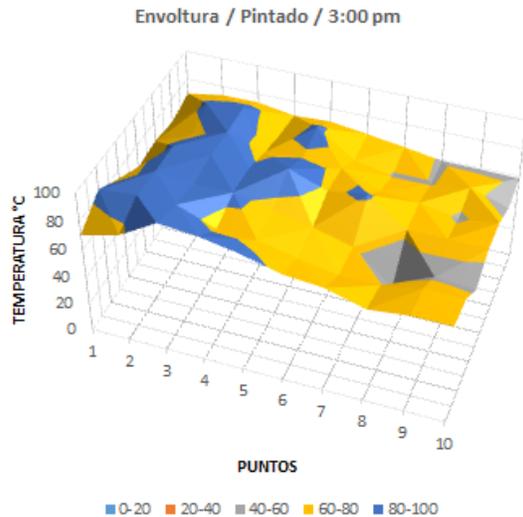


Gráfico 19 Temperatura registrada a las 3:00 pm.

Con un promedio de 55.9°C , se presentó un descenso en la temperatura y la radiación no superó los 950 W/m^2 . Ver Gráfico 20.

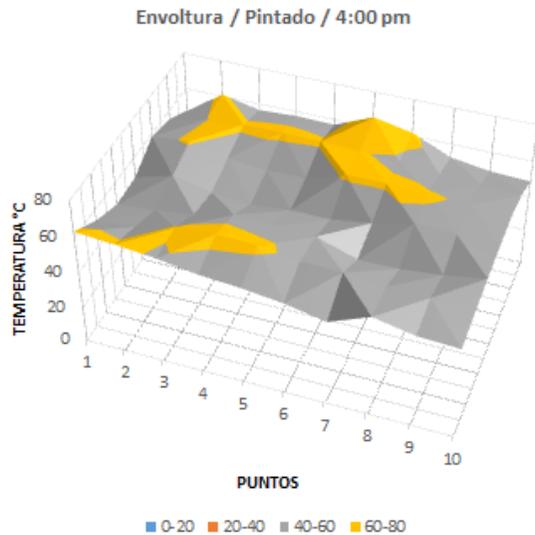


Gráfico 20 Comportamiento de la temperatura a las 4:00 pm.

Conclusiones

El diseño se realizó mediante los cálculos descritos se recomienda utilizar por lo menos una tabla de Excel para automatizar el proceso de cálculo. El prototipo fue elaborado en AutoCAD lo cual favorece el grado de exactitud en las curvaturas del CPC con este molde obtenido a partir de la impresión a escala 1:1 del CPC se construyó el prototipo con madera y materiales ya especificados. La utilización de estos materiales permite tener un prototipo fácil de reproducir, ensamblar, desensamblar, transportar y viable económicamente.

Cuando se tiene papel metálico como reflector y el comal ahumado por la parte inferior se obtuvo una temperatura promedio de 35.11°C , desviación estándar de 7.56 bajo una irradiancia promedio de 595.66 W/m^2 y una desviación estándar de 390.73 con una temperatura máxima de 49.60°C , con una eficiencia del 86.32%, lo cual es un comportamiento típico para las 10:00 am con nubosidad. El mejor comportamiento se obtuvo a las 4:00 pm con una temperatura promedio de 74.29°C y una desviación estándar de 6.43 bajo una irradiancia promedio de 928 W/m^2 y una desviación estándar de 2.16 con una temperatura máxima de 93.90°C . Y una eficiencia térmica de 56.24%. El experimento realizado a las 10:00 am presenta una mayor eficiencia comparado con el de las 4:00 pm debido a que el comal alcanza menores temperaturas por lo tanto tuvo menor pérdida de calor hacia el ambiente. El papel metálico destacó por tener mayor eficiencia en la reflexión en comparación con la cinta de aluminio y envoltura de frituras.

Con el concentrador fabricado de cinta aluminio y comal sin recubrimiento la temperatura promedio obtenida fue de 34.88°C con una desviación estándar de 4.27 bajo una irradiancia promedio de 517.33 W/m^2 y una eficiencia de 30.5% a las 10:00 am, la temperatura máxima fue de 43.90°C . La experimentación realizada a las 3:00 pm se obtuvo una temperatura promedio de 59.11°C con una desviación estándar de 2.16 bajo una irradiancia promedio de 1020 W/m^2 , la temperatura máxima fue de 79.80°C y una eficiencia de 46.6%. Con estos valores de temperatura ya es posible el calentamiento de los alimentos.

Mediante las pruebas de campo se demostró que el material de papel aluminio fue el mejor reflejante al tener una superficie totalmente uniforme, logro dirigir los rayos solares directo a la placa de acero al carbono (comal).

Como mejor recubrimiento del comal se demostró que la pintura en aerosol negro mate logra una mejor absorción de los rayos solares, alcanzando una temperatura promedio de 90°C. Los materiales que utilizamos a pesar de ser comunes lograron un buen funcionamiento aunque siempre se puede mejorar algunos aspectos del diseño del concentrador y reflector.

Referencias

- [1] Associates, R. J. (2000). *Albuquerque, NM*. Obtenido de <http://www.ecotec2000.de/espanol/sun6.htm>
- [2] Eduardo A. Rincón Mejía, Á. E. (2006). Empleo de la energía solar para la cocción de alimentos. *Universidad Autónoma de la Ciudad de México*.
- [3] Garcia, A. (07 de Octubre de 2009). *Cocina Solar*. Obtenido de <https://cocinasolar.wordpress.com>
- [4] Gonzalez, J. R. (30 de Marzo de 2008). *Wikipedia*. Obtenido de *Optica Geometrica*: <http://es.m.wikipedia.org>
- [5] Ingeniería, U. N.-F. (Abril de 2011). *UNAM*. Obtenido de <http://www.unam.mx>
- [6] Kletenik. (s.f.). *Geometría analítica*. Moscú: Editorial Mir.
- [7] Mejía, D. E. (2007). *Comales Solares*. *International Solar Energy Society*.
- [8] Mejía, E. A. (2008). Cocinas solares, a la vanguardia en México. *Revista Solar/ ANES*, 2-10.
- [9] Mejía, E. A. (2010). Aplicaciones de la óptica anidólica. *Universidad Autónoma de la Ciudad de México / Programa de Energía*.
- [10] Villamar, J. M. (Septiembre de 2013). *Inventario de Energía Renovable*. Obtenido de <http://www.ineel.mx/boletin032013/divulga.pdf>

Instrucciones para Autores

[Titulo en Times New Roman y Negritas No.14]

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

(Indicar Fecha de Envio: Mes, Dia, Año); Aceptado (Indicar Fecha de Aceptación: Uso Exclusivo de ECORFAN)

Resumen

Titulo

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 Mayusculas -2do Nombre de Autor. Titulo del Paper. Título de la Revista. 2015, 1-1: 1-11 – [Todo en Times New Roman No.10]

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico:)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Instrucciones para Autores

© ECORFAN-(Indicar el país de publicación)

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

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

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

Inclusión de Graficos, 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 titulo en la parte inferior con Times New Roman No.10 y Negrita]

www.ecorfan.org/bolivia

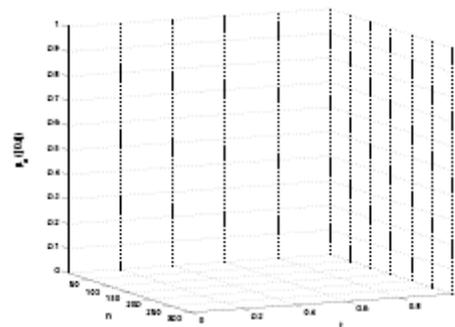


Grafico 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberan ser imágenes- todo debe ser editable.

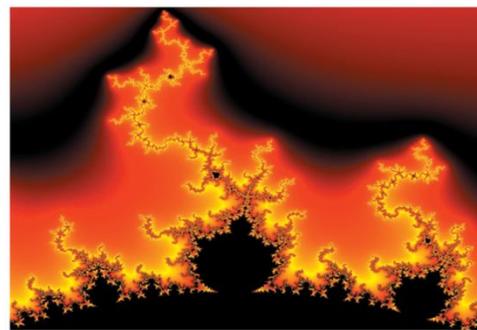


Figura 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberan ser imágenes- todo debe ser editable.

Tabla 1 Titulo y Fuente (en cursiva).

No deberan 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



Sucre, Chuquisaca 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



Sucre, Chuquisaca 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-Bolivia 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-Bolivia 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 Aplicaciones de la Ingeniería

“Metodología de Diseño del Perfil Aerodinámico de Hub para Turbinas de Viento de Eje Horizontal de Baja Capacidad”

JIMÉNEZ-RAMÍREZ, Alan, LÓPEZ-GARZA, Víctor, MOLINERO-HERNÁNDEZ, Daniel y CASILLAS-FARFÁN, Christian

“Análisis armónico de un aerogenerador y un STATCOM basado en una técnica mejorada para la obtención de la solución periódica”

CONTRERAS-AGUILAR, Luis, VENEGAS-TRUJILLO, Tiberio, ARROYO-LEDESMA, Jaime y JIMÉNEZ-BETANCOURT, Ramón

“Análisis numérico del flujo asimétrico variando la posición axial del impulsor”

LIZARDI, Arturo, LÓPEZ, Raymundo, TERRES, Hilario y MORALES, Juan

“Diseño y construcción de comal Tolokatsin de concentrador solar a partir de materiales alternativos”

DÍAZ-ZAMORANO, Ana, LUNA-PADILLA, Ivo, LAGUNA-PERÉZ, Emmanuel y OLIVARES-RAMÍREZ, Juan

