

ISSN 2523-6865

Volumen 4, Número 12 – Julio – Diciembre – 2020

Revista de Simulación Computacional

ECORFAN[®]

ECORFAN-Taiwan

Editor en Jefe

QUINTANILLA - CÓNDOR, Cerapio. PhD

Directora Ejecutiva

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Editorial

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

Diseñador Web

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

Diagramador Web

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Asistente Editorial

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

Traductor

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

Filóloga

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

Revista de Simulación Computacional,

Volumen 4, Número 12, Julio a Diciembre 2020, es una revista editada semestralmente

por Ecorfan-Taiwán. Taiwan, Taipei. YongHe district, Zhong Xin, Street 69.

Postcode: 23445. WEB:

www.ecorfan.org/taiwan,

revista@ecorfan.org. Editor en Jefe:

QUINTANILLA - CÓNDOR, Cerapio.

PhD. ISSN: 2523-6865. Responsables de la

última actualización de este número de la

Unidad de Informática Ecorfan.

ESCAMILLA-BOUCHÁN, Imelda,

LUNA-SOTO, Vladimir, actualizado al 31

de Diciembre, 2020.

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

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

Revista de Simulación Computacional

Definición del Research Journal

Objetivos Científicos

Apoyar a la Comunidad Científica Internacional en su producción escrita de Ciencia, Tecnología en Innovación en el Área de Ingeniería y Tecnología, en las Subdisciplinas de sistema de telemetría, intervalo difuso, estimulación eléctrica, controlador difuso, aplicación móvil, red de comunicaciones, plataforma web, control de producción, tecnología computacional, electrónica de la computadora, dispositivos de control, lenguajes de programación y sistemas de producción automatizados.

ECORFAN-México S.C es una Empresa Científica y Tecnológica en aporte a la formación del Recurso Humano enfocado a la continuidad en el análisis crítico de Investigación Internacional y está adscrita al RENIECYT de CONACYT con número 1702902, su compromiso es difundir las investigaciones y aportaciones de la Comunidad Científica Internacional, de instituciones académicas, organismos y entidades de los sectores público y privado y contribuir a la vinculación de los investigadores que realizan actividades científicas, desarrollos tecnológicos y de formación de recursos humanos especializados con los gobiernos, empresas y organizaciones sociales.

Alentar la interlocución de la Comunidad Científica Internacional con otros centros de estudio de México y del exterior y promover una amplia incorporación de académicos, especialistas e investigadores a la publicación Seriada en Nichos de Ciencia de Universidades Autónomas - Universidades Públicas Estatales - IES Federales - Universidades Politécnicas - Universidades Tecnológicas - Institutos Tecnológicos Federales - Escuelas Normales - Institutos Tecnológicos Descentralizados - Universidades Interculturales - Consejos de CyT - Centros de Investigación CONACYT.

Alcances, Cobertura y Audiencia

Revista de Simulación Computacional es un Research Journal editado por ECORFAN-México S.C en su Holding con repositorio en Taiwan, es una publicación científica arbitrada e indizada con periodicidad trimestral. Admite una amplia gama de contenidos que son evaluados por pares académicos por el método de Doble-Ciego, en torno a temas relacionados con la teoría y práctica de telemetría, intervalo difuso, estimulación eléctrica, controlador difuso, aplicación móvil, red de comunicaciones, plataforma web, control de producción, tecnología computacional, electrónica de la computadora, dispositivos de control, lenguajes de programación y sistemas de producción automatizados con enfoques y perspectivas diversos, que contribuyan a la difusión del desarrollo de la Ciencia la Tecnología e Innovación que permitan las argumentaciones relacionadas con la toma de decisiones e incidir en la formulación de las políticas internacionales en el Campo de las Ciencias de Ingeniería y Tecnología. El horizonte editorial de ECORFAN-México® se extiende más allá de la academia e integra otros segmentos de investigación y análisis ajenos a ese ámbito, siempre y cuando cumplan con los requisitos de rigor argumentativo y científico, además de abordar temas de interés general y actual de la Sociedad Científica Internacional.

Consejo Editorial

DE LA ROSA - VARGAS, José Ismael. PhD
Universidad París XI

GUZMÁN - ARENAS, Adolfo. PhD
Institute of Technology

RODRIGUEZ - ROBLEDO, Gricelda. PhD
Universidad Santander

DIAZ - RAMIREZ, Arnoldo. PhD
Universidad Politécnica de Valencia

MEJÍA - FIGUEROA, Andrés. PhD
Universidad de Sevilla

RIVAS - PEREA, Pablo. PhD
University of Texas

VAZQUES - NOGUERA, José. PhD
Universidad Nacional de Asunción

TIRADO - RAMOS, Alfredo. PhD
University of Amsterdam

LARA - ROSANO, Felipe. PhD
Universidad de Aachen

CENDEJAS - VALDEZ, José Luis. PhD
Universidad Politécnica de Madrid

Comité Arbitral

LOAEZA - VALERIO, Roberto. PhD
Instituto Tecnológico Superior de Uruapan

PEREZ - ORNELAS, Felicitas. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

ANTOLINO - HERNANDEZ, Anastacio. PhD
Instituto Tecnológico de Morelia

HERNÁNDEZ - MORALES, Daniel Eduardo. PhD
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

AYALA - FIGUEROA, Rafael. PhD
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

GAXIOLA - PACHECO, Carelia Guadalupe. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

GONZALEZ - BERRELLEZA, Claudia Ibeth. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

CASTRO - RODRÍGUEZ, Juan Ramón. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

ARROYO - DÍAZ, Salvador Antonio. PhD
Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas

MORALES - CARBAJAL, Carlos. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

RODRÍGUEZ - DÍAZ, Antonio. PhD
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

Cesión de Derechos

El envío de un Artículo a Revista de Simulación Computacional emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Artículo.

Los autores firman el Formato de Autorización para que su Artículo se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding Taiwan considere pertinentes para divulgación y difusión de su Artículo cediendo sus Derechos de Obra

Declaración de Autoría

Indicar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en la participación del Artículo y señalar en extenso la Afiliación Institucional indicando la Dependencia.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo con el Número de CVU Becario-PNPC o SNI-CONACYT- Indicando el Nivel de Investigador y su Perfil de Google Scholar para verificar su nivel de Citación e índice H.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en los Perfiles de Ciencia y Tecnología ampliamente aceptados por la Comunidad Científica Internacional ORC ID - Researcher ID Thomson - arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID respectivamente

Indicar el contacto para correspondencia al Autor (Correo y Teléfono) e indicar al Investigador que contribuye como primer Autor del Artículo.

Detección de Plagio

Todos los Artículos serán testeados por el software de plagio PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se mandara a arbitraje y se rescindirá de la recepción del Artículo notificando a los Autores responsables, reivindicando que el plagio académico está tipificado como delito en el Código Penal.

Proceso de Arbitraje

Todos los Artículos se evaluarán por pares académicos por el método de Doble Ciego, el arbitraje Aprobatorio es un requisito para que el Consejo Editorial tome una decisión final que será inapelable en todos los casos. MARVID® es una Marca de derivada de ECORFAN® especializada en proveer a los expertos evaluadores todos ellos con grado de Doctorado y distinción de Investigadores Internacionales en los respectivos Consejos de Ciencia y Tecnología el homologo de CONACYT para los capítulos de America-Europa-Asia-Africa y Oceanía. La identificación de la autoría deberá aparecer únicamente en una primera página eliminable, con el objeto de asegurar que el proceso de Arbitraje sea anónimo y cubra las siguientes etapas: Identificación del Research Journal con su tasa de ocupamiento autoral - Identificación del Autores y Coautores- Detección de Plagio PLAGSCAN - Revisión de Formatos de Autorización y Originalidad-Asignación al Consejo Editorial- Asignación del par de Árbitros Expertos- Notificación de Dictamen-Declaratoria de Observaciones al Autor-Cotejo de Artículo Modificado para Edición-Publicación.

Instrucciones para Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

Área del Conocimiento

Los trabajos deberán ser inéditos y referirse a temas de telemetría, intervalo difuso, estimulación eléctrica, controlador difuso, aplicación móvil, red de comunicaciones, plataforma web, control de producción, tecnología computacional, electrónica de la computadora, dispositivos de control, lenguajes de programación y sistemas de producción automatizados y a otros temas vinculados a las Ciencias de Ingeniería y Tecnología.

Presentación del Contenido

En el primer artículo se presenta, *Determinación del requerimiento energético para calefacción en un invernadero agrícola y dimensionamiento del sistema Termosolar-Gas L.P. requerido para su suministro óptimo*, por ESCOBEDO-BRETADO, Jorge & MARTÍN-DOMINGUEZ, Ignacio, con adscripción en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., como siguiente artículo está *Emulador de turbina eólica basado en el control vectorial de una máquina eléctrica*, por HERNÁNDEZ, Oscar, MINA, Jesús y CLAUDIO, Abraham, con adscripción en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, como siguiente artículo está *Propuesta de diseño aerodinámico para reducción de turbulencia en la estela de rotación en turbinas eólicas de baja capacidad HAWT*, por MOLINERO, Daniel, LÓPEZ, Víctor y CERVANTES, Alberto, como siguiente artículo está *Semi-automatización de biodigestor cerdo vs. vaca*, por MORALES-IBARRA, Vanessa, SALAZAR-VALLE, Eduardo, MIRANDA-HERRERA, María Guadalupe y MADRID-GONZALEZ, Valentín.

Contenido

Artículo	Página
Determinación del requerimiento energético para calefacción en un invernadero agrícola y dimensionamiento del sistema Termosolar-Gas L.P. requerido para su suministro óptimo ESCOBEDO-BRETADO, Jorge & MARTÍN-DOMINGUEZ, Ignacio Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.	1-8
Emulador de turbina eólica basado en el control vectorial de una máquina eléctrica HERNÁNDEZ, Oscar, MINA, Jesús y CLAUDIO, Abraham <i>Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico</i>	9-19
Propuesta de diseño aerodinámico para reducción de turbulencia en la estela de rotación en turbinas eólicas de baja capacidad HAWT MOLINERO, Daniel, LÓPEZ, Víctor y CERVANTES, Alberto	20-29
Semi-automatización de biodigestor cerdo vs. vaca MORALES-IBARRA, Vanessa, SALAZAR-VALLE, Eduardo, MIRANDA-HERRERA, María Guadalupe y MADRID-GONZALEZ, Valentín	30-35

Determinación del requerimiento energético para calefacción en un invernadero agrícola y dimensionamiento del sistema Termosolar-Gas L.P. requerido para su suministro óptimo

Determination of the energy requirement for heating in an agricultural greenhouse and sizing of the Thermosolar-Gas L.P. system required for optimal supply

ESCOBEDO-BRETADO, Jorge^{†*} & MARTÍN-DOMINGUEZ, Ignacio

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. - Unidad Durango (CIMAV-Dgo) Victoria 147 Norte. Zona Centro Histórico. 34000 Durango, Dgo. México.

ID 1^{er} Autor: *Jorge, Escobedo-Bretado*

ID 1^{er} Coautor: *Ignacio, Martín-Domínguez*

DOI: 10.35429/JCS.2020.12.4.1.8

Recibido: 10 de Julio, 2020; Aceptado 30 de Diciembre, 2020

Resumen

Se presenta el análisis térmico por simulación de un invernadero agrícola para tomate Saladette, existente en Chihuahua, mediante la plataforma computacional TRNSYS, para el dimensionamiento requerido del sistema de calefacción. Se presentan las características constructivas del invernadero y su situación geográfica así como las características de desarrollo óptimas del cultivo de tomate Saladette para sus diferentes etapas. Se presenta el comportamiento térmico estimado del invernadero, para su operación sin calefacción. Se hace una propuesta de equipamiento requerido para la calefacción del invernadero, considerando sus características físicas actuales y su localización geográfica. Se realiza la proyección financiera del sistema de calentamiento híbrido solar-gas, para el sistema funcional con una fracción solar del 72%, utilizando colectores solares de tubos evacuados.

Abstract

A thermal analysis for the simulation of an agricultural greenhouse tomato Saladette, existing in Chihuahua, by computing platform TRNSYS, for the required sizing of the heating system is presented. The construction characteristics of the greenhouse and its geographical location and the characteristics of optimal development of growing tomato Saladette different stages are presented. The estimated greenhouse thermal behavior, for operation without heating is presented. A proposal for equipment required for heating the greenhouse is made, considering his current physical characteristics and geographic location. The financial projection of the heating system solar-gas hybrid, for functional system with a solar fraction of 72% is made, using evacuated tube solar collectors.

Invernadero Agrícola, Calefacción Solar, Simulación TRNSYS, Proyección Financiera

Agricultural Greenhouse, Solar Heating, TRNSYS Simulation, Financial Projection

Citación: ESCOBEDO-BRETADO, Jorge & MARTÍN-DOMINGUEZ, Ignacio. Determinación del requerimiento energético para calefacción en un invernadero agrícola y dimensionamiento del sistema Termosolar-Gas L.P. requerido para su suministro óptimo. 2020. 4-12:1-8.

* Correspondencia al autor (Correo electrónico: jorge.escobedo@cimav.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

La industria agrícola puede utilizar energía solar para la climatización de un invernadero incrementando así su producción. Existe actualmente en el mercado una gran variedad de tipo de tecnología para captar, almacenar y poner a disposición energía térmica solar para la climatización de un invernadero. Determinar el diseño integral del sistema óptimo de esta tecnología resulta complicado debido a la variación intrínseca de las variables ambientales como temperatura, humedad, radiación solar entre otras, además del perfil de carga en la demanda energética (Souliotis M. et al., 2009). El software TRNSYS puede mostrar diferentes escenarios para poder comparar el comportamiento de las diferentes configuraciones y dimensiones de tecnología para aprovechamiento de energía solar con un error menor del 5% (Almeida P, et al., 2014). Los autores coinciden en la profunda complejidad de las variables que intervienen en un invernadero y su interdependencia, variables como tamaño, diseño y material constructivo del invernadero, variables propias del cultivo como temperatura, humedad relativa, dióxido de carbono, transpiración y variables ambientales como temperatura, humedad relativa, radiación solar entre muchas otras (Attar et al., 2013), (Kolokotsa et al., 2010), (Chargui y Sammouda, 2014), (Amir Vadiie y Viktoria Martin, 2013), (Tsoutsos et al., 2010), (Kamel y Fung, 2014), (Aye et al., 2010), (Candy et al., 2012). En la revisión de la literatura no se encontró algún modelo genérico en TRNSYS o cualquier otro tipo de software que se alimente de coordenadas geográficas, condiciones ambientales y características constructivas de un invernadero para el análisis energético técnico y económico completo de un invernadero. Una simulación dinámica puede ayudar a entender el comportamiento térmico a lo largo periodos extendidos de tiempo de un invernadero localizado en el norte de México.

Objetivo

Diseñar el sistema de calefacción de un invernadero agrícola para tomate Saladette, mediante la plataforma computacional TRNSYS. Seleccionar el equipamiento que satisfaga técnica y económicamente los requerimientos necesarios para el óptimo desarrollo del tomate en temporada de invierno con una fracción solar mayor al 60%.

Metodología

Se desarrolló un modelo de un sistema solar térmico para satisfacer las demandas de calefacción de un invernadero de ambiente controlado altamente tecnificado. En el invernadero en estudio se produce Tomate Saladette en sus variedades Moctezuma y Cuauhtémoc.

Problemática

El invernadero debe satisfacer los requerimientos de temperatura, humedad y concentración de CO₂ en sus valores óptimos propuestos por la comisión veracruzana de comercialización agropecuaria.

- Temperatura: 15°C y 30°C (durante todas sus etapas productivas).
- Humedad: 60% y 80%.
- Concentración de CO₂: 700-800 ppm.

Para lograr las condiciones anteriores simultáneamente el invernadero debe estar cerrado creando un ambiente controlado. Con estas medidas mejora el manejo de la humedad y de la concentración del CO₂, sin embargo, la temperatura debe ser tratada con mayor cuidado.

Características del Invernadero

Localización geográfica

El invernadero está ubicado dentro del Parque Agroindustrial Naica, Municipio de Saucillo, Chihuahua. Sus coordenadas geográficas son 28.06 N y -105.53 W y se encuentra en una altitud media de 1,415 metros sobre el nivel del mar.



Figura 1 Localización de la ciudad de Delicias, Chihuahua, México

Tipo de Tecnología

El invernadero en estudio es un invernadero multi-capilla producto de una empresa canadiense. Estos invernaderos son ideales para las operaciones mediana y fuertemente automatizadas. El invernadero cuenta con 9 capillas distribuidas en un área superficial de 1.6 hectáreas y un volumen aproximado de 100,000 m³.

La envoltura de doble pared de Polietileno es sostenida por estructuras metálicas.



Figura 2 Tipo de tecnología de invernadero utilizada

Control climático actual

Actualmente el invernadero no cuenta con sistemas activos de climatización, únicamente con una envoltura de plástico de doble pared y ventilación natural que se induce abriendo los sistemas de ventilas situados en las paredes laterales y en la parte superior de la estructura, mediante la apertura mecanizada.

Sistema de calefacción propuesto

En la figura 3 se muestran los componentes principales del sistema de calefacción propuesto.



Figura 3 Esquema del sistema de calefacción solar asistido por gas propuesto

Modelos TRNSYS utilizados

Edificio con zonas térmicas

Para modelar el invernadero se utilizó el Type 56 de TRNSYS. Este componente modela el comportamiento térmico de un edificio, así como la energía necesaria para su climatización.

El modelo del invernadero se desarrolla en el paquete SketchUp creando una zona térmica con la figura constructiva del invernadero real. El Type 56 de TRNSYS es capaz de leer los datos del invernadero desarrollado en SketchUp y permite analizar los balances de energía en cada superficie de la construcción.

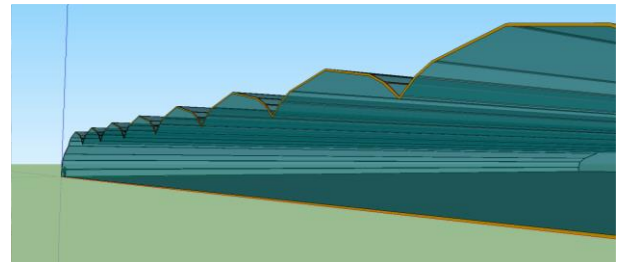


Figura 4 Implementación del invernadero en SketchUp

Generador de clima

Los datos climáticos correspondientes a la ciudad de Delicias Chihuahua y son generados por el modelo de Generador de Clima de TRNSYS. Este modelo tiene la capacidad de leer datos en intervalos regulares de tiempo a partir de un archivo de datos climáticos externo (TMY, año típico meteorológico). Este modelo interpola los datos (incluyendo la radiación solar para superficies inclinadas) y los pone a disposición para otros componentes de TRNSYS con un paso de simulación menor a una hora si así se desea.

Colectores solares

Se utilizó el modelo con curva de eficiencia térmica cuadrática. Los colectores solares de tubos evacuados a utilizarse corresponden a un modelo disponible comercialmente en México, pero con fabricación y prueba en Estados Unidos. Los colectores están dotados de un área total de 4.4 m² cada uno. La tasa de flujo de prueba del colector fue de 0.02 kg / s · m². La ecuación 1 describe el comportamiento de la eficiencia térmica del colector.

$$n = 0.442 - 0.968 \left(\frac{T_i - T_{Amb}}{I} \right) - 0.0071 \left(\frac{T_i - T_{Amb}}{I} \right)^2 \quad (1)$$

Donde n es la eficiencia térmica del colector, T_i es la temperatura de agua de entrada al colector, T_{Amb} es la temperatura ambiente e I es la radiación solar incidente sobre el colector solar (datos de la ficha técnica expedida por la Solar Rating & Certification Corporation).

Caldera auxiliar a gas

El calentador auxiliar considerado en la simulación (type 6) tiene una capacidad de 1,000 kW. El calentador mantiene la temperatura del agua del tanque a 60 °C en caso de que la energía captada por los colectores no alcance esa temperatura.

Termo tanque estratificado

El termo tanque se simula utilizando el modelo de tanque estratificado de TRNSYS (type 4a). Cuenta con dos entradas y dos salidas de agua. El agua sale del tanque estratificado hacia los colectores por la parte inferior y regresa hacia la parte superior, aprovechando así la temperatura más baja del tanque para una mayor eficiencia de los colectores solares.

El agua sale del tanque hacia los intercambiadores de calor por la parte superior y regresa por la parte inferior, aprovechando así la temperatura más elevada del agua del tanque.

Bombas de velocidad constante

Para la simulación de las bombas se utilizó el type 110, la bomba que hace circular el agua por el campo de colectores arranca cuando la diferencia de temperaturas entre el agua de la parte inferior y superior del tanque alcanza una diferencia de 10°C. El encendido de la bomba se controla con un controlador basado en histéresis. Intercambiadores de calor

El intercambiador de calor se modeló con el componente de intercambiador de calor a contra corriente (type 5b). Se basa en la aproximación de efectividad de capacitancia mínima de un intercambiador de calor. En este modelo, el usuario proporciona un coeficiente global de transferencia de calor (UA), así como los flujos propuestos de ambos fluidos. Los fluidos son agua-aire.

Ventiladores

Este modelo permite mantener una corriente de flujo constante de aire hacia el intercambiador de calor agua-aire. Las propiedades del aire se toman del aire dentro del invernadero. La corriente de flujo de aire es introducida en kg/h. En TRNSYS, el ventilador es el Type 3.

El ventilador es capaz de entregar características del aire como temperatura y flujo, además de características del ventilador como la energía eléctrica consumida.

Diversores y mezcladores de flujos

Este modelo permite dividir o mezclar flujos de agua ya sea en proporciones determinadas o ajustables. En TRNSYS este dispositivo lo representa el Type 11.

Simulación del sistema

Se simuló la operación del sistema durante periodos de un año, realizando cálculos cada 15 minutos (paso). Las condiciones climáticas son idénticas para cada corrida y corresponden a un año típico en la ciudad de Delicias, Chih. Los resultados generados por TRNSYS se muestran gráficamente en pantalla con resolución de 15 minutos. Los diversos flujos térmicos calculados fueron integrados en periodos de un día y un año, para obtener resultados diarios y anuales.

Resultados

Los resultados se presentan en graficas de temperaturas obtenidas del simulador y en tablas con datos procesados basados en un análisis paramétrico.

Temperatura de Invernadero sin calefacción

El comportamiento anual de temperaturas de aire ambiente dentro y fuera del invernadero puede verse en los resultados de la simulación mostrada en la figura 5. Se observan líneas punteadas paralelas indicando el intervalo de la temperatura de confort del cultivo. Se observa que la temperatura ambiente dentro del invernadero, en invierno y verano, esta generalmente fuera de dicho confort.

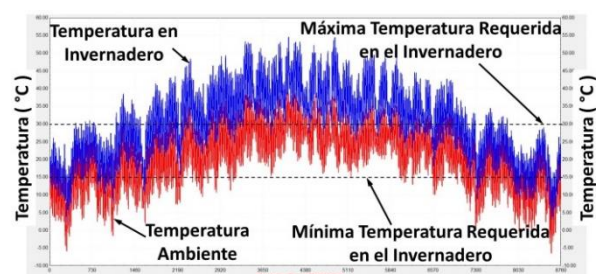


Figura 5 Temperaturas ambiente fuera y dentro del invernadero sin climatizar

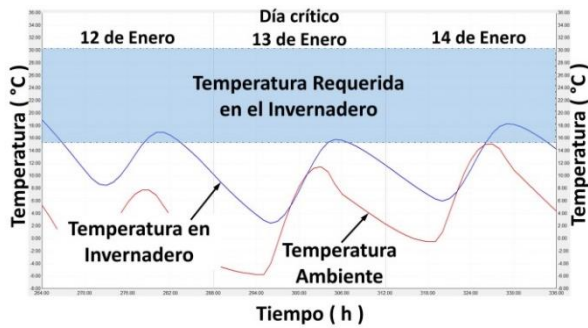


Figura 6 Temperaturas fuera del intervalo de confort

Temperatura de Invernadero con calefacción

La figura 7 muestra el comportamiento térmico del invernadero con el equipo solar propuesto. Se observa que en temporada invernal la temperatura en el invernadero se encuentra dentro del intervalo requerido cercana a la línea inferior.

El día que presenta la temperatura ambiente más baja del año es el 13 de enero con -6°C . Para ese día y con el equipo solar que se recomienda en este trabajo, la temperatura en el invernadero se encuentra dentro de la temperatura requerida.

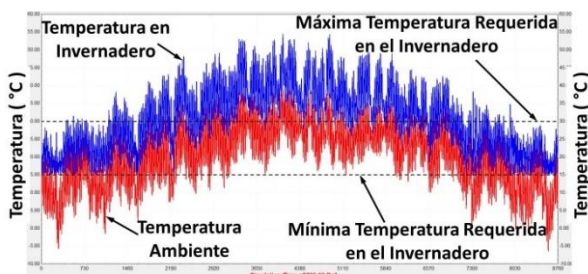


Figura 7 Temperaturas ambiente fuera y dentro del invernadero climatizado

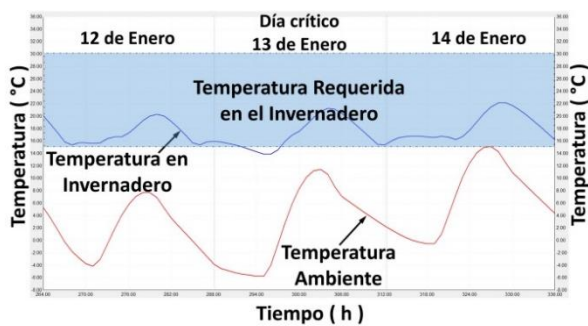


Figura 8 Temperaturas dentro del intervalo de confort

Fracción solar

La fracción solar (FS) ya sea mensual o anual, es la fracción del total de energía que es abastecida por el sistema solar y se puede calcular por medio de la ecuación de Buckles y Klein (Hobbi, 2009) la cual se muestra a continuación:

$$FS = \frac{(Q_{Carga} - Q_{Auxiliar})}{Q_{Carga}} \quad (2)$$

Donde Q_{carga} es el total de energía requerida y $Q_{auxiliar}$ es la energía aportada por el sistema auxiliar (en este caso la caldera). La importancia de conocer la fracción solar radica en que es un indicador del desempeño global del sistema y no sólo de algún componente. El código español energético para edificios recomienda una fracción solar mínima del 60%.

Número de colectores

Frecuentemente los sistemas solares son diseñados para obtener una fracción solar en particular, es decir, para obtener un cierto nivel deseado en la sustitución de energía convencional (Domínguez et al., 2012).

La simulación se configuró manera que se obtuviera un valor alrededor del recomendado, obteniendo con ello que 300 colectores solares de tubos evacuados son necesarios para obtener el 72%.

Volumen de almacenamiento térmico

De acuerdo con los resultados obtenidos en la simulación para las diferentes relaciones: volumen de almacenamiento / área de captación, se observó que el comportamiento térmico más favorable, se tiene cuando la relación se fija en 50 litros por cada metro cuadrado de área de colección.

Diseño recomendado para calentamiento

El equipo requerido para satisfacer la demanda de calefacción con fracción solar de 72% se presenta en la siguiente tabla.

Equipo	Recomendado FS = 72%	Precio Unitario
Colectores solares de tubos evacuados, heat pipe con cabezal	300	\$10,000
Almacenamiento térmico @ 50 L/m ²	75 m ³	\$80,000 / 25 m ³
Intercambiadores de calor	140	\$9,000
Caldera Auxiliar de 1000 kW	1	\$750,000

Tabla 1 Características del equipo que conforma el sistema solar asistido por gas propuesto

En los casos de colectores, intercambiadores y caldera, los modelos y cantidades recomendadas están basados en la disponibilidad actual de información técnica y precios.

Proyección financiera para calentamiento

Se realizó la proyección financiera de los costos de operación del invernadero, para comparar el costo de calentamiento, climatizándolo con gas, contra el costo que resulta al incluir equipamiento solar.

Los costos que se consideran para el análisis preliminar son:

- Consumo de gas sin apoyo solar.
- Consumo de gas cuando se tiene apoyo solar, con las dos diferentes fracciones solares reportadas.
- Costo de adquisición estimado de colectores solares

Los costos que no se toman en cuenta en este análisis son:

- Adquisición de la caldera.
- Almacenamiento térmico.
- Intercambiadores de calor

Debido a que dichos equipos se requieren en ambas opciones.

Para este análisis se obtienen los consumos de gas incurridos por calefacción durante un año completo de operación, para dos configuraciones analizadas.

- Sistema basado solo en gas L.P. FS = 0.
- Sistema con 300 colectores solares FS = 72%.

Dado que la vida útil de los equipos se estima en 25 años, se tiene que el consumo energético de cada configuración se mantendrá igual durante toda la vida útil, pero el costo del gas sufre un aumento de precio anual conocido del 9%, y la inflación en México es del 4%. Con lo anterior se tienen flujos de efectivo al inicio del periodo de tiempo analizado, originados por la inversión requerida para la adquisición de los colectores solares. Los costos de operación resultantes del consumo de gas en cada opción, se considera que ocurren al final de cada año, y van en aumento debido al aumento constante del precio del gas. Se tienen 25 años de operación, y para poder analizar el valor financiero de las diferentes opciones se trasladan los costos anuales a valor presente, sumándose con los costos de adquisición de los colectores solares. Con ello se obtiene el monto total, el valor financiero de cada opción de diseño analizada, que ya pueden compararse entre sí para evaluar las opciones de diseño.

	FS = 0	FS = 72%
Consumo de gas (\$)	11,870,054	3,561,304
Colectores solares (\$)	0	3,000,000
Valor financiero @ 25 años (\$)	11,870,054	6,561,304

Tabla 2 Resumen de proyección financiera

Conclusiones

Se diseñó el sistema de calefacción de un invernadero agrícola para tomate Saladette, mediante la plataforma computacional TRNSYS.

Se determinó el equipamiento que satisface técnica y económicamente los requerimientos necesarios para el óptimo desarrollo del tomate en temporada de invierno con una fracción solar del 72%.

Del análisis preliminar se observa que el valor financiero del proyecto resulta favorable para la utilización de energía solar, aun y cuando solo se está considerando el uso del sistema de colección solar para calefacción del invernadero.

Debe observarse que durante todo el verano el sistema es capaz de seguir colectando energía que tiene un valor superior al utilizado durante el periodo invernal. Esto es fácilmente apreciable del hecho que el periodo sin requerimiento de calefacción es más largo, y la disponibilidad de energía solar durante ese periodo también es superior al invernal.

Dicha energía requiere ser utilizada para aprovechar su valor, posiblemente para producir agua fría y usarla en la refrigeración del invernadero, o bien usarla en algún proceso adicional que pueda agregar valor a los excedentes de tomate o a los desperdicios generados durante el proceso.

Los precios mostrados en tablas no incluyen costos de instalación.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del: Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol), A través del Proyecto: P13 “Laboratorios de pruebas para baja y media temperatura, laboratorio para el diseño e integración de sistemas termo solares asistido por computadora” Perteneciente a la Convocatoria 2013-02, del: Fondo SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA. Para el desarrollo y presentación de este trabajo. Jorge Alberto Escobedo Bretado

Referencias

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

Amir Vadiee, Viktoria Martin. (2013). Energy analysis and thermoeconomic assessment of the closed greenhouse – The largest commercial solar building. *Applied Energy* 102 1256–1266

Amir Vadiee, Viktoria Martin. (2013). Thermal energy storage strategies for effective closed greenhouse design. *Applied Energy* 109 337–343

Attar, I., Naili, N., Khalifa, N., Hazami, M., Farhat, A. (2013). Parametric and numerical study of a solar system for heating a greenhouse equipped with a buried exchanger. *Energy Conversion and Management*. 70 (2013) 163–173

Aye Lu, Fuller R.J., Canal A. (2010). Evaluation of a heat pump system for greenhouse heating. *International Journal of Thermal Sciences* 49 202–208

Candy Seona, Moore Graham, Freere Peter. (2012). Design and modeling of a greenhouse for a remote region in Nepal. *Procedia Engineering* 49 (2012) 152 – 160

Castellanos, Javier Z. (2004). Manual de producción hortícola en invernadero. 2da Edición. INTAGRI.

Chargui R., Sammouda H. (2014). Modeling of a residential house coupled with a dual source heat pump using TRNSYS software. *Energy Conversion and Management* 81 384–399

Domínguez F., Cejudo J., Carrillo A., Ruivo C. (2012). Design of solar thermal systems under uncertainty. *Energy and Buildings* 47, 474-484.

Hobbi Alireza, Siddiqui Kamran. (2009). Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS. *Solar Energy* 83, 700–714.

Kamel Raghad S., Fung Alan S. (2014). Modeling, simulation and feasibility analysis of residential BIPV/T+ASHP system in cold climate—Canada. *Energy and Buildings* 82 758–770

Kolokotsa D., Saridakis G., Dalamagkidis K., Dolianitis S., Kaliakatsos I. (2010). Development of an intelligent indoor environment and energy management system for greenhouses. *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 155–168

León Gallegos. (2006). Guía para el cultivo de tomate en invernadero. 2da Edición.

Marshall L. Sweet, James T. McLeskey Jr. (2012). Numerical simulation of underground Seasonal Solar Thermal Energy Storage (SSTES) for a single family dwelling using TRNSYS. *Solar Energy* 86, 289-300.

Mashonjowa, E., Ronsse, F., Milford, J.R., Pieters, J. G. (2013) Modelling the thermal performance of a naturally ventilated greenhouse in Zimbabwe using a dynamic greenhouse climate model. *Solar Energy* 91 381–393.

Souliotis M., Kalogirou S., Tripanagnostopoulos Y. (2009). Modelling of an ICS solar water heater using artificial neural networks and TRNSYS. *Renewable Energy* 34, 1333–1339

Tsoutsos T, Aloumpi E, Gkouskos Z, Karagiorgas M. (2010). Design of a solar absorption cooling system in a Greek hospital. *Energy and Buildings* 42 265–272.

Emulador de turbina eólica basado en el control vectorial de una máquina eléctrica**Wind turbine emulator based on vector control of an electric machine**

HERNÁNDEZ, Oscar†*, MINA, Jesús y CLAUDIO, Abraham

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internadao Palmira S/N, Palmira, 62490 Cuernavaca, Mor., México.*ID 1^{er} Autor: *Oscar, Hernández*ID 1^{er} Coautor: *Jesús, Mina*ID 2^{do} Coautor: *Abraham, Claudio*

DOI: 10.35429/JCS.2020.12.4.9.19

Recibido: 15 de Julio, 2020; Aceptado 30 de Diciembre, 2020

Resumen

Algunos subsistemas asociados a generadores eoloeléctricos para ser probados requieren e.g. de una turbina eólica y un túnel de viento. Esta infraestructura, por su costo/dimensión, no es de fácil acceso por lo que conviene contar con sistemas capaces de emular una turbina eólica. Este trabajo presenta un emulador de turbina basado en una Máquina de Inducción (MI). La acción sobre la MI es mediante control vectorial y un convertidor Back-to-Back, conformado por dos convertidores (el GSC-lado red y el MSC-lado máquina), interconectados mediante un bus de CD-capacitivo. El control del GSC es orientado al voltaje de red y su objetivo es regular el bus de CD. El control del MSC es orientado al flujo de estator y su objetivo es controlar el par. Dado que la referencia de par se obtiene a partir del modelo estático-dinámico de la turbina que se desea emular (curvas par-velocidad); esto, junto con una adecuada compensación de inercia, permite emular diferentes turbinas eólicas, donde solo hay que cuidar que la MI sea compatible con la turbina en términos del par/potencia. Específicamente, en este trabajo se presentan resultados de simulación en PSIM de la propuesta de emulador de turbina para una MI de 1 HP.

Generador eoloeléctrico, Turbina eólica, Máquina de inducción, Convertidor back-to-back, Control vectorial

Abstract

In wind energy conversion systems some of their components need of the required infrastructure, like a wind turbine and a wind tunnel, in order to be tested. This infrastructure, due to its cost/dimension, is often inaccessible; so, it is desirable to have a system able to emulate the behavior of a wind turbine. This paper presents a wind turbine emulator based on an induction machine (IM). The action on the IM is through vectorial control and a Back-to-Back converter, consisting of two converters (GSC-grid side and MSC-machine side), linked via a capacitive DC-bus. GSC control is grid voltage oriented and aims to regulate the DC bus. MSC control is stator flux oriented and aims to control the IM torque. Given that the torque reference is obtained from the static-dynamic model of the emulated wind turbine (torque-speed curves); this, together with adequate compensation of inertia, can emulate different wind turbines, of course taking care that the IM be compatible with the turbine in terms of the expected torque/power. Specifically, this paper shows simulation results in PSIM of the proposed wind turbine emulator for a 1 HP IM.

WECS, Wind turbine, Induction machine, Back-to-back converter, Vectorial control

Citación: HERNÁNDEZ, Oscar, MINA, Jesús y CLAUDIO, Abraham. Emulador de turbina eólica basado en el control vectorial de una máquina eléctrica. Revista de Simulación Computacional. 2020. 4-12:9-19.

* Correspondencia al autor (Correo electrónico: ohernandez@cenidet.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

La energía eólica es una de las fuentes de energía renovable mejor posicionadas para la generación de energía eléctrica, esto a partir del uso de generadores eolieléctricos (WECS – Wind Energy Conversion Systems). Sin embargo, en el contexto eléctrico ahora los WECS son vistos como elementos activos, los cuales, entre otros, deben mantener bajos niveles de THD, colaborar en la regulación del voltaje y la frecuencia de la red a través del control de la potencia activa y reactiva, etc. (Etxegarai et al., 2015).

Estos nuevos requerimientos en los WECS han llevado al desarrollo de investigación sobre diversos aspectos relacionados con los WECS, e.g. en relación con las componentes mecánicas, eléctricas y electrónicas; sin embargo, para poder evaluar el desempeño de estas alternativas de solución, es necesario un ambiente controlado, en este caso, condiciones de par y velocidad angular en el eje del generador, principalmente.

La solución evidente para probar un WECS es contar con una turbina eólica y un túnel de viento, pero esto es costoso y de difícil acceso, por lo tanto, se buscan alternativas más prácticas y económicas. Una opción es utilizar un motor eléctrico para impulsar el generador en sustitución de la turbina y el túnel de viento, sin embargo, en un sentido estricto, un motor eléctrico no posee la misma característica par-velocidad que una turbina eólica, en consecuencia, se necesita un sistema de control para lograr que el motor se comporte como una turbina. Este sistema capaz de reproducir el comportamiento de las turbinas eólicas, bajo determinadas condiciones de viento se le llama emulador de turbina eólica.

En general, los emuladores de turbina que se reportan en la literatura están basados en el modelo de la turbina a emular, específicamente, en relación con sus curvas potencia/par-velocidad angular, la cual define la referencia de par que se desea que el motor reproduzca. Respecto a las máquinas eléctricas se ha propuesto el uso de máquinas de CD y de CA.

En (Martinez et al., 2014) se usa un motor de CD al que se le conecta una resistencia en serie en la armadura; la solución es simple, sin embargo, las pérdidas de energía en la resistencia serie son muy altas. En otros casos como (Arifujjaman, 2012) se utiliza un control de velocidad para el motor, cuya referencia se obtiene del modelo de turbina a emular; aunque la solución parece atractiva, no obstante, los resultados parecen no ser convincentes. En (Weiwei et al., 2007) se propone un control de par, los resultados mostrados no son muy buenos, pero pueden ser aceptables. Con un esquema de control de par muy similar, (Yu, 2014) propone un emulador que sólo reproduce los puntos de máxima potencia de la turbina. Además, existen algunas otras variantes, como es el caso de (Ahshan et al., 2008), en donde se utiliza un sensor de par, a fin de mejorar la correspondencia entre el par a la salida del motor y el par del modelo de turbina.

Otro aspecto de importancia sobre el comportamiento en una turbina es su inercia, la cual es poco abordada en los artículos previos. La inercia está ligada con la dinámica de la turbina y define el tiempo de respuesta entre un punto de operación y otro, lo cual es importante e.g. en el diseño de sistemas de control del WECS.

Dado que la inercia propia de un motor eléctrico como emulador no se equipará a la inercia de una turbina real, entonces es necesario que se incluya una componente de compensación de inercia en el emulador.

En este sentido, los emuladores basados en máquinas de CA sí suelen incluir compensación de inercia. En el caso de (Lin et al., 2006), (Yang et al., 2013) y (Dolan et al., 2005) se hace uso de una Máquina Síncrona de Imanes Permanentes y de un control de par; los resultados experimentales en estado estacionario avalan el correcto funcionamiento del sistema, sin embargo, se destaca que en (Lin et al., 2006) y (Yang et al., 2013) no se incluye la inercia; por su parte (Dolan et al., 2005) sí aborda la compensación de inercia e ilustra su dinámica ante cambios de par, además contempla también, los fenómenos de sombra de torre y cizalladura del viento (diferencias en la velocidad del viento debidas a la torre y a la posición de aspas).

Otras propuestas de emuladores hacen uso de la Máquina de Inducción Jaula de Ardilla (MIJA), como es el caso de (Kojabadi et al., 2004) y (Sokolovs et al., 2014); en el caso de (Sokolovs et al., 2014), entre otras cosas, aborda varios tipos de turbina y sí considera la compensación de inercia. Los resultados en estado estacionario son buenos, pero no se muestra un análisis transitorio asociado a la compensación de inercia.

En relación con las revisiones previas, en este trabajo se propone el diseño de un emulador de turbina eólica basado en una MIJA y un convertidor Back-to-Back que sí contempla la compensación de inercia. De manera específica el control de la MIJA se hace usando control de par y flujo magnético basado en control vectorial.

El caso de estudio es una MIJA de 1 HP que será adecuada para turbinas eólicas de potencias menores o iguales a 1HP.

El documento está organizado como sigue: la sección 2 provee el modelado estático/dinámico de una turbina eólica y su dimensionamiento; la sección 3 describe los componentes del emulador de turbina; la sección 4 aborda el modelado de algunos componentes del emulador para el diseño del sistema de control del emulador; la sección 5 muestra los resultados de simulación obtenidos a partir de la implementación del emulador en PSIM; finalmente, la sección 6 proveen las conclusiones del trabajo.

Modelado y Dimensionamiento de la Turbina Eólica

El modelo de una turbina se compone de las curvas potencia/par-velocidad angular y de la componente de inercia.

Modelo Estático

La potencia mecánica (P_T) o el par (T_T) de una turbina está definida por:

$$P_T = C_p \frac{\rho \pi r^2 V_v^3}{2}, T_T = C_p \frac{\rho \pi r^2 V_v^3}{2\omega_T} \tag{1}$$

r es el radio de la turbina, ρ y V_v son la densidad y la velocidad del viento, ω_T es la velocidad angular de la turbina, y C_P es el coeficiente de potencia. El C_P está definido para cada modelo de turbina; en este trabajo se usa uno definido en (Nouira et al., 2012), como:

$$C_p = 0.22 \left[110 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.025}{\beta^2 + 1} \right) - 0.4\beta - 5 \right] e^{-12.5 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.025}{\beta^2 + 1} \right)} + 0.0068\lambda \tag{2}$$

Donde, β es el ángulo de ataque de las aspas y λ es la razón de velocidad de punta (Tip Speed Ratio), dado por: λ=(rω_T)V_v. De acuerdo con (1), para cada velocidad del viento, se tendrán respectivas curvas de potencia o par con respecto a la velocidad angular.

Modelo Dinámico

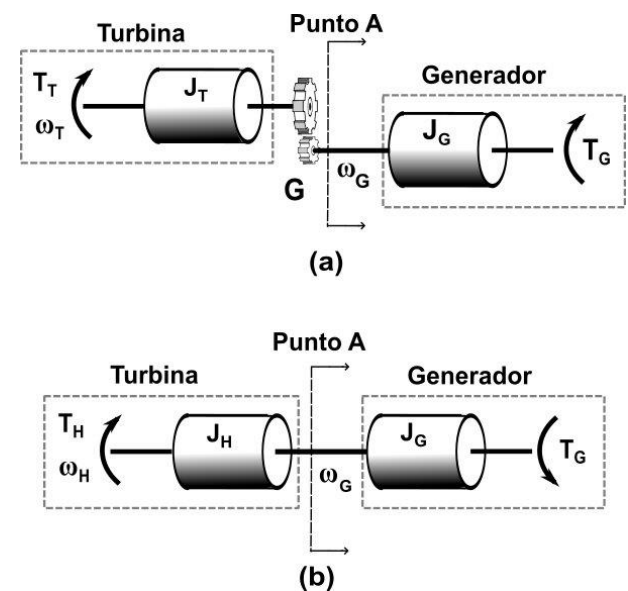


Figura 1 (a) Subsistema mecánico del WECS. (b) Subsistema mecánico de la turbina reflejado al lado de alta velocidad

El subsistema mecánico de la turbina eólica se describe en la Figura 1a; donde J_T es la inercia de la turbina; T_G, ω_G, J_G son el par, la velocidad e inercia del generador; y G es la ganancia de la caja de engranes. Dado que el emulador se acoplará directamente al generador, las variables y parámetros de la turbina se transforman al lado de alta velocidad, esta transformación se muestra en la Figura 1b. Los valores están dados por.

$$\omega_H = G\omega_T, T_H = \frac{T_T}{G}, J_H = \frac{J_T}{G^2}$$

Compensación de Inercia

De acuerdo con la Figura 1b, el emulador debe entregar un par T_A en la entrada del generador. Con una dinámica correspondiente a la inercia (J_H). Sin embargo, la inercia del motor (J_M) no se equipará con la de la turbina, por lo que es necesario hacer una compensación de inercia. Este trabajo propone compensar la inercia junto con el control de par del motor, lo que es una opción sin costo extra y ajustable al valor de inercia de cualquier turbina que se desee emular, lo cual no sucede al compensar inercia e.g. mediante volantes de inercia.

En el mecanismo de compensación de inercia que se propone, la inercia de compensación (J_C) se deberá sumar a la inercia propia del motor (J_M), véase la Figura 2. En este sentido, el valor de la inercia de compensación deberá ser: $J_C = J_H - J_M$.

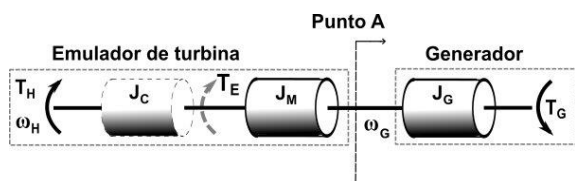


Figura 2 Modelo del sistema mecánico del emulador con compensación de inercia

De acuerdo con la Figura 2, el modelo matemático entre T_H y T_E (par del motor), es

$$J_C \frac{d\omega_H}{dt} = T_H - T_E \quad (3)$$

A partir del cual se puede definir una referencia T_E^* , tal como se indica en (4) o en la Figura 3:

$$T_E^* = T_H - J_C \frac{d\omega_H}{dt} \quad (4)$$

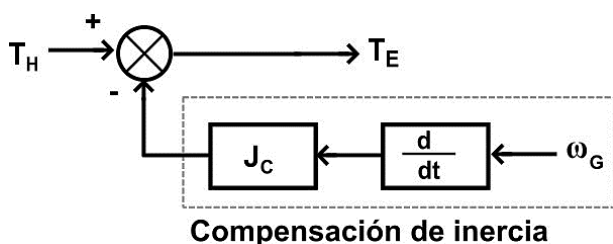


Figura 3 Referencia de par con compensación de inercia para el control de par de la MIJA

La referencia de par T_E^* , incluye la referencia de par T_H^* provista por el modelo estático de la turbina, ecuación (1); y la dinámica asociada a la compensación de inercia; es decir, T_E^* es una versión ralentizada de T_H^* . Con esto, es posible proponer un lazo de control del par (T_E) de la MIJA, cuya referencia sea dada por (4). En este control, de manera natural, el par resultante (T_A) incluirá la dinámica asociada a J_M , y de manera externa, incluirá la dinámica asociada a J_C .

Dimensionamiento de la Turbina

El caso de estudio es un emulador basado en una MIJA de 1 HP, razón por la cual, se definirá un modelo de turbina cuya potencia en el escenario de viento máximo esté dentro de la potencia que la MIJA pueda entregar. En este sentido, se asumirá el caso de una turbina eólica de $\frac{1}{2}$ HP; la cual, basado en valores comerciales se asume con: $r=0.68$ m, $J_T=0.1$ Kgm² y $V_v=6-10$ m/s. Con estos valores, y de acuerdo con las ecuaciones de potencia y par, (1), dicha turbina eólica describe las curvas de potencia y par que se muestran en la Figura 4. Por otro lado, a fin de equiparar las bajas velocidades angulares del modelo de turbina, con las velocidades altas de la MIJA (ver Tabla 1) para una condición supersíncrona, se propone una caja de engranes con $G=2.8$.

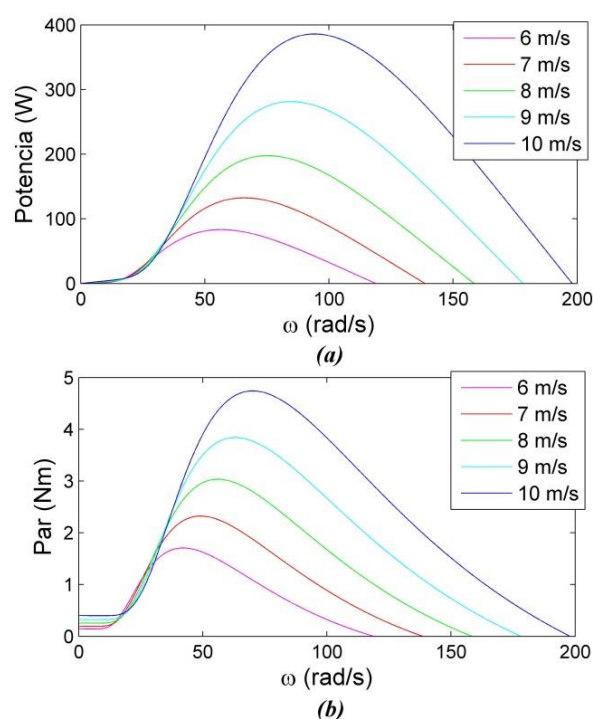


Figura 4 Curvas de la turbina eólica propuesta. (a) Potencia-vel. angular; (b) Par-vel. angular

Estructura del emulador de turbina

La estructura general del emulador de turbina se muestra en la Figura 5; el cual está conformado por: una MIJA, un convertidor electrónico tipo Back-to-Back (B2B), filtro del lado red, el modelo de turbina a emular y los controladores correspondientes.

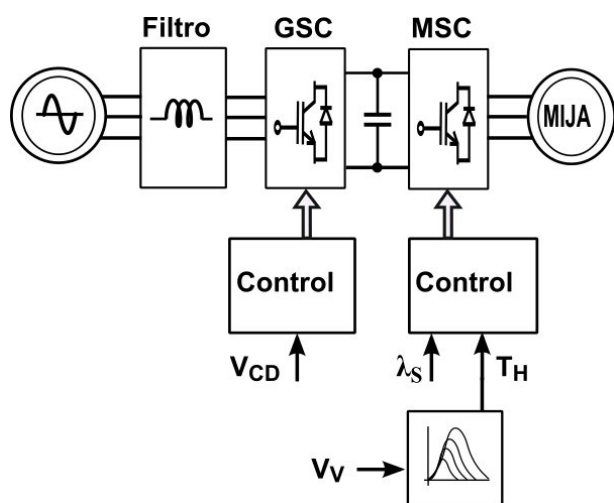


Figura 5 Esquema del emulador de turbina

Los parámetros de la MIJA están dados en la Tabla 1. Por su parte, el B2B está conformado por dos convertidores conectados por un bus de CD capacitivo, uno es el convertidor del lado red (GSC) y el otro es el convertidor del lado máquina (MSC). Los parámetros del B2B y del filtro lado red están dados en la Tabla 2.

Parámetro	Valor
Potencia	1 HP
Voltaje	230/460 V
Corriente a plena carga	3.2/1.6 A
Velocidad a plena carga	1725 rpm
Momento de inercia	0.0026 kgm ²
Resistencia de estator	3.43 Ω
Resistencia de rotor	2.2 Ω
Autoinductancia de estator	5.4 mH
Autoinductancia de rotor	8.1 mH
Inductancia mutua	212.5 mH

Tabla 1 Parámetros de la MIJA

Parámetro	Valor
Voltaje en bus de CD (V_{CD})	420 V
Capacitancia (C)	180 uF
Índice de modulación (m)	0.8
Frec. de conmutación (f_c)	10 kHz
Corriente máxima del filtro	4.52 A
Ciclo de trabajo (d)	0.5
Inductancia del filtro (L_f)	11 mH
Resistencia serie (r_f)	5.4 mH

Tabla 2 Parámetros del B2B y del Filtro de Red

Diseño del sistema de control

El control del emulador de turbina se divide en dos partes: el control del GSC, encargado de regular el bus de CD; y el control del MSC, que se encarga de regular el par y el flujo. Aquí se usa control vectorial, que es una técnica basada en la transformación abc→dq; en el marco dq las variables son ortogonales, lo que permite el diseño de controles desacoplados con diversos objetivos.

En este trabajo se selecciona al voltaje de red como marco de referencia para el control del GSC; mientras que para el control del MSC se selecciona como marco de referencia al flujo del estator.

Control del Convertidor del Lado Red (GSC)

Modelado del GSC

El subsistema red-filtro-GSC se muestra en el esquema de la Figura 6. Donde: v_{la}, v_{lb}, v_{lc} son los voltajes de red; v_{ca}, v_{cb}, v_{cc} son los voltajes en terminales del GSC; r_{fa}, r_{fb}, r_{fc} son las resistencias serie del filtro y L_{fa}, L_{fb}, L_{fc} son las inductancias por fase del filtro.

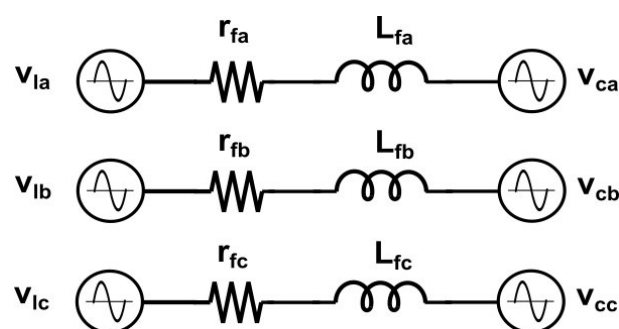


Figura 6 Circuito simplificado de la conexión convertidor-red

El modelo dq del subsistema red-filtro-GSC, es.

$$\begin{aligned} v_{ld} &= r_f i_{ld} + \omega_l L_f i_{lq} + L_f \frac{di_{ld}}{dt} + v_{cd} \\ v_{lq} &= r_f i_{lq} - \omega_l L_f i_{ld} + L_f \frac{di_{lq}}{dt} + v_{cq} \end{aligned} \quad (5)$$

Donde ω_l es la velocidad angular del marco de referencia θ_l .

PLL para ángulo del Voltaje de Red

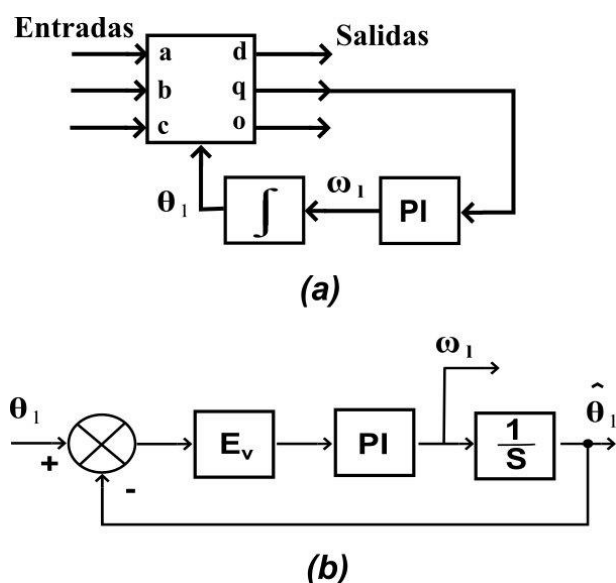


Figura 7 (a) Esquema del PLL. (b) Esquema para el diseño del control del PLL

El ángulo del voltaje de red (marco de referencia para el control del GSC), se determina a través de un PLL como el que se muestra en la Figura 7, (Chung, 2000). En este PLL, las entradas son los voltajes abc, y se asume que el vector de voltajes se orienta completamente sobre el eje d, por lo que el eje q deberá ser cero (señal de error como entrada al PI). En el esquema para el diseño del PI, Figura 7b; E_v es el valor pico de las señales de entrada, en este caso: $E_v = V_p = 170$ V (voltaje pico de red). La función de transferencia (FT) en lazo cerrado del esquema de la Figura 7b es:

$$H_{F1}(s) = \frac{E_v K_{PP} s + E_v K_{PI}}{s^2 + E_v K_{PP} s + E_v K_{PI}} \quad (6)$$

Para determinar los parámetros del PI se compara (6) con un sistema de segundo orden con factor de amortiguamiento $\xi = 0.55$ y $\omega_n = 1500$ rad/s, que es un ancho de banda mayor a la frecuencia de red (377 rad/s). Con esto se obtiene: $K_{PP} = 9.705$ y $K_{PI} = 13235$.

Control del GSC

El control del GSC se hace mediante un lazo interno de control de corriente y un lazo externo de regulación del bus de CD. Dado que el marco de referencia es el voltaje de red, entonces: $v_{ld} = V_p$ y $v_{lq} = 0$; bajo estas consideraciones y despejando de (5) para los voltajes en el convertidor, se obtiene:

$$\begin{aligned} v_{cd} &= -r_f i_{ld} - L_f \frac{di_{ld}}{dt} - \omega_l L_f i_{lq} + v_{ld} \\ v_{cd} &= -v_{cd1} + \text{Com}_{ld} \\ v_{cq} &= -r_f i_{lq} - L_f \frac{di_{lq}}{dt} + \omega_l L_f i_{ld} \\ v_{cq} &= -v_{cq1} + \text{Com}_{lq} \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned} v_{cd1} &= r_f i_{ld} + L_f \frac{di_{ld}}{dt} \\ v_{cq1} &= r_f i_{lq} + L_f \frac{di_{lq}}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

Nótese que las ecuaciones dadas en (7) son lineales y desacopladas, por lo que i_{ld} se selecciona para controlar la potencia activa (regulación del bus de CD), mientras que i_{lq} se selecciona para controlar la potencia reactiva del GSC. Dado que esto último no es de interés en el presente trabajo, entonces $i_{lq} = 0$, y los términos de compensación o desacople se reducen en: $[\text{Com}]_{ld} = v_{ld}$ y $[\text{Com}]_{lq} = \omega_l L_f i_{ld}$. El esquema del lazo de control de corriente para el GSC, se muestra en la Figura 8a, que es válido tanto para i_{ld} como para i_{lq} .

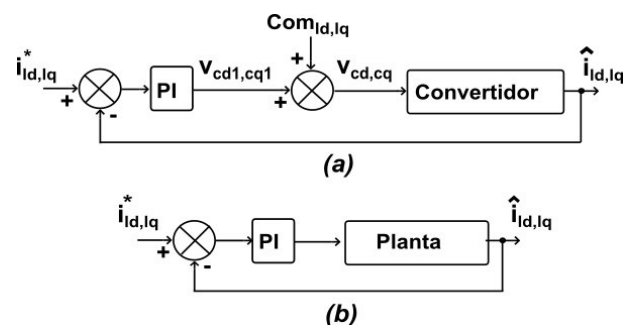


Figura 8 (a) Lazo de control de corriente del GSC. (b) Esquema para el diseño del lazo de corriente del GSC

El control se diseña a partir del esquema simplificado de la Figura 8b, en donde la FT de cada planta se obtiene de (7). Así, la FT del sistema en lazo cerrado es.

$$H_{ii}(s) = \frac{\frac{K_{liP}}{L_f} s + \frac{K_{liI}}{L_f}}{s^2 + \frac{(r_f + K_{liP})}{L_f} s + \frac{K_{liI}}{L_f}} \quad (8)$$

Para determinar los parámetros del PI se compara (8) con un sistema de segundo orden con factor de amortiguamiento $\xi=1$ y $\omega_n=400$ rad/s, con lo cual se obtiene: $K_{liI}=1600$ y $K_{liP}=4.57$. Por otro lado, para el diseño del lazo externo de control se parte del análisis de corrientes en el nodo del bus de CD, en donde resulta.

$$i_{RED} = i_c + i_{MIJA} \quad (9)$$

i_c : corriente del capacitor; i_{RED} : corriente del nodo hacia el GSC; i_{MIJA} : corriente del nodo hacia el MSC. Al igualar la potencia en el bus de CD con la del GSC (bajo la consideración de $i_{lq}=0$) y con la del MSC, se obtiene.

$$P_{GSC} = \frac{3}{2} v_{cd} i_{ld} = v_{BUS} i_{RED}$$

$$P_{MSC} = \frac{3}{2} (v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}) = v_{BUS} i_{MIJA} \quad (10)$$

Dado que $P_{GSC}=P_{MSC}$, de (9) y (10) se obtiene:

$$i_{ld} = \frac{2v_{BUS}}{3v_{cd}} i_c + \frac{v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}}{v_{cd}} \quad (11)$$

$$= i_{ld1} + Com_c$$

Donde:

$$i_{ld1} = \frac{2v_{BUS}}{3v_{cd}} i_c = C \frac{4\sqrt{2} dv_{BUS}}{3m_1 dt} \quad (12)$$

Donde m_1 es el índice de modulación. La referencia para el lazo interno se obtiene de (11). Asumiendo un controlador PI, para su diseño se toma (12) como planta y la FT en lazo cerrado es:

Los parámetros del PI se obtienen al igualar (13) con una FT de segundo orden. En este caso: $\xi=1$, $\omega_n=20$ rad/s y $m_1=0.8$; con lo cual se obtiene: $K_{CI}=0.168$ y $K_{CP}=0.0168$. El esquema completo del control del GSC se muestra en la Figura 9.

Control del Convertidor del Lado Máquina (MSC)

Modelado de la MIJA

$$v_{sd} = r_s i_{sd} - \omega \lambda_{sq} + \lambda'_{sd}$$

$$v_{sq} = r_s i_{sq} + \omega \lambda_{sd} + \lambda'_{sq}$$

$$v_{rd} = r_r i_{rd} - (\omega - \omega_r) \lambda_{rq} + \lambda'_{rd}$$

$$v_{rq} = r_r i_{rq} + (\omega - \omega_r) \lambda_{rd} + \lambda'_{rq}$$

$$\lambda_{sd} = \left(L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms} \right) i_{sd} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{rd}$$

$$\lambda_{sq} = \left(L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms} \right) i_{sq} + \frac{3}{2} L_{ms} i_{rq}$$

$$\lambda_{rd} = \left(L_{lr} + \frac{3}{2} L_{mr} \right) i_{rd} + \frac{3}{2} L_{mr} i_{sd}$$

$$\lambda_{rq} = \left(L_{lr} + \frac{3}{2} L_{mr} \right) i_{rq} + \frac{3}{2} L_{mr} i_{sq}$$

$$T_E = \frac{3P}{4} (\lambda_{sd} i_{sq} - \lambda_{sq} i_{sd}) \quad (14)$$

El control del MSC se basa en el modelo dq de la MIJA dado por las ecuaciones siguientes:

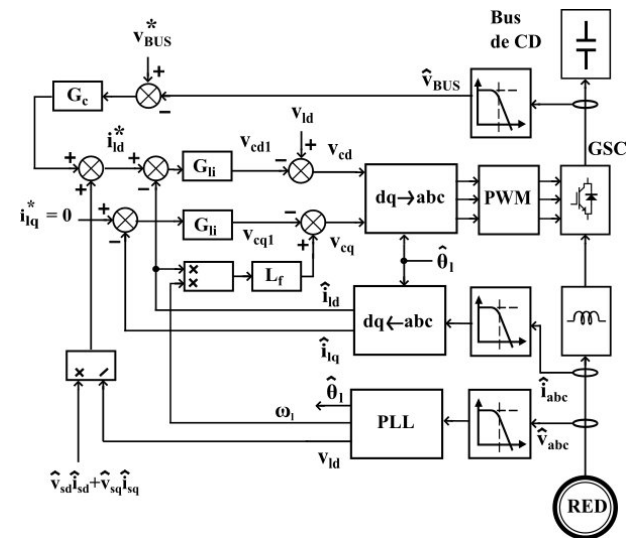


Figura 9 Esquema de control del GSC

PLL para ángulo del Flujo de Estator

El ángulo del flujo de estator (marco de referencia para el control del MSC), se obtiene utilizando un PLL similar al que se definió en el esquema de la Figura 7; no obstante, aquí las entradas son flujos por fase, que se calculan con $\lambda_{sn} = \int [(v_{sn} - r_s i_s)] dt$, donde: $n=\{a,b,c\}$.

El diseño del PLL es similar al desarrollado en la sección 4.1.2. En este caso la FT de lazo cerrado es:

$$H_{F1}(s) = \frac{E_f K_{PMP} s + E_f K_{PMI}}{s^2 + E_f K_{PMP} s + E_f K_{PMI}} \quad (15)$$

Los parámetros del controlador PI del PLL se obtienen al igualar (15) con una FT de segundo orden; en donde bajo la consideración de $E_f = \lambda_{sd} = 0.3$ Wb, $\xi = 1$, $\omega_n = 800$ rad/s; se obtiene: $K_{PMI} = 2133333$ y $K_{PMP} = 5333$.

Control del MSC

El control del MSC busca el control separado del flujo y del par de la MIJA; para lo cual se considera la siguiente observación:

Observación 1. Los controles no se pueden diseñar en términos de voltajes o corrientes de rotor, dado que se trata de una MIJA; $v_{rd} = v_{rq} = 0$ (rotor cortocircuitado).

El control de flujo y par consta de correspondientes lazos internos de corriente; para su diseño, tomando en cuenta la Observación 1, las ecuaciones de voltaje de estator, v_{sd} y v_{sq} , resultan en.

$$\begin{aligned} v_{sd} &= r_s i_{sd} + \lambda'_{sd} = v_{sd1} + Com_{Fid} \\ v_{sq} &= r_s i_{sq} + \omega \lambda_{sd} = v_{sq1} + Com_{Fiq} \end{aligned} \quad (16)$$

Con

$$\begin{aligned} v_{sd1} &= r_s i_{sd} \\ v_{sq1} &= r_s i_{sq} \end{aligned} \quad (17)$$

Los sistemas dados en (17) son útiles para el diseño de los controladores de los lazos internos, donde i_{sd} se selecciona para el *control de flujo* e i_{sq} se selecciona para el *control de par*. Los términos: $Com_{Fid} = \lambda'_{sd}$ y $Com_{Fiq} = \omega \lambda_{sd}$, son términos de compensación. Los controladores para los lazos internos de corriente son iguales, de tal forma que aquí solo se ilustra uno de los casos. El controlador propuesto es del tipo PI, el cual se diseña a partir de cualquiera de las plantas dadas en (17), donde su FT en lazo cerrado es

$$H_{Fi}(s) = \frac{\frac{K_{FiP}}{K_{FiP} + r_s} (s + \frac{K_{FiI}}{K_{FiP}})}{s + \frac{K_{FiI}}{K_{FiP} + r_s}} \quad (18)$$

Para determinar los parámetros del PI, se compara (18) con un sistema de primer orden como el que se muestra

$$H_1(s) = \frac{K(s + \omega_o)}{s + \omega_p} \quad (19)$$

Donde: $\omega_p = 400$ rad/s (ω_p debe ser menor a la seleccionada para el PLL); ω_o ubicada a una década arriba de ω_p . Con esto se obtiene: $K_{FiP} = 0.381$ y $K_{FiI} = 1524$.

Para el diseño del lazo externo, *control de flujo* (relación entre λ_{sd} e i_{sd}), se parte de la ecuación de λ_{sd} dada en (14), esto es

$$\lambda_{sd} = L_S i_{sd} + L_M i_{rd}$$

Sin embargo, dada la *Observación 1*, luego de manipulaciones algebraicas con las ecuaciones de (14), se obtiene una expresión de λ_{sd} que no depende de i_{rd} , esto es

$$i_{sd} + \sigma \frac{L_R}{r_r} i'_{sd} = \frac{1}{L_S} \lambda_{sd} + \frac{L_R}{r_r L_S} \lambda'_{sd} + com_1 \quad (20)$$

$$\text{Donde: } \sigma = 1 - \frac{L_M^2}{L_R L_S} \text{ y } com_1 = \sigma \frac{L_R}{r_r} \omega_{sl} i_{sq}.$$

Aplicando Transformada de Laplace a (20) se obtiene

$$I_{sd}(s) = I_{sd1}(s) + Com_{FE}(s) \quad (21)$$

Donde:

$$\begin{aligned} I_{sd1}(s) &= \frac{\left(\frac{L_R}{r_r L_S} s + \frac{1}{L_S}\right)}{\left(\sigma \frac{L_R}{r_r} s + 1\right)} \Lambda_{sd}(s) \\ Com_{FE}(s) &= \frac{1}{\left(\sigma \frac{L_R}{r_r} s + 1\right)} Com_1(s) \end{aligned}$$

Así, de acuerdo con (21) la referencia de corriente i_{sd}^* se obtiene a partir del lazo de control de flujo, diseñado con i_{sd1} como planta, más el término de compensación Com_{FE} . Por lo tanto, asumiendo un controlador PI y la planta dada por i_{sd1} , la FT en lazo cerrado es

$$H_{Fe}(s) = \frac{L_S \sigma K_{FEP} s^2 + \left(\frac{L_S r_r K_{FEP}}{L_R} + L_S \sigma K_{FEI}\right) s + \frac{L_S r_r K_{FEI}}{L_R}}{(L_S \sigma K_{FEP} + 1) s^2 + \left(\frac{L_S r_r K_{FEP}}{L_R} + L_S \sigma K_{FEI} + \frac{r_r}{L_R}\right) s + \frac{L_S r_r K_{FEI}}{L_R}}$$

Los parámetros del PI se obtienen al igualar $H_{Fe}(s)$ con un sistema de segundo orden con $\xi = 1$ y $\omega_n = 20$ rad/s; de lo cual se obtiene: $K_{FEP} = 18.27$ y $K_{FEI} = 227.8$.

Respecto al lazo externo para el control de par (relación entre T_E e i_{sq}), solo se define una referencia de i_{sq}^* en términos de T_E^* . Así, de la ecuación de par en (14), dado que $\lambda_{sq} = 0$, se obtiene:

$$i_{sq}^* = \frac{4}{3P\lambda_{sd}} T_E^* = K_1 T_E^* \quad (22)$$

La referencia T_E^* a su vez se obtiene de acuerdo con (4) o por el esquema de la Figura 3, en donde se introduce la compensación de inercia. La estructura completa del control del MSC se muestra en la Figura 10.

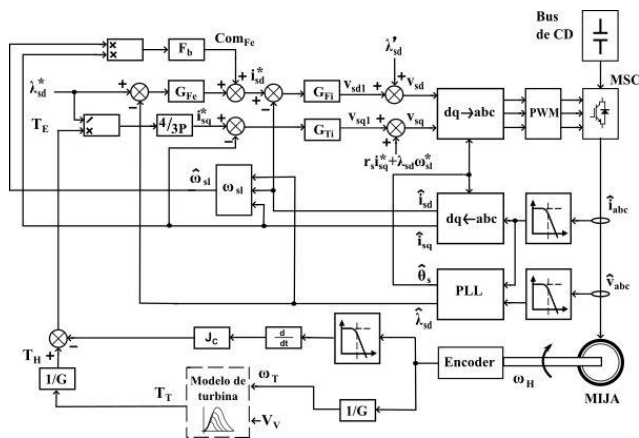


Figura 10 Esquema de control del MSC

Resultados

Prueba Dinámica del Emulador

Aquí se evalúa el efecto de la compensación de inercia en el emulador. Las condiciones de prueba contemplan cambios del par de carga, T_G , de acuerdo con el siguiente patrón: 1.1 Nm en $3 \leq t \leq 4.1s$, 0.7 Nm en $4.1 \leq t \leq 13.1 s$ y 1.1 Nm en $13.1 s \leq t \leq 22 s$. En la Figura 11a, se observa cómo el emulador logra seguir el par de carga (color verde), y el efecto dinámico (respuesta transitoria) del emulador sin compensación de inercia (línea roja) versus con compensación de inercia (línea azul). La Figura 11b, muestra la velocidad angular del emulador de turbina ante cambios de par, en la cual también es evidente la diferencia en la respuesta dinámica entre el emulador sin compensación de inercia (línea roja) versus con compensación de inercia (línea azul).

Finalmente, la Figura 11c muestra el voltaje en el bus de CD regulado por el control del GSC, $V_{CD} = 420 V$.

Prueba de Estado Estacionario del Emulador

En estas pruebas de estado estacionario, se evalúa la capacidad del emulador para reproducir las curvas par-velocidad angular de la turbina que se desea emular. Las condiciones de prueba son las siguientes:

- Las velocidades de viento de prueba son: 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, 9 m/s y 10 m/s.
- La carga para al emulador de turbina es una carga mecánica dinámica, que hará las veces de un generador eléctrico. Dicha carga se programa para que el par sea lineal a la velocidad angular.
- El valor del par generado por el emulador de turbina se toma en condiciones de estado estacionario.

Para cada punto de operación, velocidad del viento – carga, de las condiciones de prueba, los resultados (*) se muestran en la Figura 12. Como se puede ver, los resultados básicamente coinciden con los de la curva par-velocidad angular del modelo de turbina eólica que se está emulando.

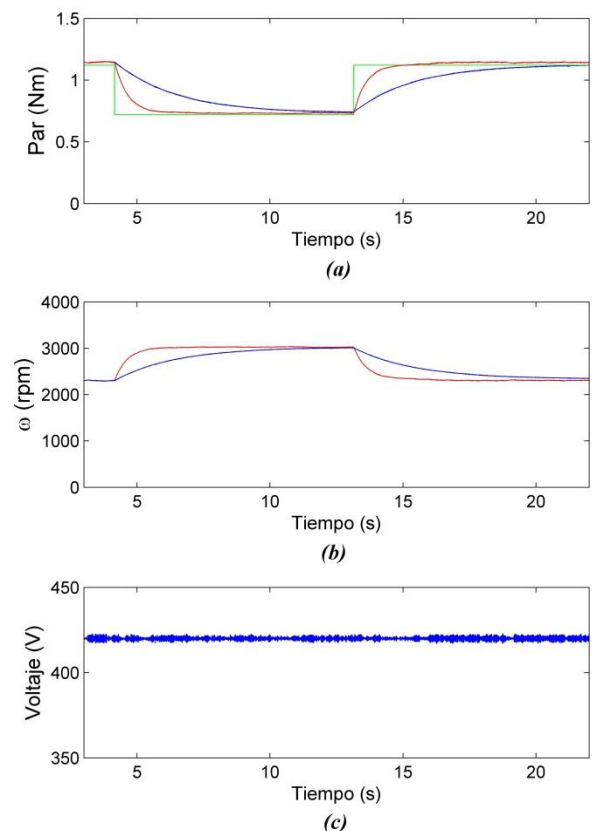


Figura 11 Respuesta dinámica del Emulador de Turbina. (a) Seguimiento de par. (b) Respuesta dinámica de la velocidad. (c) Regulación del bus de CD

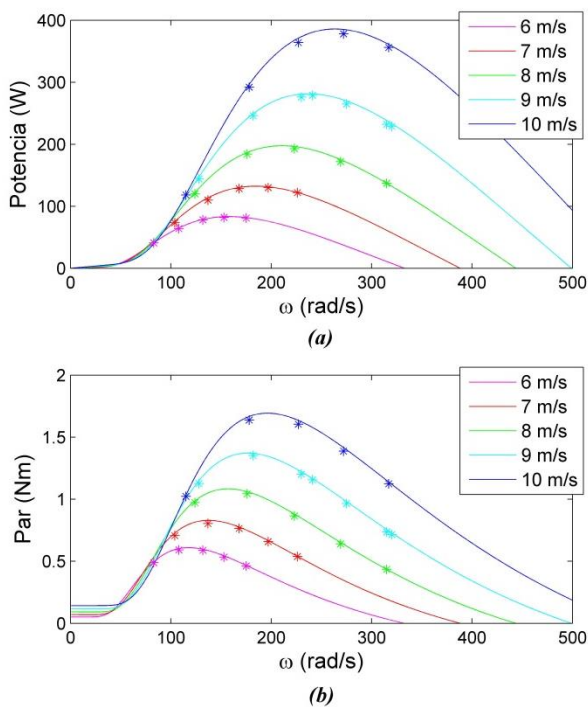


Figura 12 Comparación del comportamiento del emulador de turbina (*) versus las curvas par/potencia-velocidad de la turbina modelada. (a) Potencia-vel. angular. (b) Par-vel. angular

Conclusiones

En este trabajo se mostró el proceso de diseño y control de un emulador de turbina eólica, basado en una MIJA y en un convertidor Back-to-Back. El objetivo primordial es lograr, mediante control, específicamente mediante el control del MSC, que el emulador se comporte lo más cercano al modelo de turbina establecido, tanto en estado estable como en la parte dinámica.

El comportamiento en estado estacionario se refiere a la capacidad del emulador para ubicarse en el correspondiente punto de operación, par-velocidad angular, de cada velocidad del viento, de acuerdo con la referencia provista por las curvas de comportamiento del modelo de turbina.

En cuanto a la dinámica, se buscó que el emulador también describa el comportamiento transitorio de la turbina emulada, para lo cual se propuso un mecanismo de compensación de inercia, adicional a la inercia propia de la MIJA.

En las pruebas de simulación se verificó que el emulador se comporta tal y como lo describen las curvas par-velocidad de la turbina seleccionada para emulación, ya que se pudo evaluar su comportamiento para diferentes condiciones de viento. Análogamente, las simulaciones demostraron que el emulador tiene un comportamiento transitorio adecuado, puesto que cuando no se hacía compensación de inercia, los cambios de velocidad eran rápidos; por el contrario, con la compensación estos cambios eran más lentos.

Adicionalmente, se corroboró el buen desempeño del control del GSC en la regulación del bus de CD, ante diversos cambios de velocidad y/o de par. Este control es importante, puesto que una adecuada regulación del bus garantiza el funcionamiento adecuado del MSC, encargado de controlar el par.

Es importante resaltar que, entre otras, algunas de las ventajas del emulador propuesto son que está basado en una MIJA, que es una de las opciones más robusta y económica entre las máquinas reportadas; adicionalmente, resaltar también que el control y la compensación de inercia son mecanismos sencillos y ajustables que permitirían la emulación de diversos tipos de turbinas, contrario al uso de opciones de compensación de inercia como es un volante de inercia.

Por otro lado, las limitaciones del emulador, entre otras, son: que aquí no se toman en cuenta las pérdidas mecánicas; que se asume que se dispone de un sensor de par mecánico y de un sensor de velocidad angular; y que la compensación de inercia depende directamente de la derivada de la velocidad angular, lo cual puede ser un problema ante la presencia de ruido en las mediciones de velocidad angular.

Referencias

Ahshan, R., Iqbal, M., & Mann, G. K. (2008). Controller for a small induction-generator based wind-turbine. *Applied Energy*, 85(4), 218-227.

Arifujjaman, M. (2012). Emulation of a small wind turbine system with a separately-excited dc machine. *IU-Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 8(1), 569-579.

- Chung, S.-K. (2000). A phase tracking system for three phase utility interface inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15(3), 431-438.
- Dolan, D., & Lehn, P. (2005). *Real-time wind turbine emulator suitable for power quality and dynamic control studies*: University of Toronto.
- Etxegarai, A., Eguia, P., Torres, E., Iturregi, A., & Valverde, V. (2015). Review of grid connection requirements for generation assets in weak power grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1501-1514.
- Kojabadi, H. M., Chang, L., & Boutot, T. (2004). Development of a novel wind turbine simulator for wind energy conversion systems using an inverter-controlled induction motor. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 19(3), 547-552.
- Lin, F.-J., Teng, L.-T., Shieh, P.-H., & Li, Y.-F. (2006). *Intelligent controlled-wind-turbine emulator and induction-generator system using RBFN*. Paper presented at the Electric Power Applications, IEE Proceedings-.
- Martinez, F., Herrero, L. C., & de Pablo, S. (2014). Open loop wind turbine emulator. *Renewable Energy*, 63, 212-221.
- Nouira, I., Khedher, A., & Bouallegue, A. (2012). A Contribution to the Design and the Installation of an Universal Platform of a Wind Emulator Using a DC Motor. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 2(4), 797-804.
- Sokolovs, A., Grigans, L., Kamolins, E., & Voitkans, J. (2014). An Induction Motor Based Wind Turbine Emulator. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 51(2), 11-21.
- Weiwei, L., Dianguo, X., Wei, Z., & Hongfei, M. (2007, 23-25 May 2007). *Research on Wind Turbine Emulation based on DC Motor*. Paper presented at the Industrial Electronics and Applications, 2007. ICIEA 2007. 2nd IEEE Conference on.
- Yang, L., Yan, S., Chen, Z., & Liu, W. (2013). *A novel wind turbine simulator for wind energy conversion systems using an permanent magnet synchronous motor*. Paper presented at the Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013 International Conference on.
- Yu, R. (2014). Maximum power point tracking from a wind turbine emulator using a DC-DC converter controlled. *International Journal of Control and Automation*, 7, 117-128.

Propuesta de diseño aerodinámico para reducción de turbulencia en la estela de rotación en turbinas eólicas de baja capacidad HAWT

Aerodynamic design proposal for turbulence reduction in the rotational steed in low-capacity HAWT wind turbines

MOLINERO, Daniel*†, LÓPEZ, Víctor y CERVANTES, Alberto

ID 1^{er} Autor: *Daniel, Molinero*

ID 1^{er} Coautor: *Víctor, López*

ID 2^{do} Coautor: *Alberto, Cervantes*

DOI: 10.35429/JCS.2020.12.4.20.29

Recibido: 20 de Julio, 2020; Aceptado 30 de Diciembre, 2020

Resumen

Se presenta una propuesta de diseño aerodinámico para la reducción de turbulencia en la estela de rotación de turbinas eólicas de eje horizontal. La propuesta surge del análisis de diversas alternativas para la modificación de los álabes de una turbina diseñada bajo la teoría BEM (Teoría de Momento-Álabe). Se emplearon diversos programas de cómputo para el diseño, modelado y simulación de las diversas propuestas. Los resultados experimentales de anemometría de hilo caliente en túnel de viento utilizando un modelo fabricado con tecnología de impresión 3D, son comparados con los obtenidos en CFD (Dinámica de Fluidos por Computadora). Como trabajo adicional, se integró un sistema de medición de velocidad de viento para caracterización del túnel de viento empleado. Pruebas adicionales para obtención de líneas de corriente mediante un generador de humos y medición de torque de arranque son también llevadas a cabo. Los resultados experimentales y CFD presentan buena concordancia, con lo cual se logró la validación de la metodología empleada para el análisis. Como resultado del análisis, se demostró que es posible lograr un diseño con baja generación de turbulencia y una potencia de salida aceptable.

Turbina, Turbulencia, Alabes, Optimización, Simulación

Abstract

A proposal for aerodynamic design in order to reduce turbulence in the wake of rotation horizontal axis wind turbines is presented. The proposal arises from the analysis of various alternatives for the modification of turbine blades designed under the BEM theory (Blade-Element Theory). Various computer programs for design, modelling and simulation of various proposals were employed. The experimental results of hot wire anemometry in wind tunnel using a model made with 3D printing technology are compared with those obtained in CFD (Computer Fluid Dynamics). As additional work, a measuring wind speed system for wind tunnel characterization was integrated. Additional tests for obtaining streamlines using a smoke generator and starting torque measurement are also carried out. Experimental and CFD results show good agreement, thereby validation of the methodology used for the analysis was achieved. As a result of the analysis, it was shown that it is possible to achieve a design with low generation of turbulence and an acceptable output power.

Turbine, Turbulence, Blades, Optimization, Simulation

Citación: MOLINERO, Daniel, LÓPEZ, Víctor y CERVANTES, Alberto. Propuesta de diseño aerodinámico para reducción de turbulencia en la estela de rotación en turbinas eólicas de baja capacidad HAWT. Revista de Simulación Computacional. 2020. 4-12:20-29.

* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: molherd@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

Dada la tendencia hacia el uso de fuentes de energía renovable la (SENER, 2012) encontró que entre 2006 y 2011 la capacidad de producción global de energía eólica creció a un ritmo de 27% anual. De acuerdo con lo presentado por la consultora PWC para la Asociación Mexicana de Energía Eólica, el potencial eólico nacional se estimó en al menos 50,000 MW considerando factores de planta de 20%. (AMDEE, 2012).

El equipo empleado para la conversión de energía de viento en energía eléctrica es la turbina eólica, que en el caso de turbinas de eje horizontal está compuesta por los álabes, hub y el pedestal. Debido a diversos factores, la eficiencia en turbinas eólicas se aleja del límite teórico de eficiencia máxima. Uno de estos factores es la turbulencia en la corriente de viento generada en la zona inmediata posterior a una turbina; una turbina en funcionamiento en esta estela, o dentro de un parque eólico donde los efectos de varias estelas pueden ser sentidos simultáneamente, producirá menos energía y sufrirá mayor carga estructural que una turbina que funciona en la corriente libre (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001).

Diversos estudios se han realizado para la optimización de los álabes con el fin de aumentar el aprovechamiento del recurso eólico hasta su límite teórico, entre ellos (Sharifi & Nobari, 2013), (Liu, Wang, & Tang, 2013) y (Singh & Ahmed, 2013), así como evaluar el comportamiento de la estela de rotación, su efecto en el desempeño de la turbina y la turbulencia asociada a la estela de rotación, como lo realizado por (Sicot, Devinant, Loyer, & Hureau, 2008), (Crespo & Hernandez, 1996) y (Bastankhah & Porté-Agel, 2014).

El presente trabajo está encaminado a desarrollar un diseño aerodinámico que reduzca la generación de turbulencia en turbinas eólicas de eje horizontal de baja capacidad.

También se presenta la metodología llevada a cabo para la validación de un modelo computacional para análisis de la estela de rotación.

Diseño Aerodinámico de Turbinas Eólicas de Eje Horizontal – Teoría BEM

En el diseño aerodinámico de álabes de turbinas eólicas de eje horizontal se emplea la teoría BEM (Blade Element Momentum). Sin embargo, de acuerdo a (Sørensen, 2011) modelos numéricos más avanzados basados en las ecuaciones promedio de Navier-Stokes (RANS) se están aplicando ampliamente y comienzan a complementar la teoría BEM, por ejemplo, al analizar la estela de rotación o la interacción entre las turbinas en parques eólicos. El método BEM fue introducido por (Glauert H. , 1953a) (Glauert H. , 1953b) combinando la Teoría de Momento con la Teoría de Elemento Alabe, para determinar las cargas locales a lo largo de la envergadura del álabes.

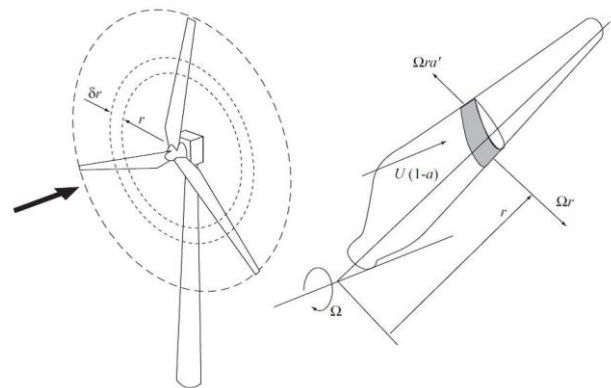


Figura 1 Anillo anular descrito por una sección del elemento alabe

Fuente: (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001)

El método supone que todas las secciones a lo largo del rotor son independientes y pueden ser tratadas por separado. Así, las fuerzas de sustentación y arrastre a las que se somete cada elemento son responsables de los cambios de momento axial y angular del aire que pasa a través del anillo que describe el álabes al girar (Figura 1). Por lo tanto, en una sección radial dada, una diferencia en la velocidad del viento se genera desde corriente arriba hasta lo profundo de la estela, creando una caída de presión en la sección del alabe. (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001) y (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009).

La teoría BEM basa su análisis en un triángulo de velocidades, donde los catetos corresponden a la velocidad del viento U_∞ y la velocidad tangencial del álabes Ωr , mientras que la hipotenusa se conoce como la velocidad relativa W .

Así se tiene que:

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

Donde a y a' son los factores de inducción de flujo axial y radial respectivamente y Ω la velocidad de rotación.

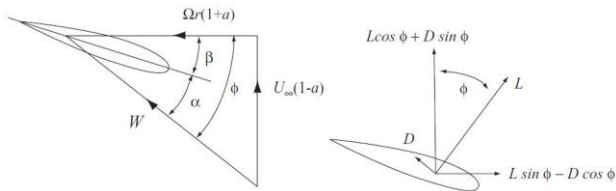


Figura 2 Triangulo de velocidades en una sección del elemento álabes

Fuente: (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001)

En la Figura 2 se puede observar la relación entre los ángulos de ataque α , de paso β e incidencia ϕ con las velocidades y fuerzas actuantes en una sección transversal del álabes. De este modo se tiene que:

$$\sin \phi = \frac{U_{\infty}(1-a)}{W}; \cos \phi = \frac{\Omega r(1+a')}{W} \quad (2)$$

Finalmente, las ecuaciones de cambio de momento axial y angular para diseño que se utilizan en la teoría BEM son las siguientes:

$$\frac{W^2}{U_{\infty}^2} N \frac{c}{R} (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) = 8\pi(a(1-a) + (a'\lambda\mu)^2)\mu \quad (3)$$

$$\frac{W^2}{U_{\infty}^2} N \frac{c}{R} (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) = 8\pi\lambda\mu^2 a'(1-a) \quad (4)$$

Donde N es el número de alabes, c la cuerda del alabe, C_l el coeficiente de sustentación y C_d el coeficiente de arrastre. La velocidad específica λ y la relación de radios μ están definidas como:

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

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

La solución para obtener los factores óptimos de inducción de flujo axial a y radial a' , usando coeficientes de sustentación C_l y arrastre C_d de perfiles aerodinámicos requiere un proceso iterativo. En tal caso, las siguientes ecuaciones son convenientes ya que, usando valores previos de los factores de inducción de flujo proporcionan nuevos valores para cada iteración. (Burton, Sharpe, Jenkins, & Bossanyi, 2001).

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_r}{4 \sin \phi^2} \left[C_x - \frac{\sigma_r}{4 \sin^2 \phi} C_y^2 \right] \quad (7)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma_r C_y}{4 \sin \phi \cos \phi} \quad (8)$$

Donde la solidez de cuerda σ_r y los coeficientes de fuerza axial C_x y tangencial C_y están definidos como:

$$\sigma_r = \frac{Nc}{2\pi\mu R} \quad (9)$$

$$C_x = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi \quad (10)$$

$$C_y = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi \quad (11)$$

De acuerdo con (Wilson & Lissaman, 1974) el coeficiente de arrastre no debería ser incluido en las ecuaciones anteriores. El argumento para la exclusión del arrastre es que, el arrastre sólo es causado por la fricción de pared y no afecta la caída de presión a través del rotor. Por lo tanto, se consideró la siguiente relación:

$$a = \frac{1}{3}; a' = \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2} \quad (12)$$

Donde $a=1/3$ es el valor óptimo para alcanzar el máximo coeficiente de potencia ($C_P = 0.59$) conocido como límite de (Betz, 1919) al resolver la diferencial de la expresión siguiente:

$$C_P = 4a(1-a)^2 \quad (13)$$

Por lo tanto, el coeficiente de sustentación puede ser elegido como aquel valor que equivale a la máxima relación de sustentación-arrastre (C_l/C_d) para el cálculo de la cuerda, ya que esto minimizará pérdidas, de tal manera que el coeficiente de arrastre es tan pequeño que se puede omitir en la Ecuación 4 de cambio de momento angular para dar como resultado:

$$\frac{Nc}{2\pi R} = \frac{4\lambda\mu^2 a'}{\frac{W}{U_{\infty}} C_l} \quad (14)$$

Diseño y Modelado

Los perfiles aerodinámicos estándar más empleados pertenecen a diversas familias como: NACA, NREL, RISΦ, DU y FFA. Además, existen también perfiles aerodinámicos desarrollados a partir de los perfiles convencionales antes mencionados.

MOLINERO, Daniel, LÓPEZ, Víctor y CERVANTES, Alberto. Propuesta de diseño aerodinámico para reducción de turbulencia en la estela de rotación en turbinas eólicas de baja capacidad HAWT. Revista de Simulación Computacional. 2020

El perfil seleccionado para llevar a cabo el análisis fue el NACA 4412, ya que es un perfil aerodinámico con buena relación sustentación-arrastre incluso a altos ángulos de ataque.

En ocasiones, no es posible obtener los coeficientes de sustentación y arrastre para todos los números de Reynolds y ángulos de ataque a que se somete un perfil, en tales casos se realizan interpolaciones. Por lo tanto, con el fin de hacer más rápido el proceso de diseño se empleó el software XFOIL desarrollado por (Drela, 1989). XFOIL calcula mediante el método de paneles y la función de corriente los coeficientes de sustentación y arrastre en base al perfil aerodinámico, ángulo de ataque y números de Reynolds y Mach. Esto permite seleccionar el ángulo de ataque óptimo a emplear en la punta del álabe, estableciendo un coeficiente de sustentación de diseño y en base a esto realizar el diseño completo.

Para el diseño aerodinámico incluyendo álabes y hub, se creó una rutina en base a la Teoría BEM en MatLab, de la cual se obtiene la geometría del álabe. Los resultados de esta rutina fueron comparados con los obtenidos en el software TIMEO desarrollado por (Álvarez Cervera, Lesso Arroyo, & López Garza, 2005), mostrando buena concordancia.

Una vez concluido el diseño aerodinámico se realiza el modelado 3D en el software Gambit. En el modelado se realiza también el diseño del hub, que para este caso se modelado a partir de la ecuación parabólica presentada por (Wang, Bai, Fletcher, Whiteford, & Cullen, 2008):

$$y = \frac{D}{2} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 \quad (15)$$

Esta geometría de hub puede ser remplazada por geometrías optimizadas, como las presentadas por (Jiménez, Lopez, Solorio, & Molinero, 2015), en futuros análisis.

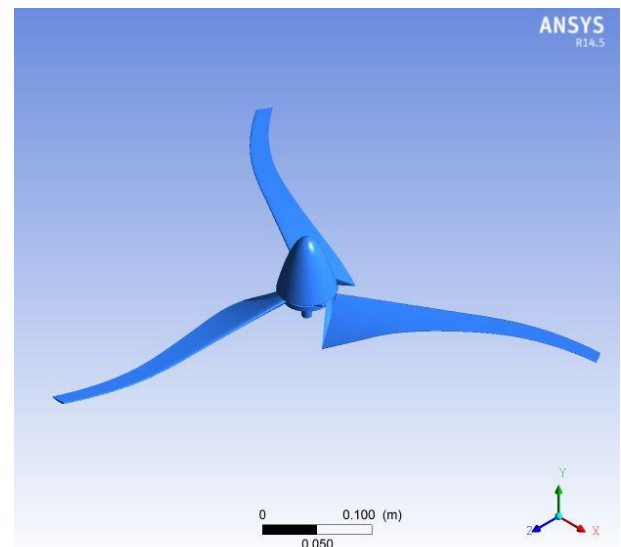


Figura 3 Rotor de 25W con alabes curvados (10% de Sweep)

La teoría BEM sólo contempla álabes rectos en un eje normal al perfil aerodinámico, donde se puede variar el ángulo de ataque y de paso en función del ángulo de incidencia de la velocidad relativa de viento. Por lo tanto, en la rutina de diseño en MatLab se incluyeron ecuaciones para generar álabes curvos en distintas direcciones, de manera similar a lo expuesto por (Gertz, Johnson, & Swytink-Binnema, 2014), (Larwood, Dam, & Schow, 2014) y (Chattot, 2009), como se muestra en la Figura 3.

En total se propusieron 18 rotores, los cuales se dividen en dos grupos: rotores con ángulo de ataque variable (VA) y rotores con ángulo de ataque fijo (FA). Dentro de cada grupo existen cuatro grupos: 1) rotores con “sweep” (positivo en contra del sentido de rotación YSPOS y negativo en sentido opuesto YSNEG), 2) rotores con “dihedral” (positivo en la dirección del viento YDPOS y negativo en contra de la dirección de viento YDNEG), 3) rotores con combinación de “sweep” y “dihedral” (con variantes positivas y negativas) y 4) rotores sin “sweep” y/o “dihedral” (NS-ND).

El sweep se realizó curvando los álabes 10% del valor del radio, la curvatura es con respecto al eje del álabe en el plano que contiene al rotor. La longitud curvada del álabe fue 40% del radio, medido desde la punta hacia la raíz del álabe empleando un exponente de 2. (Larwood, Dam, & Schow, 2014).

$$y = d_{tip} \left(\frac{r-r_{start}}{R*r_{start}} \right)^y \quad (16)$$

El Dihedral se realizó curvando los álabes 10% del valor del radio. En este caso la curvatura se realiza con respecto al eje del álabes en el plano paralelo a la dirección del viento. El porcentaje del álabes curvado es del 100% y el exponente empleado fue de 2. (Chattot, 2009).

$$\left[\frac{a_{wt-r}}{a_{wt}} \right]^n + y^n = 1 \quad (17)$$

Una opción más para modificación de álabes de turbinas eólicas consiste en linearizar la relación cuerda-radio, lo cual reduce la cuerda en la raíz del álabes. (Manwell, McGowan, & Rogers, 2009) y (Liu, Wang, & Tang, 2013). Sin embargo, en un estudio previo (Molinero Hernández, Garza López, Jiménez Ramírez, López Zermeño, & Cadenas Calderón, 2015) mostraron que al aplicar esta técnica, tanto la potencia de salida como el torque de arranque de la turbina disminuyen.

Simulación

Para el proceso de mallado el dominio se dividió en dos marcos de referencia, uno fijo con forma cubica y otro rotatorio de forma cilíndrica dentro del que se incluye el rotor.

Se realizaron simulaciones empleando los modelos de turbulencia k-ε standar para el rotor estático y k-w SST para el rotor en movimiento, ya que estos modelos dan buenas aproximaciones al fenómeno real, como han mostrado (Kasmi & Masson, 2008), (Abdel Salam & Ramalingam, 2014), (Rocha, Rocha, Carneiro, Silva, & Bueno, 2014) y (Lanzafame, Mauro, & Messina, 2013)

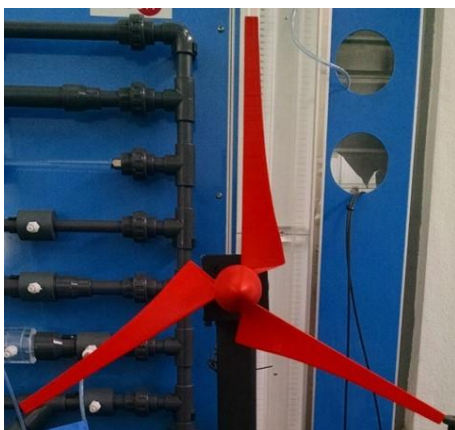


Figura 4 Rotor de 25 W fabricado en plástico ABS empleando tecnología de impresión 3D

Fabricación y Pruebas

Con el fin de validar los resultados de CFD y dar certidumbre a los datos que se obtuvieron, se realizaron pruebas en túnel de viento con un rotor de 0.57 m de diámetro fabricado con plástico ABS en una impresora 3D (Figura 4), capaz de generar 25 Watts considerando un coeficiente de potencia ideal de 0.59, una velocidad de viento de 6.5 m/s y una velocidad específica de 5.

Previo a la realización de pruebas con equipo de anemometría de hilo caliente, se realizó la caracterización del túnel de viento. Con este propósito se ensambló un sistema empleando una tarjeta de adquisición de datos National Instruments, un tubo Pitot de punta elipsoidal y cuatro sensores para medir presión diferencial, presión atmosférica, temperatura y humedad relativa.

La conexión entre PC y tarjeta de adquisición de datos se realiza mediante LabView. Los datos obtenidos utilizando este equipo y un anemómetro de paletas fueron comparados. Entre ambos métodos existe una discrepancia de 3%.

Una vez concluida la caracterización del túnel, se midió el torque generado por el rotor usando un torquímetro. Debido a que la sonda del torquímetro no permite la rotación, únicamente se midió el torque de arranque. Como resultado se obtuvo una variación de 3% entre el valor medido y el valor obtenido en CFD. También se realizaron tomas con cámara de alta velocidad para captura de líneas de corriente en la zona cercana a la punta de los álabes utilizando un generador de humo. Debido a las características del mismo únicamente se hicieron tomas del rotor estático, donde se observa buena concordancia entre las imágenes de CFD y de cámara de alta velocidad (Figura 5).

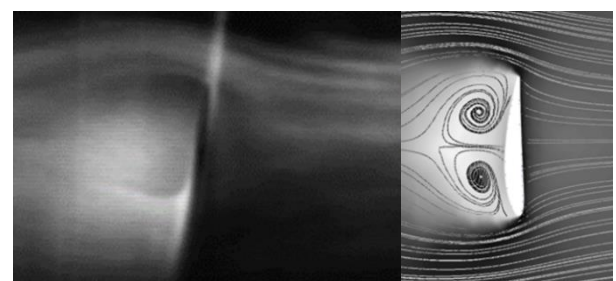


Figura 5 Líneas de corriente a) Experimento (izquierda) y b) CFD (derecha)

Finalmente, se realizaron las mediciones de velocidad instantánea e intensidad de turbulencia en la estela empleando equipo de anemometría de hilo caliente.

El equipo puede medir la velocidad instantánea con una probeta unidireccional por la cual circula una corriente eléctrica, el enfriamiento debido a una corriente de viento genera variaciones en el voltaje de alimentación, con lo cual se puede conocer la velocidad de viento. (Jørgensen, 2002). Las lecturas fueron tomadas en un plano perpendicular a la dirección del flujo de aire. Solo se realizaron lecturas parte superior de la sección de pruebas, ya que en la parte inferior se encontraba el soporte del rotor y se obtendrían lecturas con un alto nivel de interferencia.

Las lecturas de intensidad de turbulencia con el rotor estático mediante anemometría de hilo caliente y los resultados obtenidos en CFD presentaron buena concordancia como se muestra en la Figura 6. Todas las pruebas se realizaron manteniendo el rotor frente una corriente de viento de 6.5 m/s.

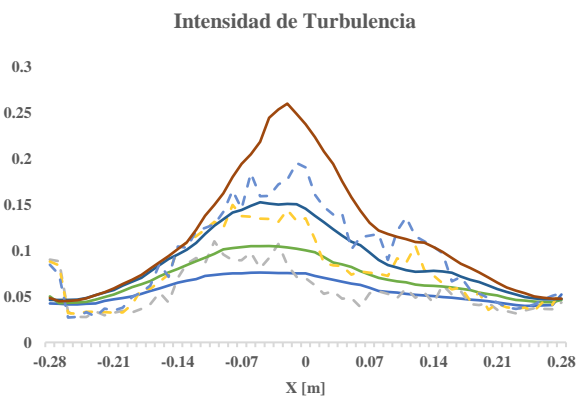


Figura 6 Intensidad de turbulencia en la región central de los alabes. CFD (línea continua) vs Anemómetro de hilo caliente (línea punteada)

Análisis de Resultados

Una vez validado el modelo CFD para el rotor estático se compararon rotores con las mismas características de sweep y dihedral. Se observó que, los rotores con ángulo de ataque fijo generan mayor torque de arranque (73.8% - 103.3%) y mayor potencia de salida (1.6% - 7.1%) que aquellos con ángulo de ataque variable.

Por otro lado, los rotores con ángulo de ataque fijo generan entre 4.49% y 22.31% más intensidad de turbulencia para el rotor estático, y entre 0.26% y 3.03% más para el rotor en movimiento, a excepción del rotor YSPOS-YDNEG-FA, con el cual la intensidad de turbulencia disminuyó 0.39%.

El Gráfico 1 muestra que el máximo valor de intensidad de turbulencia con el rotor estático (0.058057) es producido por el modelo NS-YDNEG-FA, mientras que el valor mínimo (0.047296) es producido por el modelo YSNEG-YDNEG-VA. Así mismo, el mayor torque de arranque (0.04427 N-m) es producido por el rotor YSPOS-YDNEG-FA, y el menor (0.01890 N-m) es producido por el rotor YSPOS-YDPOS-VA según el Gráfico 2.

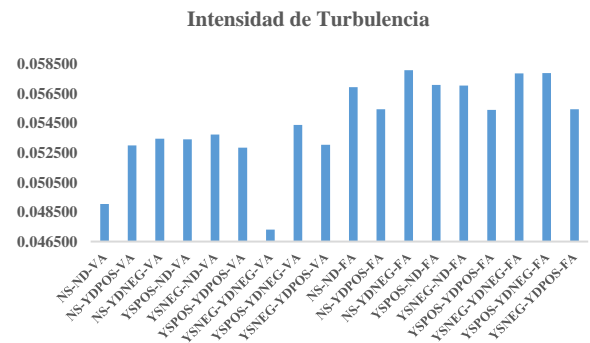


Gráfico 1 Intensidad de turbulencia en estela. Resultados de CFD con rotor estático

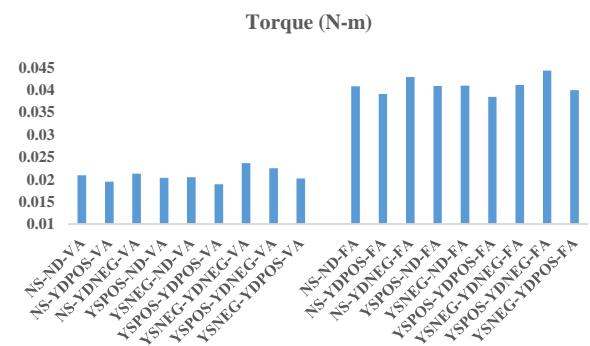


Gráfico 2 Torque de arranque. Resultados de CFD con rotor estático

El Gráfico 3 muestra que la mayor intensidad de turbulencia con el rotor en movimiento (0.053896) se genera con el modelo YSPOS-YDPOS-FA, en contraparte la mínima (0.051687) se produce con el modelo NS-ND-VA. Respecto a la potencia generada, en la Grafica 4 se puede observar que el rotor con la mayor potencia de salida (25.18 W) es el YSPOS-YDPOS-FA, lo cual es más de lo esperado según la Teoría BEM.

Los rotores con la menor potencia de salida (22.57 W) fueron los modelos YSNEG-YDNEG-VA y NS-YDNEG-VA. Estos resultados están de acuerdo con lo presentado por (Chattot, 2009), donde indica que el sweep y el dihedral positivos incrementan la potencia de salida.

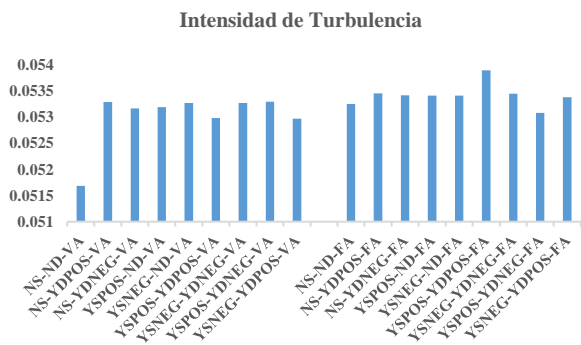


Gráfico 3 Intensidad de turbulencia en estela. Resultados de CFD con rotor en movimiento.

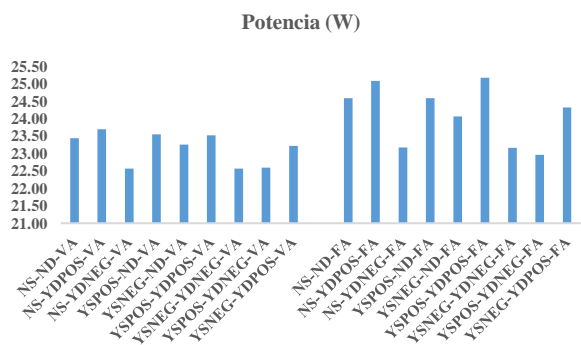


Gráfico 4 Potencia. Resultados de CFD con rotor en movimiento

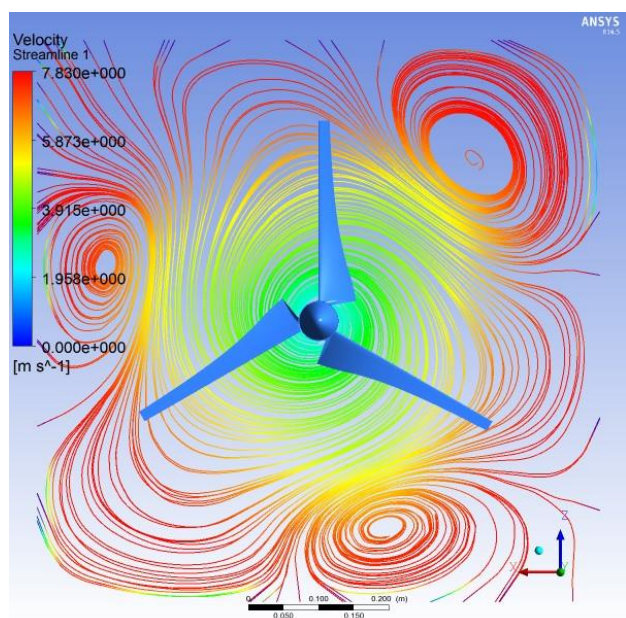


Figura 7 Líneas de corriente coloreadas por magnitud de velocidad en el Rotor NS-ND-VA con la menor intensidad de turbulencia 0.051687. Potencia de salida 23.44 W

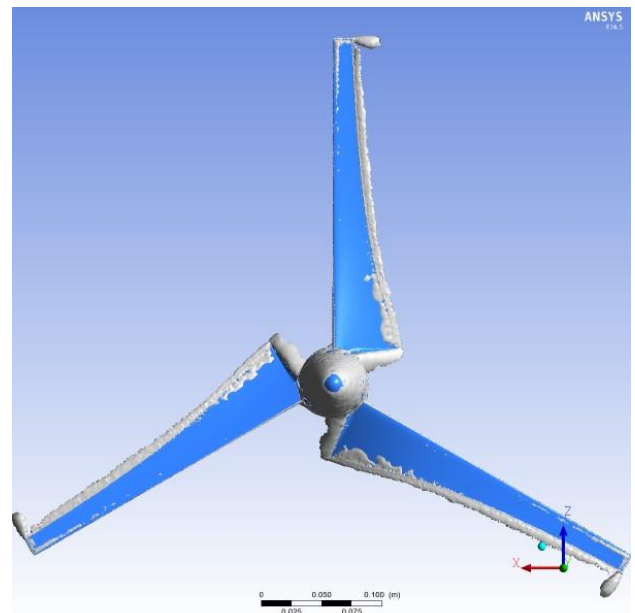


Figura 8 Vorticidad generada por el Rotor NS-ND-VA con la menor intensidad de turbulencia 0.051687. Potencia de salida 23.44 W

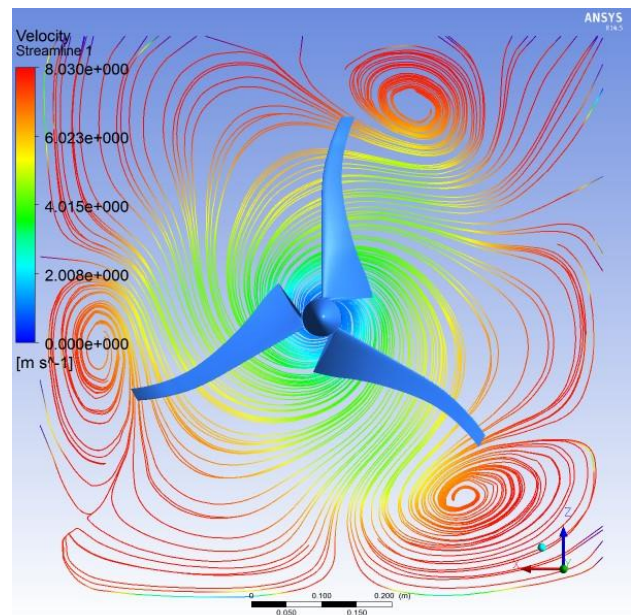


Figura 9 Líneas de corriente coloreadas por magnitud de velocidad en el Rotor YSPOS-YDPOS-FA con la mayor intensidad de turbulencia 0.053896. Potencia de salida 25.18 W

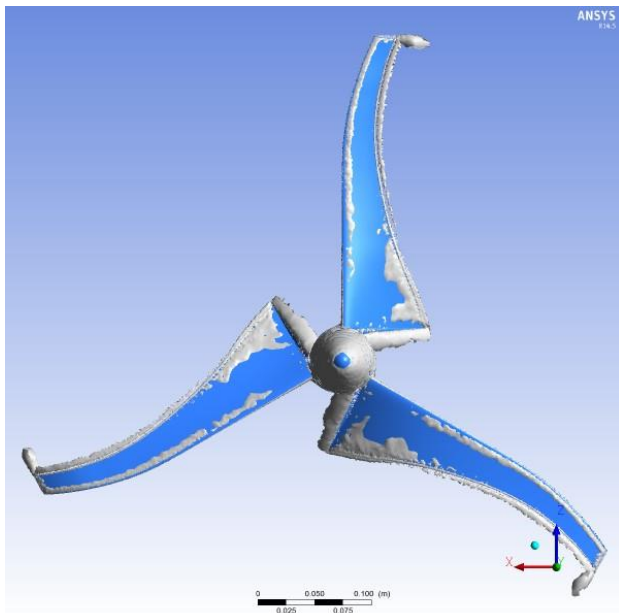


Figura 10 Vorticidad generada por el Rotor YSPOS-YDPOS-FA con la mayor intensidad de turbulencia 0.053896. Potencia de salida 25.18 W

En las Figuras 7, 8, 9 y 10 se muestra mediante líneas de corrientes y zonas de vorticidad el comportamiento de los rotores que generan la menor y mayor intensidad de turbulencia al generar potencia de salida.

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.

Conclusiones

Se empleó equipo de anemometría de hilo caliente para obtener datos de velocidad de instantánea e intensidad de turbulencia en la estela detrás del rotor de una turbina de viento de eje horizontal de baja capacidad, los datos experimentales para el rotor estático presentan buena concordancia con los datos de CFD, lo cual sumado con los resultados de medición de torque da certidumbre en el procedimiento ejecutado para el diseño, modelado, simulación, fabricación y experimentación.

En futuros trabajos es recomendable llevar a cabo un análisis estadístico de los datos experimentales obtenidos en cada uno de los puntos de medición, lo cual dará información acerca de la simetría estadística y la amplitud de distribución (factor de planicidad) del flujo. En el caso del rotor en movimiento, se deben realizar pruebas aun adicionales con probetas de hilo caliente de dos y tres direcciones con el propósito de incrementar la certidumbre en los datos obtenidos en CFD, esto último en conjunto con un análisis estadístico proporcionara información más detallada del flujo relacionada con los esfuerzos cortantes de Reynolds (momentos cruzados) y cantidades de transporte lateral (momentos cruzados de orden superior).

La propuesta de diseño que cumple con la menor generación de turbulencia, tanto en modo estático como en movimiento, fue el modelo NS-ND-VA. Aunque no fue la propuesta con la mayor potencia de salida, la cual fue el modelo YSPOS-YDPOS-FA, su potencia de salida es mayor a otras propuestas que presentan incluso mayor intensidad de turbulencia en la estela. Con estos resultados se puede comprobar que es posible mediante la modificación de la geometría de los álabes reducir la turbulencia en la estela de rotación, logrando un incremento en la eficiencia del aerogenerador y reducción de la estela de rotación afectada por la turbulencia.

Ya que en todos los modelos los álabes fueron curvados únicamente el 10% de la longitud del radio, es recomendable realizar análisis con distintos porcentajes de curvatura y el impacto que esto tendría en la estructura del alabe debido a la variación en las cargas resultantes debido a la interacción con el fluido.

A futuro la metodología seguida en este trabajo puede ser también empleada el diseño de nuevos perfiles aerodinámicos y el estudio de diferentes geometrías de puntas para los álabes, entre ellos los “winglets”.

Referencias

Abdel Salam, A. M., & Ramalingam, V. (2014). Wake prediction of horizontal-axis wind turbine using full-rotor modeling. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*(124), 7-19.

Álvarez Cervera, R., Lesso Arroyo, R., & López Garza, V. (2005). Análisis de Perfiles Aerodinámicos de un Álabes de Turbina de Viento a Través de la Interfase TIMEO-ANSYS. *VI Congreso Internacional de Innovación Basada en Diseño e Ingeniería*, 461, págs. 2–4. San Miguel de Allende, México.

AMDEE. (2012). *Iniciativa para el desarrollo del potencial eólico en México*. Mexico, D.F.: Asociación Mexicana de Energia Eolica.

Bastankhah, M., & Porté-Agel, F. (2014). A new analytical model for wind-turbine wakes. *Renewable Energy*, 1-8.

Betz, A. (1919). *Schraubenpropeller mit geringstem energieverlust*. Berlin, Germany: Gottinger Nachr.

Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). *Wind Energy Handbook* (1 ed.). West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd. doi:ISBN 0 471 48997 2

Chattot, J.-J. (2009). Effects of blade tip modifications on wind turbine performance using vortex model. *Computers & Fluids*(38), 1405–1410.

Crespo, A., & Hernandez, J. (1996). Turbulence Characteristics in wind-turbines wakes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*(61), 71-85.

Drela, M. (1989). XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils. *Low Reynolds Aerodynamics. Lec. Notes in Eng.*(54).

Gertz, D., Johnson, D. A., & Swytink-Binnema, N. (2014). Comparative Measurements of the Effect of a Winglet on a Wind Turbine. En *Research Topics in Wind Energy 2. Wind Energy – Impact of Turbulence* (págs. 121-126). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Glauert, H. (1953a). *Airplane propellers. Aerodynamic theory* (ed. W. F. Durand). Berlin, Germany: Julius Springer.

Glauert, H. (1953b). *Windmills and fans. Aerodynamic theory* (ed. W. F. Durand). Berlin, Germany: Julius Springer.

Jiménez, A., Lopez, V., Solorio, G., & Molinero, D. (2015). Diseño y Optimización del Perfil Aerodinámico del Hub para una Turbina de Viento de Baja Capacidad. *1er. Congreso Internacional de Energías Renovables*. Huatulco, Oaxaca. México.

Jørgensen, F. E. (2002). How to measure turbulence with hot-wire anemometers - a practical guide. Skovlunde, Denmark: Dantec Dynamics A/S.

Kasmi, A. E., & Masson, C. (2008). An extended k-ε model for turbulent flow through horizontal axis wind turbines. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*(96), 103–122.

Lanzafame, R., Mauro, S., & Messina, M. (2013). Wind turbine CFD modeling using a correlation-based transitional model. *Renewable Energy*(52), 31-39.

Larwood, S., Dam, C. v., & Schow, D. (2014). Design studies of swept wind turbine blades. *Renewable Energy*(71), 563-571.

Liu, X., Wang, L., & Tang, X. (2013). Optimized linearization of chord and twist angle profiles for fixed-pitch fixed-speed wind turbine blades. *Renewable Energy*(57), 111-119.

Manwell, J., McGowan, J., & Rogers, A. (2009). *Wind Energy Explained : Theory, Design, and Application* (2 ed.). West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.

Molinero Hernández, D., Garza López, V., Jiménez Ramírez, A., López Zermeño, J., & Cadenas Calderón, E. (2015). Evaluación de Técnicas de Optimización Geométrica de Álabes de Turbinas Eólicas de Alta Capacidad Aplicadas a Turbinas Eólicas de Baja Capacidad. *Academia Journals Celaya 2015*. Celaya, Guanajuato, México.

Rocha, P. C., Rocha, H. B., Carneiro, F. M., Silva, M. V., & Bueno, A. V. (2014). K-ω-SST (shear stress transport) turbulence model calibration: A case study on a small scale horizontal axis wind turbine. *Energy* 65 (2014) 412e418(65), 412-418.

SENER. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*. Mexico, D.F.: Secretaría de Energía. Obtenido de www.energia.gob.mx

MOLINERO, Daniel, LÓPEZ, Víctor y CERVANTES, Alberto. Propuesta de diseño aerodinámico para reducción de turbulencia en la estela de rotación en turbinas eólicas de baja capacidad HAWT. *Revista de Simulación Computacional*. 2020

Sharifi, A., & Nobari, M. (2013). Prediction of optimum section pitch angle distribution along wind turbine blades. *Energy Conversion and Management*, 67, 342–350.

Sicot, C., Devinant, P., Loyer, S., & Hureau, J. (2008). Rotational and turbulence effects on a wind turbine blade. Investigation of the stall mechanisms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (96), 1320– 1331.

Singh, R. K., & Ahmed, M. R. (2013). Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications. *Renewable Energy*(50), 812-819.

Sørensen, J. N. (2011). Aerodynamic Aspects of Wind Energy Conversion. *Annual Review of Fluid Mechanics*(43), 427-448.

Wang, F., Bai, L., Fletcher, J., Whiteford, J., & Cullen, D. (2008). Development of small domestic wind turbine with scoop and prediction of its annual power output. *Renewable Energy*(33), 1637-1651.

Wilson, R. E., & Lissaman, P. B. (1974). Applied aerodynamics of wind-power machines'. NTIS: PB-238-595, . Oregon State University, USA.

Semi-automatización de biodigestor cerdo vs. vaca

Semi-automation of pig biodigestor vs. cow

MORALES-IBARRA, Vanessa*†, SALAZAR-VALLE, Eduardo, MIRANDA-HERRERA, María Guadalupe y MADRID-GONZÁLEZ, Valentín

ID 1^{er} Autor: *Vanessa, Morales-Ibarra*

ID 1^{er} Coautor: *Eduardo, Salazar-Valle*

ID 2^{do} Coautor: *María Guadalupe, Miranda-Herrera*

ID 3^{er} Coautor: *Valentín, Madrid-González*

DOI: 10.35429/JCS.2020.12.4.30.35

Recibido: 25 de Julio, 2020; Aceptado: 30 de Diciembre, 2020

Resumen

En la actualidad existen diversos métodos para el manejo y la obtención de diversas energías renovables, conociendo todas las ventajas de su utilización. En el presente trabajo se muestra la metodología para llevar a cabo un biodigestor semi-automatizado, ya que este contara con un termómetro analógico y presostato, los cuales ayudaran a monitorear la temperatura a la que se encuentran las mezclas estudiadas que en este caso serán de cerdo y vaca, además cuenta con un presostato para mayor seguridad del usuario, ambas variables podrán ser leídas con una tarjeta arduino uno y mostradas en un pequeño display de bajo consumo de energía, se observa respuestas favorables de generación del biogás mostrando buena presión y buenas características de flama, haciendo favorable su uso principalmente en lugares donde es complicado el traslado de gas LP o gas natural, aprovechando los residuos para la creación de composta.

Energías renovables, Termómetro analógico, presostato, arduino, display

Abstract

Currently there are several methods for handling and obtaining various renewable energies, knowing all the advantages of their use. In this paper the methodology is shown to perform the job of a biodigester semi - automated, this will feature an analog thermometer, which will help to monitor the temperature at which are the mixtures studied in this case will be pork and cow. In this paper the methodology is shown to perform the job of a biodigester semi - automated, this will feature an analog thermometer and switch pressure which will help to monitor the temperature and the pression at which are the mixtures studied, in this case will be pork and cow, also has a pressure switch for added user safety, both variables can be read with a arduino card one and displayed on a small display of low power consumption, are observed favorable responses from generation biogas, showing good pressure and good flame as main feature, making suitable use, mainly the gas in places where the transfer of LP gas or natural gas is complicated, using waste to create compost.

Renewable energies, analog thermometer, pressure switch, arduino, display

Citación: MORALES-IBARRA, Vanessa, SALAZAR-VALLE, Eduardo, MIRANDA-HERRERA, María Guadalupe y MADRID-GONZÁLEZ, Valentín. Semi-automatización de biodigestor cerdo vs. vaca. Revista de Simulación Computacional. 2020. 4-12:30-35.

* Correspondencia al autor (correo electrónico: vmorales@utt.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El presente trabajo muestra el desarrollo y puesta en marcha de un biodigestor Semi-Automatizado. Desde hace ya un par de décadas el hombre se ha dado cuenta del daño que generan algunas fuentes de energía, además de que muchas de ellas son agotables y de difícil, cara o complicada extracción. El biodigestor descrito muestra una solución asequible a la obtención de gas natural, destacando algunas ventajas sobre otros biodigestores caseros como lo son el monitoreo de temperatura en el reactor donde se lleva a cabo la descomposición anaeróbica en donde dicha descomposición puede ser controlada por el usuario, el biodigestor cuenta con un presostato en el tanque de recepción del gas ayudando esto a mantener la seguridad del ambiente y el usuario.

Este tipo de soluciones sustentables en la generación de energía favorece en gran medida al reciclaje y disminución de residuos; reducción en la producción de gases de efecto invernadero, la producción del gas puede ser utilizada en diferentes áreas como lo son el alumbrado, cocción de alimentos, generación de energía eléctrica etc.

Dentro de la descripción del método se muestran algunos conceptos básicos para la creación del biodigestor (antecedentes), tipos de biodigestores, tarjeta y sensores utilizados para el monitoreo de variables físicas (temperatura y presión), observaciones del trabajo realizado, resultados y conclusiones.

Antecedentes

Un biodigestor es un sistema natural y ecológico que aprovecha la digestión anaeróbica (en ausencia de oxígeno) de las bacterias para transformar el estiércol en biogás y sus residuos en fertilizante.

El biogás puede ser empleado como combustible en las cocinas, o iluminación, y en grandes instalaciones se puede utilizar para alimentar al llamado biol, inicialmente se ha considerado un producto secundario, pero actualmente se está considerando de la misma importancia, o mayor, que el biogás ya que provee un fertilizante natural que mejora fuertemente el rendimiento de las cosechas.

El gas metano es un hidrocarburo alcano sencillo, el contiene únicamente átomos de carbono e hidrogeno unidos por un enlace covalente. Es incoloro y no es soluble en agua. En la naturaleza se produce como producto final de la putrefacción anaeróbica de las plantas, conocido también como biogás.

Es biogás es un gas que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos y otros factores, en ausencia de oxígeno (ambiente anaeróbico). El producto resultante está formado por metano CH₄ (50 a 70%), dióxido de carbono CO₂ (30 a 45%), monóxido de carbono y otros gases en menor proporción. El biogás y abono generado de los residuos de operación del biodigestor ha sido utilizado en países con poblaciones rurales numerosas debido a que es económico y fácil de instalar.

Tipos de Biodigestores

En la figura 1. Se muestra un esquema con los diferentes tipos de biodigestores, estos están clasificados en función de su frecuencia de cargado, o sea la frecuencia con la que se introduce la materia a descomponer, se mencionan enseguida algunas ventajas y desventajas de cada uno de ellos.



Figura 1 Tipos de biodigestores

Discontinuo: Se carga una sola vez y se retira cuando ya se ha dejado de producir gas, solo entonces se renueva de materia orgánica. Se usa cuando la disponibilidad de materia orgánica es limitada o intermitente.

- Tipo Batch o intermitente Figura 2, esta clase de biodigestor se carga (o se llena) una vez, y se descarga el contenido digerido, una vez que finaliza el proceso de fermentado, o sea, cuando deja de producir gas.

Tiene un solo orificio para la carga y descarga. La duración de la fermentación varía entre 2 a 4 meses, dependiendo del clima ya sea este cálido, templado, frío, etc.; ya que la temperatura afecta directamente la velocidad de reacción dentro del reactor.

Semicontinuo: Se cargan en lapsos cortos como de 12 horas, 1 vez al día, o cada dos días, se utiliza cuando la disponibilidad de materia orgánica es constante. Los principales, son el Hindu, el chino y el Taiwanés, como ventajas principales si se quiere aprovechar más el gas, o el biol, generado de los residuos es una buena opción.

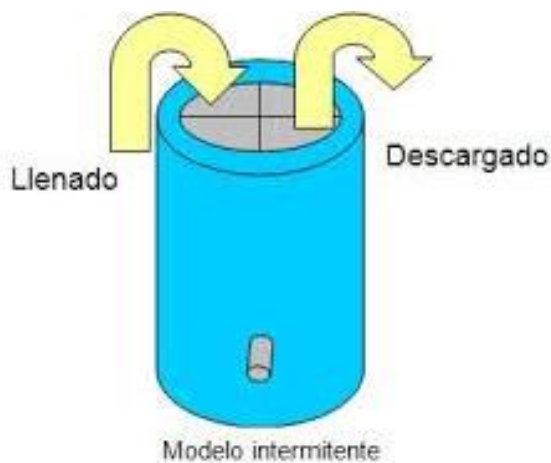


Figura 2 Biodigestor tipo Batch o intermitente

- Tipo chino, Figura 3 un modelo bastante utilizado debido a su durabilidad, fácil manejo, funcionabilidad y seguridad. Se trata de una cámara cerrada con sus respectivas cámaras de carga y descarga. La estructura puede ser construida de concreto armado, ladrillos, piedra u hormigón y las paredes internas permeabilizadas con diferentes materiales, se estima su vida útil mayor a 15 años con un buen mantenimiento.

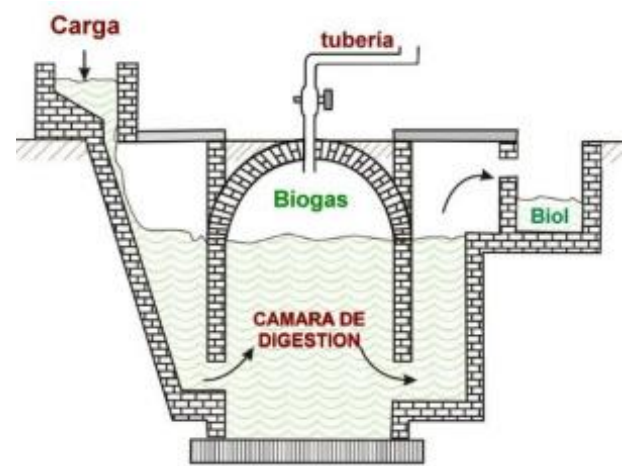


Figura 3 Tipo chino.

- Tipo Hindú, figura 4. Este diseño consiste en una estructura vertical que dispone de un reactor, cuya estructura sea de ladrillo tanto paredes como fondo, aunque a veces se usa refuerzo en hormigón, una campana o cúpula flotante de metal o material resistente a la corrosión, dos zonas definidas conectadas al reactor: una para la carga de materia orgánica y otra para la descarga de biol, una cámara hermética en la cual se genera condiciones de degradación anaeróbicas y la salida.

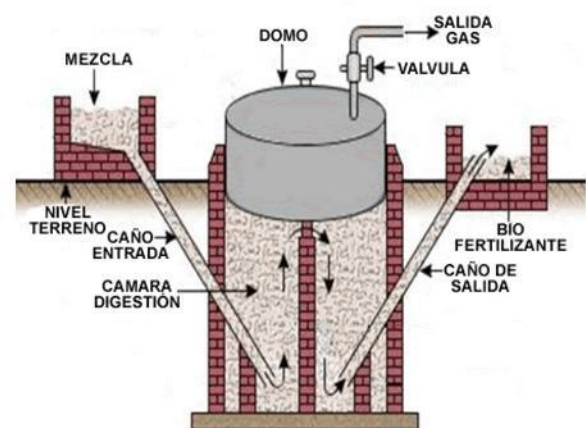


Figura 4 Digestor tipo Hindú

- Tipo salchicha, Figura 5 En este digestor, el gas se va acumulando en la parte superior de la bolsa-reactor, parcialmente llena con materia orgánica en fermentación, la bolsa se va inflando lentamente con un sistema presión baja.

Este biodigestor presenta los siguientes componentes:

- Tubo de entrada: es un tubo de plástico de 20 a 30cm de diámetro, que se utiliza para la inserción de materia orgánica y se dirige hacia adentro del reactor 15 cm de profundidad.
- Reactor principal componente del biodigestor, su tamaño varía dependiendo de la cantidad de material a fermentar, sin embargo, este no puede ser muy grande, debe estar aislado y contener un de calentamiento y agitación. Para calentarse se recubre por encima de 60 cm con una estructura simple de plástico a modo de invernadero, la construcción de una pared de tierra a los costados para evitar el enfriamiento del biodigestor. El gas producido por el digestor puede almacenarse en un espacio añadido al digestor o conducirse independientemente a otra instalación de almacenamiento, cerca de la cocina, calefactor a usarse.
- Tubo del afluyente: fabricado de material plástico, localizado entre 10 a 15 cm, por debajo del tubo de entrada y en el lado opuesto del digestor, generando una pendiente que proporcione el gradiente necesario para que el gas fluya naturalmente y con facilidad a la hora de descargar y evitar fugas.
- Tubo de metano: ubicado en la parte superior de la bolsa de almacenamiento de metano, de 5 cm de diámetro, se utiliza para transportar el biogás a su lugar de uso. Es importante que se conecte a un filtro absorbente de sulfuro de hidrógeno, que puede ser de virutas de hierro u otros materiales.
- Dispositivo de seguridad: se utiliza para prevenir la ruptura del fermentador ocasionada por las presiones altas del gas generado de la fermentación anaeróbica. Consiste en una botella plástica de al menos 10 cm de profundidad insertada el tubo de salida, cuando la presión del digestor es mayor a la del agua (o sea, la presión mayor a 10cm de agua), se liberará el gas.
- Tubo de limpieza: el lodo sedimentado en el fondo del biodigestor debe ser removido cada dos años, esta la tubería sirve para evacuar estos lodos por bombeo.

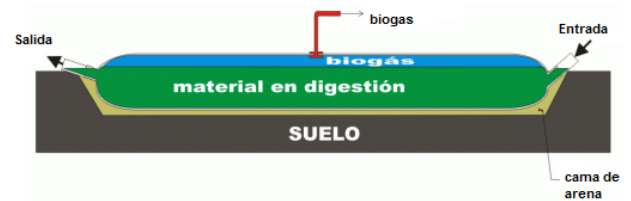


Figura 5 Digestor tipo Salchicha

Tarjeta y sensores utilizados

Arduino, figura 6. Es una herramienta y plataforma electrónica de código abierto, flexible y sencillo de utilizar. Con ella es posible crear objetos o entornos interactivos. Esta plataforma puede detectar o afectar el entorno recibiendo entradas de diversos sensores y activando algunos actuadores respectivamente.

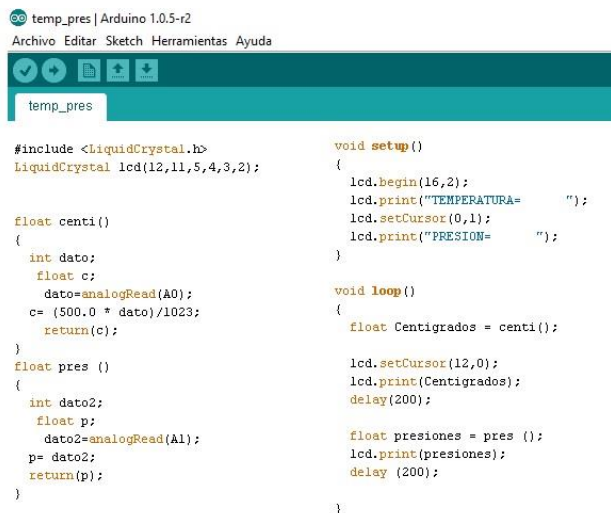
La tarjeta Arduino posee un microcontrolador el cual se programa mediante el lenguaje de programación Arduino y el entorno de desarrollo Arduino. Los ficheros de diseño de referencia pueden ser adaptables a las necesidades del usuario puesto que se encuentran disponibles bajo una licencia abierta.

Otros microcontroladores ofrecen características similares al Arduino, pero éste lleva ventaja en cuanto a asequibilidad, multiplataforma trabajando con Windows, Mac y Linux; entorno de programación simple; software y sobre todo hardware ampliable.



Figura 6 Tarjeta arduino.

Sensor LM35, Figura 7 es un sensor de temperatura con una precisión calibrada de 1 °C. Su rango de medición abarca desde -55 °C hasta 150 °C. La salida es lineal y cada grado Celsius equivale a 10 mV (150 °C = 1500 mV). Está calibrado directamente en grados Celsius. La tensión de salida es proporcional a la temperatura y tiene una precisión garantizada de 0.5 °C a 25 °C, baja corriente de alimentación (60 µA) y bajo coste, no requiere de circuitos adicionales para calibrarlo externamente.



```

temp_pres | Arduino 1.0.5-r2
Archivo Editar Sketch Herramientas Ayuda

temp_pres

#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(12,11,5,4,3,2);

float centi()
{
  int dato;
  float c;
  dato=analogRead(A0);
  c= (500.0 * dato)/1023;
  return(c);
}

float pres ()
{
  int dato2;
  float p;
  dato2=analogRead(A1);
  p= dato2;
  return(p);
}

void setup()
{
  lcd.begin(16,2);
  lcd.print("TEMPERATURA= ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("PRESION= ");
}

void loop()
{
  float Centigrados = centi();

  lcd.setCursor(12,0);
  lcd.print(Centigrados);
  delay(200);

  float presiones = pres ();
  lcd.print(presiones);
  delay (200);
}

```

Figura 10 Programa en arduino

Las salidas de los sensores utilizados muestran sus resultados en un display de bajo consumo el cual es conectado a la tarjeta arduino, y su fuente de alimentación es una conexión a una pila de 9VCD para la arduino, el display y el sensor de temperatura y la conexión al sensor de presión es con dos pilas de 9 VCD en conexión en serie.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad tecnológica de Torreon por el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo y al cuerpo académico de innovación, integración y desarrollo de tecnologías.

Conclusiones

Todos los cambios de carga del digestor se realizaron en un lapso de dos días, Obteniendo buenos resultados en la generación del biogás, después de las primeras veces de quema de gas, se dio a conocer que el gas se mantiene por encima del aire, muestras buenas características de flama. Con el estiércol de cerdo se produce menos gas que con el estiércol de vaca, con el de cerdo el gas que se obtiene tiene un olor más fuerte y despreciable, con el gas obtenido con el estiércol de vaca se obtiene en promedio 3 cm más de gas en dos días que con el de cerdo y el olor es menos despreciable, con respecto al de cerdo.

Al ser vaciado y limpiado el biodigestor para una nueva carga, se mostró que la descomposición del cerdo es de mayor aceleración en comparación con la de la vaca, cuando se vació la carga del cerdo no tenía casi nada de carga de materia orgánica, pero mostro una mayor cantidad de fertilizante al ser vaciado.

La de vaca al ser limpiado el biodigestor, mostro que un tenía materia orgánica que podía seguir descomponiéndose dentro de él, mostrando una carga de fertilizante de 45% de la carga original del bote aproximadamente.

Referencias

Martina P., Yank L. & Corace J. & Bucki Wasserman B. & Aeberhard R. & Ventín A. (2005). *Estudio de la producción de biogás en función de la cantidad de residuos de madera en un biodigestor del tipo carga única o batch. Avances en energías renovables y medio ambiente.* Vol (9).pp 06.23 a 06.27.

Soria Fregoso M. & Ferrera-Cerrato, R. (2001). *Produccion de biofertilizantes mediante biodigestion de excreta liquida de cerdo.* Terra .Vol (19). pp 353 a 362.

Bernardo campos cuni (2011). *Metodologia para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino.* Scielo on line Vol. 20.

Brian W. Evans. 2008 *Arduino Programming Handbook: A Beginner's Reference*, Editorial, USA, 2 edición.

Jaime Marti Herrero. (2008). *BIODIGESTORES FAMILIARES, Guia de diseño y Manual de instalación..* Bolivia, Editorial Cooperación Técnica Alemana GTZ.

Instrucciones para la Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

[Título en Times New Roman y Negritas No. 14 en Español e Inglés]

Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1^{er} Autor†*, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1^{er} Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2^{do} Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3^{er} Coautor

Institución de Afiliación del Autor incluyendo dependencia (en Times New Roman No.10 y Cursiva)

International Identification of Science - Technology and Innovation

ID 1^{er} Autor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 1^{er} Autor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 1^{er} Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 1^{er} Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 2^{do} Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 2^{do} Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 3^{er} Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 3^{er} Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

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

Resumen (En Español, 150-200 palabras)

Objetivos
Metodología
Contribución

Indicar 3 palabras clave en Times New Roman y Negritas No. 10 (En Español)

Resumen (En Inglés, 150-200 palabras)

Objetivos
Metodología
Contribución

Indicar 3 palabras clave en Times New Roman y Negritas No. 10 (En Inglés)

Citación: Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1er Autor†*, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1er Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2do Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3er Coautor. Título del Artículo. Revista de Simulación Computacional. Año 1-1: 1-11 (Times New Roman No. 10)

* Correspondencia del Autor (ejemplo@ejemplo.org)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

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

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

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

Enfocar claramente cada una de sus características

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

Explicación de las secciones del Artículo

Desarrollo de Secciones y Apartados del Artículo con numeración subsecuente

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

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

Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

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

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

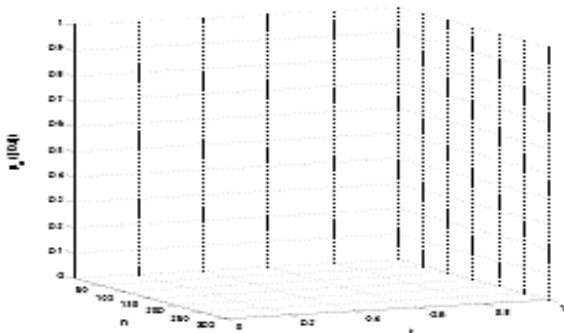


Gráfico 1 Título y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

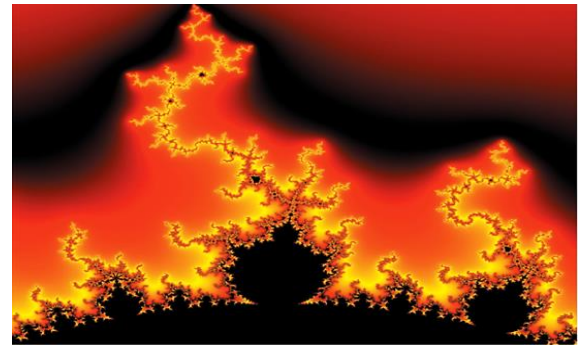


Figura 1 Título y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

Tabla 1 Título y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

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

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.

Utilizar Alfabeto Romano, todas las referencias que ha utilizado deben estar en el Alfabeto romano, incluso si usted ha citado un Artículo, libro en cualquiera de los idiomas oficiales de la Organización de las Naciones Unidas (Inglés, Francés, Alemán, Chino, Ruso, Portugués, Italiano, Español, Árabe), debe escribir la referencia en escritura romana y no en cualquiera de los idiomas oficiales.

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

Requerimientos de Propiedad Intelectual para su edición:

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Originalidad del Autor y Coautores

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Aceptación del Autor y Coautores

Reserva a la Política Editorial

Revista de Simulación Computacional se reserva el derecho de hacer los cambios editoriales requeridos para adecuar los Artículos a la Política Editorial del Research Journal. Una vez aceptado el Artículo en su versión final, el Research Journal enviará al autor las pruebas para su revisión. ECORFAN® únicamente aceptará la corrección de erratas y errores u omisiones provenientes del proceso de edición de la revista reservándose en su totalidad los derechos de autor y difusión de contenido. No se aceptarán supresiones, sustituciones o añadidos que alteren la formación del Artículo.

Código de Ética – Buenas Prácticas y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Declaración de Originalidad y carácter inédito del Artículo, de Autoría, sobre la obtención de datos e interpretación de resultados, Agradecimientos, Conflicto de intereses, Cesión de derechos y distribución

La Dirección de ECORFAN-México, S.C reivindica a los Autores de Artículos que su contenido debe ser original, inédito y de contenido Científico, Tecnológico y de Innovación para someterlo a evaluación.

Los Autores firmantes del Artículo deben ser los mismos que han contribuido a su concepción, realización y desarrollo, así como a la obtención de los datos, la interpretación de los resultados, su redacción y revisión. El Autor de correspondencia del Artículo propuesto requisitara el formulario que sigue a continuación.

Título del Artículo:

- El envío de un Artículo a Revista de Simulación Computacional emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Artículo, salvo que sea rechazado por el Comité de Arbitraje, podrá ser retirado.
- Ninguno de los datos presentados en este Artículo ha sido plagiado ó inventado. Los datos originales se distinguen claramente de los ya publicados. Y se tiene conocimiento del testeo en PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se procederá a arbitrar.
- Se citan las referencias en las que se basa la información contenida en el Artículo, así como las teorías y los datos procedentes de otros Artículos previamente publicados.
- Los autores firman el Formato de Autorización para que su Artículo se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding Taiwan considere pertinentes para divulgación y difusión de su Artículo cediendo sus Derechos de Obra.
- Se ha obtenido el consentimiento de quienes han aportado datos no publicados obtenidos mediante comunicación verbal o escrita, y se identifican adecuadamente dicha comunicación y autoría.
- El Autor y Co-Autores que firman este trabajo han participado en su planificación, diseño y ejecución, así como en la interpretación de los resultados. Asimismo, revisaron críticamente el trabajo, aprobaron su versión final y están de acuerdo con su publicación.
- No se ha omitido ninguna firma responsable del trabajo y se satisfacen los criterios de Autoría Científica.
- Los resultados de este Artículo se han interpretado objetivamente. Cualquier resultado contrario al punto de vista de quienes firman se expone y discute en el Artículo.

Copyright y Acceso

La publicación de este Artículo supone la cesión del copyright a ECORFAN-México, S.C en su Holding Taiwan para su Revista de Simulación Computacional, que se reserva el derecho a distribuir en la Web la versión publicada del Artículo y la puesta a disposición del Artículo en este formato supone para sus Autores el cumplimiento de lo establecido en la Ley de Ciencia y Tecnología de los Estados Unidos Mexicanos, en lo relativo a la obligatoriedad de permitir el acceso a los resultados de Investigaciones Científicas.

Título del Artículo:

Nombre y apellidos del Autor de contacto y de los Coautores	Firma
1.	
2.	
3.	
4.	

Principios de Ética y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Responsabilidades del Editor

El Editor se compromete a garantizar la confidencialidad del proceso de evaluación, no podrá revelar a los Árbitros la identidad de los Autores, tampoco podrá revelar la identidad de los Árbitros en ningún momento.

El Editor asume la responsabilidad de informar debidamente al Autor la fase del proceso editorial en que se encuentra el texto enviado, así como de las resoluciones del arbitraje a Doble Ciego.

El Editor debe evaluar los manuscritos y su contenido intelectual sin distinción de raza, género, orientación sexual, creencias religiosas, origen étnico, nacionalidad, o la filosofía política de los Autores.

El Editor y su equipo de edición de los Holdings de ECORFAN® no divulgarán ninguna información sobre Artículos enviado a cualquier persona que no sea el Autor correspondiente.

El Editor debe tomar decisiones justas e imparciales y garantizar un proceso de arbitraje por pares justa.

Responsabilidades del Consejo Editorial

La descripción de los procesos de revisión por pares es dado a conocer por el Consejo Editorial con el fin de que los Autores conozcan cuáles son los criterios de evaluación y estará siempre dispuesto a justificar cualquier controversia en el proceso de evaluación. En caso de Detección de Plagio al Artículo el Comité notifica a los Autores por Violación al Derecho de Autoría Científica, Tecnológica y de Innovación.

Responsabilidades del Comité Arbitral

Los Árbitros se comprometen a notificar sobre cualquier conducta no ética por parte de los Autores y señalar toda la información que pueda ser motivo para rechazar la publicación de los Artículos. Además, deben comprometerse a mantener de manera confidencial la información relacionada con los Artículos que evalúan.

Cualquier manuscrito recibido para su arbitraje debe ser tratado como documento confidencial, no se debe mostrar o discutir con otros expertos, excepto con autorización del Editor.

Los Árbitros se deben conducir de manera objetiva, toda crítica personal al Autor es inapropiada.

Los Árbitros deben expresar sus puntos de vista con claridad y con argumentos válidos que contribuyan al que hacer Científico, Tecnológica y de Innovación del Autor.

Los Árbitros no deben evaluar los manuscritos en los que tienen conflictos de intereses y que se hayan notificado al Editor antes de someter el Artículo a evaluación.

Responsabilidades de los Autores

Los Autores deben garantizar que sus Artículos son producto de su trabajo original y que los datos han sido obtenidos de manera ética.

Los Autores deben garantizar no han sido previamente publicados o que no estén siendo considerados en otra publicación seriada.

Los Autores deben seguir estrictamente las normas para la publicación de Artículos definidas por el Consejo Editorial.

Los Autores deben considerar que el plagio en todas sus formas constituye una conducta no ética editorial y es inaceptable, en consecuencia, cualquier manuscrito que incurra en plagio será eliminado y no considerado para su publicación.

Los Autores deben citar las publicaciones que han sido influyentes en la naturaleza del Artículo presentado a arbitraje.

Servicios de Información

Indización - Bases y Repositorios

RESEARCH GATE (Alemania)

GOOGLE SCHOLAR (Índices de citas-Google)

MENDELEY (Gestor de Referencias bibliográficas)

REDIB (Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico- CSIC)

HISPANA (Información y Orientación Bibliográfica-España)

Servicios Editoriales

Identificación de Citación e Índice H

Administración del Formato de Originalidad y Autorización

Testeo de Artículo con PLAGSCAN

Evaluación de Artículo

Emisión de Certificado de Arbitraje

Edición de Artículo

Maquetación Web

Indización y Repositorio

Traducción

Publicación de Obra

Certificado de Obra

Facturación por Servicio de Edición

Política Editorial y Administración

69 Calle Distrito YongHe, Zhongxin. Taipei-Taiwán. Tel: +52 1 55 6159 2296, +52 1 55 1260 0355, +52 1 55 6034 9181; Correo electrónico: contact@ecorfan.org www.ecorfan.org

ECORFAN®

Editor en Jefe

QUINTANILLA - CÓNDOR, Cerapi

Directora Ejecutiva

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Editorial

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

Diseñador Web

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

Diagramador Web

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Asistente Editorial

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

Traductor

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

Filóloga

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

Publicidad y Patrocinio

(ECORFAN® Taiwan), sponsorships@ecorfan.org

Licencias del Sitio

03-2010-032610094200-01-Para material impreso, 03-2010-031613323600-01-Para material electrónico, 03-2010-032610105200-01-Para material fotográfico, 03-2010-032610115700-14-Para Compilación de Datos, 04 -2010-031613323600-01-Para su página Web, 19502-Para la Indización Iberoamericana y del Caribe, 20-281 HB9-Para la Indización en América Latina en Ciencias Sociales y Humanidades, 671-Para la Indización en Revistas Científicas Electrónicas España y América Latina, 7045008-Para su divulgación y edición en el Ministerio de Educación y Cultura-España, 25409-Para su repositorio en la Biblioteca Universitaria-Madrid, 16258-Para su indexación en Dialnet, 20589-Para Indización en el Directorio en los países de Iberoamérica y el Caribe, 15048-Para el registro internacional de Congresos y Coloquios. financingprograms@ecorfan.org

Oficinas de Gestión

69 Calle Distrito YongHe, Zhongxin. Taipei-Taiwán.

Revista de Simulación Computacional

“Determinación del requerimiento energético para calefacción en un invernadero agrícola y dimensionamiento del sistema Termosolar-Gas L.P. requerido para su suministro óptimo”

ESCOBEDO-BRETADO, Jorge & MARTÍN-DOMINGUEZ, Ignacio

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.

“Emulador de turbina eólica basado en el control vectorial de una máquina eléctrica”

HERNÁNDEZ, Oscar, MINA, Jesús y CLAUDIO, Abraham

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

“Propuesta de diseño aerodinámico para reducción de turbulencia en la estela de rotación en turbinas eólicas de baja capacidad HAWT”

MOLINERO, Daniel, LÓPEZ, Víctor y CERVANTES, Alberto

“Semi-automatización de biodigestor cerdo vs. vaca”

MORALES-IBARRA, Vanessa, SALAZAR-VALLE, Eduardo,

MIRANDA-HERRERA, María Guadalupe y MADRID-GONZALEZ, Valentín

