

ISSN 2523-6776

Volumen 2, Número 8 — Octubre — Diciembre - 2018

Revista de Ingeniería Tecnológica

ECORFAN®

ECORFAN-Taiwan

Editora en Jefe

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Redactor Principal

SERRUDO-GONZALES, Javier. BsC

Asistente Editorial

ROSALES-BORBOR, Eleana. BsC

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

Director Editorial

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

Editor Ejecutivo

VARGAS-DELGADO, Oscar. PhD

Editores de Producción

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Administración Empresarial

REYES-VILLAO, Angélica. BsC

Control de Producción

RAMOS-ARANCIBIA Alejandra. BsC

DÍAZ-OCAMPO Javier. BsC

Revista de Ingeniería Tecnológica,

Volumen 2, Número 8, de Octubre a Diciembre 2018, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Taiwán. Taiwan, Taipei. YongHe district, ZhongXin, Street 69. Postcode: 23445. WEB: www.ecorfan.org/taiwan, revista@ecorfan.org. Editora en Jefe: RAMOS-ESCAMILLA, María, CoEditor: VARGAS-DELGADO, Oscar. PhD. ISSN 2523-6776. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN, Imelda. PhD, LUNA-SOTO, Vladimir. PhD. Actualizado al 31 de Diciembre 2018.

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 Centro Español de Ciencia y Tecnología.

Revista de Ingeniería Tecnológica

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 Electromagnetismo, Fuentes de distribución eléctrica, Innovación en la ingeniería eléctrica, Amplificación de señales, Diseño de motores eléctricos, Ciencias materiales en las plantas eléctricas, Gestión y distribución de energías eléctricas.

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 Ingeniería Tecnológica 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 Electromagnetismo, Fuentes de distribución eléctrica, Innovación en la ingeniería eléctrica, Amplificación de señales, Diseño de motores eléctricos, Ciencias materiales en las plantas eléctricas, Gestión y distribución de energías eléctricas 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

ROCHA - RANGEL, Enrique. PhD
Oak Ridge National Laboratory

CARBAJAL - DE LA TORRE, Georgina. PhD
Université des Sciences et Technologies de Lille

GUZMÁN - ARENAS, Adolfo. PhD
Institute of Technology

CASTILLO - TÉLLEZ, Beatriz. PhD
University of La Rochelle

FERNANDEZ - ZAYAS, José Luis. PhD
University of Bristol

DECTOR - ESPINOZA, Andrés. PhD
Centro de Microelectrónica de Barcelona

TELOXA - REYES, Julio. PhD
Advanced Technology Center

HERNÁNDEZ - PRIETO, María de Lourdes. PhD
Universidad Gestalt

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

HERNANDEZ - ESCOBEDO, Quetzalcoatl Cruz. PhD
Universidad Central del Ecuador

HERRERA - DIAZ, Israel Enrique. PhD
Center of Research in Mathematics

MEDELLIN - CASTILLO, Hugo Iván. PhD
Heriot-Watt University

LAGUNA, Manuel. PhD
University of Colorado

VAZQUES - NOGUERA, José. PhD
Universidad Nacional de Asunción

VAZQUEZ - MARTINEZ, Ernesto. PhD
University of Alberta

AYALA - GARCÍA, Ivo Nefthalí. PhD
University of Southampton

LÓPEZ - HERNÁNDEZ, Juan Manuel. PhD
Institut National Polytechnique de Lorraine

MEJÍA - FIGUEROA, Andrés. PhD
Universidad de Sevilla

DIAZ - RAMIREZ, Arnoldo. PhD
Universidad Politécnica de Valencia

MARTINEZ - ALVARADO, Luis. PhD
Universidad Politécnica de Cataluña

MAYORGA - ORTIZ, Pedro. PhD
Institut National Polytechnique de Grenoble

ROBLEDO - VEGA, Isidro. PhD
University of South Florida

LARA - ROSANO, Felipe. PhD
Universidad de Aachen

TIRADO - RAMOS, Alfredo. PhD
University of Amsterdam

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

CASTILLO - LÓPEZ, Oscar. PhD
Academia de Ciencias de Polonia

LÓPEZ - BONILLA, Oscar Roberto. PhD
State University of New York at Stony Brook

LÓPEZ - LÓPEZ, Aurelio. PhD
Syracuse University

RIVAS - PEREA, Pablo. PhD
University of Texas

VEGA - PINEDA, Javier. PhD
University of Texas

PÉREZ - ROBLES, Juan Francisco. PhD
Instituto Tecnológico de Saltillo

SALINAS - ÁVILES, Oscar Hilario. PhD
Centro de Investigación y Estudios Avanzados -IPN

RODRÍGUEZ - AGUILAR, Rosa María. PhD
Universidad Autónoma Metropolitana

BAEZA - SERRATO, Roberto. PhD
Universidad de Guanajuato

MORILLÓN - GÁLVEZ, David. PhD
Universidad Nacional Autónoma de México

CASTILLO - TÉLLEZ, Margarita. PhD
Universidad Nacional Autónoma de México

SERRANO - ARRELLANO, Juan. PhD
Universidad de Guanajuato

ZAVALA - DE PAZ, Jonny Paul. PhD
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada

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

ENRÍQUEZ - ZÁRATE, Josué. PhD
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados

HERNÁNDEZ - NAVA, Pablo. PhD
Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica

CASTILLO - TOPETE, Víctor Hugo. PhD
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

CERCADO - QUEZADA, Bibiana. PhD
Intitut National Polytechnique Toulouse

QUETZALLI - AGUILAR, Virgen. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

DURÁN - MEDINA, Pino. PhD
Instituto Politécnico Nacional

PORTILLO - VÉLEZ, Rogelio de Jesús. PhD
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados

ROMO - GONZALEZ, Ana Eugenia. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

VASQUEZ - SANTACRUZ, J.A. PhD
Centro de Investigación y Estudios Avanzados

VALENZUELA - ZAPATA, Miguel Angel. PhD
Universidad Autónoma Metropolitana

OCHOA - CRUZ, Genaro. PhD
Instituto Politécnico Nacional

SÁNCHEZ - HERRERA, Mauricio Alonso. PhD
Instituto Tecnológico de Tijuana

PALAFIX - MAESTRE, Luis Enrique. PhD
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

AGUILAR - NORIEGA, Leocundo. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

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

REALYVÁSQUEZ - VARGAS, Arturo. PhD
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

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

MALDONADO - MACÍAS, Aidé Aracely. PhD
Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

LICEA - SANDOVAL, Guillermo. PhD
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

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

RAMIREZ - LEAL, Roberto. PhD
Centro de Investigación en Materiales Avanzados

VALDEZ - ACOSTA, Fevrier Adolfo. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

GONZÁLEZ - LÓPEZ, Samuel. PhD
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

CORTEZ - GONZÁLEZ, Joaquín. PhD
Centro de Investigación y Estudios Avanzados

TABOADA - GONZÁLEZ, Paul Adolfo. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

RODRÍGUEZ - MORALES, José Alberto. PhD
Universidad Autónoma de Querétaro

Comité Arbitral

ESCAMILLA - BOUCHÁN, Imelda. PhD
Instituto Politécnico Nacional

LUNA - SOTO, Carlos Vladimir. PhD
Instituto Politécnico Nacional

URBINA - NAJERA, Argelia Berenice. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

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

CASTRO - ENCISO, Salvador Fernando. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

CASTAÑÓN - PUGA, Manuel. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

BAUTISTA - SANTOS, Horacio. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

GONZÁLEZ - REYNA, Sheila Esmeralda. PhD
Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

RUELAS - SANTOYO, Edgar Augusto. PhD
Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas

HERNÁNDEZ - GÓMEZ, Víctor Hugo. PhD
Universidad Nacional Autónoma de México

OLVERA - MEJÍA, Yair Félix. PhD
Instituto Politécnico Nacional

CUAYA - SIMBRO, German. PhD
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

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

ALVAREZ - SÁNCHEZ, Ervin Jesús. PhD
Centro de Investigación Científica y de Estudios Superiores de Ensenada

SALAZAR - PERALTA, Araceli. PhD
Universidad Autónoma del Estado de México

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

RAMÍREZ - COUTIÑO, Víctor Ángel. PhD
Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica

BAUTISTA - VARGAS, María Esther. PhD
Universidad Autónoma de Tamaulipas

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

GONZÁLEZ - JASSO, Eva. PhD
Instituto Politécnico Nacional

FLORES - RAMÍREZ, Oscar. PhD
Universidad Politécnica de Amozoc

ARROYO - FIGUEROA, Gabriela. PhD
Universidad de Guadalajara

BAUTISTA - SANTOS, Horacio. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

GUTIÉRREZ - VILLEGAS, Juan Carlos. PhD
Centro de Tecnología Avanzada

HERRERA - ROMERO, José Vidal. PhD
Universidad Nacional Autónoma de México

MARTINEZ - MENDEZ, Luis G. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

LUGO - DEL ANGEL, Fabiola Erika. PhD
Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

NÚÑEZ - GONZÁLEZ, Gerardo. PhD
Universidad Autónoma de Querétaro

PURATA - SIFUENTES, Omar Jair. PhD
Centro Nacional de Metrología

CALDERÓN - PALOMARES, Luis Antonio. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

TREJO - MACOTELA, Francisco Rafael. PhD
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

TZILI - CRUZ, María Patricia. PhD
Universidad ETAC

DÍAZ - CASTELLANOS, Elizabeth Eugenia. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

ORANTES - JIMÉNEZ, Sandra Dinorah. PhD
Centro de Investigación en Computación

VERA - SERNA, Pedro. PhD
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

MARTÍNEZ - RAMÍRES, Selene Marisol. PhD
Universidad Autónoma Metropolitana

OLIVARES - CEJA, Jesús Manuel. PhD
Centro de Investigación en Computación

GALAVIZ - RODRÍGUEZ, José Víctor. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

JUAREZ - SANTIAGO, Brenda. PhD
Universidad Internacional Iberoamericana

ENCISO - CONTRERAS, Ernesto. PhD
Instituto Politécnico Nacional

GUDIÑO - LAU, Jorge. PhD
Universidad Nacional Autónoma de México

MEJIAS - BRIZUELA, Nildia Yamileth. PhD
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

FERNÁNDEZ - GÓMEZ, Tomás. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

MENDOZA - DUARTE, Olivia. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

ARREDONDO - SOTO, Karina Cecilia. PhD
Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

NAKASIMA - LÓPEZ, Mydory Oyuky. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

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

ARCEO - OLAGUE, José Guadalupe. PhD
Instituto Politécnico Nacional

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

AMARO - ORTEGA, Vidblain. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

ÁLVAREZ - GUZMÁN, Eduardo. PhD
Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada

CASTILLO - BARRÓN, Allen Alexander. PhD
Instituto Tecnológico de Morelia

CASTILLO - QUIÑONES, Javier Emmanuel. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

ROSALES - CISNEROS, Ricardo. PhD
Universidad Nacional Autónoma de México

GARCÍA - VALDEZ, José Mario. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

CHÁVEZ - GUZMÁN, Carlos Alberto. PhD
Instituto Politécnico Nacional

MÉRIDA - RUBIO, Jován Oseas. PhD
Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital

INZUNZA - GONÁLEZ, Everardo. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

VILLATORO - Tello, Esaú. PhD
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

NAVARRO - ÁLVEREZ, Ernesto. PhD
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados

ALCALÁ - RODRÍGUEZ, Janeth Aurelia. PhD
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

GONZÁLEZ - LÓPEZ, Juan Miguel. PhD
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados

RODRIGUEZ - ELIAS, Oscar Mario. PhD
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

ORTEGA - CORRAL, César. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

GARCÍA - GORROSTIETA, Jesús Miguel. PhD
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

Cesión de Derechos

El envío de un Artículo a Revista de Ingeniería Tecnológica 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 homólogo de CONACYT para los capítulos de America-Europa-Asia-África 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 autorial - 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 Electromagnetismo, Fuentes de distribución eléctrica, Innovación en la ingeniería eléctrica, Amplificación de señales, Diseño de motores eléctricos, Ciencias materiales en las plantas eléctricas, Gestión y distribución de energías eléctricas y a otros temas vinculados a las Ciencias de Ingeniería y Tecnología.

Presentación del contenido

En el primer artículo presentamos *Evaluación de la energía solar como alternativa para un sistema de climatización en invernaderos*, por GÓMEZ-MERCADO, Abdiel, JUÁREZ-PLATA, Allin, RESÉNDIZ-ROSAS, Celerino y ÁVILA-DÁVILA, Érika, con adscripción en el Instituto Tecnológico de Pachuca, como segundo artículo presentamos *Análisis del uso de biomasa en sistema alternativo de microgeneración*, por BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Jorge, BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Marcos, FLORES-LARA, Vicente y MORA-SANTOS, Carlos, con adscripción en el Instituto Tecnológico de Apizaco, como tercer artículo presentamos *Aplicación de sensores inerciales para análisis de marcha humana*, por MARTÍNEZ-SOLÍS, Fermín, VERGARA-LIMON, Sergio, RAMÍREZ-BETANCOUR, Reymundo y OLMOS-LÓPEZ, Armando, con adscripción en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, como cuarto artículo presentamos *Análisis numérico por el Método de Elementos Finitos de una zapata de tipo tambor*, por VILLAGÓMEZ-Gerardo, HERNÁNDEZ-Bernabé, MARTÍNEZ-Armando y HERNÁNDEZ-Alberto, con adscripción en la Universidad Politécnica de Pachuca.

Contenido

Artículo	Página
Evaluación de la energía solar como alternativa para un sistema de climatización en invernaderos GÓMEZ-MERCADO, Abdiel, JUÁREZ-PLATA, Allin, RESÉNDIZ-ROSAS, Celerino y ÁVILA-DÁVILA, Érika <i>Instituto Tecnológico de Pachuca</i>	1-10
Análisis del uso de biomasa en sistema alternativo de microgeneración BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Jorge, BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Marcos, FLORES-LARA, Vicente y MORA-SANTOS, Carlos <i>Instituto Tecnológico de Apizaco</i>	11-22
Aplicación de sensores inerciales para análisis de marcha humana MARTÍNEZ-SOLÍS, Fermín, VERGARA-LIMON, Sergio, RAMÍREZ-BETANCOUR, Reymundo y OLMOS-LÓPEZ, Armando <i>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla</i>	23-31
Análisis numérico por el Método de Elementos Finitos de una zapata de tipo tambor VILLAGÓMEZ-Gerardo, HERNÁNDEZ-Bernabé, MARTÍNEZ-Armando y HERNÁNDEZ-Alberto <i>Universidad Politécnica de Pachuca</i>	32-40

Evaluación de la energía solar como alternativa para un sistema de climatización en invernaderos

Evaluation of solar energy as an alternative for a climate control system in greenhouses

GÓMEZ-MERCADO, Abdiel*†, JUÁREZ-PLATA, Allin, RESÉNDIZ-ROSAS, Celerino y ÁVILA-DÁVILA, Érika

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pachuca. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Carr. México-Pachuca Km 87.5 Col. Venta Prieta C.P. 42080 Pachuca, Hgo.

ID 1^{er} Autor: *Abdiel, Gómez-Mercado* / ORC ID: 0000-0002-3409-6851, Researcher ID Thomson: P-7684-2018, PubMed ID: abd13l_gm

ID 1^{er} Coautor: *Allin, Juárez-Plata* / ORC ID: 0000-0002-1548-7355, Researcher ID Thomson: P-5343-2018; arXiv ID: 2366149

ID 2^{do} Coautor: *Celerino, Reséndiz-Rosas* / ORC ID: 0000-0003-3197-2876, Researcher ID Thomson: P-6224-2018, Mendeley ID: Celerino Reséndiz-Rosas

ID 3^{er} Coautor: *Érika, Ávila-Dávila* / ORC ID: 0000-0002-9365-6214

Recibido: Septiembre 01, 2018; Aceptado Noviembre 26, 2018

Resumen

La producción de cultivos bajo invernadero se ha convertido en una actividad en expansión a nivel mundial. El uso de combustibles fósiles para mantener las condiciones climáticas apropiadas dentro de los espacios protegidos resulta costoso y perjudicial al medio ambiente. La selección de un sistema de climatización para invernaderos que funcione con energía solar, ya sea térmica o fotovoltaica, es el objeto de estudio del presente documento. Como caso de estudio, un invernadero localizado en el Instituto Tecnológico de Pachuca fue utilizado para la investigación. A partir de un balance térmico y con el uso del software Wolfram Mathematica 11® se obtuvieron los valores de temperatura y humedad al interior del invernadero para cualquier estación del año. Mediante el simulador de Selección de Sistemas Fotovoltaicos de la Universidad Autónoma de Chapingo, se eligieron los equipos y se calcularon los costos de un sistema fotovoltaico para la climatización del invernadero. Así mismo, se determinaron los equipos y se estimaron los costos para la instalación de un colector solar. La evaluación consistió en un análisis costo beneficio de éstas dos alternativas, resultando seleccionado el uso de energía solar fotovoltaica para la operación del sistema de climatización del invernadero.

Invernaderos, Climatización, Balance térmico, Energía solar fotovoltaica

Abstract

The production of greenhouse crops has become an expanding activity worldwide. The use of fossil fuels to weather the appropriate climatic conditions within the protected spaces is costly and harmful to the environment. The selection of a heating-ventilation system for greenhouses that works with solar energy, either thermal or photovoltaic, is the object of study of this document. As a case of study, a greenhouse located at the Instituto Tecnológico de Pachuca was used for research. From a thermal balance and with the use of the Wolfram Mathematica 11® software, the temperature and humidity values inside the greenhouse were obtained for any season of the year. Using the Photovoltaic Systems Selection simulator of the Universidad Autónoma de Chapingo, the equipment was chosen and the costs of a photovoltaic system for heating-ventilation of the greenhouse were calculated. Likewise, the equipment was determined and the costs for the installation of a solar collector were estimated. The evaluation consisted of a cost-benefit analysis of these both alternatives, resulting selected the use of solar photovoltaic energy for the operation of the heating-ventilation system of the greenhouse.

Greenhouse, Air conditioning, Thermal balance, Photovoltaic solar energy

Citación: GÓMEZ-MERCADO, Abdiel, JUÁREZ-PLATA, Allin, RESÉNDIZ-ROSAS, Celerino y ÁVILA-DÁVILA, Érika. Evaluación de la energía solar como alternativa para un sistema de climatización en invernaderos. Revista de Ingeniería Tecnológica. 2018. 2-8: 1-10.

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: agmerca63@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidades
A	Superficie total de captación	m^2
C	Consumo diario de agua	L
c_p	Calor específico del aire húmedo	$J/kg \cdot K$
E	Velocidad de evapotranspiración dentro del invernadero	$kg/m^2 \cdot s$
H	Altura promedio del invernadero	m
h	Coefficiente global de transferencia de calor	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
I	Radiación real recibida	$kcal/m^2$
I_n	Radiación solar diaria	$kcal/m^2$
I_o	Radiación de referencia	$kcal/m^2$
K	Factor de corrección de I_n por inclinación	
N	Número de horas de sol en la zona	
Q_{cc}	Pérdida de calor a través de la cubierta	W/m^2
Q_{nec}	Flujo de calor ser suministrado por el sistema de calefacción	W/m^2
Q_{net}	Radiación global absorbida dentro del invernadero	W/m^2
Q_{ren}	Pérdida de calor por infiltración y ventilación	W/m^2
Q_{rad}	Radiación global fuera del invernadero	W/m^2
q_v	Velocidad de ventilación	$m^3/m^2 \cdot s$
R_c	Rendimiento del colector solar	
r_s	Reflectancia de la radiación solar en la superficie del suelo	-
T_a	Temperatura ambiente exterior media	$^\circ C$
T_A	Temperatura de acumulación	$^\circ C$
T_e	Temperatura ambiente exterior media	$^\circ C$
	Temperatura de entrada del agua de la red hidráulica	
T_{ext}	Temperatura del aire fuera del invernadero	$^\circ C$
T_{int}	Temperatura del aire dentro del invernadero	$^\circ C$
T_m	Temperatura media del agua en el colector solar	$^\circ C$
w	Relación de la superficie de la cubierta a la superficie del suelo	-
W_{ext}	Humedad absoluta fuera del invernadero	$g_{agua} / kg_{aire seco}$
W_{int}	Humedad absoluta dentro del invernadero	$g_{agua} / kg_{aire seco}$
τ_c	Transmitancia de radiación solar del material de la cubierta del invernadero	-
ρ	Masa específica del aire	$kg_{aire seco} / m^3$

Introducción

Los alimentos orgánicos son el resultado de un proceso agrícola más amigable con el medio ambiente (PROFECO). La demanda de estos productos registra hoy en día un notable crecimiento. Actualmente, la agricultura orgánica en México cubre casi 400,000 has. y está en franca expansión; la tasa media de crecimiento de esta actividad es del 20% anual en promedio en los últimos 10 años. Entre el 85 y 90% de la producción orgánica nacional es de exportación.

Los ingresos en divisas por las exportaciones de productos orgánicos son de alrededor de 400 millones de dólares promedio anual (CNPO), sin embargo, este tipo de productos son más costosos que los convencionales debido a que su producción es más lenta y en menor cantidad, resultado de la ausencia de fertilizantes, hormonas de crecimiento y, en general, al riguroso proceso de certificación al cual son sometidos (PROFECO). Derivado de dichos factores, se ha puesto especial atención a la tecnología de desarrollo de invernaderos, que incluye la automatización y control climático del cultivo.

El uso de combustibles fósiles para calentamiento, ventilación e iluminación de invernaderos es costoso (Cuce, 2013) y representa daños significativos al medio ambiente, tales como calentamiento global y cambio climático (Cuce, 2013).

Las energías alternativas empleadas en espacios protegidos, específicamente la energía solar fotovoltaica o térmica, pueden ser aprovechadas para mantener las condiciones apropiadas de humedad relativa y temperatura según las necesidades del cultivo (Sethi, 2008). Con un estudio costo-beneficio de la energía solar térmica y solar fotovoltaica es posible determinar cuál es la más adecuada para invernaderos.

Reda Hassanien et al (Hassanien, 2015) realizaron una revisión y discusión sobre la aplicación de las nuevas tecnologías en energía solar para el control climático en invernaderos (enfriamiento, calentamiento e iluminación, principalmente). El estudio teórico determinó que los calentadores solares de aire muestran el mejor desempeño general sobre los demás sistemas estudiados.

Erdem Cuce et al (Cuce, 2016) presentaron un estudio sobre ahorro de energía y tecnologías para el control climático en invernaderos, tales como módulos fotovoltaicos, colectores térmicos solares, sistemas y colectores híbridos, bombas de calor, materiales que permiten un mejor aislamiento térmico y sistemas de iluminación. Los resultados de la investigación revelaron que es posible lograr más del 80% en el ahorro de energía en los invernaderos convencionales seleccionando adecuadamente el sistema de energía renovable y sustentable, con un periodo de reembolso de 4 a 5 años dependiendo del cultivo.

Alexandros Sotirios et al (Sotirios, 2016) implementaron un sistema autónomo de energía renovable que consiste en la conversión de energía solar fotovoltaica en hidrógeno mediante electrólisis del agua. El hidrógeno generado es almacenado durante el día en un tanque presurizado y en la noche es convertido en electricidad para alimentar una bomba de calor que propicia el calentamiento de un invernadero. Como resultado, se determinó una eficiencia general del sistema del 11%.

J. Xu et al (Xu, 2014) desarrollaron un sistema subterráneo de almacenamiento de energía térmica utilizando un colector solar que alimenta una red de intercambiadores de calor de tubos en U para abastecer los requerimientos energéticos en un invernadero, con la finalidad de obtener una distribución uniforme de la energía térmica en toda el área de cultivo. Los resultados obtenidos demostraron que, gracias a la transferencia de calor por convección y conducción en los tubos, se mantuvo una temperatura de 13 °C por encima de la temperatura ambiental dentro del invernadero.

Wael M. et al (Wael, 2015) dedicaron su investigación al cálculo de la cantidad de energía solar que puede ser capturada desde la superficie de un invernadero y utilizada para reemplazar el consumo de combustibles fósiles y otros sistemas de calentamientos convencionales en los invernaderos. Se llevó a cabo un estudio analítico para diferentes proporciones curvas de superficie y se determinó el óptimo máximo con mayor captación de energía solar. Finalmente, para el caso óptimo se realizó un estudio de cantidad de energía capturada y los costos del ahorro energético.

Trypanagnostopoulos et al (Trypanagnostopoulos, 2017) realizaron un estudio sobre la colocación de paneles solares fotovoltaicos en el techo de un invernadero para satisfacer la demanda energética del espacio protegido. Al mismo tiempo, determinaron que no se generan efectos significativos en el crecimiento de los cultivos debido a la sombra que producen los módulos fotovoltaicos.

V.P. Sethi et al (Sethi, 2013) realizaron una recopilación de los modelos de microclimas para invernaderos que han sido diseñados, con la finalidad de generar un modelo térmico más preciso. Los aspectos examinados en cada modelo fueron: tipo de modelo, herramienta o programa utilizado para la simulación, suposiciones para escribir las ecuaciones de balance de energía, resultados obtenidos y validación.

Las tecnologías de desarrollo de invernaderos no han sido claras en la determinación del proceso de control climático que mejor satisfaga los requerimientos energéticos a costos accesibles. Por tanto, el objetivo del presente trabajo es realizar el balance térmico del invernadero y determinar los requerimientos energéticos para mantener las condiciones climáticas apropiadas para el correcto desarrollo del cultivo aplicando energía solar térmica o fotovoltaica.

Metodología

La realización del presente trabajo forma parte de un proyecto multidisciplinario de emprendimiento desarrollado en el Instituto Tecnológico de Pachuca. Un invernadero tipo túnel, ubicado dentro del plantel, es el objeto de estudio del presente documento.

Se realizó un análisis y evaluación sobre la aplicación de energía solar térmica y fotovoltaica en invernaderos con base en las necesidades energéticas de los mismos.

1. Condiciones climatológicas

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la ciudad de Pachuca, Hidalgo, lugar en donde se desarrolló el proyecto, presenta clima templado semihúmedo, con temperatura promedio anual de 16 °C, temperatura mínima promedio de 4 °C y temperatura máxima promedio de 27 °C.

En la Tabla 1 se muestran las temperaturas ambientales máximas, T_{max} , mínimas, T_{min} , promedio, T_{med} , radiación solar, RG, y humedad relativa, HR, registradas en la ciudad de Pachuca, correspondientes al año 2017. La información es proveniente de la base de datos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

MES	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{med} (°C)	RG (W/m ²)	HR (%)
Ene	25.01	3.68	13.86	465.5	47.73
Feb	26.03	5.57	16.12	527.71	42.21
Mar	27.86	8.81	18.33	575.84	45.79
Abr	29.97	9.71	20.99	600.52	35.51
May	32.3	13.24	22.99	581.05	42.56
Jun	30.2	15.14	22.33	515.93	54.27
Jul	27.08	14.13	19.51	514.84	73.48
Ago	27.67	13.88	20.33	550.24	69.68
Sep	26.46	13.57	19.15	457.83	73.28
Oct	26.09	10.82	18.09	490.46	65.39
Nov	26.74	5.93	15.97	492.19	50.90
Dic	24.51	4.58	13.88	421.83	50.91

Tabla 1 Datos climáticos 2017 Pachuca, Hidalgo
Fuente: SEMARNAT, INIFAP

Para el monitoreo de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero fue utilizado un Termómetro Digital HTC-5.

2. Características del invernadero

Un invernadero está diseñado para proteger cultivos de los factores medioambientales externos (lluvia, viento y temperatura extrema, entre otros). El invernadero tipo túnel del Instituto Tecnológico de Pachuca, fue fabricado con acero galvanizado para su estructura y con cubierta de polietileno calibre 720. Sus dimensiones son especificadas en la tabla 2 (Licona y Copado, 2016) y mostrados en la Figura 1. Los datos de la geometría del invernadero fueron utilizados para llevar a cabo la simulación.

Propiedad	Marco	Arco techo
Largo (m)	6	6
Ancho (m)	5.4	Arco: 4.24
Altura (m)	3	0.8
Área (m ²)	32.4	25.44
Volúmen (m ³)	97.4	20.35

Tabla 2 Dimensiones del invernadero
Fuente: Licona y Copado, 2016

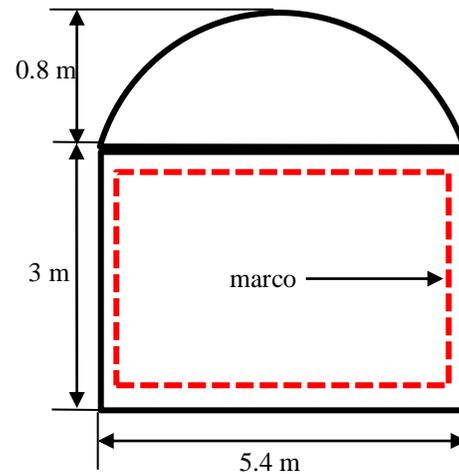


Figura 1 Dimensiones del invernadero

3. Balance de energía en el invernadero

La figura 2 y la ecuación 1 expresan el balance térmico dentro del invernadero (ASAE, 2003),

$$Q_{net} + Q_{nec} = Q_{cc} + Q_{ren} \quad (1)$$

El flujo de calor por evapotranspiración, así como la pérdida de calor a través del suelo son considerados despreciables en el presente trabajo.

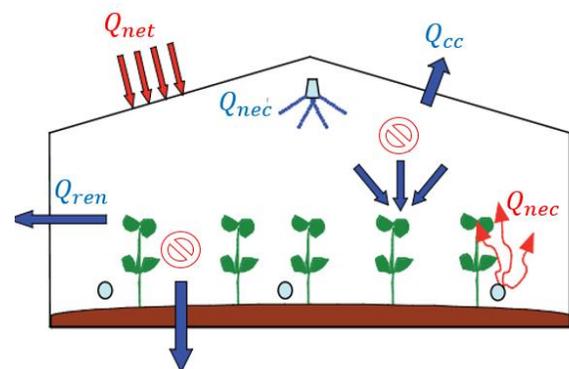


Figura 2 Balance energético en un invernadero
Fuente: Valera, Molina, Álvarez, 2008

El flujo de calor neto por radiación para un invernadero puede ser escrito según la ecuación 2.

$$Q_{net} = \tau_c(1 - r_s) \cdot Q_{rad} \quad (2)$$

La pérdida de calor debido a la renovación del aire interior del invernadero (ventilación e infiltración) se determinó mediante la ecuación 5.

$$Q_{ren} = q_v \cdot c_p \cdot \rho(T_{int} - T_{ext}) \quad (3)$$

En donde q_v representa la velocidad de ventilación ($m^3/m^2 \cdot s$) y $(T_{int} - T_{ext})$ define la diferencia de temperatura del aire entre el interior y el exterior del invernadero, respectivamente. La descripción del resto de los parámetros puede encontrarse en la sección de nomenclatura.

Para el cálculo del flujo de calor perdido a través de la cubierta se empleó la ecuación 4.

$$Q_{cc} = h \cdot w(T_{int} - T_{ext}) \quad (4)$$

En la ecuación 4, w representa la relación de las superficies de la cubierta y del piso, por lo que su valor es adimensional.

El flujo de calor que debe ser proporcionado por el sistema de calefacción (aire o agua caliente) se definió por medio de la ecuación 5.

$$Q_{nec} = Q_{cc} + Q_{ren} - Q_{net} \quad (5)$$

Se consideró al ambiente interno del invernadero (el aire delimitado por la cubierta) como el volumen de control del sistema y se asumió que las propiedades temperatura y humedad absoluta son homogéneas en todo el interior, se planteó el comportamiento del sistema mediante las ecuaciones diferenciales 6 y 7 de primer orden (Takakura y Fang, 2002).

$$\frac{dT_{int}}{dt} = \frac{1}{C_p \cdot \rho \cdot H} [Q_{rad} + Q_{nec} - (T_{int} - T_{ext}) \cdot (q_v \cdot C_p \cdot \rho + w \cdot h)] \quad (6)$$

$$\frac{dW_{int}}{dt} = \frac{1}{H \cdot \rho} [q_v \cdot \rho (W_{int} - W_{ext})] \quad (7)$$

Para la solución de las ecuaciones diferenciales se utilizó el software Wolfram Mathematica 11. Las condiciones iniciales para cada una de las variables establecidas, cuando $t = 0$, fueron asumidas de acuerdo con las ecuaciones 8 y 9.

$$t_{int} = t_{ext} \quad (8)$$

$$W_{int} = W_{ext} \quad (9)$$

Las humedades absolutas, interna y externa, pueden ser calculadas mediante la expresión 10.

$$W_{int} \cdot q_v \cdot \rho = W_{ext} \cdot q_v \cdot \rho + E \quad (10)$$

De acuerdo con Joliet (1999), $E = 0$ para invernaderos que aún no tienen cultivo en su interior.

4. Energía solar fotovoltaica como alternativa para el sistema de calefacción

A partir de los resultados obtenidos de las ecuaciones de balance energético, se escribieron las ecuaciones para determinar el número de módulos fotovoltaicos (MFV), los inversores y controladores para el sistema de calefacción (Ibáñez et al, 2004). Se realizó el estudio asumiendo la interconexión del sistema a la red de CFE para evitar el banco de baterías (Figura 3).

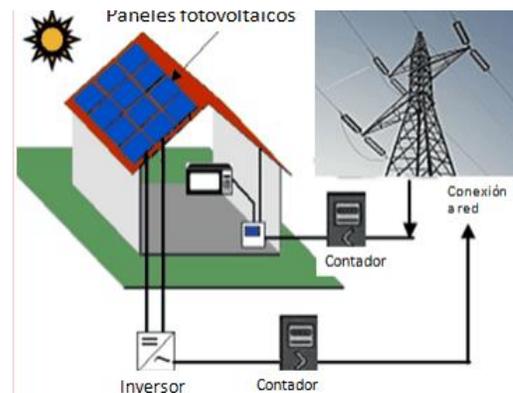


Figura 3 Sistema Fotovoltaico interconectado a la red
Fuente: Krishnamurthy, 2015

Para el cálculo y selección de equipos necesarios, así como la estimación de costos, se utilizó el simulador de Selección de Sistemas Fotovoltaicos de la Universidad Autónoma de Chapingo.

Al analizar la relación mensual de las horas solar pico (H_{sp}) entre el consumo de energía mensual durante un año se seleccionó el mes crítico, en donde la incidencia de radiación solar fue la más baja y se eligió un tipo de módulo fotovoltaico (MFV) del catálogo del software para disponer de su potencia (P_{mod}) y características eléctricas. A partir de esta información se calculó la cantidad de MFV (N_{mod}) necesarios, considerando un factor de seguridad ($F_s = 1.25$).

$$N_{mod} = F_s \frac{E_{p,diario}}{H_{sp} P_{mod}} \quad (11)$$

La cantidad de reguladores (N_r) para el subsistema de regulación se determinó de la relación de la intensidad de corriente de generación-acumulación ($I_{reg, gen-acu}$) y la intensidad de corriente de un regulador específico ($I_{max, reg}$)

$$N_r = \frac{I_{reg, gen-acu}}{I_{max, reg}} \quad (12)$$

La metodología de cálculos, catálogos de los equipos de invernaderos y componentes fotovoltaicos, se analizaron en el software "Selección de sistema fotovoltaico para invernadero" disponible de uso libre en de la red y se encuentra registrado ante el Instituto Nacional de Derecho de Autor.

5. Energía solar térmica como alternativa para el sistema de calefacción

Se realizó el cálculo del sistema de calefacción para el invernadero mediante el uso de colectores solares. La Figura 4 muestra el diseño de la instalación del sistema.

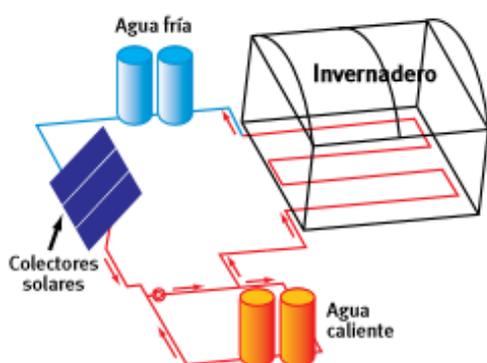


Figura 4 Sistema de colectores solares
Fuente: Bargach et al., 2004

Se consideró agua de la red hidráulica como el fluido de trabajo para el balance energético en el sistema térmico solar. La captación solar se realiza con paneles solares. Dentro de estos paneles circula el agua que se calienta gracias a la incidencia de los rayos del sol. El calor así obtenido se transmite al agua de consumo a través de un intercambiador y normalmente queda acumulado en un depósito para su uso posterior.

Para la determinación de la radiación real recibida, I , se empleó la ecuación 13 (Martínez, 2016).

$$I = \frac{I_n K}{N} \quad (13)$$

El rendimiento del colector solar se determinó mediante el gráfico de la Figura 5, proporcionado por un proveedor de colectores solares, y habiendo calculado previamente el diferencial de temperaturas de la ecuación 14 (Martínez, 2016).

$$\Delta T = \frac{I_0}{I} (T_m - T_A) \quad (14)$$

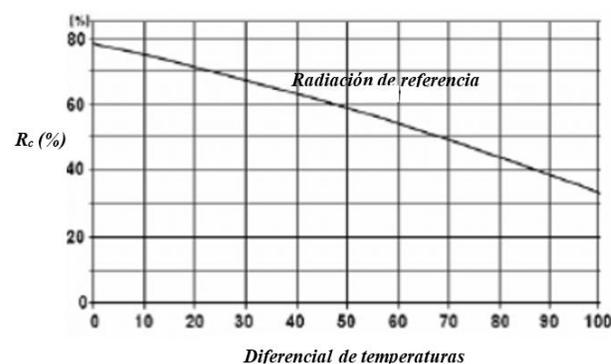


Figura 5 Rendimiento del colector
Fuente: RENOVA Energía

El área del colector solar, se determinó mediante la ecuación 15 (Martínez, 2016).

$$A = \frac{C(T_a - T_e)}{I_n \cdot K \cdot R_c} \quad (15)$$

La cantidad de colectores necesarios para cubrir las necesidades energéticas del invernadero se obtuvo a partir de la ecuación 15 (Arroyo, 2016):

$$N_{col} = \frac{A}{A_{colector}} \quad (16)$$

Análisis y Discusión de Resultados

1. Monitoreo de variables establecidas

De acuerdo con las mediciones de temperatura, humedad relativa y radiación global diaria reportadas por SAGARPA e INIFAP, se consideraron los datos registrados en los meses con temperaturas más críticas durante el año (diciembre, enero, febrero y mayo) para generar el modelo matemático de temperatura dentro del invernadero, así como la determinación de energía total necesaria tanto para calefacción como para ventilación del espacio protegido.

2. Modelo de temperatura dentro del invernadero

En diciembre, enero y febrero se registraron temperaturas ambientales por debajo de los cero grados Celsius.

Por otra parte, el comportamiento de la temperatura dentro del invernadero se determinó a partir de la resolución de la ecuación 6 mediante el software Wolfram Mathematica 11[®], de donde se obtuvieron los gráficos 1 a 8.

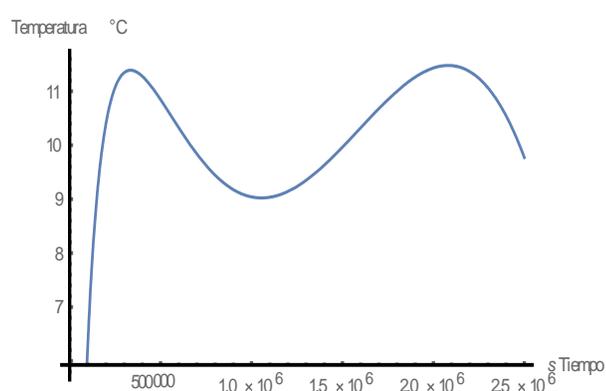


Gráfico 1 Temperatura interior en diciembre
Fuente: Wolfram Mathematica 11

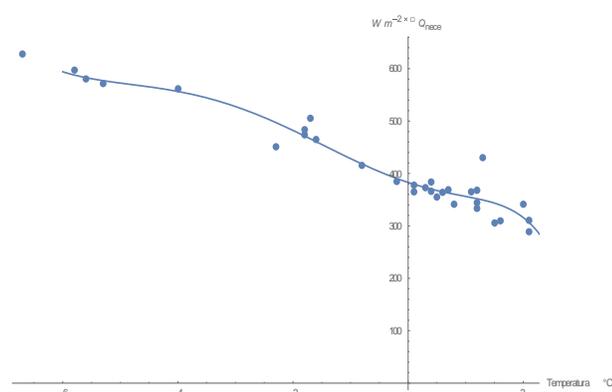


Gráfico 2 Flujo de calor en diciembre
Fuente: Wolfram Mathematica 11

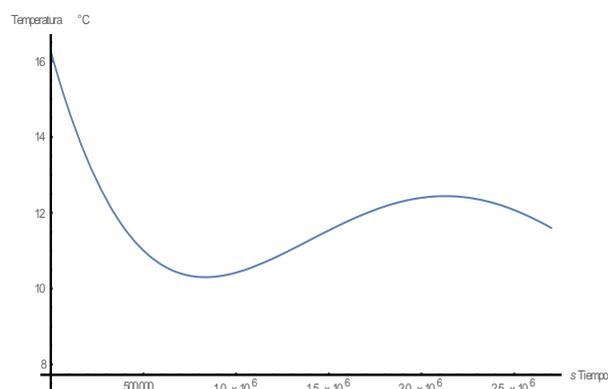


Gráfico 3 Temperatura interior en enero
Fuente: Wolfram Mathematica 11

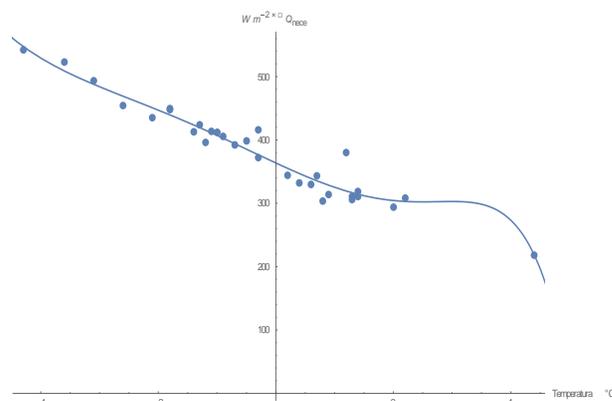


Gráfico 4 Flujo de calor en enero
Fuente: Wolfram Mathematica 11

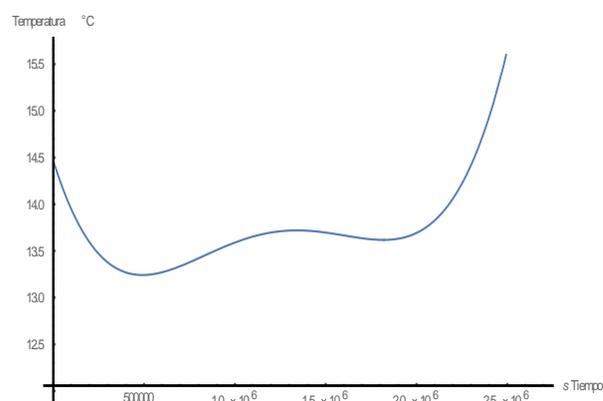


Gráfico 5 Temperatura interior en febrero
Fuente: Wolfram Mathematica 11

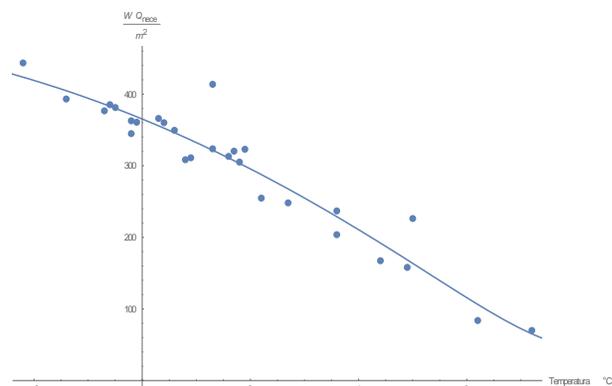


Gráfico 6 Flujo de calor en febrero
Fuente: Wolfram Mathematica 11

Los Gráficos 1, 3 y 5 corresponden al comportamiento de la temperatura esperado dentro del invernadero de en los meses de diciembre, enero y febrero.

Los registros más altos de temperatura ocurren, en promedio, a menos de 15 °C, lo que representa amenaza para cierto tipo de cultivos debido a la generación de bacterias que se ven favorecidas en su crecimiento por las bajas temperaturas, o bien, puede ocurrir afectación en el desarrollo de las plantas por la ausencia de condiciones óptimas de temperatura para su crecimiento.

De esta manera, se vuelve indispensable el suministro de energía calorífica para mantener la temperatura correcta dentro del invernadero.

Las Figuras 2, 4 y 6 muestran el flujo de calor en W/m^2 que requiere adicionarse al sistema de acuerdo con la temperatura exterior y con la temperatura interior deseada. Puede observarse que el flujo de calor es proporcional a la temperatura exterior, representada en el eje horizontal de cada gráfico; es decir, mientras más baja sea la temperatura ambiental, mayor será el requerimiento energético.

Fitz-Rodriguez et al (2009) determinaron temperaturas internas del invernadero durante 28 horas consecutivas para determinar la tasa de ventilación apropiada para el invernadero, sin embargo, en el presente trabajo se analizaron las temperaturas de todos los días del año para identificar los meses más críticos para los invernaderos y se determinaron las cantidades de energía requeridas para lograr la temperatura apropiada para los cultivos.

En el mes de mayo, por otra parte, se registraron las temperaturas más altas del año 2017. La solución de la ecuación diferencial para el comportamiento de la temperatura en mayo dentro del invernadero se puede observar en el gráfico 7.

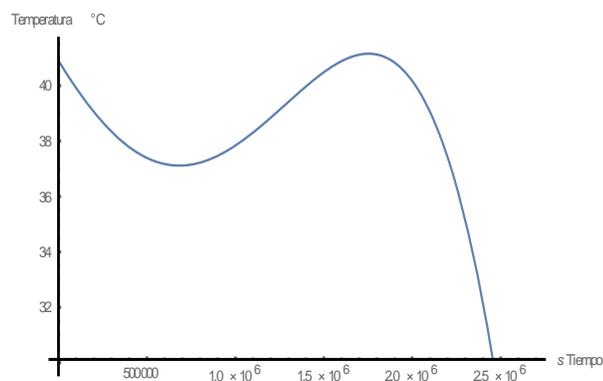


Gráfico 7 Temperatura interior en mayo
Fuente: Wolfram Mathematica 11

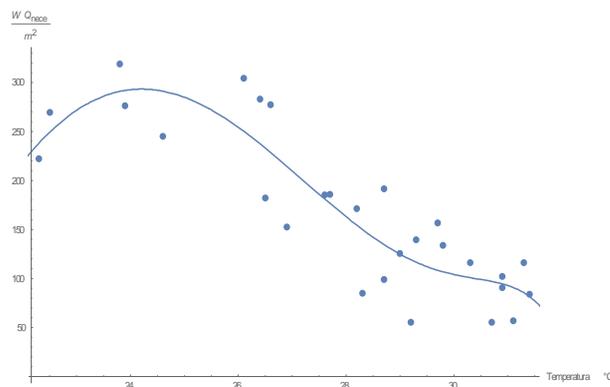


Gráfico 8 Flujo de calor en mayo
Fuente: Wolfram Mathematica 11

Joudi et al (2014) realizaron un estudio sobre ventilación de invernaderos, sin embargo, en el balance de energía el calor transferido desde la superficie del suelo fue despreciable, por lo que el balance de energía no resulta adecuado para aplicarse en el invernadero razón de estudio del presente trabajo. Por otra parte, en el invernadero del Tecnológico de Pachuca se requiere calefacción además de la ventilación, es por ello que se determinaron las necesidades energéticas no sólo para días de temperaturas elevadas, sino también de temperaturas bajas.

3. Evaluación de la energía solar fotovoltaica para el sistema de calefacción

Se realizó un estudio en el software proporcionado al público en general por la Universidad Autónoma de Chapingo, con base en las necesidades del sistema, siendo el resultado del análisis el mostrado en la Figura 7, donde se desglosan los modelos, los costos y la cantidad de módulos fotovoltaicos, baterías, controladores e inversores necesarios, así como el costo de los accesorios y de la instalación. Finalmente, se presenta el precio total estimado del sistema fotovoltaico.

4. Evaluación de la energía solar térmica para el sistema de calefacción

Se determinó el área del colector solar, resultando en 4.2 m^2 . Del catálogo de proveedores de calentadores solares (SAECSA), se seleccionó un colector plano con área útil de 2.6 m^2 , por lo tanto, se requieren 2 colectores para satisfacer las necesidades energéticas en el invernadero.

Selección de Sistema Fotovoltaico para Invernadero	
Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua Universidad Autónoma Chapingo	
Inventario de aplicaciones	Datos generales
<p>General Resumen </p> <p>REPORTE GENERAL</p>	
<p>Componentes del Sistema Fotovoltaico</p> <p>Resultado del análisis para Empresa: INSTITUTO Dirección: BOULEVARD FELIPE ANGELES Para la ciudad de: Pachuca</p>	
Módulos Fotovoltaicos	<p>Marca: Techno Sun Modelo: SYP605-M Horas solar pico (HSP): 4.20 Voltaje nominal: 6 V Módulos FV en Serie: 1 Módulos FV en Paralelo: 5 Total de Módulos FV: 5 Potencia total instalada 300 W Precio unitario: 1,909.95 MXN Precio total (estimado) del arreglo 9,549.75 MXN</p>
Batería	<p>Días de autonomía: 3 Voltaje Nominal: 6V Capacidad requerida: 937.50A-h Tipo de batería: Descarga Profunda Marca: Hawker Modelo: T-105 Capacidad de régimen: 225 Voltaje por unidad: 6 Baterías en Serie: 1 Baterías en Paralelo: 4 Total de baterías: 4 Precio unitario: 1,625.00 MXN Precio total estimado: 6,500.00 MXN</p>
Controlador (es)	<p>Corriente de Corto Circuito: 24.13 A Voltaje nominal del sistema: 6 V Marca: samlexsolar Modelo: Solarix PRS 2020 Corriente nominal: 20 A Total de controladores: 1 Precio unitario: 1,960.00 MXN Precio total estimado: 1,960.00 MXN</p>
Inversor (es)	<p>Tipo de onda: Senoidal Modificada Potencia Nominal: 75 W Total de inversores: 3 Precio unitario: 540.60 MXN Precio total estimado: 1,622.00 MXN</p>
Instalación y Accesorios	4,908 MXN
Precio estimado del sistema 24,540 MXN	

Figura 7 Resumen de equipos y costos del sistema fotovoltaico

El costo de cada colector es de \$13,080 y la instalación tiene un precio de \$1,900. Se estimó un costo total aproximado del sistema térmico solar de \$30,000. En la figura 8 se muestran las especificaciones del colector solar



Figura 8 Características del colector solar
Fuente: SAECSA

Conclusiones y Recomendaciones.

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la determinación de temperaturas y humedades dentro del invernadero por medio del software Wolfram Mathematica 11, fue posible identificar las épocas del año en las que se requiere adicionar o extraer energía calorífica del espacio protegido para mantener las condiciones bioclimáticas adecuadas para la correcta reproducción de los cultivos. La energía solar fotovoltaica puede ser utilizada como fuente alternativa de energía en el invernadero.

Según los resultados generados en el software de la Universidad Autónoma de Chapingo, se calcularon los equipos a utilizar y los costos son relativamente asequibles en comparación con los costos de un sistema de colectores solares, resultando \$6,000 más costoso un sistema térmico solar, además, con la instalación de un sistema solar fotovoltaico, puede ser aprovechada la energía eléctrica para la iluminación y el sistema de riego dentro del invernadero.

Una vez realizado el cultivo dentro del invernadero y para futuras experimentación, será necesario considerar la transpiración de las plantas en el balance térmico para obtener una mayor precisión en el cálculo de los requerimientos energéticos.

Referencias

CNPO Presentación, recuperado el <http://www.cnpo.org.mx/presentacion.html>

Cuce, E., Young, CH., Riffat, SB. (2015). Thermal insulation, power generation, lighting and energy saving performance of heat insulation solar glass as a curtain wall application in Taiwan: a comparative experimental study. Elsevier.

Cuce, E, Cuce, PM. (2013). A comprehensive review on solar cookers. Elsevier

Cuce E, Cuce, PM, Bali, T. (2013). An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaics cell parameters. Elsevier.

Cuce, E., Harjunowibowo, D., Cuce, P. (2015). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. Elsevier. 34-59.

Hassanien, R., Hassanien, E., Li, M., Dong, W. (2015). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. Elsevier. 989-1001.

Krishnamurthy, S. (2015). Aplicaciones de sistemas Fotovoltaica. P-13.

Licon, L., Copado, E., (2016). Construcción de Invernadero Sustentable. Instituto Tecnológico de Pachuca.

Martínez, V., Giménez, B., Castilla, N., Pastor, R. (2016). Contribución solar para agua caliente sanitaria: dimensionado de colectores solares. Departamento de Contrucciones Arquitectónicas, España.

PROFECO <https://www.gob.mx/profeco/articulos/alimentos-organicos-144992?idiom=es>

PROFECO <https://www.gob.mx/profeco/documentos/alimentos-organicos?state=published>

PROFECO <https://www.gob.mx/profeco/documentos/alimentos-organicos?state=published>

Sethi, VP., Sharma, SK. (2008). Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. Elsevier. 82(9).

Sethi, VP., Sharma, SK. (2007). Greenhouse heating and cooling using aquifer water. 32(8).

Sotitios, A., Sotirios, A., Colantoni, A., Pascuzzi, S. (2016). Thermal energy assessment of a small scale photovoltaic, hydrogen and geothermal stand-alone system for greenhouse heating. Elsevier. 115-127.

Sethi, V., Sumathy, K., Lee, C., Pal, D. (2013). Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies. Elsevier. 56-82.

Trypanagnostopoulos, G., Kavga, A., Souliotis, M., Trypanagnostopoulos, Y. (2017). Greenhouse performance results for roof installed photovoltaics. Elsevier. 724-731.

Wael, M., Maghlany, E., Mohamed, A., Tanaka, H. (2015). Optimum design and orientation of the greenhouses for maximum capture of solar energy in North Tropical Region. Elsevier. 1096-1104.

Xu, J., Li, Y., Wang, R., Liu, W. (2013). Performance investigation of a solar heating system with underground seasonal energy storage for greenhouse application. Elsevier. 61-73.

Análisis del uso de biomasa en sistema alternativo de microgeneración

Analysis of biomass used as fuel in an alternative system for micro-generation

BEDOLLA-HERNANDEZ, Jorge†*, BEDOLLA-HERNANDEZ, Marcos, FLORES-LARA, Vicente y MORA-SANTOS, Carlos

Tecnológico Nacional de México/I.T. Apizaco

ID 1^{er} Autor: *Jorge, Bedolla-Hernandez* / ORC ID: 0000-0003-3856-6061, CVU CONACYT ID: 83901, SNI: 36612

ID 1^{er} Coautor: *Marcos, Bedolla-Hernandez* / ORC ID: 0000-0001-9668-2779, CVU CONACYT ID: 92081

ID 2^{do} Coautor: *Vicente, Flores-Lara* / ORC ID: 0000-0001-5029-9707, CVU CONACYT ID: 121181

ID 3^{er} Coautor: *Carlos, Mora-Santos* / ORC ID: 0000-0002-6050-6578, CVU CONACYT: 49134

Recibido: Septiembre 03, 2018; Aceptado Noviembre 28, 2018

Resumen

En el trabajo se presenta un sistema enfocado en la microgeneración de energía eléctrica, donde se incluye un subsistema de generación de vapor de 15 L de volumen y una microturbina de adhesión de 1 kW de diseño de potencia mecánica en su flecha. El subsistema de vapor se diseñó para operar con gas LP, el cual puede reemplazarse por biomasa sólida en forma de madera, con ligeros cambios en la zona de combustión. La característica de la microturbina de adhesión es que puede operar de forma intermitente sin que la calidad del vapor o el flujo másico constante representen un inconveniente. En función de esas características, el estudio se enfoca en analizar un esquema equivalente para microgeneración con combustión de biomasa. Para el desarrollo de las pruebas se considera la combustión con gas, con el objeto de obtener calor de forma razonablemente controlada, posteriormente se sustituye el combustible por biomasa sólida y se comparan los esquemas. La comparación del sistema se basa en la temperatura y presión del recipiente; así como en la velocidad de la flecha de la microturbina como función del tiempo. Los resultados muestran que es factible el uso de biomasa para la sustitución de combustible no renovable en el sistema de microgeneración.

Biomasa, Microgeneración, Microturbina

Abstract

In this study a system for micro-generation is presented. The system is constituted by a couple of secondary systems, including a boiler and a non-conventional micro-turbine. The boiler has a capacity of 15 L and the turbine was designed for 1 kW of shaft power. The boiler was designed to use as combustible either LP gas or solid biomass, it making just minor changes in the combustion zone. The type of micro-turbine was considered taking account that system could operate without constant fluid flow, with intermittent velocity and inclusive with biphasic flow. The, the study was focused in analysing an equivalent system for micro-generation with solid biomass. For combustion process was considered the schemes with LP gas and biomass, and then the results in each case were compared. In the comparison, the parameters of temperatures and pressure in the boiler were analyzed, as well as, the velocity in the turbine shaft as a time function is monitored. The results show the feasibility to use solid biomass in the alternative system analyzed for microgeneration.

Biomass, Microgeneration, Microturbine

Citación: BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Jorge, BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Marcos, FLORES-LARA, Vicente y MORA-SANTOS, Carlos. Análisis del uso de biomasa en sistema alternativo de microgeneración. *Revista de Ingeniería Tecnológica*. 2018. 2-8: 11-22.

*Correspondencia al Autor (ljbédolla@cenidet.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Los métodos de generación de energía eléctrica tradicionales tienen que evolucionar, ya que por un lado estos requieren de instalaciones con infraestructura de gran tamaño y por otro lado requieren de una gran cantidad de recursos y combustibles para su operación. Si bien la capacidad de generación es considerable en sistemas de gran tamaño, es necesario considerar que todos los recursos para su operación están en la misma proporción. Por lo que los sistemas que contribuyan en la evolución y diversificación de procesos y sistemas de fuentes de generación de energía tienen que estar pensados para reducir implicaciones desfavorables de tamaño, costo y recursos. Esto claro sin perder de vista las implicaciones ambientales y del ecosistema que se puedan producir. Ya que desde un punto de vista ético, solo la biomasa que no forma parte de las cadenas alimenticias deberá usarse para la producción de combustibles, químicos, potencia o calor (Gavrilescu, 2008).

Sin embargo, la creciente necesidad en el desarrollo de sistemas de generación alternativos obedece al constante incremento en la demanda de este recurso, pero enfocados en la tendencia hacia sistemas de generación de energía amigables con el ambiente.

Otro componente en la diversificación en la generación de energía es la Generación Distribuida (GD), la cual se considera como un método alternativo de generación de energía eléctrica que se realiza mediante muchas fuentes pequeñas de energía en lugares próximos a las cargas, evitando de esa manera la transportación y distribución (Grant et al., 2014). Además, la GD permite la opción de trabajar interconectado o aislado de la red de energía eléctrica (Ackermann et al., 2004). En ese sentido la GD presenta como beneficio reducir las dimensiones de los sistemas de generación, lo cual, va de la mano con la reducción de recursos para su operación. Adicionalmente, la GD tiene beneficios al fomentar el desarrollo rural mediante la producción de electricidad en lugares donde no es accesible la red eléctrica comercial (Buragohain, 2010); así como también de representar oportunidades de ingresos adicionales a través de la revaloración de fuentes locales (Ripa et al., 2017).

Por sus características la GD se define como cualquier tecnología de generación eléctrica a pequeña escala que proporciona electricidad en puntos cercanos al consumidor (Alanne & Saari, 2006; Theo et al., 2017). Al respecto, la capacidad de generación eléctrica clasifica a los sistemas de la siguiente forma (Grisales et al., 2017): micro (generadores de 1 W a 5 kW), pequeña (generadores de 5 kW a 5 MW), mediana (generadores de 5 MW a 50 MW) y grande (generadores de 50 MW a 300 MW).

Independientemente del volumen de generación, el impacto que se ocasiona al medio ambiente es un factor importante a considerar en la búsqueda de sistemas alternativos de generación, los cuales es deseable que sean accesibles, funcionales y de bajo costo; todo esto para ser consistentes con las características de la GD.

Las alternativas que se planteen en ese sentido tienen que corresponder a sistemas con reducidas emisiones de efecto invernadero y que preferentemente funcionen por medio de energía renovables.

Sin embargo, desafortunadamente las fuentes de energía renovable presentan algunos inconvenientes importantes a considerar (Erdinc & Uzunoglu, 2012): de las tres fuentes más ampliamente explotadas de energías renovables, que son la hidrodinámica, la eólica y la fotovoltaica, dos de ellas (la fotovoltaica y la eólica) presentan la limitante de ser altamente dependientes de las condiciones climáticas. Por lo que no puede asegurarse su disponibilidad sobre demanda y solo pueden obtenerse cuando la fuente natural así lo permite.

Para disminuir la dependencia climática de combustibles alternativos para GD, una opción en el rango de microgeneración lo constituye la biomasa, la cual es posible obtener en prácticamente cualquier lugar de forma abundante (Asadullah, 2014). Aunque por otro lado, parte de los problemas que limitan el uso de la biomasa como combustible tienen que ver con su transportación, almacenamiento y tratamiento previo al proceso. Aun así, entre todas las fuentes renovables de energía, la biomasa es una de las opciones más interesantes (González et al., 2015).

Donde en el caso de la biomasa sólida recuperada de recurso forestal, ésta no requiere de cuidados especiales en transportación, su almacenamiento es simple y puede mantenerse en ese estado por periodos prolongados, y claro está su uso no se limita por condiciones climáticas.

La biomasa sólida es la única fuente de energía renovable como tal probada desde épocas ancestrales, por lo tanto su tecnología de aplicación es desconocida. En función del rango de temperaturas que alcanzan esta fuente puede aplicarse directamente en la generación de vapor y en consecuencia en generar electricidad y calor (Balta et al., 2009).

Entre las fuentes renovables de energía, la biomasa sólida de recurso forestal es una alternativa con gran potencial para la generación de electricidad, por ser una fuente local abundante en muchos países, y su aplicación se basa en tecnologías probadas (Singh, 2017).

La conversión termoquímica de biomasa sólida como recurso forestal en otra forma de energía para producir electricidad puede realizarse básicamente en dos formas: a través de la combustión directa o a través de la gasificación. La combustión directa convierte la energía química almacenada en la madera en energía térmica que se usa en máquinas o turbinas de vapor, o variaciones de éstas con el ciclo Rankine orgánico (Silva y Nakata 2012).

Para los sistemas de generación, la combustión con biomasa sólida toma lugar en un generador de vapor, y es conveniente para las turbinas de vapor, ya que para generar el fluido esos sistemas aceptan diversos tipos de combustible, y en consecuencia la biomasa puede usarse directamente a tales procesos (Wahlund et al., 2000).

Por su parte las micro-turbinas son una versión reducida de turbinas convencionales, pero con características que las hacen adecuadas para procesos de generación a pequeña escala. La simplicidad de las micro-turbinas hacen que sus requerimientos de mantenimiento sean mucho menores en comparación con los equipos convencionales (Monteiro et al., 2009).

En función de lo anterior en el presente estudio se analiza un sistema alternativo de generación eléctrica, consistente con las características deseables de un sistema de GD, en el cual se considera que la generación de vapor se realiza a partir del uso de biomasa sólida. Como ha mencionado, la biomasa sólida es la fuente de energía renovable que más interés ha encontrado en la producción y generación a escala reducida y no presenta limitantes climáticas para su aplicación. Este tipo de biomasa involucra recurso forestal de desecho, así como residuos de procesos de agricultura, basura de madera industrial y comercial, basura de árboles urbanos, y la principal fuente de madera puede encontrarse en los residuos forestales que se convierten en basura en caso de no encontrarles otra aplicación (Cimdina et al., 2014).

El sistema de generación de vapor considerado en este estudio recibe la flama directa de la combustión de la biomasa sólida, por lo cual las características del vapor están en el rango de temperaturas bajas. Esto motiva que la selección de la micro-turbina de vapor a usar en el sistema alternativo de generación se ajuste a un fluido de trabajo que puede ser variable, en función del propio proceso de combustión.

Los componentes principales considerados para el sistema alternativo de microgeneración corresponden a un recipiente cilíndrico que recibe la flama directa de la combustión y contiene al vapor generado, y a una microturbina que funciona bajo el principio de adhesión. La característica de adhesión de la turbina hace que ésta pueda operar con fluido tanto líquido como gaseoso, bifásico e incluso con partículas suspendidas. Por lo tanto, la calidad y cantidad de vapor no es limitante para su operación. Esa condición de la microturbina la hace la selección viable para operar con sistemas de generación de vapor a partir de biomasa sólida.

En las siguientes secciones se presenta el sistema de microgeneración propuesto para operar con biomasa sólida. Posteriormente se describen los subsistemas que lo componen y se muestran los correspondientes resultados, para aplicación tanto de una fuente continua de combustible de gas licuado de petróleo (GLP); así como, con la combustión de biomasa sólida.

Se presentan las conclusiones del trabajo en las que se subraya la viabilidad de la biomasa sólida para la generación a escala reducida.

Sistema de microgeneración

El sistema en estudio para análisis del uso de biomasa como alternativa de combustible para microgeneración, se basa en los componentes de un sistema de generación con turbina de vapor.

La Figura 1 muestra el esquema de generación, en la que se incluyen el sistema de generación de vapor (boiler) y la micro-turbina de adhesión. Las características del sistema corresponden a los esquemas de GD, de forma tal que la potencia considerada está en el orden de cientos de Watts. El subsistema de generación de vapor incluye al hogar de combustión donde se quema el combustible, tanto con biomasa sólida como con una fuente constante de alimentación de GLP.

La Figura 2 muestra el sistema experimental correspondiente al esquema de la Figura 1. La región a) es donde se realiza la combustión de la biomasa sólida con la flama en contacto directo con el recipiente cilíndrico b) que contiene al líquido y al vapor, en su caso. El elemento c) es la línea de vapor y el d) se refiere a la turbina no convencional.

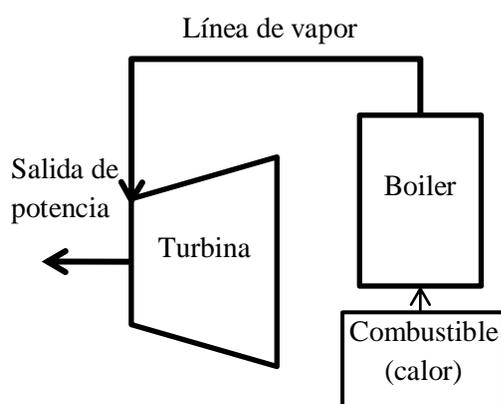


Figura 1 Esquema del sistema de microgeneración



Figura 2 Componentes del sistema de microgeneración, donde: a) hogar de combustión, b) recipiente cilíndrico a presión instrumentado, c) línea de vapor con medidor de flujo y d) micro turbina de adhesión.

Micro-turbina de adhesión

Este sistema no convencional se caracteriza porque su rotor está formado de discos planos co-rotantes en lugar de álabes convencionales de geometría compleja. El fluido de trabajo se inyecta tangencialmente a los discos en su diámetro externo a través de una tobera y pasa por los espacios entre los discos planos paralelos. Las partículas de fluido al interior de la turbina describen una línea espiral en la superficie plana del disco desde el diámetro externo hacia el interno (Bedolla et al., 2012).

La fuerza viscosa de arrastre que se produce por la adhesión del fluido a la superficie plana de los discos resulta en el movimiento del rotor. La energía cinética del fluido y la adhesión de éste con los discos transfiere la energía cinética al compacto del rotor, obteniendo en la flecha de salida de la turbina potencia mecánica y par de torsión, que son función del flujo del fluido (Sengupta, 2012).

El desempeño y eficiencia de esta turbina es dependiente de la combinación de diverso parámetros.

La siguiente es una lista de parámetros que han sido identificados e investigados para lograr un mejor diseño de esta turbina no convencional (Gupta and Kodali, 2013): número de discos, radio interno y externo, espesor de los discos, número y forma de las toberas, flujo compresible o no incompresible, número de Reynolds, ángulo de entrada del flujo, geometría de los separadores, velocidad del flujo, número de entradas, velocidad del rotor, ubicación del desfogue, tipo de aplicación, estator, rodamientos y sellos, relación de radios, viscosidad cinemática y dinámica, presión estática y estancamiento, velocidad angular y razón total del flujo.

La micro-turbina de adhesión es de geometría simple, por lo que su manufactura es relativamente fácil. Este sistema tiene ventajas por ejemplo en cuanto a su reducido, mantenimiento y su alta potencia para la relación de peso y costo. Puede operar a partir de diversos tipos de fluidos y mezclas, incluso flujos con partículas suspendidas. Posee capacidad de auto-limpieza natural por el campo de fuerza centrífuga con que opera, y el sentido de giro solo se limita por la acción/dirección el flujo de trabajo, pudiendo invertir sentido de giro sin modificaciones adicionales que el sentido de las toberas. El intervalo de velocidad del fluido de trabajo comprende un rango muy amplio, y el cambio de velocidad del flujo o el cambio de flujo másico (mientras permita el accionamiento) no interrumpe el funcionamiento del sistema (Bedolla et al., 2016).

La micro-turbina de adhesión en el presente estudio se muestra en la Figura 3. Para el diseño de la micro-turbina de adhesión, se toma como referencia el modelo presentado en la Figura 4 (Guha and Sengupta, 2013), donde se presenta un par de discos separados axialmente por una distancia b .



Figura 3 Micro-turbina de adhesión

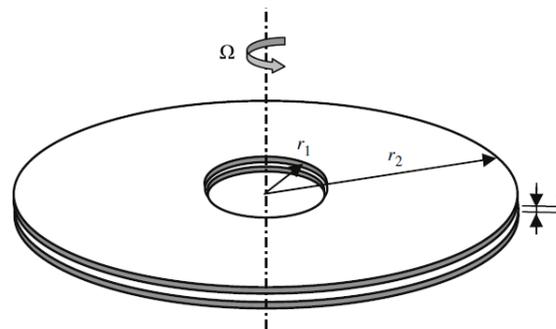


Figura 4 Esquema del modelo de la turbina

De acuerdo a la figura 4, la entrada del fluido al rotor de la turbina se realiza de forma tangencial al radio externo r_2 , y el desfogue del fluido se realiza por el centro de los discos en el radio r_1 . Por simplificación del cálculo el fluido entre los discos se asume estable, laminar y axisimétrico. Boyd and Rice (1968) mostraron que la razón de la componente axial de velocidad a la componente tangencial y radial es cercana al orden de b/r_2 . De donde se ha establecido que para una turbina de adhesión la razón antes indicada es muy pequeña. Por lo tanto la componente axial de velocidad es pequeña en comparación con los otros componentes de velocidad. Las ecuaciones de continuidad y de momento y las condiciones de frontera pueden representarse en términos de velocidades relativas, lo cual permite simplificar las ecuaciones de conservación. A partir de lo anterior, y para una distribución de velocidad tangencial conocida el torque total y la potencia de salida de la flecha de turbina pueden calcularse al considerar que el esfuerzo cortante sobre la pared de un lado de uno de los discos (τ_w) está dado por la ecuación (1).

$$\tau_w(r) = \left[\mu \frac{\partial v_\theta(r,z)}{\partial z} \right]_{en\ z=0} = \frac{6\mu\Omega r_2 \zeta_m}{b} \quad (1)$$

Donde r , θ y z son las coordenadas cilíndricas, μ es la viscosidad del fluido, V es la velocidad relativa del fluido, Ω es la velocidad de rotación del disco y ζ_m es la velocidad tangencial promedio adimensional.

Si se considera un elemento delgado circular de espesor dr a un radio r , el torque alrededor del eje del rotor correspondiente a un lado de un disco (T_{dl}), a causa de la fuerza cortante actuando sobre un elemento diferencial de área y al integrar a lo largo de todo el radio, se obtiene por la ecuación (2).

$$T_{d1} = \int_{r_1}^{r_2} \tau_w (2\pi r) r dr \quad (2)$$

Entonces el torque total (T) producido por el rotor completo consistente de n discos se calcula por la ecuación (3).

$$T = 2(n - 1)T_{d1} \quad (3)$$

La potencia teórica ideal (P_T) de salida de la flecha de la turbina se obtiene con la ec. (4).

$$P_T = T \Omega \quad (4)$$

A partir de lo anterior y bajo la consideración de usar vapor de agua como fluido de trabajo, la potencia mecánica teórica de diseño en la flecha de la microturbina para este subsistema se estima en 1 kW. Donde, la temperatura considerada a la entrada de la turbina es la de saturación del agua a 133.5 °C y con una presión promedio de 300 kPa. Para lograr los requerimientos de diseño se requiere de 22 discos planos con diámetro exterior de 213 mm.

La carcasa de la microturbina se diseña para 213.54 mm en su diámetro interior. Si bien el espesor de los discos debe tender a cero en condiciones ideales, para el sistema en estudio se considera un espesor de pared de 0.89 mm (corresponde a una lámina comercial calibre 20), con lo cual se obtiene la rigidez necesaria de los discos para la operación de la turbina hasta una velocidad angular de 12000 rpm.

Por las características del fluido de trabajo, la separación de los discos debe establecerse en 0.33 mm (calibre 29 de una lámina comercial), que es al menos el doble de la capa límite del fluido para las condiciones antes descritas. Esta separación de discos se supone le permite circular al fluido sin estancamiento y transferir su energía cinética al rotor.

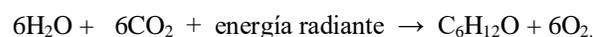
El vapor para el accionamiento de la turbina se obtiene del generador de vapor, cuya descripción se amplía en la siguiente sección. Como se ha planteado la calidad del fluido de trabajo no es limitante para el funcionamiento de la microturbina analizada, ya que ésta puede operar incluso con fluido líquido o con fluido bifásico, en el caso de contar con vapor húmedo en el generador.

Subsistema de microgeneración de vapor

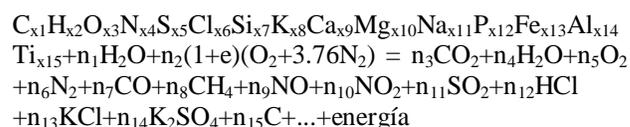
De forma común el proceso para generar vapor se realiza en una caldera, la cual en su forma básica se define como un recipiente metálico cerrado destinado a la producción de vapor o bien a calentar agua mediante la acción de calor a una temperatura y presión superior a la ambiente. Como resultado de la transferencia de calor producida por la quema de un combustible (para este estudio biomasa sólida), se entrega la energía térmica al agua a través de las paredes del contenedor.

Para su aplicación en la generación de vapor, se entiende como biomasa al término usado para referirse a la materia de las plantas, la cual se genera por la fotosíntesis, donde la energía del sol se convierte en agua y CO₂ dentro de la materia orgánica (Demirbas, 2001). Como parte del proceso de fotosíntesis las plantas convierten la energía radiante del sol en energía química en forma de glucosa, lo cual se representa de la siguiente manera (Saidur et al., 2011):

agua + dióxido de carbono + luz solar → glucosa + oxígeno



La predicción de la combustión para propósitos de diseño y control requiere del conocimiento de las propiedades del combustible y de la forma en la cual esas propiedades influyen en el proceso de combustión. Una reacción global para la combustión de combustible de biomasa en aire podría tomar la siguiente forma (Jenkins et al., 1998):



Donde el primero compuesto es el combustible de biomasa, el segundo término expresa la humedad en el combustible, en presencia de mucha humedad el combustible no reaccionará espontáneamente. El tercer término representa el aire, considerado para el caso como una simple mezcla binaria de oxígeno y nitrógeno en una relación de volumen de 21-79%. Se aprecia que el producto de la reacción es complejo, por lo que se indican solo los principales productos que parecen durante la combustión (Demirbas, 2005).

La combustión de la biomasa es una serie de reacciones químicas en la cual principalmente se oxida el carbón para producir dióxido de carbono y el hidrógeno es oxidado para obtener agua. Sin embargo, se presentan muchos otros elementos en el proceso de combustión de biomasa (Saidur et al., 2011). En general las propiedades de combustión de la biomasa se pueden clasificar en macroscópicas y microscópicas. Las propiedades macroscópicas del combustible de biomasa están relacionadas con análisis macroscópicos, como el valor de calentamiento, contenido de humedad, el tamaño de partícula, densidad del compuesto y la temperatura de fusión de las cenizas. Un análisis microscópico incluye el calentamiento, la cinética química y los datos del mineral (Demirbas, 2004). Una característica de la biomasa es que la combustión puede realizarse en forma directa, quemándola sin la intervención previa de algún proceso químico. La combustión de la biomasa sólida permite obtener gases de combustión con temperaturas para producir vapor y generar electricidad a partir de éste. En ese mismo sentido la combustión de la biomasa puede aplicarse para producir calor en hogares e industrias.

Existen diversas tecnologías para la combustión de la biomasa, dentro de las cuales la combustión en cama fluidizada es la mejor tecnología para quemar combustible de baja calidad, alto contenido de ceniza y bajo valor calorífico. Este proceso puede realizarse con aire a presión atmosférica, el cual actúa como aire de fluidización y aire de combustión. Sin embargo, se considera que la combustión de la biomasa es un proceso complejo, y una descripción detallada de la misma está fuera del enfoque del presente trabajo. Pero de forma simplificada el proceso de combustión de biomasa puede considerarse como: inicia con el calentamiento de la madera, en ese momento sus componentes empiezan a hidrolizarse, oxidarse, deshidratarse e incrementar su temperatura formando volátiles del combustible, sustancias alquitranadas, y carbonácea altamente reactiva. En la temperatura de ignición de las sustancias volátiles y alquitranadas se produce el inicio de la combustión con reacciones exotérmicas. Durante el proceso de combustión, se produce suficiente calor para propagar el proceso de carbonización y la liberación de productos de descomposición de madera volátiles.

Con las simplificaciones indicadas del proceso de combustión con biomasa, se establece el flujo de combustible de biomasa (B) en función de la potencia térmica (P_t), del valor calorífico bajo del combustible (Q), y de su eficiencia (η) (Lazaroiu, 2008), como la ecuación (5).

$$B \left[\frac{kg}{s} \right] = \frac{P_t}{Q_i^i \eta} \quad (5)$$

A partir de la ec. (5) se calcula la carga total del volumen del hogar de combustión (q_v) del sistema en función del volumen del hogar de combustión (V_f) de acuerdo con la ecuación (6).

$$q_v \left[\frac{kW}{m^3} \right] = \frac{B Q_i^i}{V_f} \quad (6)$$

A partir de las ecuaciones y simplificaciones se considera que el subsistema de microgeneración de vapor para el caso de estudio, que se diseñó para operar tanto con un quemador de gas licuado de petróleo (GLP) y con biomasa sólida, responde a las consideraciones de flujo de combustible de la ec (5). Para el estudio en particular se quemó biomasa sólida en forma de madera.

Ese sistema así obtenido se presenta en la Figura 1b), y a su vez se compone principalmente del recipiente cilíndrico que confina el líquido - evaporar (Figura 1b), el cual tiene una capacidad para 15 L.

El sistema el combustible para generar los gases de combustión que producen el calor que se transfiere al recipiente cilíndrico, con lo que se incrementa la temperatura del fluido (Figura 1a).

El subsistema para la generación de vapor se presenta en la Figura 5, y en la Figura 6 se presentan los elementos de monitoreo y seguridad con que se instrumenta el recipiente cilíndrico. En la Figura 7 se presenta el espacio y elementos para la quema del combustible, tanto con biomasa sólida como de GLP. Donde el recipiente cilíndrico es el mismo, solo se modifica el hogar de combustión dependiendo del combustible usado para generar el calor. El cual como se observa puede ser GLP (C1) o biomasa sólida en forma de madera (C2).

Para el caso de la biomasa la región de combustión se establece confinada como muestra Figura 7b, con su correspondiente fluidización para la admisiones de aire. Incluye la rejilla para colocar la biomasa en la cama fluidizada, y una charola para recolección de los residuos productos de la combustión de la biomasa.



Figura 5 Sistema para la microgeneración de vapor

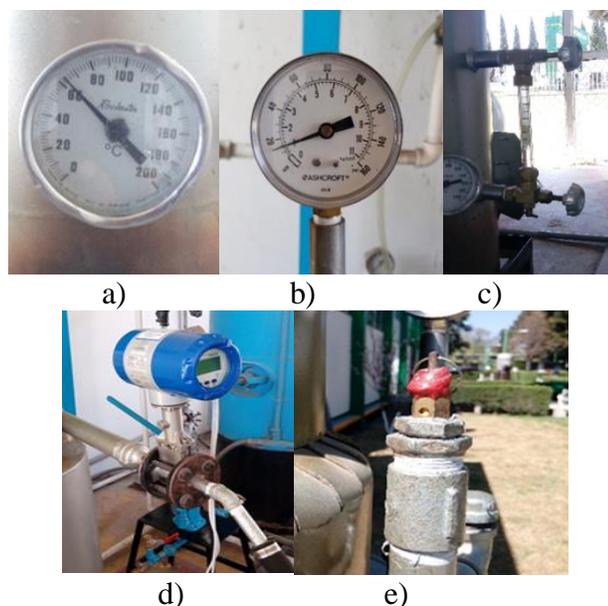


Figura 6 Componentes del cilindro a presión, donde: a) termómetro, b) manómetro, c) medidor de nivel del líquido, d) medidor de flujo y f) válvula de alivio

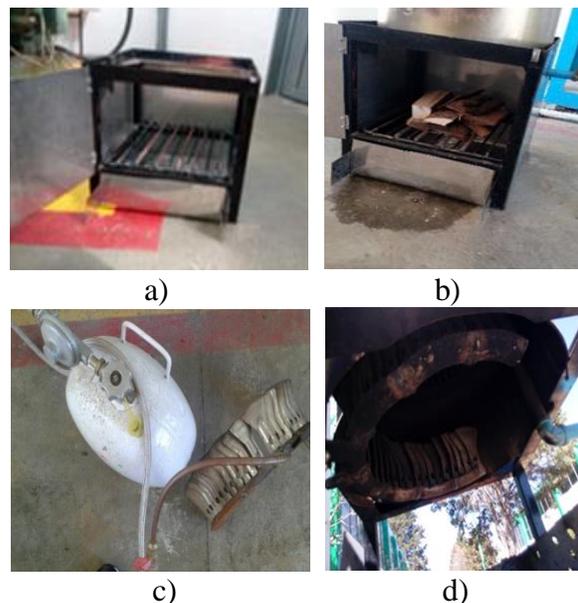


Figura 7 Componentes del hogar de combustión, donde: a) hogar de combustión para la biomasa, b) integración del hogar de combustión y cilindro a presión c) quemador de GLP, d) integración del quemador al cilindro

Resultados

De acuerdo al enfoque del presente estudio las pruebas se realizaron para dos tipos de combustible, por un lado usando GLP (C1) y por el otro con la biomasa sólida en forma de madera (C2). El GLP se consideró que produce parámetros de la combustión razonablemente constantes y su manejo permite un mejor control en la operación del sistema de pruebas. Por lo tanto, los resultados del GLP se usan como base de comparación en el proceso de obtención de vapor cuando se sustituye el combustible por biomasa sólida.

Para la comparación en la generación de vapor con ambos combustibles, en el recipiente cilíndrico a presión se usó un nivel de agua de 50% y 25% de su capacidad. Se consideró ese nivel máximo para reducir el tiempo en que se obtiene vapor, y el nivel mínimo se seleccionó como tal para prevenir que el fluido se evapore completamente.

Con lo cual se busca optimizar el tiempo de la prueba y por otro lado evitar condiciones riesgosas que se pudieran presentar al evaporar completamente el fluido. Para el caso de calentamiento con el 50% del nivel de fluido el gráfico 1 muestra los resultados para la presurización del cilindro, a partir de los dos combustibles usados (C1 y C2).

La presión alcanzada en la pruebas es de 310 kPa, que corresponde una presión promedio para el funcionamiento de la microturbina y es consistente con las características que presión de saturación que se busca en el vapor. Del gráfico 1 se aprecia que al C2 le toma aproximadamente en promedio 15% más de tiempo para alcanzar la presión establecida del sistema. Pero por otro lado, esa figura muestra que el comportamiento en presurización en las pruebas realizadas puede considerarse que es muy similar para ambos tipos de combustibles, logrando con ambos combustibles la misma presión y para tiempos de combustión similares.

De acuerdo a las curvas representativas que se muestran en el gráfico 1, se parecía que el uso de biomasa sólida permite obtener los niveles requeridos del fluido de trabajo para el accionamiento de la turbina. De forma análoga lo se obtiene un comportamiento aproximado para el sistema en estudio con una alimentación de combustible continua (C1), que con la alimentación intermitente de combustible de biomasa sólida. En función de esos resultados se considera que es viable la aplicación de biomasa en el sistema alternativo propuesto de microgeneración.

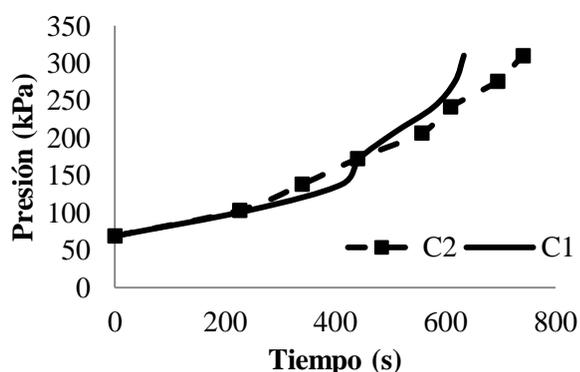


Gráfico 1 Comportamiento de presurización del recipiente cilíndrico para dos combustibles

Una vez que se logra la presión de trabajo buscada en el recipiente cilíndrico, se realiza la alimentación de vapor a la microturbina de adhesión.

A partir de lo cual se obtiene el accionamiento de la micro-turbina y se monitorean y registran los datos representativos que se muestran en la Figura 9. Donde se observa que para la presión inicial de 310 kPa en el recipiente cilíndrico, se obtiene un gasto másico para la alimentación de fluido a la turbina de 23 kg/hr.

Por condiciones inerciales el instante en que se abre la válvula de alimentación de vapor la velocidad angular de la micro-turbina es 0, pero un instante después se aprecia que alcanza su velocidad máxima, la cual corresponde a 3100 rpm.

Para el sistema en estudio se obtuvo que por debajo de un gasto de 9.5 kg/hr la velocidad desciende drásticamente, hasta que se detiene por completo la turbina. Aunque para ese nivel de gasto todavía exista flujo de vapor pasando por la microturbina, éste ya no es significativo para el accionamiento. Por tal razón los rangos de operación encontrados, son los que se presentan en el gráfico 2.

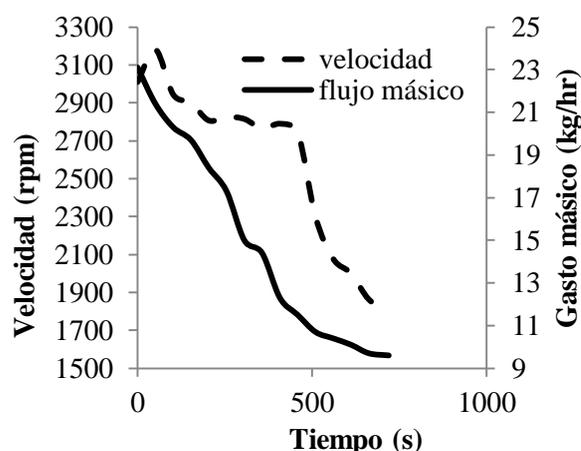


Gráfico 2 Condiciones del flujo para la microturbina de adhesión

Para las pruebas realizadas se obtuvo que el sistema de microgeneración puede operar tanto con combustible derivado del petróleo (GLP), como con biomasa sólida usada como combustible. En función de lo cual se establece que la aplicación de la biomasa recuperada de recurso forestal es una opción viable para la microgeneración, lo cual se muestra con las pruebas de operación de la turbina no convencional, que se selecciona en la integración del sistema. Si bien el generador de vapor no mantiene una alimentación constante de vapor a la turbina, por las condiciones propias de dimensiones y proceso de combustión de la biomasa si se obtiene que el sistema es capaz de accionar la turbina para el proceso de microgeneración.

La cantidad de combustible de biomasa sólida se modifica conforme ésta se quema, por lo que la cantidad de calor también se modifica en el proceso de combustión.

En ese mismo proceso, una vez que se abre la válvula de alimentación a la turbina la cantidad de vapor en el recipiente cilíndrico también decrece, por lo que aunado a las dimensiones del generador de vapor está limitado el tiempo de operación continua de la turbina. Sin embargo, las características de diseño y operación de la microturbina hacen que ésta se integre de forma adecuada al proceso, ya que esta puede operar en todo el rango de velocidad que se tiene para la alimentación del flujo, puede tener paros frecuentes y la calidad del fluido no es impedimento para su operación.

Agradecimiento

Los autores agradecen al TECNM por el apoyo económico brindado para la realización de este trabajo, dentro del proyecto clave 6236.17-P.

Conclusiones

En el trabajo se presenta un sistema alternativo para microgeneración a partir de biomasa sólida como combustible. Mediante el cual se analizó la viabilidad de uso de ese combustible en procesos de microgeneración. El diseño del sistema propuesto integra una microturbina de adhesión que puede operar de acuerdo a las limitantes del microgeneración de vapor para uno volumen de 15 L de líquido como máximo. Las pruebas desarrolladas permiten ver que la biomasa usada como combustible en el generador de vapor tiene comportamiento similar al presentado con GLP como combustible. Por lo que se concluye que la biomasa sólida puede ser usada como combustible en la generación de vapor para accionamiento de una turbina de vapor.

La alimentación de vapor a la microturbina del sistema, presenta inconvenientes propios de la magnitud de generación de vapor en cantidad y calidad del fluido de trabajo; pero en función de las características de la turbina se aprecia de los resultados que ésta puede operar en un intervalo considerable de velocidades (arriba de 3000 rpm) y para una variación significativa de flujo másico (alrededor de 250% de variación entre el nivel inferior y el superior). De lo que se establece que este tipo de micro-turbina supera las limitaciones que se tiene el generador de vapor del estudio para escalas reducidas.

De forma general se concluye que el sistema propuesto puede operar con biomasa sólida para la generación de vapor. La biomasa se usa sin tratamiento previo y el vapor satisface las condiciones para la operación de a turbina no convencional seleccionada.

Referencias

Ackermann, T., G.Andersson and L.Soder, 2004, Distributed Generation: a definition, Electric Power System Research, 71, pp. 119 – 128.

Alanne K, Saari A., 2006, Distributed energy generation and sustainable development, Renew Sustain Energy Rev, 2006, 10, pp. 539-58.

Asadullah M., 2014, Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29, (2014), pp. 201–215.

Balat M, Balat M, Kırtay E, Balat H., 2009, Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Gasification systems. Energy Convers Manag 2009; 50: 3158– 68.

Bedolla J., Carro R., Szwedowicz D., Sánchez P., Bedolla M., 2012, “Turbina de Construcción Simplificada para Aplicaciones no Convencionales”, Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, año VII, num. 19, pp. 32-37.

Bedolla J., Lara V., Bedolla M., Szwedowicz D., Mora C.A., 2016, Análisis comparativo de alternativas del rotor de una turbina no convencional, Memorias del XXII Congreso de la SOMIM y XIV Congreso Iberomat, Septiembre 28-30, del 2016 Cd. Mérida, Yucatán. México, ISSN 2448-5551.

Boyd K.E., and Rice W., 1968, Laminar inward flow of an incompressible fluid between rotating disks, with full peripheral admission, ASME Trans. J. Appl. Mechanics, 35 (2) (1968), pp. 229–237.

Buragohain B., Mahanta P., Moholkar S., 2010, Biomass gasification for decentralized power generation: The Indian perspective, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14 (1), January 2010, pp. 73-92.

- Cimdina G., Slisane D., Ziemele J., Vitolins V., Vigants G., Blumberga D., 2014b, Sustainable Development of Renewable Energy resources. Biomass Cogeneration Plant, The 9th International Conference “Environmental Engineering” 22–23 May 2014, Vilnius, Lithuania.
- Demirbas A., 2001, Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemical. *Energy conversion and Management*, 42 (2001), pp. 1357-1378.
- Demirbas A., 2004, Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress Energy Combust Sci*, 2004; 30, pp. 219–30.
- Demirbas A. 2005, Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Prog Energy Combust Sci*, 2005;31, pp. 171–92.
- Erdinc O, Uzunoglu M. 2012, Optimum design of hybrid renewable energy systems: overview of different approaches. *Renew Sustain Energy Rev.*, 2012;16:1412–25.
- Gavrilescu M., 2008, Biomass Power for Energy and Sustainable Development, *Environmental Engineering and Management Journal*, 7 (5), pp. 617-640.
- González A., Riba J., Puig R., Navarro P., 2015, Review of micro- and small-scale technologies to produce electricity and heat from Mediterranean forests' wood chips, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43 (2015), pp. 143–155.
- Grant A., Igor E., Michelle G., Kockar I., and Peter M., (2014), The economics of distributed energy generation: a literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42. pp. 543-556. ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.064>.
- Grisales, L. F., Restrepo Cuestas B. J., y Jaramillo, F. E., 2017 “Ubicación y dimensionamientos de generación distribuida: una revisión,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, no. 2, pp. 157-176. DOI: <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2344>.
- Guha A. and Sengupta S., 2013, The fluid dynamics of the rotating flow in a Tesla disc turbine, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 37 (2013), pp. 112–123.
- Gupta H., and Kodali S.P., 2013, Design and Operation of Tesla Turbo machine - A state of the art review, *International Journal of Advanced Transport Phenomena*, Jan-Dec 2013, 02 (01), pp 7-14.
- Jenkins B.M., Baxter L.L., Miles Jr T.R. and Miles T.R., 1998, Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, 54 (1998), pp. 17–46.
- Lazaroiu G., Mihaescu L., Prisecaru T., Oprea I., Pisa I., Negreanu G., Indries R., 2008, Combustion of Pitcoal-Wood Biomass Brichettes in a Boiler Test Facility. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2008, 7(5), pp. 595-601.
- Monteiro E, Moreira NA, Ferreira S., 2009, Planning of micro-combined heat and power systems in the Portuguese scenario. *Appl Energy* 2009; 86, pp. 290–8.
- Ripa M., Fiorentino G., Giani H., Clausen A., Ulgiat S., 2017, Refuse recovered biomass fuel from municipal solid waste. A life cycle assessment, *Applied Energy*, 186, (2017), pp. 211-225.
- Saidura R., Abdelaziza E.A., Demirbasb A., Hossaina M.S., Mekhilefc S., 2011, A review on biomass as a fuel for boilers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2011), pp. 2262–2289.
- Sengupta A., A Theory of Tesla Disc Turbines, *Journal Of Power and Energy*, 2012, vol. 5 (226), pp. 650-663.
- Silva D, Nakata T., 2012, Design of decentralized energy systems for rural electrification in developing countries considering regional disparity. *Appl Energy*, 2012; 91, 130–45.
- Singh J., 2017, Management of the agricultural biomass on decentralized basis for producing sustainable power in India, *Journal of Cleaner Production*, 142 (2017), pp. 3985-4000.

Theo W., Lim J., Ho W., Hashim H., Lee C., 2017, Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67 (2017), pp. 531-573.

Wahlund B, Yan J, Westermark M., 2000, Comparisons of CO₂-reducing alternatives for heat and power generation: CO₂-capture and fuel shift to biomass, Durie RA, McMullan P, Paulson CAJ, Smith AY, Williams DJ, editors. 5th International Conference on Greenhouse Gas Technology. Cairns, Australia: CSIRO Publishing; 2000. p. 229–34.

Aplicación de sensores inerciales para análisis de marcha humana

Application of inertial sensors at human gait analysis

MARTÍNEZ-SOLÍS, Fermín^{1*†}, VERGARA-LIMON, Sergio², RAMÍREZ-BETANCOUR, Reymundo¹ y OLMOS-LÓPEZ, Armando¹

¹ Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. División Académica de Ingeniería y Arquitectura

² Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ciencias de la Electrónica

ID 1^{er} Autor: *Fermin, Martínez-Solís* / **Researcher ID Thomson:** P-6735-2018, **CVU CONACYT ID:** 64026

ID 1^{er} Coautor: *Sergio, Vergara-Limon* / **CVU CONACYT ID:** 22133

ID 2^{do} Coautor: *Reymundo, Ramírez-Betancour* / **Researcher ID Thomson:** P-5945-2018, **CVU CONACYT ID:** 161945

ID 3^{er} Coautor: *Armando Olmos-López* / **Researcher ID Thomson:** H-1677-2018, **CVU CONACYT ID:** 41944

Recibido: Septiembre 05, 2018; Aceptado Noviembre 30, 2018

Resumen

El análisis de movimiento del cuerpo humano permite detectar alteraciones en el aparato locomotor y sistema nervioso central. En particular, el análisis de marcha establece patrones de movimiento que identifican patologías y eventos que pueden predecir caídas. En este trabajo, se propone un sistema electrónico con sensores inerciales para analizar marcha normal y patológica, además de detectar eventos que ayuden a identificar caídas. Se utilizó un FPGA y cuatro sensores inerciales para lograr un sistema de medición en tiempo real. Para ambos miembros inferiores, se colocó un acelerómetro en el muslo para estimar el ángulo de cadera y otro acelerómetro en la pierna para estimar el ángulo de rodilla. El diseño de firmware y software permitió un tiempo máximo de retardo, entre lecturas, de 724 μ s, y con ello, se logró una frecuencia de muestreo de 250 Hz. El funcionamiento del sistema se validó con un robot instrumentado con encoder de 655,360 p/rev con el cual se identificó un error promedio de 0.75°. Se analizó la marcha de 10 sujetos sanos de fenotipo mexicano de quienes se obtienen patrones de marcha que muestran movimientos periódicos y alternantes, además se identificó una correlación de movimiento entre las articulaciones de cadera y rodilla. También, se identificaron movimientos particulares propios de cada sujeto. Se pretende que, con la identificación de movimientos particulares, gracias a la frecuencia de 250 HZ, se puedan identificar eventos que permitan diseñar algoritmos para prevenir caídas en adultos mayores.

Sensores inerciales, Análisis de marcha, Sistema en tiempo real

Abstract

In this work, an electronic system with inertial sensors to analyze normal gait, pathology, and detecting events that help identify falls is designed. An FPGA and four inertial sensors were used to achieve a real-time measurement system. For both lower limbs, an accelerometer was placed on the thigh to estimate the hip angle and another accelerometer on the leg to estimate the angle of the knee. The design of firmware and software allowed a delay time between readings of 724 μ s. The sampling rate was 250 Hz. The electronic system was validated with an encoder of 655,360 p / rev, which was used to identify an error of 0.75 ° on average. We analyzed the gait of 10 healthy subjects of Mexican phenotype from whom gait patterns were obtained showing periodic and alternating movements; also, a correlation of movement between the hip and knee joint was identified. We also identify particular movements related to the screw-home of the knee. It is intended that with the identification of particular movements, this can be used to detecting human falls and so, design algorithms to prevent falls in older adults.

Gait, Inertial sensors, Real-Time, Systems

Citación: MARTÍNEZ-SOLÍS, Fermín, VERGARA-LIMON, Sergio, RAMÍREZ-BETANCOUR, Reymundo y OLMOS-LÓPEZ, Armando. Aplicación de sensores inerciales para análisis de marcha humana. Revista de Ingeniería Tecnológica. 2018. 2-8: 23-31.

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: fermin.martinez@ujat.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La locomoción humana es un proceso que requiere interacción síncrona de diferentes segmentos corporales tanto superiores como inferiores. Las extremidades inferiores son las encargadas de lograr el proceso de locomoción que comúnmente se conoce como marcha humana. Durante mucho tiempo, la marcha ha sido sujeto de varios estudios, los cuales, tienen como objetivo comprender los movimientos articulares que se involucran en dicho proceso. Establecer un patrón de marcha normal ha sido uno de los objetivos principales en varias investigaciones. En el área médica, los parámetros de marcha son esenciales para valorar la marcha normal y patológica, también son considerados como herramienta útil para el diagnóstico de enfermedades del sistema nervioso y cerebro, tales como Alzheimer y parálisis cerebral (Iosa et al. 2014; Dadashi et al. 2013; Esser et al. 2011; Rezgui et al. 2013; Esser et al. 2012; Papers 2012; Colgan et al. 2016). Asimismo, en biomédica los parámetros de marcha son la base para diseñar prótesis, exosqueletos y robots de rehabilitación.

Los laboratorios de biomecánica instrumentados con cámaras, plataformas de fuerza y equipos de electromiografía han sido la principal herramienta para el estudio de marcha. Estos laboratorios han permitido identificar fases y eventos, necesarios para establecer un patrón de marcha normal. Sin embargo, uno de sus principales problemas es el área de captura delimitada por las cámaras y plataformas de fuerza, éstas restringen el número de zancadas (de 3 a 5) en cada análisis de marcha. Además, la complejidad de instalación, el ajuste del ambiente y el alto costo económico han limitado el uso de laboratorios en estudios de marcha (Whittle 2007).

Los nuevos métodos basados en sensores inerciales han mostrado excelentes resultados para el análisis de marcha. Los diferentes sistemas desarrollados con acelerómetros y giroscopios permiten grabar la cinemática de los miembros inferiores durante la marcha. Los sensores inerciales son colocados en los segmentos corporales para medir la aceleración y velocidad relativa a un marco de referencia. Las mediciones reflejan la intensidad y frecuencia de los movimientos en la marcha.

Los sistemas instrumentados con sensores inerciales son portables, lo cual permite grabar varias zancadas. Sin embargo, una de las principales desventajas es la obtención de ángulos articulares a través de la integración de aceleraciones y velocidades (Dejnabadi et al. 2005; Tao et al. 2012; Mayagoitia et al. 2002; Schwesig et al. 2011; Pasciuto et al. 2016).

De acuerdo a lo reportado en el estado del arte, diferentes estudios de análisis de marcha realizados con sistemas tradicionales (cámaras, plataformas de fuerza y equipos de electromiografía) han reportado ocho eventos y dos fases que caracterizan un ciclo de marcha (Whittle 2007; Donal 2002; Dugan & Bhat 2005; Winter 2009; Senanayake & Senanayake 2010; Manca et al. 2010). Por otro lado, el principal objetivo de los sistemas portátiles desarrollados con sensores inerciales ha sido la caracterización de la cinemática de la marcha. Sin embargo, debido a las ventajas que presentan dichos sistemas, éstos han sido usados para valorar desordenes en la marcha a consecuencia de patologías (Dejnabadi et al. 2005; Dejnabadi et al. 2006; Mayagoitia et al. 2002; Che-Chang & Yeh-Liang 2010; Schwesig et al. 2011; Colgan et al. 2016). Por tal motivo, recientes estudios desarrollados con sistemas portátiles, instrumentados con sensores inerciales, buscan resolver el problema del drif y garantizar la detección de eventos y fases del ciclo de marcha, además de encontrar nuevos parámetros y particularidades que ayuden a identificar desordenes en la marcha.

En este trabajo se presenta un sistema electrónico instrumentado con sensores inerciales para detectar eventos desarrollados en la marcha humana, este sistema permitirá evaluar marcha normal y patológica en tiempo real. Se utilizaron cuatro sensores inerciales, un FPGA y una PC para instrumentar un sistema en tiempo real. Este sistema permitirá estimar el ángulo articular de cadera y rodilla a través del polígono de aceleraciones, y con ello, detectar eventos de marcha normal y patológica. El objetivo es contar con un sistema portable que permita valorar marcha normal y patológica, también se pretende que la información, registrada por el sistema, se pueda utilizar para desarrollar algoritmos para prevenir caídas en adultos mayores y personas con discapacidad motriz.

La sección II presenta el método para estimación de ángulos articulares, metodología de diseño y validación del sistema electrónico y, metodología para análisis de marcha con acelerómetros. En la sección III se presentan resultados del análisis de marcha de 10 sujetos de fenotipo mexicano. En la sección IV se presentan conclusiones y recomendaciones del trabajo.

Metodología

1. Estimación de ángulos articulares

Los sistemas de medición desarrollados con acelerómetros analizan el movimiento a través de la aceleración experimentada en los segmentos corporales. El acelerómetro mide la aceleración (sobre un sistema ortogonal) relativa ocasionada por fuerzas externas, reflejando así, la intensidad y frecuencia de los movimientos (Che-Chang & Yeh-Liang 2010).

Para obtener la cinemática de los miembros inferiores mediante acelerómetros: primero, se obtuvo el ángulo de inclinación de muslos y piernas de forma independiente, y posteriormente, se obtuvo la cinemática del miembro inferior. Para ello, se estableció un marco de referencia X-Y donde, el eje Y es paralelo al vector de gravedad y al plano sagital de sustentación. El marco del acelerómetro es $x'-y'$ (ver Figura 1). El marco de referencia X-Y se mueve con el cuerpo, y el marco $x'-y'$ se mueve con relación al marco X-Y.

La Figura 1 muestra una barra que representa un segmento corporal, dicha barra tiene un acelerómetro para estimar el ángulo de inclinación θ . Para evitar que el acelerómetro cambiará de posición durante el análisis de movimiento, éste se ató a una barra de plástico flexible, y posteriormente, con cinta elástica la barra se sujetó al segmento corporal.

El movimiento experimentado por los segmentos corporales es ocasionado por dos fuerzas: la fuerza de los músculos y la fuerza de la gravedad. Estas fuerzas están relacionadas con las aceleraciones que experimenta cada segmento, así que, la aceleración de cada segmento puede determinarse por la siguiente expresión:

$$\mathbf{a} = a_n + a_t, \quad (1)$$

Donde a_n es la aceleración normal y a_t la aceleración tangencial.

Ahora, si consideramos que cada segmento está afectado por dos fuerzas, entonces, la aceleración normal estaría determinada por:

$$\mathbf{a}_n = \frac{v^2}{r} (-\text{sen}(\theta) + \text{cos}(\theta)) + g(-\text{sen}(\theta) + \text{cos}(\theta)), \quad (2)$$

Dónde: $\frac{v^2}{r} (-\text{sen}(\theta) + \text{cos}(\theta))$ representa la aceleración del segmento corporal generada por los músculos: siendo v la velocidad lineal y r la longitud del segmento; $g(-\text{sen}(\theta) + \text{cos}(\theta))$ es la aceleración generada por la fuerza gravitacional, donde g es el valor de la gravedad.

Asimismo, la aceleración tangencial se puede determinar por:

$$\mathbf{a}_t = \alpha * r(\text{cos}(\theta) + \text{sen}(\theta)), \quad (3)$$

De la cual, α es la aceleración angular y r es la longitud del segmento.

Sin embargo, las ecuaciones 2 y 3 sólo son válidas cuando la aceleración del segmento no es mayor al valor de gravedad. Así que, cuando la aceleración registrada por el acelerómetro es igual a la gravedad, la aceleración se considera constante. En este caso, la aceleración de la ecuación 1 no tiene componente tangencial y la ecuación se puede reescribir como:

$$\mathbf{a} = g(-\text{sen}(\theta) + \text{cos}(\theta)).$$

Las aceleraciones que registra el acelerómetro colocado en el segmento corporal son a_x y a_y . Estas aceleraciones son las componentes de la aceleración descrita por la ecuación 1 respecto al marco de referencia X-Y, es decir $\mathbf{a} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$.

Entonces, el ángulo de inclinación θ de la Figura 1, se puede obtener mediante el polígono de aceleraciones con la siguiente expresión.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{a_x}{a_y}, \quad (4)$$

Donde θ es el ángulo de inclinación del segmento, a_x la aceleración en x' y a_y la aceleración en y' .

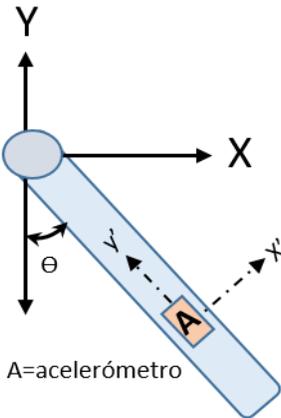


Figura 1 Estimación del ángulo de inclinación

Para obtener la cinemática del miembro inferior, se estableció un nuevo marco de referencia $X''-Y''$ con origen en la articulación de la cadera (ver Figura 2).

Los segmentos corporales de muslo y pierna fueron representados por $L1$ y $L2$ respectivamente. Así, como se puede ver en la Figura 2, el ángulo α y las longitudes $L1$ y $L2$ determinan la longitud total del miembro inferior. El ángulo α y la longitud total del miembro pueden obtenerse por:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\|L1\|^2 + \|L2\|^2 - \|R\|^2}{2\|L1\|\|L2\|} \right) \tag{5}$$

$$R^2 = L1^2 + L2^2. \tag{6}$$

En cada segmento corporal (muslo y pierna) de los miembros inferiores se colocó un acelerómetro como se muestra e la Figura 2. El ángulo articular de cadera y rodilla se estima considerando el marco de referencia $X''-Y''$.

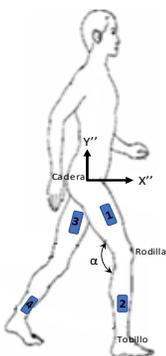


Figura 2 Estimación de ángulo de cadera y rodilla

2. Diseño de sistema electrónico

La Figura 3 muestra el diagrama a bloques con los elementos que integran el sistema de medición: 1) cuatro acelerómetros micro electromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés) como sensores de ángulo, 2) una tarjeta de adquisición de datos PCI (del inglés *Peripheral Component Interconnect*) para adquisición de datos instrumentada con un FPGA (del inglés *Field Programmable Gate Array*) como dispositivo de mando y control (León-Bonilla 2006), y 3) una computadora con ranura PCI para visualizar y grabar los datos. A continuación, se presenta una descripción de las características y tareas que desarrollan los elementos que integran el sistema de medición.

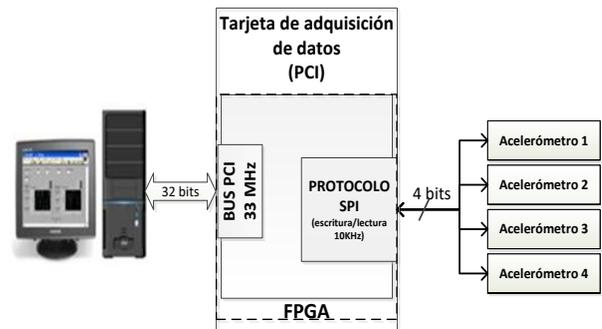


Figura 3 Diagrama a bloques del sistema de medición

Sensores: se utilizaron cuatro acelerómetros (*ADIS16209*) de dos ejes con rango de medición de ± 1.7 y 12 bits de resolución (por lo tanto, el bit *LSB* es igual a 0.97mg). Cada acelerómetro entrega la información en señales digitales mediante los protocolos de comunicación serial *I2C* (del inglés *Inter-Integrated Circuit*) y *SPI* (del inglés, *Serial Peripheral Interface*).

La lectura de los acelerómetros se logró mediante el protocolo serial *SPI* a través de la conexión maestro-esclavo. El FPGA (instrumentado en la tarjeta PCI) desarrolló las tareas de dispositivo maestro para generar: la señal de reloj *SCK* para la sincronización del sistema (acelerómetros-FPGA), la señal *SDO* para configurar los dispositivos esclavos y la señal *CS* para seleccionar el dispositivo esclavo. Entonces, los dispositivos esclavos envían la información al dispositivo maestro a través de la señal *SDI*, los datos de esta señal se guardan temporalmente en los registros del FPGA.

Tarjeta PCI: La tarjeta de adquisición de datos es la encargada del procesamiento, adquisición y control del flujo de datos entre la PC (del inglés *personal computer*) y los acelerómetros, esto a través de los protocolos de transferencia de datos PCI y SPI respectivamente. Es una tarjeta modular de arquitectura abierta que esta instrumentada con un FPGA (*Cyclone II, Altera Corporation*) con 8256 compuertas lógicas, el cual, logra una frecuencia de trabajo de 100 Mhz (León-Bonilla 2006). Las tareas que realizó el FPGA fueron: configurar y leer los acelerómetros, así como, almacenar y enviar los datos (lectura de los acelerómetros) a la PC para su visualización y almacenamiento en un archivo de texto. Para lograr lo anterior se diseñó un firmware con los siguientes bloques: 1) Bloque PCI: realiza el protocolo de lectura-escritura PCI para transferencia de datos de 32 bits entre la tarjeta de adquisición y la PC. 2) Bloque SPI: genera el protocolo de comunicación serial maestro-esclavo para la comunicación entre los acelerómetros y la tarjeta de adquisición. Y, 3) bloque de Control: sincroniza las diferentes frecuencias de trabajo de los bloques involucrados con el propósito de no perder datos durante la transferencia de información, entre la PC y los acelerómetros. Para realizar los bloques anteriores fue necesario reproducir los diagramas de tiempos de los protocolos PCI y SPI. Por último, debido al tiempo de transferencia de datos del protocolo PCI, y la capacidad de procesamiento y almacenamiento del FPGA, se puede incrementar el número de acelerómetros e instrumentar otro tipo de sensores sin afectar el periodo de muestreo.

PC para procesamiento de datos: se utilizó un software de instrumentación virtual para procesar y visualizar la información en la PC. Este *software* permitió realizar transferencia de datos mediante el bus PCI en tiempo real. El programa desarrollado controló el período de muestreo del sistema, el cual, fue de 4 milisegundos, es decir, el sistema logró 250 muestras por segundo.

La transferencia de datos entre la PC y la tarjeta PCI, para la lectura del sensor de ángulo, se realizó de la siguiente forma. Mediante *software*, la PC envía paquetes de 32 bits por el bus PCI para seleccionar, configurar y obtener los datos (lectura de registro) registrados por el sensor.

El FPGA recibe los paquetes de 32 bits por el bloque PCI para luego generar el protocolo *SPI*; los datos se envían por *hardware* al sensor seleccionado. Entonces el sensor envía en forma serial el dato capturado, éste se guarda temporalmente en los registros del FPGA.

El mismo procedimiento se realiza para los cuatro acelerómetros, por consiguiente, el FPGA guarda la lectura de los cuatro acelerómetros, y está a la espera del comando de lectura de datos que se genera por *software* en la PC. Una vez que la PC genera el comando de lectura, los datos se transfieren por PCI para desplegar las gráficas y analizar los datos y, una vez validado los datos, éstos se guardan en un archivo de texto para su posterior procesamiento.

3. Validación del sistema de medición

El método (para obtener el ángulo de inclinación) y el sistema de medición fueron evaluados a través de un *encoder* incremental instrumentado en un robot manipulador. La resolución del *encoder* es de 655,360 p/rev. Se utilizó el eslabón de codo del robot manipulador de tres grados de libertad reportado en (Reyes 2011), el objetivo es utilizar el eslabón como péndulo simple y lograr que oscile a velocidad constante. El acelerómetro fue sujetado al eslabón como se muestra en la Figura 1 donde el eslabón está alineado a la vertical. El péndulo describió una trayectoria trazada por:

$$x = 90 * \text{sen}(\omega t). \quad (7)$$

Así, el péndulo describió un movimiento oscilatorio de 90° a -90°. El procedimiento anterior se generó para velocidades de 1 a 3 rad/seg. No obstante, a velocidades mayores a 2 rad/seg al acelerómetro no registraba la trayectoria completa del péndulo.

Por lo tanto, se mantuvo la velocidad angular de 1 rad/seg. Las mediciones de ángulo registradas por los dos sistemas de medición: uno con *encoder (robot)* y otro con acelerómetro (sistema de medición de con acelerómetros) mostraron un error promedio de 0.75°, es importante mencionar que los dos sistemas son asíncronos, el robot tiene un periodo de muestreo de 2.5 mseg mientras que el sistema presentado en este trabajo, su periodo de muestreo es de 4 mseg.

4. Metodología para análisis de marcha con acelerómetros

Se analizó la marcha de 10 sujetos de fenotipo mexicano con edades que varían de 24 a 35 años de edad. En la Tabla 1 se presentan las características particulares tales como: edad, lateralidad, estatura y peso. Las longitudes de muslo y pierna se obtuvieron a través de tablas antropométricas tomando como referencia la estatura de las personas (Winter 2009). Cada sujeto caminó en promedio 10 m de forma natural (velocidad de marcha normal). La metodología para el análisis de marcha es la siguiente:

- 1) Se colocaron acelerómetros en muslos y piernas como se muestra en la Figura 2.
- 2) Se realizó una prueba de adaptación y validación del sistema.
- 3) Cada sujeto caminó en promedio 10 m sobre una superficie uniforme libre de obstáculos.
- 4) Se realizaron dos pruebas de marcha a cada sujeto.
- 5) Cada sujeto permaneció un promedio de 5 seg de pie sin moverse, al principio y al final del análisis de marcha, esto para establecer el punto de referencia.
- 6) Se generaron los archivos con los ángulos articulares para su posterior análisis.

Sujetos	Datos anatómicos				Longitud de segmentos	
	Edad (años)	Lateralidad (Diestro/Si niestro)	Altura (m)	Peso (kg)	Muslo (m)	Pierna (m)
1	24	D	1.90	80	0.465	0.467
2	25	D	1.69	90	0.414	0.415
3	24	D	1.70	69	0.416	0.418
4	24	D	1.70	78	0.416	0.418
5	28	D	1.70	79	0.416	0.418
6	26	D	1.75	74	0.428	0.430
7	24	S	1.65	63	0.404	0.405
8	24	D	1.70	71	0.416	0.418
9	28	D	1.78	80	0.436	0.437
10	25	D	1.60	65	0.392	0.393

Tabla 1 Datos anatómicos y antropométricos de 10 sujetos sanos de fenotipo mexicano

Resultados

Una de las ventajas de realizar el análisis de marcha con un sistema portable es el número de pasos que se pueden grabar (Donath et al. 2016). Esto permitió identificar particularidades que no habían sido reportadas en la literatura.

Los múltiples ciclos mostraron que, durante la marcha, la cadera de un miembro inferior (izquierdo o derecho) realiza movimientos con mayor amplitud, es decir, la amplitud máxima de los ángulos de cadera no son iguales en ambos miembros. Los resultados mostraron que la cadera del miembro inferior dominante muestra ligeramente mayor amplitud.

La Figura 4 muestra la variación de amplitud entre la cadera derecha y la cadera izquierda, se puede observar que los movimientos de la cadera derecha (línea azul) son ligeramente mayores a los de la izquierda (línea roja). La variación fue diferente para cada sujeto.

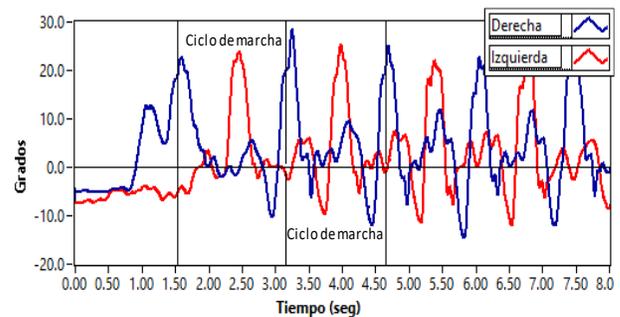


Figura 4 Ángulos articulares de cadera en el plano sagital: línea roja cadera derecha y línea azul cadera izquierda

Los resultados (de análisis de marcha) también permitieron identificar una correlación de movimiento entre las articulaciones de cadera y rodilla durante la marcha. En la Figura 5 se puede ver que, en los movimientos de flexión-extensión, la rodilla tiende a adoptar la forma de movimiento de cadera; en los movimientos de equilibrio y transición (fase de apoyo) la correlación disminuye a causa de los movimientos del pie. En la fase de apoyo, el pie realiza movimientos de equilibrio y acomodo para empujar el cuerpo hacia delante, y de esta forma dar el siguiente paso (zona de transición y pre-oscilación).

También, en la Figura 5, se puede observar que los ángulos de cadera y rodilla, en el primer paso, no tienen la forma ni la amplitud que tienen los pasos posteriores. Se puede observar claramente que el ángulo máximo de rodilla, en el primer paso, es 10° menor al ángulo promedio de los pasos posteriores.

Asimismo, en la Figura 6 se presenta el ángulo de la cadera derecha donde se pueden observar las fases del ciclo de marcha y movimientos particulares. El tiempo del ciclo es de 1.38 seg: 1.05 seg de la fase de apoyo, correspondiente al 80% del ciclo de marcha y 0.33 seg de la fase de oscilación, correspondiente al 20% del ciclo de marcha, aproximadamente.

En la fase de apoyo, al inicio se muestran movimientos de flexion-extensión y, posteriormente, se presentan movimientos de contacto del pie con el piso.

En la fase de oscilación, se puede ver que los movimientos sólo son de extensión-flexión y el tiempo de dichos movimientos es corto, aproximadamente 0.33 seg, correspondiente al 20 % del ciclo de marcha.

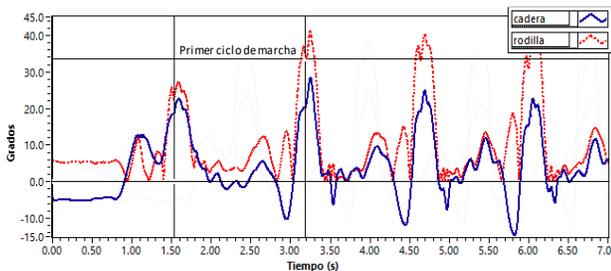


Figura 5 Correlación de movimiento entre cadera y rodilla durante el proceso de marcha

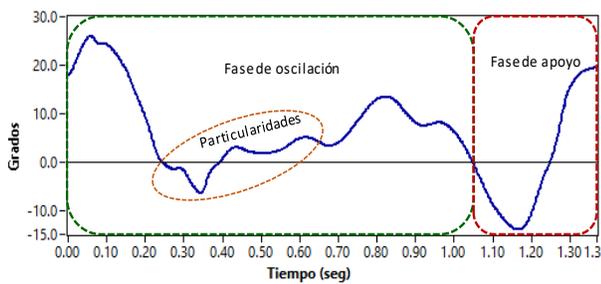


Figura 6 Fases del ciclo de marcha y particularidades para ángulo de cadera

Por otro lado, en la Figura 7 se muestran las fases del ciclo de marcha para el ángulo de rodilla.

Al igual que en la cadera, la rodilla presenta la fase de apoyo y oscilación; cuyo tiempo del ciclo es de 1.38 seg: 1.05 seg para la fase de apoyo, correspondiente al 80% del ciclo de marcha y 0.33 seg para la fase de oscilación, correspondiente al 20% del ciclo de marcha, aproximadamente.

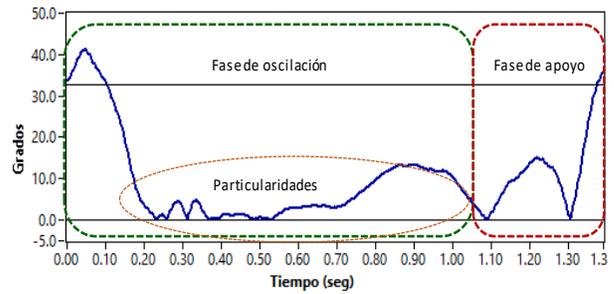


Figura 7 Fases del ciclo de marcha y particularidades para ángulo de rodilla

En la fase de apoyo, tanto en la cadera como en la rodilla, se observan movimientos particulares que generalmente no se describen en patrones de marcha estándar, estas particularidades se presentan en movimientos donde el pie está en contacto directo con el piso, y de acuerdo a la hipótesis preliminar, estas particularidades se pueden relacionar con el estilo de caminar de cada persona.

Sin embargo, dichas particularidades se pueden parametrizar y utilizar de referencia para establecer rangos de normalidad y utilizar éstos para diseñar algoritmos que nos permita predecir la trayectoria del miembro inferior y, con ello, detectar eventos de riesgo de caída de un sujeto.

En este trabajo, se analizó la marcha de 10 sujetos de fenotipo mexicano donde las principales variables se presentan en la Tabla 2. Se puede observar que el tiempo de duración del ciclo y el ángulo de flexión de la cadera, están dentro de los rangos que han sido reportados por otros autores para marcha estándar (Oberg et al., 1994; Iosa et al., 2014; Whittle 2007; Winter 2009; Donal 2002).

No obstante, las amplitudes de los ángulos de rodilla no figuran dentro de los rangos de valores de marcha estándar reportados en diferentes trabajos previamente citados.

Finalmente, la correlación de movimiento entre cadera y rodilla es un parámetro nuevo que podría indicar el nivel de coordinación de las articulaciones durante la marcha y, éste podría utilizarse para detectar desordenes del sistema nervioso central.

Parámetros	Desviación estándar	Media	Mediana	Mínimo	Máximo
Correlación cadera-rodilla de miembro dominante	0.078	0.736	0.733	0.543	0.867
Tiempo de duración de ciclo	0.103	1.396	1.412	1.226	1.576
CADERA					
Ángulo de flexión	2.767	23.43 2	23.600	18.000	28.700
Ángulo de extensión	3.004	-7.573	-7.750	-17.000	-3.000
RODILLA					
Ángulo de respuesta a carga	2.381	5.636	6.000	1.000	12.000
Ángulo extensión (FA)	6.380	35.78 0	36.600	22.870	46.500
Ángulo flexión (FO)	5.190	36.80 0	37.000	26.800	46.70
Ángulo extensión (FO)	1.890	6.918	7.000	3.700	12.000

Tabla 2 Parámetros de marcha de 10 sujetos de fenotipo mexicano

Conclusiones

Los múltiples ciclos de marcha capturados por el sistema de medición revelaron que, en la marcha normal, el ángulo de rodilla en el paso inicial no es el mismo en relación a los pasos posteriores. También, los resultados mostraron que no hay ciclos de marcha con ángulos de cadera o rodilla que sean iguales, aun tratándose de la misma articulación.

Con la tendencia central y la desviación estándar se podrá establecer un intervalo, de marcha normal, es decir, los parámetros de marcha serán definidos por un grupo de personas con características particulares.

Los intervalos de cada parámetro pueden utilizarse para establecer un patrón de marcha para evaluar la marcha normal o patológica.

Este patrón de marcha, a diferencia del patrón de marcha estándar, sólo será representativo para un selecto grupo de personas, y no para todas las personas como sucede en la marcha estándar.

De esta forma, con el patrón de marcha de un grupo de personas, a través de inferencia estadística, es posible estimar parámetros de marcha de personas que han sufrido amputación, y utilizar dicha información, para diseñar dispositivos biomédicos como prótesis y ortesis.

Además, se pueden desarrollar algoritmos para prevenir caídas en adultos mayores o personas con disfuncionalidad muscular.

Una de las desventajas del trabajo es que el sistema de medición es alámbrico y esto limita el estudio de la marcha, por tanto, se recomienda desarrollar un sistema inalámbrico que permita analizar los movimientos articulares en diferentes actividades diarias de cada sujeto. Esto permitirá parametrizar movimientos, de las articulaciones, de diferentes actividades de la vida diaria

Es importante considerar la correlación de movimiento entre cadera y rodilla ya que ésta podría utilizarse para detectar desordenes del sistema nervioso central.

Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado con apoyo del Programa para el Desarrollo Profesional Docente PRODEP a través del financiamiento del proyecto (UJAT-PTC-270).

Referencias

- Béseler, M., 2006. Estudio de los parámetros cinemáticos de la marcha del paciente hemiplejico mediante plataformas dinamométricas. Universidad de Valencia.
- Che-Chang, Y. & Yeh-Liang, H., 2010. A Review of Accelerometry-Based Wearable Motion Detectors for Physical Activity Monitoring. *Sensor*, 10, pp.7772–7788.
- Colgan, G. et al., 2016. Gait analysis and hip extensor function early post total hip replacement. *Journal of Orthopaedics* 13, pp.171–176.
- Dadashi, F. et al., 2013. Gait and foot clearance parameters obtained using shoe-worn inertial sensors in a large-population sample of older adults. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 14, pp.443–457.
- Dejnbadi, H. et al., 2006. Estimation and Visualization of Sagittal Kinematics of Lower Limbs Orientation Using Body-Fixed Sensors. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 53(7), pp.1385–1393.
- Dejnbadi, H., Jolles, B.M. & Aminian, K., 2005. A new approach to accurate measurement of uniaxial joint angles based on a combination of accelerometers and gyroscopes. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 52(8), pp.1478–1484.

- Donal, A., 2002. *Kinesiology of the Musculoskeletal System* 1st ed., USA: Mosby, Inc.
- Donath, L. et al., 2016. Validity and reliability of a portable gait analysis system for measuring spatiotemporal gait characteristics: comparison to an instrumented treadmill. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 13, 6 pp.2–9.
- Esser, P. et al., 2011. Assessment of spatio-temporal gait parameters using inertial measurement units in neurological populations. *Gait & Posture*, 34(4), pp.558–560. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.06.018>
- Esser, P. et al., 2012. Validity and inter-rater reliability of inertial gait measurements in Parkinson's disease: A pilot study. *Journal of Neuroscience Methods*, 205(1), pp.177–181. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jneumeth.2012.01.005>.
- Iosa, M. et al., 2014. Assessment of Waveform Similarity in Clinical Gait Data: The Linear Fit Method. *BioMed Research International*, 2014, pp.1–7. Available at: <http://www.hindawi.com/journals/bmri/2014/214156/>.
- Leavitt, L., et al., 1971. Gait analysis of normal subjects. *South. Med. J.*, vol. 64, no. 9, pp. 1131–1138.
- León-Bonilla, A., 2006. Tarjeta PCI para control de un robot con tres grados de libertad. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Cuervavaca, Morelos, 2006.
- Manca, M. et al., 2010. Repeatability of a new protocol for gait analysis in adult subjects. *Gait & posture*, 32, pp.282–284.
- Mayagoitia, R.E., Nene, A. V & Veltink, P.H., 2002. Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems. *Journal of Biomechanics*, 35, pp.537–542.
- Oberg, T., et al., 1994. Joint angle parameters in gait: Reference data for normal subjects, 10-79 years of age. *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 31, no. 3, pp. 199–213.
- Papers, R., 2012. Gait and Balance Analysis for Patients with Alzheimer's Disease Using an Inertial-Sensor-Based Wearable Instrument. , 18(6), pp.1822–1830.
- Pasciuto, I. et al., 2015. How Angular Velocity Features and Different Gyroscope Noise Types Interact and Determine Orientation Estimation Accuracy. *Sensors* 15, pp. 23983-24001; doi:10.3390/s150923983.
- Reyes, F., 2011. *Robótica: Control de robots manipuladores*, 1st ed. México: Alfaomega.
- Rezgui, T. et al., 2013. On the imitation of CP gait patterns by healthy subjects. *Gait and Posture*, 38, pp.576–581.
- Schwesig, R. et al., 2011. Inertial sensor based reference gait data for healthy subjects. *Gait and Posture*, 33, pp.673–678.
- Senanayake, C.M. & Senanayake, S.M.N.A., 2010. Computational intelligent gait-phase detection system to identify pathological gait. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 14(5), pp.1173–1179.
- Tao, W. et al., 2012. Gait Analysis Using Wearable Sensors. *Sensors*, 12, pp.2255–2283.
- Whittle, M.W., 2007. *Gait Analysis an Introduction* 4th ed., London/GB: Elsevier Health Sciences.
- Winter, D., 2009. *Biomechanics and motor control of human movement* 2nd ed., Waterloo Ontario, Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Senanayake, C.M. & Senanayake, S.M.N.A., 2010. Computational intelligent gait-phase detection system to identify pathological gait. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 14(5), pp.1173–1179.

Análisis numérico por el Método de Elementos Finitos de una zapata de tipo tambor

Numerical analysis by the Finite Element Method of a drum type shoe

VILLAGÓMEZ-Gerardo†, HERNÁNDEZ-Bernabé, MARTÍNEZ-Armando* y HERNÁNDEZ-Alberto

Universidad Politécnica de Pachuca

ID 1^{er} Autor: *Gerardo, Villagómez* / **ORC ID:** 0000-0001-9813-491X, **CVU CONACYT ID:** 424482

ID 1^{er} CoAutor: *Bernabé, Hernández* / **ORC ID:** 0000-0002-5305, **CVU CONACYT ID:** 1480

ID 2^{do} CoAutor: *Armando, Martínez* / **ORC ID:** 0000-0002-9252-1043, **CVU CONACYT ID:** 238703

ID 3^{er} CoAutor: *Alberto, Hernández* / **ORC ID:** 0000-0003-1312-702X, **CVU CONACYT ID:** 507211

Recibido: Septiembre 08, 2018; Aceptado: Diciembre 03, 2018

Resumen

En el presente trabajo se realizó el análisis numérico por el método de elementos finitos de una zapata de tipo tambor para servicio pesado, fue utilizado el software ANSYS como herramienta computacional. Este análisis permitirá a los fabricantes tener un panorama más amplio con respecto a la validación, modificación y mejora de sus zapatas, las cuales son aplicadas para el sistema de frenado. Las condiciones establecidas de carga y restricciones en ANSYS, se obtuvieron a partir del ensayo de frenado tipo O para motor desembragado. El material aplicado para el estudio se determinó de forma experimental a partir de difracción de rayos X, EDS y dureza Vickers de una zapata comercial. Como resultado de este trabajo se determinó la distribución de esfuerzos presentes sobre la superficie y las diferentes regiones de una zapata de tipo tambor. Se estableció a partir de los resultados obtenidos la metodología que permitirá evaluar y validar diferentes geometrías en zapatas permitiendo determinar posibles fallas o mejoras.

Elemento finito, Zapata, Distribución de esfuerzos

Abstract

In the present work, the numerical analysis was carried out using the finite element method of a heavy duty drum shoe, ANSYS software was used as computational tool. This analysis will allow manufacturers to have a wider picture regarding the validation, modification and improvement of their shoes, which are applied to the braking system. The established loading conditions and restrictions in ANSYS were obtained from the O-type braking test for disengaged engine. The material applied for the study was determined experimentally from X-ray diffraction, EDS and Vickers hardness of a commercial shoe. As a result of this work, the distribution of stresses presents on the surface and the different regions of a drum type shoe was determined. The methodology that will allow evaluating and validating different shoe geometries to determine possible faults or improvements was established from the results obtained.

Finite element, Shoe, Distribution of stresses

Citación: VILLAGÓMEZ-Gerardo, HERNÁNDEZ-Bernabé, MARTÍNEZ-Armando y HERNÁNDEZ-Alberto. Análisis numérico por el Método de Elementos Finitos de una zapata de tipo tambor. Revista de Ingeniería Tecnológica 2018. 2-8: 32-40.

*Correspondencia al Autor (Correo electrónico: aimp@upp.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Actualmente en todas las áreas relacionadas con el sector automotriz es necesario que cuenten con un área de ingeniería, debido a que son los responsables del diseño y análisis de diversas piezas y refacciones de vehículos ligeros y pesados, ya que es de suma importancia determinar antes de la fabricación de los productos los parámetros y condiciones que puedan generar una falla.

Diversos fabricantes de las partes relacionadas con el sistema de frenado de vehículos ligeros y pesados, han mostrado su interés en estudiar una configuración de tipo tambor, en específico la parte que se conoce como zapata de frenado, la cual es el elemento que contiene montadas las pastas de frenado, y a su vez se encuentra sujeta a un sistema de resortes, un cilindro receptor y a diversos pernos o anclas.

Es por esto, que al llevar a cabo el proceso de frenado se generan diferentes tipos y magnitudes de esfuerzos sobre diversas regiones de la zapata. Por este motivo es importante realizar un estudio que permita determinar los posibles puntos o secciones específicas donde pueda fallar la zapata, tomando en cuenta el material del que está fabricada, su diseño y las cargas aplicadas.

En este trabajo se propone realizar con base a una zapata comercial de servicio pesado, el análisis numérico de elementos finitos utilizando el programa ANSYS, el cual nos permitirá estudiar y determinar de forma computacional las regiones específicas donde se pueden presentar fallas, esto determinando las restricciones y magnitudes de cargas en condiciones críticas, a las cuales va a estar sometido el elemento estudiado a partir del ensayo de frenado tipo O para motor desembragado.

Además para resultados más exactos se llevó a cabo el dimensionamiento partiendo de una pieza original, mediante una máquina de coordenadas con precisión de 0.001mm y calibrador con precisión de 0.005mm, con la cantidad de puntos suficientes y medidas necesarias para crear el modelo en 3D. También se determinó de forma experimental el tipo de material con el cual fue fabricada la zapata.

Cada una de las etapas realizadas y los resultados obtenidos en este trabajo permitirán a los fabricantes apoyados de su área de ingeniería, establecer el procedimiento a partir de un análisis estático y no dinámico, el cual servirá de referencia para posteriores estudios y desarrollo de nuevas zapatas con diferentes características, principalmente con diferentes geometrías, materiales y dimensiones, esperando mejorar su funcionamiento y desempeño.

En las secciones de este artículo se describe a detalle todo el proceso realizado para el estudio computacional, iniciando con la caracterización de material que permitirá definir los parámetros del material. Posteriormente se determinaron las restricciones y cargas que se presentan en la zapata cuando está en funcionamiento el sistema de frenado con base a el ensayo establecido para este tipo de elementos. En la sección de análisis de elementos finitos se describe el procedimiento, las condiciones y parámetros establecidos en ANSYS para llevar a cabo el cálculo computacional.

Caracterización del material

Para asignar el material en el programa ANSYS y llevar a cabo el cálculo estático por el método de elementos finitos de la zapata comercial utilizada, se caracterizó el material de la pieza por las técnicas de Difracción de Rayos-X, Microdureza Vickers y EDS.

Los experimentos de difracción de rayos-X se llevaron cabo en un difractor INEL EQUINOX 200 incorporando detector curvo en tiempo real con radiación de Cobalto ($\text{Co } \alpha_1$), la muestra se procesó en un periodo de 20 min a temperatura ambiente y sin atmósfera controlada en un porta muestras de aluminio y sin ningún tratamiento adicional.

El difractograma del material de la zapata comercial (Gráfico 1), muestra con respecto a la base de datos PDF-2 (Powder Diffraction Files) la presencia de la fase de SiC (PDF:49-1623), $\text{C}_{0.055}\text{Fe}_{1.945}$ (PDF: 44-1290), Al (PDF: 04-0787) y Fe_3Si (PDF: 42-1329).

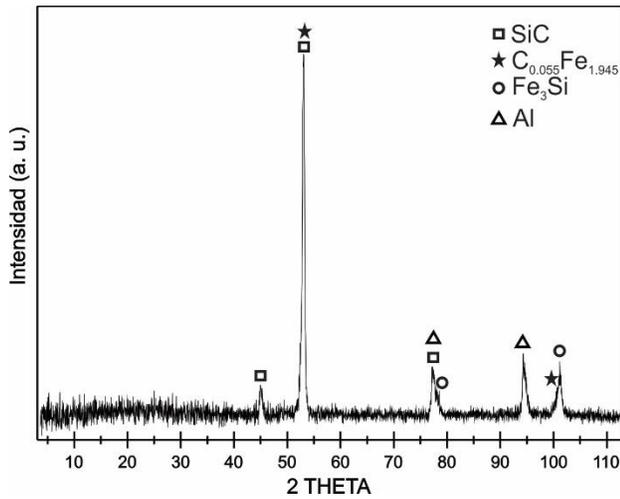


Gráfico 1 Difractograma del material de la zapata utilizada

Con el análisis de EDS realizado en un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-010LA, podemos confirmar los elementos presentes en la muestra, a partir de las fases identificadas por la Difracción de Rayos-X. En la Tabla 1 podemos observar con respecto al porcentaje en peso cada uno de los elementos detectados.

Elemento	% peso
C	5.25
Si	0.3
P	0.03
Mn	0.6
Fe	93.82
Total	100

Tabla 1 Composición química de la superficie en [%peso]

Por último, se determinó la microdureza Vickers en un durómetro Bowers 412 DAT, el cual fue calibrado con un estándar de microdureza V163-273 con valor nominal de 744HV1. Las pruebas se llevaron a cabo con una carga de 50 gramos durante un periodo de 10 segundos, se realizaron 10 pruebas determinando un valor promedio de 215.825 HV.

Con base a los resultados del tipo de fases presentes, la composición química del material y su dureza Vickers, se determinó que el material utilizado para la zapata comercial de frenado de tipo tambor para este estudio es un acero AISI 1060 (Tabla 2), esto permita definir en ANSYS los parámetros relacionados con el acero utilizado, asegurando resultados más exactos durante el cálculo por el método de elementos finitos.

Material	AISI 1060
Densidad (g/cm ³)	7.85
Resistencia a la fluencia (MPa)	485
Coefficiente de Poisson	0.27-0.30
Modulo de elasticidad (GPa)	190-210

Tabla 2 Propiedades mecánicas

Determinación de las cargas aplicadas en la zapata

Se determinaron las cargas y restricciones a las cuales está sujeta la zapata, esto con base a la legislación de *distribución del esfuerzo de frenado entre los ejes de los vehículos* [1], bajo las siguientes consideraciones: Usando los requisitos de un ensayo de frenado del tipo O con motor desembragado como se muestra en la Tabla 3; y un vehículo categoría N3.

El ensayo requiere que el vehículo se encuentre cargado, siendo la distribución por eje la declarada por el fabricante y se llevará a cabo a la velocidad indicada para su categoría, debiendo alcanzar el rendimiento mínimo.

Velocidad inicial	60 km/h
Espacio recorrido	$s > 0.15v + v^2/130$
Deceleración media	$dm \geq 5m/s^2$

Tabla 3 Requisitos del ensayo

Usando las características de un vehículo categoría N3 como se muestra en la Tabla 4, procederemos a calcular las variables para determinar las cargas.

Peso máximo autorizado (PMA)	18 t
Distancia entre ejes (E)	5 m
Distancias a ejes del centro de gravedad	
Vehículo vacío:	
a	2.03 m
b	2.97 m
Vehículo cargado:	
a'	3.194 m
b'	1.806 m
Altura del CDG vehículo vacío (h)	1.1 m
Altura del CDG vehículo cargado (h')	1.9 m
Peso del vehículo con caja de carga	7.8 t
Eje delantero:	4.63 t
Eje trasero:	3.117 t
Peso del vehículo cargado	
Eje delantero	6.5 t
Eje trasero	11.5 t
Presión máxima en cilindro de empuje (p')	7.5kg/cm ²
Radio del neumático bajo carga (R)	0.5 m
Coefficiente de adherencia suelo-neumático	0.5 m

Tabla 4 Características principales de un vehículo categoría N3

A continuación, se realiza la descripción de los requisitos para los vehículos de dos ejes de categoría N3 según *distribución del esfuerzo de frenado entre los ejes de los vehículos*.

Cualquier situación de carga no debe bloquear las ruedas traseras antes que las delanteras para un coeficiente de frenado $z < 0.3$, por lo que, la relación entre el coeficiente de frenado en el eje delantero y el coeficiente de frenado del eje trasero “r” se determina a partir de la Ecuación 1.

$$r = \frac{b + hz}{a - hz} = \frac{2.97t + 1.1m * 0.3}{2.03 - 1.1m * 0.3} = 1.94 \quad (1)$$

En la Ecuación 2 se muestra como se realiza el cálculo del coeficiente F, el cual emplea los dos ejes al mismo tiempo, y representa la adherencia a partir de la cual puede presentarse bloqueo en ruedas traseras antes que delanteras en vehículo cargado.

$$F = \frac{ra' + b'}{(r + 1) * h} = \frac{1.94t * 3.194m - 1806m}{(1.94t + 1) * 1.9m}$$

$$F = 0.786 \quad (2)$$

Como el coeficiente de adherencia entre el suelo y neumático es menor que F, es decir, F_0 (adherencia máxima disponible) = 0.65 < 0.786, esta relación corresponde a la curva 3 del Gráfico 2 de la teoría: *relación entre las adherencias utilizadas*. La cual indica que: Si $F \geq F_0$ el vehículo se frena siempre con prioridad de bloqueo en las ruedas delanteras. Haciendo que en esta curva F_1 (coeficiente de adherencia en el eje delantero) sea igual a F_0 , ya que la adherencia F_0 sólo podrá ser utilizada por las ruedas delanteras antes de que bloqueen, por lo que F_1 siempre será menor que F_2 .

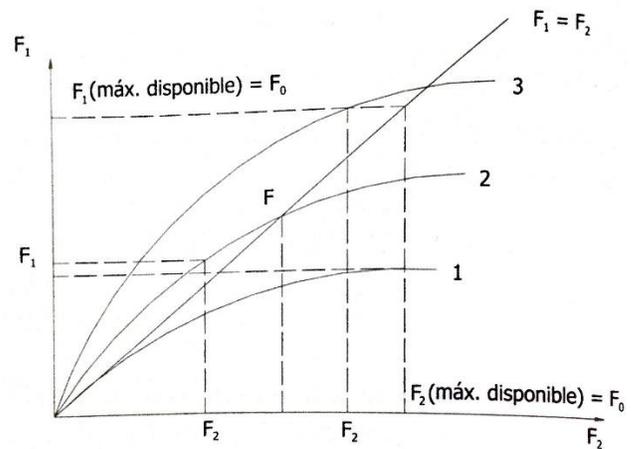


Gráfico 2 Curvas de relación entre adherencias de los ejes

Al seguir la curva 3 y definir el valor de F_1 , el coeficiente de adherencia del eje trasero (F_2), será máximo en ruedas traseras cuando las delanteras utilizan la adherencia máxima disponible de 0.65, la Ecuación 3 representa su cálculo.

$$F_2 = \frac{F_1 b}{ra - F_1(r + 1)h}$$

$$F_2 = \frac{0.65 * 1.806m}{1.94 * 3.19 - 0.65 * 2.94 * 1.9}$$

$$F_2 = 0.459 \quad (3)$$

La desaceleración máxima (J), se obtiene sustituyendo los valores de F_1 y F_2 en la Ecuación 4.

$$J = \frac{F_1 b + F_2 a}{E - h(F_1 - F_2)} g$$

$$J = \frac{0.65 * 1.806 + 0.459 * 3.18}{5 - 1.9(0.65 - 0.459)} * 9.81$$

$$J = 5.58 \frac{m}{s^2} \quad (4)$$

En la Ecuación 5 se muestra el cálculo del par máximo de frenada (M) para F_1 y F_2 :

$$M = PR \frac{F_2(ab + F_2ah)(r + 1)}{F_2^2(r + 1)h^2 + F_2h(E + b(r + 1) + bE)}$$

$$M = 18 \times 10^3 * 0.5 * \frac{0.459 * (8.52) * 2.94}{2.23 + 16.86}$$

$$M = 5122 \text{ kg m} \quad (5)$$

También se puede obtener de a partir de la Ecuación 6.

$$M = \frac{P}{g} J R$$

$$M = \frac{18000}{9.81} * 5.58 * 0.5 = 5119 \text{ kg m} \quad (6)$$

Momentos por eje (Ecuación 7 y 8)

Momento en eje delantero (M_1)

$$M_1 = M * \left(\frac{r}{r + 1} \right)$$

$$M_1 = 5122 * \frac{1.94}{2.94} = 3380 \text{ kg m} \quad (7)$$

Momento en eje trasero (M_2)

$$M_2 = M - M_1 = 5122 - 3380$$

$$M_2 = 1742 \text{ kg m} \quad (8)$$

Para conseguir los pares máximos, la presión corresponde a la máxima de 7.5 kg/cm^2 , por lo que las constantes C_1 y C_2 de los frenos son determinados en las Ecuaciones 9, 10 y 11.

$$M_1/2 = C_1 * p_{max} \quad (9)$$

$$C_1 = \frac{3380/2}{7.5 \times 10^4} = 0.0225 \text{ m}^3 \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{C_1}{r} = \frac{0.0225}{1.94} = 0.0116 \text{ m}^3 \quad (11)$$

A continuación, se determinan las cargas pertenecientes a las zapatas delanteras considerando las características de los frenos como se muestra en la Tabla 5.

Eje delantero:	
Ancho de zapata (b)	0.1778 m
Radio envolvente de leva (r)	0.03 m
Relación t/s	2
Coefficiente de rozamiento tambor-zapata	$\text{tg}\varphi=0.3$
Ángulo de abarque de zapata	$2\alpha=120^\circ$
Radio del tambor (r)	0.2 m
Cilindro de ayuda neumática (s')	0.01935 m^2

Tabla 5 Características de los frenos

Los valores del momento por zapata (M_z), la fuerza tangencial (F_t) y la fuerza normal (F) por zapata, se determinan de las Ecuaciones 12, 13 y 14.

$$M_z = \frac{M_1}{4} = 845 \text{ kg m} \quad (12)$$

$$F_t = \frac{M_z}{r} = \frac{845}{0.2} = 4225 \text{ kg} \quad (13)$$

$$F = \frac{M_z * \frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{\alpha r}{\sin \alpha}} = \frac{845 * \frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{60 * 6.28}{360} * 0.2}$$

$$F = 3491.6 \text{ kg} \quad (14)$$

La Ecuación 15 muestra cómo se determina el esfuerzo normal resultante (N).

$$N = \frac{F}{\text{tg}\varphi} = \frac{3491.6}{0.3} = 11638 \text{ kg} \quad (15)$$

La Ecuación 16 y 17 permiten determinar las superficies consideradas.

Superficie por freno (S).

$$S = 2 * 2br \alpha = 4 * 0.1778 * 0.2 * \frac{60 * 6.28}{360}$$

$$S = 0.1488 \text{ m}^2 \quad (16)$$

Superficie proyectada (S').

$$S' = 2 b r \sin \alpha$$

$$S' = 2 * 0.1778 * 0.2 * \sin 60$$

$$S' = 0.06159 \text{ m}^2 \quad (17)$$

Para determinar la presión sobre zapata (p), se aplica la Ecuación 18.

$$p = \frac{N}{S'} = \frac{11638}{0.06159} = 188953.94 \frac{kg}{m^2} \quad (18)$$

Siguiendo la Ecuación 19, determina la longitud de palanca (l).

$$l = \frac{4 p r' b r s \sin 60}{p' s' t}$$

$$l = \frac{4 * 188953.93 * 0.03 * 0.2 * 0.02 * .86}{2 * 75000 * 0.01935}$$

$$l = 0.239 m \quad (19)$$

Los parámetros previamente calculados permiten determinar las magnitudes con las que empuja el cilindro neumático a la leva y la fuerza transmitida por esta a la zapata: como se muestra en el diagrama del Grafico 3.

Las fuerzas E_1 y E_2 deberán ser diferentes para lograr la máxima fuerza de frenado en ambas zapatas.

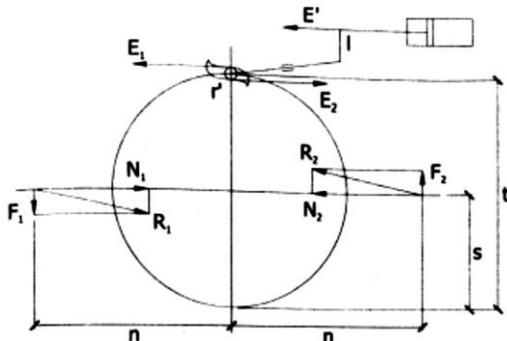


Gráfico 3 Freno accionado por leva fija

En la Ecuación 20, 21 y 22 se muestra como es el cálculo de la presión con la que empuja el cilindro neumático a la leva (p), así como las fuerzas E_1 y E_2 .

$$p = \frac{p' s' l t}{4 r' b r s \sin \alpha}$$

$$p = \frac{75000 * 0.01935 * 0.239 * .323}{4 * 0.03 * 0.1778 * 0.2 * 0.162 * 0.866}$$

$$p = 1.879 \times 10^5 \text{ kg/m}^2 \quad (20)$$

$$E_1 = \frac{2 p b r (s * \sin \alpha - r * \alpha * \text{tg} \phi)}{t + r'}$$

$$E_1 = \frac{2 * 1.879 \times 10^5 * 0.1788 * 0.2 (0.14 - 0.06280)}{0.323 + 0.03}$$

$$E_1 = 2917 \text{ kg} \quad (21)$$

$$E_2 = \frac{2 p b r (s * \sin \alpha - r * \alpha * \text{tg} \phi)}{t + r'}$$

$$E_2 = \frac{2 * 1.879 \times 10^5 * 0.1788 * 0.2 (0.14 - 0.06280)}{0.323 + 0.03}$$

$$E_2 = 9242 \text{ kg} \quad (22)$$

La magnitud de la fuerza E_1 , resulta ser la de mayor interés, ya que representa la fuerza de la leva que se aplica directamente sobre la zapata y que inicia el funcionamiento del sistema de frenado.

Representación de restricciones y conexiones para el análisis por el método de elementos finitos en ANSYS

La determinación de restricciones y conexiones en la geometría estudiada se describe a continuación:

Restricciones

La restricción de la Figura 1 se da cuando el conductor acciona los dispositivos de frenado, a esto la zapata tendrá contacto con la parte interna del tambor para empezar la deceleración.

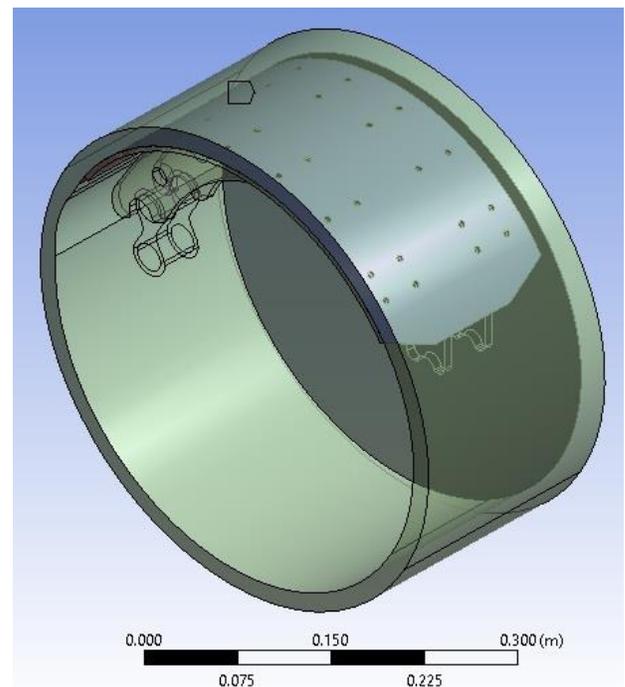


Figura 1 Contacto de no separación entre la cara interna del tambor y la cara base de la zapata

La geometría fija mostrada en la Figura 2, será la del tambor, ya que en una frenada este se detendrá por la fuerza aplicada y la base donde se sostiene la zapata, está fija a todo el mecanismo de frenos.

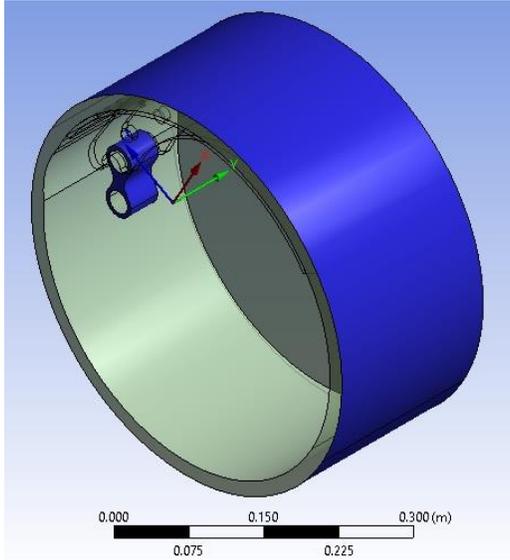


Figura 2 Geometrías fijas

Conexiones

La zapata tiene un pequeño giro el cual es desde el reposo donde la leva no es accionada, hasta donde tiene contacto con el tambor (Figura 3).

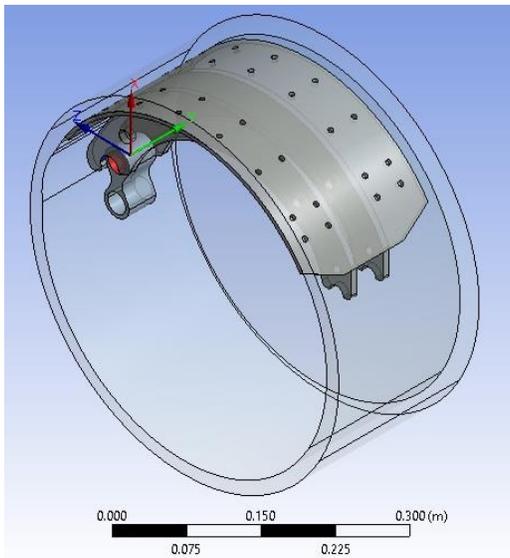


Figura 3 Contacto de revolución entre caras cilíndricas de zapata y buje

Cargas

El lugar donde la leva transmite la fuerza de empuje es en dos bases de la zapata, Por lo que, representamos la magnitud de la fuerza correspondiente a E_1 .

En la Ecuación 23 se muestra la conversión en Newtons de la fuerza E_1 y se divide entre dos (caras donde se apoya la leva) para poder insertar la fuerza en la geometría de la zapata (Figura 4 y 5)

$$E_1 = \frac{2917 \cdot 9.81}{2} = 14307.88 \text{ N} \tag{23}$$

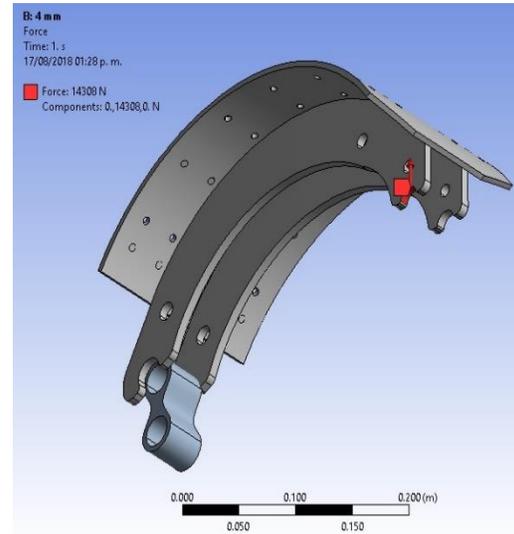


Figura 4 Fuerza 1, 14308 N

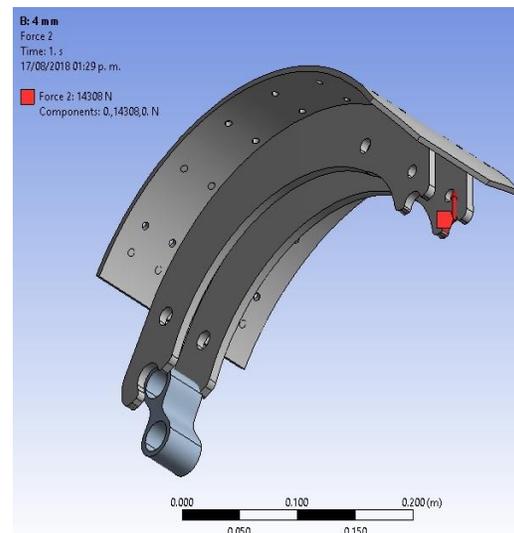


Figura 5 Fuerza 2, 14308 N

Las fuerzas 6 y 7 se propusieron de 200 N, las cuales corresponden a los resortes de retorno (Figura 6 y 7).

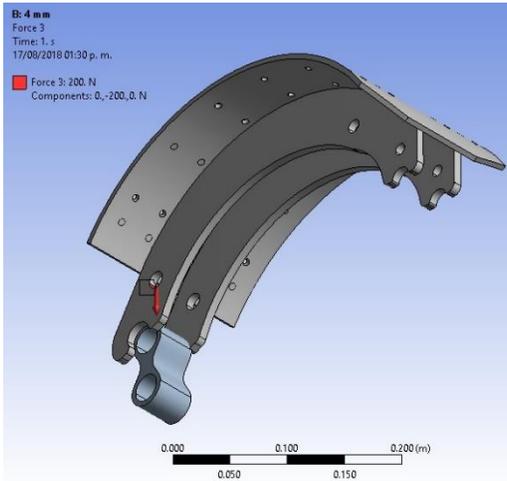


Figura 6 Fuerza 3, 200 N

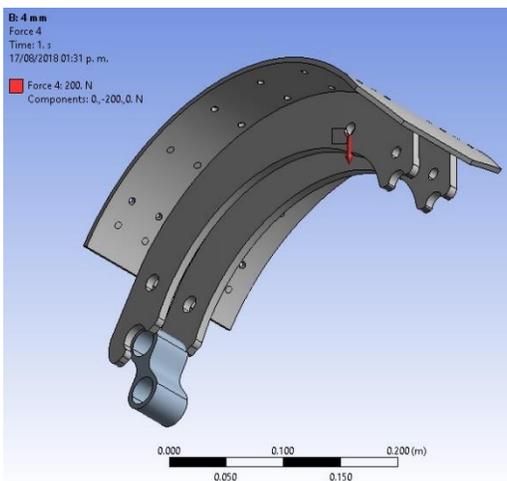


Figura 7 Fuerza 4, 200 N

El momento generado por las fuerzas presentes en la frenada se representa en la superficie de contacto con el tambor (Figura 8), es la magnitud calculada previamente M_z . En la Ecuación 24 se muestra la conversión de este parámetro a Newtons.

$$M_z = 845 \text{ kg m} * 9.8 = 8289.45 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (24)$$

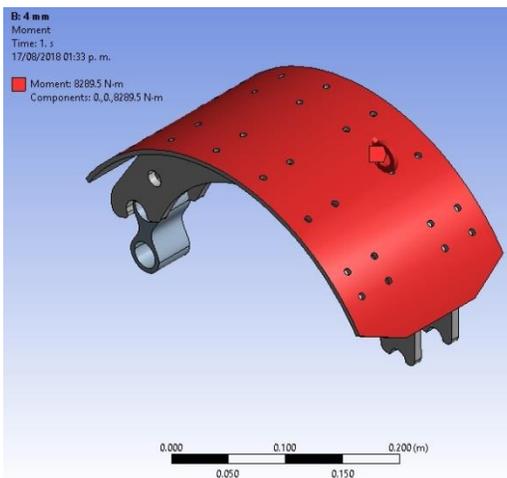


Figura 8 Momento en zapata, 8289.45 N·m

Mallado

El material seleccionado para el análisis de la zapata es un acero AISI 1060.

Utilizando un método de mallado por tetraedros y tamaño de elementos de 4mm, logrando 199459 nodos con 116170 elementos (Figura 9).

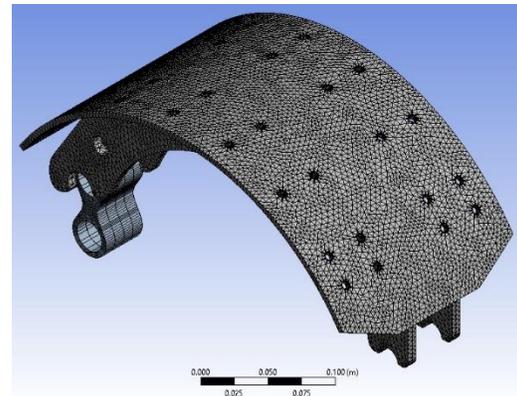


Figura 9 Mallado por elementos finitos

Resultados de análisis

Los esfuerzos equivalentes de Von-Mises producidos por las fuerzas y el momento producidos por el proceso de frenado y deceleración alcanzaron los 373 MPa como lo muestra la Figura 10.

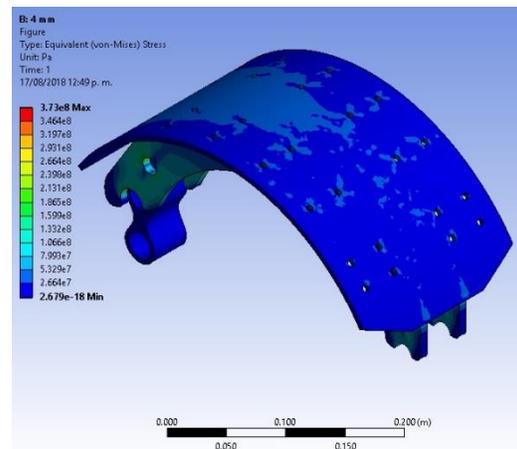


Figura 10 Esfuerzos equivalentes (Von-Mises)

Al no rebasar el límite elástico del material, se obtuvo un factor de seguridad de 1.3 (Figura 11) dando así un resultado positivo en la resistencia del material, considerando que todas las fuerzas calculadas son en base a variables esperadas en una situación máxima de carga y frenado.

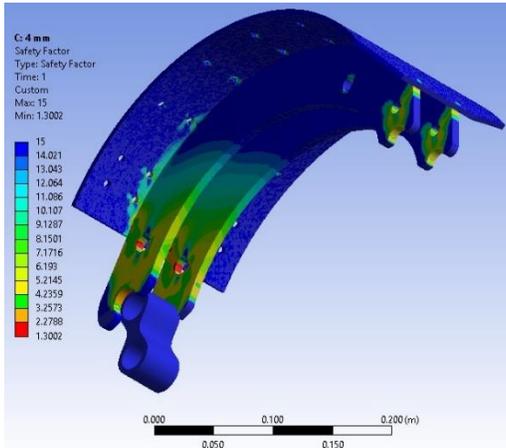


Figura 11 Factor de seguridad

Conclusiones

El análisis numérico por el método de elementos finitos, permite obtener resultados confiables con respecto al comportamiento de una zapata de tipo tambor, esto a partir de la determinación de las cargas y las restricciones que actúan sobre este elemento.

El dimensionamiento adecuado y la caracterización del material, permiten que los parámetros considerados arrojen una aproximación más exacta de los resultados.

El estudio se simplifica al ser un análisis estático y no dinámico, ya que al determinar las cargas puntuales que son aplicadas en las diferentes regiones de la zapata y con base al ensayo de frenado tipo O para motor desembragado, se puede considerar como un sistema estático.

Los resultados obtenidos y el procedimiento desarrollado en este trabajo, sirven de referencia a las áreas de ingeniería de los distintos fabricantes de zapatas de tipo tambor, ya que se pueden evaluar zapatas comerciales ya existentes o se puede considerar para la evaluación de nuevos diseños.

Referencias

Abrão, A. M., et al. "The Influence of Deep Rolling on the Surface Integrity of AISI 1060 High Carbon Steel." *Procedia CIRP*, vol. 13, Elsevier B.V., 2014, pp. 31–36, doi:10.1016/j.procir.2014.04.006.

Vashista, M., and S. Paul. "Correlation between Full Width at Half Maximum (FWHM) of XRD Peak with Residual Stress on Ground Surfaces." *Philosophical Magazine*, vol. 92, no. 33, 2012, pp. 4194–204, doi:10.1080/14786435.2012.704429.

de los Rios, Oscar Javier. "Caracterización de Materiales Alternativos Para Frenos de Fricción." *Scientia et Technica*, vol. 1, no. 52, 2012, pp. 26–31.

Cascajosa, M (2014), "Ingeniería de Vehículos: sistemas y cálculos", Madrid, España: Editorial Alfaomega.

Yang, Dan, et al. *Modal Analysis of Automobile Brake Drum Based on ANSYS Workbench*. Vol. 75, no. Mcei, 2017, pp. 608–12.

Aleem, Mohammed Abdul, et al. Design and Analysis of Drum Brakes. Vol. 1004, no. 1, 2018, pp. 257–69, <http://www.ijatir.org/uploads/541362IJATIR16691-64.pdf>.

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 Ingeniería Tecnológica. 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]

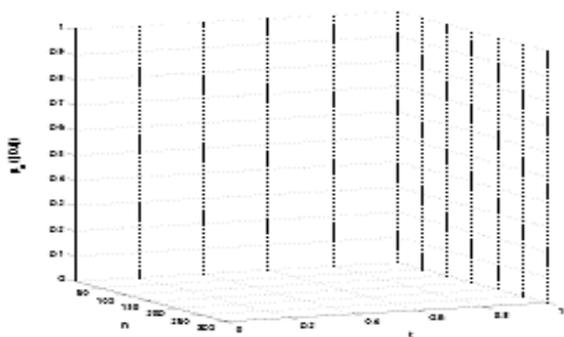


Gráfico 1 Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

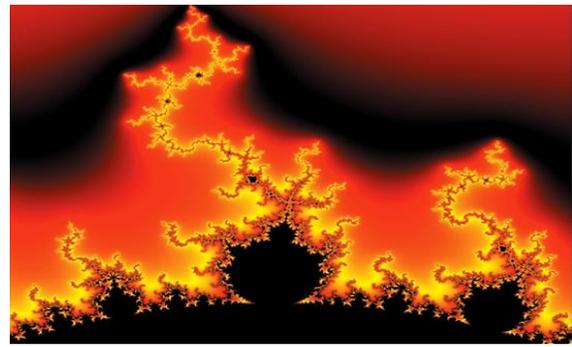


Figura 1 Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

Tabla 1 Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

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

244 - 2 Itzopan Calle. La Florida, Ecatepec Municipio México Estado, 55120 Código postal, MX. Tel: +52 1 55 2024 3918, +52 1 55 6159 2296, +52 1 55 4640 1298; Correo electrónico: contact@ecorfan.org www.ecorfan.org

ECORFAN®

Editora en Jefe

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Redactor Principal

SERRUDO-GONZALES, Javier. BsC

Asistente Editorial

ROSALES-BORBOR, Eleana. BsC

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

Director Editorial

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

Editor Ejecutivo

VARGAS-DELGADO, Oscar. PhD

Editores de Producción

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Administración Empresarial

REYES-VILLAO, Angélica. BsC

Control de Producción

RAMOS-ARANCIBIA Alejandra. BsC

DÍAZ-OCAMPO Javier. BsC

Editores Asociados

OLIVES-MALDONADO, Carlos. MsC

MIRANDA-GARCIA, Marta. PhD

CHIATCHOUA, Cesaire. PhD

SUYO-CRUZ, Gabriel. PhD

CENTENO-ROA, Ramona. MsC

ZAPATA-MONTES, Nery Javier. PhD

ALAS-SOLA, Gilberto Américo. PhD

MARTÍNEZ-HERRERA, Erick Obed. MsC

ILUNGA-MBUYAMBA, Elisée. MsC

IGLESIAS-SUAREZ, Fernando. MsC

VARGAS-DELGADO, Oscar. PhD

Publicidad y Patrocinio

(ECORFAN®- Mexico- Bolivia- Spain- Ecuador- Cameroon- Colombia- El Salvador- Guatemala- Nicaragua- Peru- Paraguay- Democratic Republic of The Congo- 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

244 Itzopan, Ecatepec de Morelos–México.

21 Santa Lucía, CP-5220. Libertadores -Sucre–Bolivia.

38 Matacerquillas, CP-28411. Morazarzal –Madrid-España.

18 Marcial Romero, CP-241550. Avenue, Salinas I - Santa Elena-Ecuador.

1047 La Raza Avenue -Santa Ana, Cusco-Peru.

Boulevard de la Liberté, Immeuble Kassap, CP-5963.Akwa- Douala-Cameroon.

Southwest Avenue, San Sebastian – León-Nicaragua.

6593 Kinshasa 31 – Republique Démocratique du Congo.

San Quentin Avenue, R 1-17 Miralvalle - San Salvador-El Salvador.

16 Kilometro, American Highway, House Terra Alta, D7 Mixco Zona 1-Guatemala.

105 Alberdi Rivarola Captain, CP-2060. Luque City- Paraguay.

Distrito YongHe, Zhongxin, calle 69. Taipei-Taiwán.

Revista de Ingeniería Tecnológica

“Evaluación de la energía solar como alternativa para un sistema de climatización en invernaderos”

GÓMEZ-MERCADO, Abdiel, JUÁREZ-PLATA, Allin, RESÉNDIZ-ROSAS, Celerino y ÁVILA-DÁVILA, Érika

Instituto Tecnológico de Pachuca.

“Análisis del uso de biomasa en sistema alternativo de microgeneración”

BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Jorge, BEDOLLA-HERNÁNDEZ, Marcos, FLORES-LARA, Vicente y MORA-SANTOS, Carlos

Instituto Tecnológico de Apizaco

“Aplicación de sensores inerciales para análisis de marcha humana”

MARTÍNEZ-SOLÍS, Fermín, VERGARA-LIMON, Sergio, RAMÍREZ-BETANCOUR, Reymundo y OLMOS-LÓPEZ, Armando

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

“Análisis numérico por el Método de Elementos Finitos de una zapata de tipo tambor”

VILLAGÓMEZ-Gerardo, HERNÁNDEZ-Bernabé, MARTÍNEZ-Armando y HERNÁNDEZ-Alberto

Universidad Politécnica de Pachuca

