

ISSN 2523-2517

Volumen 2, Número 7 – Octubre – Diciembre - 2018

Revista de Ingeniería Eléctrica

ECORFAN[®]

ECORFAN-Perú

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

SUYO-CRUZ, Gabriel. PhD

Editores de Producción

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Administración Empresarial

REYES-VILLO, Angélica. BsC

Control de Producción

RAMOS-ARANCIBIA Alejandra. BsC

DÍAZ-OCAMPO Javier. BsC

Revista de Ingeniería Eléctrica, Volumen 2, Número 7, de Octubre a Diciembre 2018, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Perú. La Raza Av. 1047 No.- Santa Ana, Cusco-Perú. Postcode: 11500. WEB: www.ecorfan.org/republicofperu, revista@ecorfan.org. Editora en Jefe: RAMOS-ESCAMILLA, María, Co-Editor: SUYO-CRUZ, Gabriel. PhD. ISSN: 2523-2517. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN Imelda, LUNA-SOTO, Vladimir, actualizado al 31 de Diciembre 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 Instituto Nacional de defensa de la competencia y protección de la propiedad intelectual.

Revista de Ingeniería Eléctrica

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 Eléctrica es un Research Journal editado por ECORFAN-México S.C en su Holding con repositorio en Perú, 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 la 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 con enfoques y perspectivas diversos, que contribuyan a la difusión del desarrollo de la Ciencia la Tecnología e Innovación que permitan las argumentaciones relacionadas con la toma de decisiones e incidir en la formulación de las políticas internacionales en el Campo de las 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 Neftalí. 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

PALAFOX - 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 Eléctrica 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 Perú 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 mandará 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-Africa y Oceanía. La identificación de la autoría deberá aparecer únicamente en una primera página eliminable, con el objeto de asegurar que el proceso de Arbitraje sea anónimo y cubra las siguientes etapas: Identificación del Research Journal con su tasa de ocupamiento autoral - Identificación del Autores y Coautores- Detección de Plagio PLAGSCAN - Revisión de Formatos de Autorización y Originalidad-Asignación al Consejo Editorial- Asignación del par de Árbitros Expertos-Notificación de Dictamen-Declaratoria de Observaciones al Autor-Cotejo de Artículo Modificado para Edición-Publicación.

Instrucciones para Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

Área del Conocimiento

Los trabajos deberán ser inéditos y referirse a temas de 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 Ingeniería y Tecnología.

Presentación del contenido

Como primer artículo presentamos, *Análisis exergético y termoeconómico de la Central Termoeléctrica, Villa de Reyes, operando a carga parcial*, por JIMENEZ-GARCIA, Juan A., DURAN-GARCIA, Maria D., CALDERON-NEPAMUCENO, Dora María y TORRES-TOVAR, Rigoberto, con adscripción en la Universidad Autónoma del Estado de México, como segundo artículo presentamos, *Prototipo electrónico de seguimiento solar sin sensores*, por FRANCO-MARTINEZ, David, HERRERA-GOMEZ, Juan Alberto y MONROY-CARREÑO, Roberto, con adscripción en el Centro Tecnológico, Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM, como tercer artículo presentamos, *Generador de energía eléctrica a través de energía limpia*, por PÉREZ-GALINDO, Liliana Eloisa, HERNÁNDEZ-BORJA, Carlos, ALVARADO-GONZÁLEZ, Ángel y LÓPEZ-VICENTE, Jade, con adscripción en la Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, como cuarto artículo presentamos, *Sistema de Control de Iluminación para Aulas*, por ESPEJEL-BLANCO, Daniel Fernando, CHÁVEZ, José Manuel, HOYO-MONTAÑO, José Antonio y HERNÁNDEZ-AGUIRRE, Fredy Alberto, con adscripción en el Instituto Tecnológico de Hermosillo.

Contenido

Artículo	Página
Análisis exergético y termoeconómico de la Central Termoeléctrica, Villa de Reyes, operando a carga parcial JIMENEZ-GARCIA, Juan A., DURAN-GARCIA, Maria D., CALDERON-NEPAMUCENO, Dora María y TORRES-TOVAR, Rigoberto <i>Universidad Autónoma del Estado de México</i>	1-13
Prototipo electrónico de seguimiento solar sin sensores FRANCO-MARTINEZ, David, HERRERA-GOMEZ, Juan Alberto y MONROY-CARREÑO, Roberto <i>Centro Tecnológico, Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM</i>	14-35
Generador de energía eléctrica a través de energía limpia PÉREZ-GALINDO, Liliana Eloisa, HERNÁNDEZ-BORJA, Carlos, ALVARADO-GONZÁLEZ, Ángel y LÓPEZ-VICENTE, Jade <i>Universidad Tecnológica Fidel Velázquez</i>	36-41
Sistema de Control de Iluminación para Aulas ESPEJEL-BLANCO, Daniel Fernando, CHÁVEZ, José Manuel, HOYO-MONTAÑO, José Antonio y HERNÁNDEZ-AGUIRRE, Fredy Alberto <i>Instituto Tecnológico de Hermosillo</i>	42-50

Análisis exergetico y termoeconómico de la Central Termoeléctrica, Villa de Reyes, operando a carga parcial

Exergetic and thermoeconomic analysis of the Villa De Reyes steam Power Plant operating on partial load

JIMENEZ-GARCIA, Juan A.†*, DURAN-GARCIA, Maria D., CALDERON-NEPAMUCENO, Dora María y TORRES-TOVAR, Rigoberto

Universidad Autónoma del Estado de México

ID 1^{er} Autor: Juan A., Jimenez-Garcia / ORC ID: 0000-0002-7303-1284, Researcher ID Thomson: G-2711-2018, CVU CONACYT ID: 241737

ID 1^{er} Coautor: Maria D., Duran-Garcia / ORC ID: 0000-0003-3584-4783, Researcher ID Thomson: J-9111-2013

ID 2^{do} Coautor: Dora María, Calderon-Nepamuceno / ORC ID: 0000-0002-4296-4049, Researcher ID Thomson - B-32220-2016, CVU CONACYT ID: 101812

ID 3^{er} Coautor: Rigoberto, Torres-Tovar / ORC ID: 0000-0001- 8734-3839, Researcher ID Thomson - S-4706-2018, CVU CONACYT ID: 353766

Recibido Julio 27, 2018; Aceptado Noviembre 30, 2018

Resumen

Se presenta el análisis exergetico y termoeconómico de la central termoeléctrica Villa de Reyes de 350 MW, ubicada en San Luis Potosí, México, que emplea combustóleo como combustible. El análisis se realiza a diferentes regímenes de carga incluyendo los de diseño (25%, 50%, 75% y 100%), con el fin de determinar si estos grados de carga son los óptimos para su operación. Se desarrolló un modelo de simulación del comportamiento del ciclo térmico de vapor, la cámara de combustión y transferencia de calor en el generador de vapor, se validó el modelo con los datos de operación conocidos y después se realizó el análisis exergetico y termoeconómico correspondiente. Se determinó que los regímenes de operación de 95.7%, 75.04% y 74.04% son los más eficientes, siendo las máximas eficiencias energética y exergetica del ciclo encontradas del 35.5% y 29% respectivamente. El análisis termoeconómico permitió determinar los elementos con los mayores costos exergeticos que son el hogar del generador de vapor, las superficies de intercambio de calor y las perdidas en el condensador. Se encontró que la eficiencia del ciclo térmico de vapor de la central termoeléctrica es del 35%±1%, para regímenes de carga Altos >74%.

Análisis Exergetico, Termoeconomía, Central Térmica

Abstract

The exergy and thermoeconomic analysis of the 350 MW Villa de Reyes thermoelectric power plant, located in San Luis Potosí, Mexico, which uses fuel oil as fuel, is presented. The analysis is carried out at different loading regimes including those of design (25%, 50%, 75% and 100%); in order to determine if these load levels are optimal for their operation. A simulation model of the steam thermal cycle, the combustion chamber and heat transfer in the steam generator was developed, the model was validated with the known operation data and then the corresponding exergy and thermoeconomic analysis was carried out. It was determined that the operating regimes of 95.7%, 75.04% and 74.04% are the most efficient, with the maximum energy and exergy efficiencies of the cycle found of 35.5% and 29% respectively. The thermoeconomic analysis allowed determining the elements with the highest exergy costs are the home of the steam generator, the heat exchange surfaces and the losses in the condenser. It was found that the thermal steam cycle efficiency of the thermoelectric plant is 35% ± 1%, for high load rates > 74%.

Exergetic Analysis, Thermoeconomics, Thermal Power Plant

Citación: JIMENEZ-GARCIA, Juan A., DURAN-GARCIA, Maria D., CALDERON-NEPAMUCENO, Dora María y TORRES-TOVAR, Rigoberto. Análisis exergetico y termoeconómico de la Central Termoeléctrica, Villa de Reyes, operando a carga parcial. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2018. 2-7: 1-13.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (juan.jimenez.uaem@gmail.com)

Nomenclatura

Símbolo	Nomenclatura	Símbolo	Nomenclatura
A	Pagos anuales (\$)	NTU	Número de unidades de transferencia de calor(-)
$A_{paredes}$	Área de las paredes externas en contacto con los productos de la combustión(m^2)	P_0 P_0	Presión en el estado de Referencia(Pa)
A_s	Superficie de intercambio de calor (m^2)	P	Presión en la cámara de combustión(MPa)
b	Espesor de la pared del tubo, En ecuación (9). (In).	P_r	Presión de gas ideal(Kpa)
B_{cal}	Gasto de combustible(kg/s)	P_{sat}	Número de Prandtl(-)
Bo	Número de Boltzman(-)	PV	Presión de Saturación a Temperatura T(Kpa)
Bu	Número de Bugar efectivo(-)	PVF	Valor Presente de la inversión (USD)
C	Costo de generación (USD/KWh)	Q	Factor de valor presente
\dot{c}	Costo exergetico (USD/h)	\dot{Q}_e	Transferencia de calor(W)
C_{min}	Capacidad calorífica menor de los fluidos de trabajo en un intercambiador de calor(W/K)	\dot{Q}_j	Flujo de calor suministrado(KJ/Kg)
C_p	Capacidad calorífica de los gases de combustión ($Btu/lb \text{ } ^\circ F$), Ecuación (9).	Q_{max}	Transferencia de calor j (W)
C_s	Factor de forma del banco de tubos(-)	Q_s	Calor máximo transferido en el intercambiador de calor(KJ/kg)
C_z	Coefficiente que depende de la cantidad de hileras en el banco de tubos(-)	RC	Flujo de calor de salida del sistema (KJ/Kg)
d	Diámetro nominal del tubo del intercambiador de calor (m)	s	Recalentador
E	Transferencia de exergía especifica (KJ/Kg)	S	Claro de la aleta $s = 1/n - b$, (in). Ec. (9).
E	Exergía (KJ)	S	Porcentaje de Azufre presente en la mezcla de combustóleo
E	Perfil de distribución de temperatura de la aleta(-)	S_f	Entropía de vapor de agua de líquido saturado($KJ/Kg \cdot K$)
\dot{E}_D	Flujo de destrucción de exergía (KJ/Kg)	S_g	Entropía de vapor de agua de vapor saturado($KJ/Kg \cdot K$)
\dot{e}_i	Flujo de exergía del elemento i (KJ/Kg).	SC	Sobre Calentador
FV	Valor futuro de la inversión (USD)	$SPVF$	Serie del factor de valor presente
G	Flujo másico de gases de combustión a través del banco de tubos aletado (kg/s)	T_0	Temperatura del estado de referencia (K)
h_1, h_2, h_{i1}, h_{i2}	Coefficiente de transferencia de calor externo e interno, en el intercambiador de calor, respectivamente(W/m^2K)	T_a	Temperatura adiabática(K)
h_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección en bancos de tubos aletados (W/m^2K)	$T_{c,ent}$	Temperatura de entrada del fluido frio en el intercambiador(K)
h_{conv}	Coefficiente de transferencia de calor por convección externo(W/m^2K)	T_{conta}	Temperatura de la superficie contaminada en el intercambiador(K)
h	Altura de la Aleta, en la ecuación (9) (in).	T_{gases}	Temperatura promedio de los gases en el intercambiador de calor(K)
h_f	Entalpia de vapor de agua de líquido saturado(KJ/kg)	$T_{h,ent}$	Temperatura de entrada del fluido caliente en el intercambiador(K)
h_g	Entalpia de vapor de agua de vapor saturado(KJ/kg)	T''_{hogar}	Temperatura de los productos de la combustión a la salida del hogar(K)
h_{rad}	Coefficiente de transferencia de calor por radiación externo(W/m^2K)	T_j	Temperatura instantánea (K)
h_s	Entalpia de flujo, que sale de un dispositivo o volumen de control(KJ/kg)	t	Tiempo (s)
k	Conductividad térmica de los gases de combustión. Ecuación (9.) ($Btu/ft \text{ } h \text{ } ^\circ F$)	U	Coefficiente de transferencia de calor total(W/m^2K)
k	Coefficiente de disminución de la radiación debida a los gases tri-atómicos($l/m \cdot MPa$)	V	Volumen (m^3)
k	Tasa de interés o tasa de descuento, ecuación 17 y 18. (%)	$(Vc)_{promed}$	Calor específico promedio de los productos de la combustión (kJ/kg)
K_{conts}	Coefficientes de conducción de la capa de ensuciamiento externa, del metal del tubo y de las incrustaciones internas	i_o	
K_m	Costo nivelado de generación (USD/MWh)	\dot{W}	Trasferencia de energía asociada al trabajo (kJ/Kg)
K_{int}	Parámetro del perfil de distribución de la temperatura en la aleta(-)	\bar{W}	Velocidad promedio de los productos de la combustión en el intercambiador de calor(m/s)
LV	Parámetro M(-)	w_b	Trabajo de la bomba de agua
m	Flujo másico (Kg/s)	W_{b1}	Trabajo de la bomba de condensados(KJ)
M	Numero de periodos de la inversión	W_{b2}	Trabajo de la bomba de recirculación(KJ)
n	Número de tubos por fila, para calcular s, en la ecuación (9)	W_{ciclo}	Trabajo termodinámico del ciclo térmico(KJ)
		W_t	Trabajo de la turbina de vapor(KJ/kg)
		W_{t1}	Trabajo de la sección de la turbina de alta presión(KJ)
		W_{t2}	Trabajo de la sección de la turbina de baja presión(KJ)
		x	Calidad de vapor()
		y'	fracción de flujo másico de vapor, extraído de la turbina de alta presión
		y''	fracción de flujo másico de vapor, extraído de la turbina de baja presión

Alfabeto Griego

θ_{hogar}	Temperatura relativa de los gases en salida del hogar(-)
$\Psi_{promedi}$	Valor promedio del coeficiente de eficiencia térmica de las paredes del hogar
φ	Coeficiente de conservación de calor en el hogar(-)
ε_{conta}	Coeficiente de emisividad de las superficies contaminadas(-)
ε	Coeficiente de emisividad de los productos de la combustión(-)
η_{aleta}	Efectividad de la aleta (-)
η_t	Eficiencia de la turbina de vapor (%)
Δh_{gases}	Diferencia de entalpía de los gases de combustión entre dos estados termodinámicos(KJ/Kg)
η_b	Eficiencia de la bomba de agua (%)
η_t	Viscosidad de los gases de combustión (lb/ft h). Ec. (9).
η_t	Coeficiente de uso del intercambiador (-)

Introducción

De acuerdo con el Balance Nacional de Energía (SENER, 2017) el consumo de energía en México en el año 2016 superó, por primera vez, a la producción de energía primaria. Ahora, si bien el consumo de energía per cápita había tenido una tendencia decreciente desde el año 2013, en el 2016 este incrementó en un 6.1% respecto al año anterior.

En lo que respecta a la generación de energía eléctrica, se observó que en el transcurso del 2016 la producción ascendió a 1,153.24 PJ, reflejando un incremento del 3.2% respecto a lo observado durante 2016. Dicha producción se integra por la generación de las centrales eléctricas públicas 54.5%, las centrales de los productores independientes de energía (PIE) 28.5% y permisionarios de autoabastecimiento 17% y nuevos permisionarios de generación 0.3%(SENER, 2017).

El principal insumo energético de estas instalaciones fue el gas seco, registrando el 83.36% del total, seguido del combustóleo con un 13.13%, por lo que se observa que el combustóleo sigue siendo una fuente importante de energía primaria. (SENER, 2017). Ahora bien, el mismo Balance Nacional de Energía, cada año indica que las centrales eléctricas son los centros de transformación que mayores pérdidas energéticas tienen, debido a las fugas energéticas que sufren los equipos en estas instalaciones y a las diferentes transformaciones que sufre la energía.

En este contexto, las centrales térmicas (CT) públicas registran la mayor pérdida, comparadas con los productores independientes de energía.

Así pues, analizando el contexto antes mostrado, se observa la importancia de realizar una optimización sobre los sistemas convencionales de generación de energía eléctrica, particularmente en las CT de Combustóleo, ya que estas aún representan un porcentaje importante de la generación total aun cuando se han implementado políticas para realizar la conversión de las centrales termoeléctricas a gas natural (CFE, 2012a).

Durante la presente investigación se consultaron diversas referencias que estudian centrales convencionales y centrales de ciclo combinado (Habib, 1999; Kwak, 2003; Narula, 1995; Rovira, 2004; Ndlovu, 2014; Zhao, 2012). Sin embargo, en estos estudios, no se consideran las condiciones de quemado del combustible, ni las características geométricas del hogar del generador de vapor, se basan en análisis generales de energía y exergía del ciclo térmico. En el caso particular, se incorporan dichas características al modelo de simulación del comportamiento del ciclo térmico de vapor, lo que permite emplear datos fidedignos para validarlo y de esta manera garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la presente investigación se realiza un análisis exergético y termoeconómico de la central termoeléctrica de Villa de Reyes, para ello se desarrolló un programa de cálculo que simula la operación de la central a diferentes regímenes de carga, basado en un sistema de ecuaciones de los estados termodinámicas en las que se dividió la central termoeléctrica para su estudio. El modelo desarrollado, incorpora ecuaciones de cálculo térmico del hogar del generador de vapor, transferencia de calor en las diferentes secciones del mismo y el análisis del ciclo térmico de vapor.

La central termoeléctrica Villa de Reyes, cuenta con una potencia instalada de 700 MW, con dos unidades de 350 MW. Cada unidad con una potencia nominal de 332.5 MW, con generadores de vapor con capacidad de producción de vapor principal de 325.4 Kg/s a 541°C y 288 Kg/s de vapor recalentado a 541°C.

La presión nominal del domo del generador de vapor es de 183 Bar y la presión de vapor recalentado es de 40 Bar. Se emplea combustóleo con una composición química de 83.64 %C, 11.3% Hidrogeno, 4.2% Azufre y 0.86% N+O. (CFE, 1987), se considera un ciclo Rankine con Recalentamiento y dos Regeneraciones para el análisis, cuyo diagrama simplificado y esquemático, se presenta en la figura 1.

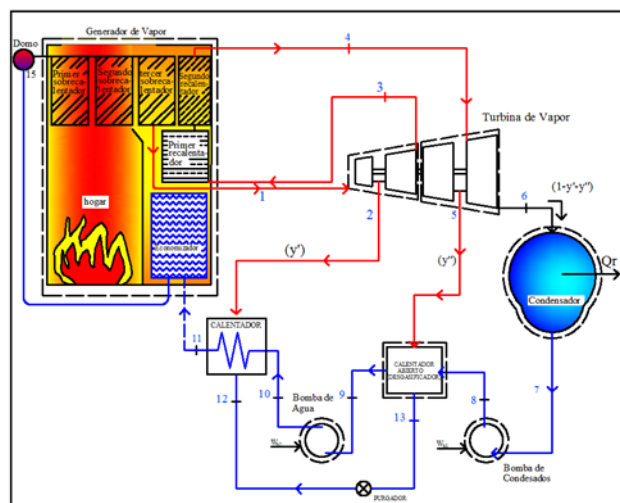


Figura 1 Diagrama esquemático de la central termoeléctrica analizada

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos del modelo termodinámico desarrollado, se validan comparándolos directamente con los datos de operación proporcionados por el fabricante a los regímenes de carga de 100%, 75%, 50% y 25% (CFE, 1987).

Una vez validado el modelo, se realizó el análisis exergético y termoeconómico a diferentes regímenes de operación, con el objetivo de determinar el comportamiento de la central termoeléctrica bajo condiciones de carga parcial y evaluar la generación de irreversibilidades y su correspondiente costo termoeconómico. Esto permite determinar qué factores influyen de manera más importante en la generación de irreversibilidades y en que grados de carga no es deseable la operación debido al incremento en las pérdidas exergéticas. Es importante destacar que este modelo, con pequeñas modificaciones, puede ser aplicado a otras configuraciones de centrales térmicas.

Metodología

El diagrama de operación de la central termoeléctrica Villa de Reyes que opera bajo un ciclo Rankine con Recalentamiento y dos Regeneraciones, se ha simplificado para su análisis y se muestra en la figura 1. Para la validación del modelo, se han rotulado dieciocho nodos para el vapor de agua, listados del 1 (línea de vapor sobrecalentado a turbina de vapor) al 18 (vapor sobrecalentado a la salida del segundo sobrecalentador) y siete nodos para los gases de combustión, listados de la a (salida de los gases de la cámara de combustión) a la g (salida de los gases del economizador).

Para cada elemento de la central termoeléctrica se realizó un análisis energético y exergético del volumen de control, tomando las siguientes consideraciones:

- Cada elemento en el ciclo fue considerado en estado estacionario.
- Las pérdidas de calor externas son consideradas menores al 5%.
- La turbina de vapor y las bombas de agua de alimentación tienen una eficiencia isentrópica del 85%.
- El efecto del cambio en la energía cinética y potencial es despreciable.
- Las variables independientes del generador de vapor son la temperatura del vapor y el flujo másico.
- Se conocen las variables geométricas del generador de vapor.
- Para el ciclo térmico de vapor, la extracción del condensador y su presión es considerada como una variable independiente.
- La geometría de la caldera es conocida, así como sus variables termodinámicas.
- Los valores de las variables independientes se tomaron del manual de operación del generador de vapor (MOGV) (CFE, 1987) para la validación del modelo.

La figura 2, muestra el diagrama de flujo y la secuencia del análisis realizado en la presente investigación; se muestran las variables que se obtienen en cada módulo del programa, diferenciando aquellas que corresponden al vapor y al gas. En los apartados siguientes se explica cada uno de los módulos de cálculo.

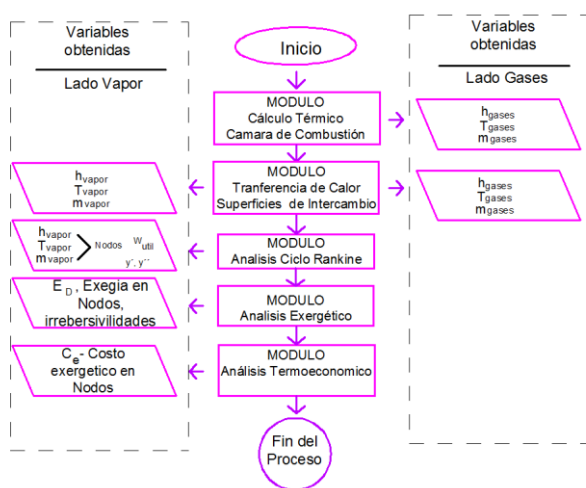


Figura 2 Diagrama de flujo de la metodología presentada.
Fuente: Elaboración Propia

Módulo de análisis térmico del generador de Vapor

En el presente estudio se incorpora el análisis de proceso de la combustión en el hogar del generador de vapor, considerando variables independientes como el flujo de combustible, la relación aire- combustible y la fracción de gases de recirculación, en función de estas variables se determinan las propiedades de los gases de combustión como son su temperatura y flujo másico, lo que permitirá en los apartados siguientes realizar el análisis de la transferencia de calor.

La ecuación principal para el cálculo de intercambio de calor en hogares, conocida como ecuación de Gurvich (CKTI, 1973; Mullinger y Jenkins, 2007), se obtiene de la relación entre la temperatura relativa de los gases en salida del hogar (θ_{hogar}), el número de Boltzman (BO), el número de Buger efectivo ($B\dot{u}$) y el parámetro M , que considera la distribución de temperaturas respecto a la altura del hogar y depende de la posición relativa del núcleo de la llama. Para su cálculo se utiliza la ecuación empírica que se define como (CKTI, 1998):

$$\theta_{hogar} = \frac{T_{hogar}}{T_a} = \frac{BO^{0.6}}{M \cdot BU^{0.3} + BO^{0.6}} \quad (1)$$

La temperatura θ_{hogar} , es la relación entre la temperatura de los gases de salida del hogar T_{hogar} y la temperatura de flama adiabática de los productos de la combustión T_a

Alternativamente, la temperatura de los gases de combustión a la salida del hogar del generador de vapor analizado, se escribe como (CKTI, 1973):

$$T''_{hogar} = \frac{T_a}{1 + M \cdot BU^{0.3} \cdot \left(\frac{5.67 \cdot \psi_{promedio} \cdot A_{paredes} \cdot T_a^3}{10^{11} \cdot \phi B_{calc}(VC)_{promedio}} \right)^{0.6}} \quad (2)$$

Donde, $\psi_{promedio}$ es el valor promedio del coeficiente de eficiencia térmica de las paredes del hogar y $A_{paredes}$ es el área de las paredes del hogar, B_{calc} es el flujo de combustible suministrado a la cámara de combustión del generador de vapor, ϕ es el coeficiente de conservación de calor en el hogar, $(VC)_{promedio}$ es el calor específico promedio de los productos de la combustión para 1 kg de combustóleo.

Las ecuaciones (2), permite también determinar la temperatura del núcleo de la llama T_a , el cual se puede considerar como un parámetro de diseño puesto que esta temperatura determina las propiedades termodinámicas de los gases de combustión. El cálculo de la temperatura de los gases de combustión a la salida del hogar y sus propiedades termodinámicas son necesarias para realizar el cálculo de la transferencia de calor en la zona de sobrecalentadores. Mayor información sobre la metodología se encuentra en Jiménez (2015).

Módulo de transferencia de calor

El proceso del cálculo de la transferencia de calor en la zona de sobrecalentadores se describe en el diagrama de flujo de la figura 3, donde se calcula el coeficiente de transferencia de calor total (U), de cada intercambiador de calor; empleando el método *efectividad-NTU* (Cengel, 2012), para determinar las propiedades de los fluidos de trabajo, se toma en consideración las características geométricas de los intercambiadores (primer sobrecalentador (1SC), segundo sobrecalentador (2do. SC), tercer sobrecalentador (3do. SC) y las propiedades termodinámicas de los fluidos de trabajo a la entrada de los intercambiadores (T_{gas} entrada, T_{vapor} entrada), al final del proceso, se determina la temperatura de vapor principal y la temperatura de los gases de combustión a la salida del generador de vapor (T_{vapor} salida, T_{gases} salida) respectivamente.

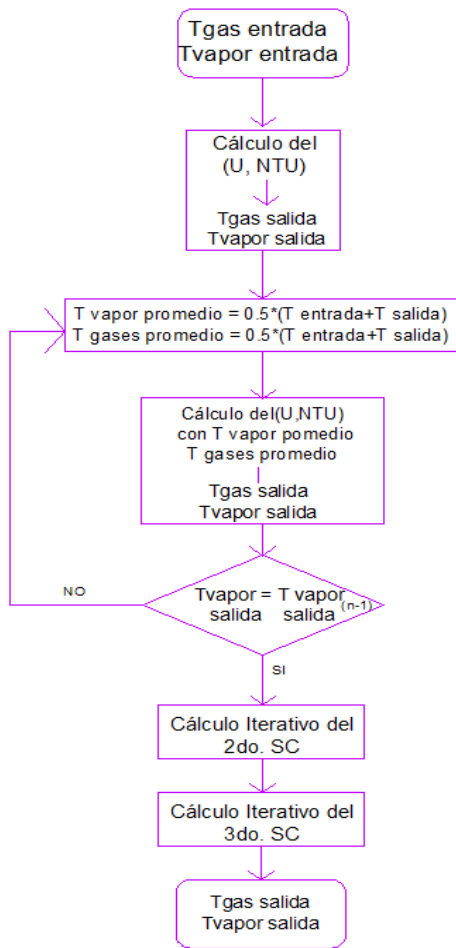


Figura 3 Proceso iterativo para determinar la temperatura a la salida de cada intercambiador de calor
Fuente: Elaboración Propia

Transferencia de calor en sobrecalentadores y recalentadores

En esta sección, se describe la metodología usada para determinar la transferencia de calor que tiene lugar en los sobrecalentadores y recalentadores de vapor del generador de vapor, esto es importante ya que en estos elementos tiene lugar la transferencia de calor por convección y radiación, no se profundiza en la metodología debido a que se emplean métodos convencionales para calcularla, más información puede encontrarse en (Bejan, 2003) y (Jiménez, 2015).

Los intercambiadores de calor que conforman los sobrecalentadores y recalentadores, para este caso, son bancos de tubos semirradiantes, con arreglo cuadrado. El coeficiente de transferencia de calor externo incluye la transferencia de calor por radiación y por convección (h_1), es calculado con la siguiente expresión (Ganapathy, 1982):

$$h_1 = \xi(h_{conv} + h_{rad}) \tag{3}$$

Donde ξ es el coeficiente de uso de superficie de intercambio de calor y h_{conv} , h_{rad} , son los coeficiente de transferencia de calor por convección y radiación externo en el intercambiador de calor. El coeficiente de convección en bancos de tubos lisos, con arreglo en cuadro se calcula con la ecuación (CKTI, 1973):

$$h_{conv} = 0.2 * C_s * C_z * \left(\frac{w}{d}\right)^{0.65} * Pr^{0.33} \tag{4}$$

Donde C_s y C_z son coeficientes que se definen por el factor de forma de los bancos de tubos (Jiménez, 2015).

El coeficiente de transferencia de calor por radiación (h_{rad}), en la ecuación 3, se calcula (CKTI, 1998):

$$h_{rad} = 5.67 \times 10^{-8} \cdot \frac{\epsilon_{cont+1}}{2} \cdot \epsilon \cdot T_{gases}^3 \left(\frac{1 - \left(\frac{T_{conta}}{T_{gases}}\right)}{1 - \left(\frac{T_{conta}}{T_{gases}}\right)} \right) \tag{5}$$

Por su parte, el coeficiente de transferencia de calor por convección desde la superficie interna de los tubos del sobrecalentador hacia el vapor se calcula (CKTI, 1998):

$$h_{conv-int} = 0.023 \frac{K}{d} \left(\frac{w.d}{v}\right)^{0.8} Pr^{0.4} \tag{6}$$

Transferencia de calor en el Economizador

El coeficiente de transferencia de calor total (U), específicamente para economizadores y bancos de tubos aletados, con aletas anulares rectas, ubicados de manera transversal al gas, se puede obtener como (Pysmenny et al., 2007):

$$U = \eta_{aleta} h_c \tag{7}$$

Donde, η_{aleta} es la efectividad de la aleta. h_c , es el coeficiente de transferencia de calor por convección. La efectividad de la aleta (η_{aleta} , puede obtenerse con expresión (Ganapathy, 2003):

$$\eta_{aleta} = 1 - (1 - E) \cdot \frac{A_f}{A_t} \tag{8}$$

Donde, A_s , es el área ocupada por la aleta. A_t , es el área total de transferencia de calor del tubo intercambiador y E , es el perfil de distribución de temperatura de la aleta. El coeficiente de transferencia de calor (h_c) en la ecuación (7) se calcula con la siguiente expresión (Ganapathy, 2003):

$$h_c = 0.295 \left(\frac{G^{0.681}}{d^{0.319}} \right) \left(\frac{K^{0.67} C_p^{0.33}}{\mu^{0.351}} \right) \left(\frac{s^{0.313}}{h^{0.2} b^{0.113}} \right) \quad (9)$$

Donde, k , es la conductividad térmica de los gases de combustión. C_p , es la capacidad calorífica de los gases de combustión μ , es la viscosidad de los gases de combustión, s , es el claro de la aleta $s = 1/n - b$, G representa el caudal másico de gases de combustión a través del banco de tubos.

Análisis del ciclo Rankine con recalentamiento y regeneración

Como ya se mencionado, el ciclo térmico de vapor corresponde a un ciclo Rankine con Recalentamiento y dos regeneraciones. Las correlaciones empleadas fueron las IAWPS, más información acerca de estas, pueden encontrarse en (Durán, 2004; Cengel 2012, Moran & Shapiro 2008). El rendimiento térmico del ciclo Rankine con Recalentamiento y regeneración es (Cengel, 2012):

$$\eta = \frac{W_{t1/m_1} + W_{t2/m_1} - W_{t2/m_1} - W_{b1} - W_{b2}}{Q_e/m_1} \quad (10)$$

Balance de exergía

Un sistema puede alcanzar nuevos estados termodinámicos mediante la interacción de energía en forma de calor y trabajo con el entorno, sin que esta disminuya en su valor neto; en cambio, la variación de exergía de un sistema mediante un proceso no será igual a la exergía neta transferida, ya que la exergía puede ser destruida a causa de las irreversibilidades presentes en el interior del sistema durante el proceso.

Las irreversibilidades se consideran energía que ya no es posible aprovechar de manera útil (exergía perdida). Por lo anterior es importante realizar balances exergéticos de los sistemas de potencia para observar de manera real las pérdidas y poder identificarlas.

La exergía puede ser transferida a través de tres mecanismos: transferencia de exergía asociada con trabajo, transferencia de exergía asociada a la transferencia de calor y transferencia de exergía asociada al flujo másico en los volúmenes de control (Moran, 2005).

Considerando un sistema térmico de n elementos como es una central de potencia. La ecuación del balance de exergía para volumen de control, del elemento n del sistema, se determina con (Moran, 1997):

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) Q_j - \left(W - p_0 \frac{dv}{dt} \right) + \sum_n m_i e_i - \sum_n m_e e_e - E_D \quad (11)$$

En la ecuación (11), los subíndices i y e , denotan la entrada (*int*) y salida (*exit*), de flujo másico respectivamente. Para un estado estacionario, la ecuación (11) se reduce a (Moran Y Shapiro, 2008):

$$0 = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) Q_j - W + \sum m_i e_i - \sum m_e e_e - E_D \quad (12)$$

Despreciando, los efectos de la exergía transferida con la transferencia de calor en el volumen de control con los alrededores Q_j , el intercambio de energía debido al trabajo sobre el volumen de control (W), y factorizando el flujo másico que atraviesa el volumen de control, el balance de exergía puede escribirse como (Moran, 2005):

$$0 = \sum m_i e_i - \sum m_e e_e - E_D \quad (13)$$

Finalmente, la destrucción de exergía para un volumen de control, se expresa como (Moran, 2005):

$$E_D = \sum m m_i e_i - \sum n m_e e_e \quad (14)$$

La ecuación (14), establece la destrucción de exergía para m , flujos másicos que entran y n , flujos que salen del volumen de control. Estas ecuaciones se aplican a cada elemento de la caldera y del ciclo para determinar las pérdidas exergéticas (irreversibilidades) y posteriormente determinar el costo asociado a estas pérdidas.

Análisis Termoeconómico y modelo de costos

En una central termoeléctrica existen valores técnicos y económicos que varían con los años y que se relacionan con el cambio del valor del dinero en el tiempo, por lo que es necesario realizar un análisis económico conocido como costo nivelado de generación que considera los efectos de las inversiones realizadas y el de la inflación al evaluar financieramente los proyectos a lo largo de toda su vida útil.

Determinar el costo nivelado de generación, involucra, tomar en consideración modelos económicos de los posibles escenarios del costo de los combustibles, mano de obra y mantenimiento. El costo nivelado de generación, permite expresar el costo de una variable que cambia cada año, este se expresa como (Ebenhoch, *et al.* 2015):

$$LV = \frac{\sum_{j=1}^n (FV_j)(PVF_j)}{SPVF} \quad (15)$$

Donde, FV es el valor futuro en el año j (generalmente 30 años), a la tasa de descuento k , que para proyectos de CFE, se considera de 12% o 14% anual (CFE, 2012b).

El valor futuro FV se evalúa usando el factor de valor presente PVF , y el valor presente PV , como (Kitto, 2005):

$$FV = \frac{PV}{PFV} \quad (16)$$

Para una serie de pagos anuales uniformes A , para n anualidades, el valor presente PV , se expresa como (Kitto, 2005):

$$PV = A \left(\frac{(1+k)^n}{k(1+k)^n} \right) = A(SPVF) \quad (17)$$

Donde $SPVF$, es la serie del factor de valor presente, que es igual a (Kitto, 2005):

$$SPVF = \left(\frac{(1+k)^n}{k(1+k)^n} \right) \quad (18)$$

Para centrales termoelectricas convencionales que queman combustible como combustible, el costo total de generación de la energía eléctrica para una potencia instalada de 350 MW, es de \$121.44 USD/MWh generador (CFE, 2012b), que es el valor estándar que se emplea en la presente investigación para realizar el análisis termoeconómico.

Validación del modelo

La validación del modelo se realizó, comparando las temperaturas de los fluidos de trabajo calculadas con el modelo de simulación desarrollado contra las temperaturas establecidas por el fabricante en el manual de operación.

Se observó, que las temperatura del vapor de agua sobrecalentado y recalentado calculadas por el modelo de simulación y las establecidas por el fabricante en el manual para los regímenes de operación analizados son muy próximas entre sí, siendo del 2.18% la variación correspondiente la temperatura del vapor sobrecalentado y del 4.25% la de la temperatura del vapor recalentado. La gráfica de variación de la temperatura del vapor de agua calculada para cada uno de los sobrecalentadores, domo de vapor y la temperatura establecida en el manual de operación para cada sobrecalentador, se aprecian en la figura 4.

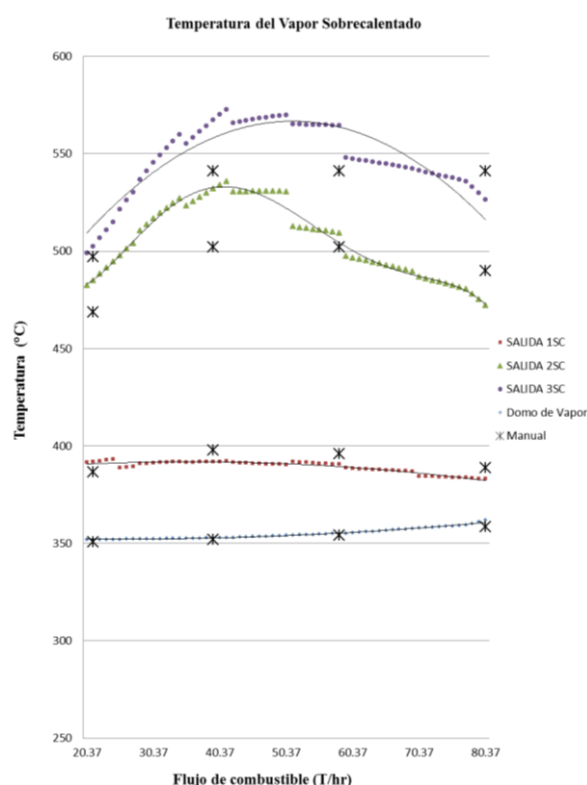


Figura 4 Temperatura de vapor de agua a la salida de los sobrecalentadores y Domo de vapor

Fuente: *Elaboración Propia*

La exactitud de los resultados del modelo, se aprecia de mejor manera en la temperatura de los gases de combustión en cada uno de los nodos calculados por el modelo y su comparación con la temperatura establecida por el fabricante a diferentes regímenes de carga; la variación para el vapor sobrecalentado representa una variación un 8.21%. Lo que se puede apreciar en la figura 5.

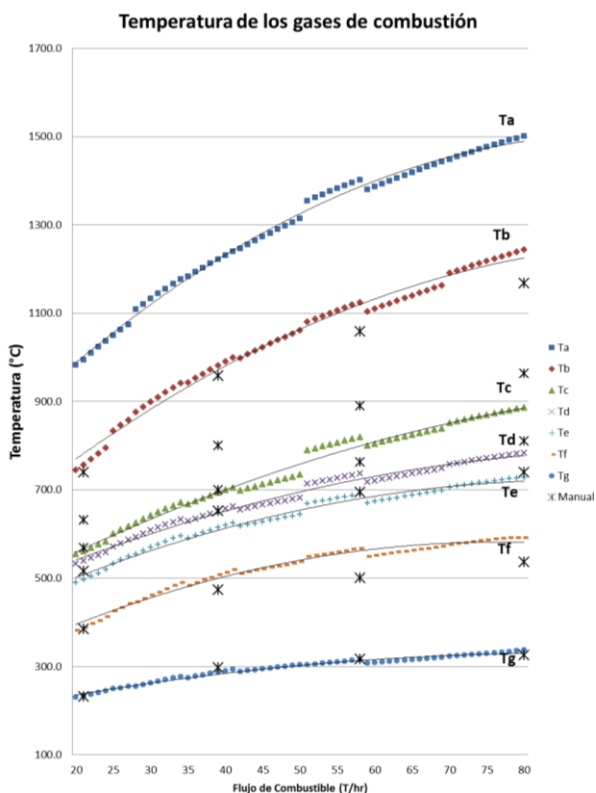


Figura 5 Temperatura de los gases de combustión a la salida de la zona de Sobrecalentadores

Fuente: *Elaboración Propia*

Análisis de resultados

Una vez validado el modelo, se realizó el análisis exergético y termoeconómico de la central termoeléctrica Villa de Reyes.

La figura 6, muestra la destrucción de exergía por tipo de componente (de izquierda a derecha en la gráfica 6.0, se encuentran las superficies de intercambio de calor, turbina, condensador, gases de escape, hogar, otros elementos y el trabajo útil generado), para los regímenes de operación del: 100%, 75%, 50% y 25%, debido a que son los regímenes de operación que se recomiendan para la operación del generador de vapor. No obstante, los resultados a regímenes del 98.4%, 80%, 66.6% y 30% se presentan debido a que se observó que son regímenes de operación más eficientes y presentan menores pérdidas exergéticas en el ciclo.

En la figura 6, se aprecia que la máxima destrucción de exergía, ocurre en el hogar del generador de vapor, esto debido a que el propio proceso de combustión es de hecho irreversible, la exergía destruida, se encuentra en un rango del 31.3 al 40%. La máxima destrucción de exergía, ocurre al régimen de carga del 25% y la mínima al 100% de carga.

Las irreversibilidades producto del propio proceso de intercambio de calor en las superficies intercambiadoras de calor en el generador de vapor, se encuentran en un rango mínimo del 14.4% y máximo del 17.9% que ocurren en los regímenes de carga analizados del 25% y 100% de carga respectivamente, está destrucción de exergía está asociada al enfriamiento y fricción de los productos de la combustión a su paso por los intercambiadores de calor.

Respecto a las irreversibilidades en la turbina de vapor, considerando las etapas de alta y baja presión, la destrucción de exergía máxima presentada es del 7.1% y la mínima del 5.9%, que se presentan en los regímenes de carga analizados del 98.4% y 25% respectivamente. Para el caso del condensador, se aprecia que aproximadamente el 10% de la exergía se destruye en este elemento, esto debido a su propio proceso de disipación de calor con el entorno o sumidero.

En el rango otros de la figura 6.0, se engloban las irreversibilidades producidas por las bombas de agua de alimentación y de recirculación, así como los calentadores de agua de alimentación conocidos como regeneradores en el ciclo térmico de vapor que se encuentran en el rango máximo del 3.7% y un mínimo del 2.5% para el régimen de carga del 98.4% y 25%, respectivamente. Finalmente se aprecia que la exergía destruida con los gases de escape es relativamente pequeña siendo la máxima del 3.3% y la mínima de 1.9%, para los regímenes de carga analizados del 98.4% y 25% respectivamente.

La figura 7, muestra el porcentaje de destrucción de exergía de cada uno de los elementos estudiados a régimen de carga variables, desde el 25% hasta el 100% de carga térmica. En la figura 7, las abreviaturas significan: 1SC; primer sobrecalentador, 2SC; segundo sobrecalentador, 3SC; tercer sobrecalentador, 1RC; primer recalentador, 2RC; segundo recalentador, TAP; turbina de alta presión, TBP: turbina de baja presión.

La figura 8, muestra la eficiencia del ciclo térmico de vapor y la eficiencia exergética, desde la carga del 25% hasta el 100%. Se aprecia que la eficiencia energética del ciclo para los regímenes de carga estudiados se encuentra entre el rango del 30% al 35.3%, encontrando puntos máximos de eficiencia energética en el rango del 75% y 100% de carga, Los dos puntos máximos de eficiencia energética de 35.3% se encuentran en los regímenes de carga de 75.6% y 100%, lo que nos permite establecer que son los regímenes de cargas más eficientes para operar la central termoeléctrica desde el punto de vista termodinámico.

Por otra parte, en la misma figura 8, también se aprecia la eficiencia exergética, que guarda un comportamiento similar con respecto a la eficiencia energética, como ya lo han reportado otros autores (Habib, Said, & Al Zaharna, 1999), la eficiencia energética es mayor que la eficiencia exergética, debido a que la eficiencia exergética mide el potencial máximo de trabajo útil que se le puede obtener a una fuente específica y la eficiencia energética la cantidad de energía respecto a la que entra al sistema y sale como trabajo. La figura 8, muestra que la eficiencia exergética alcanza un punto máximo del 28.65%, y dos puntos máximos de 28.40%, en los regímenes de carga del 74.1%, 63.3% y 51.14% respectivamente.

Respecto al análisis termoeconómico, la tabla 1, muestra los costos termoeconómicos, productos de las irreversibilidades en los elementos de la central termoeléctrica Villa de Reyes para los regímenes de carga extremos del 25% y 100% de carga.

Elemento	Carga Térmica	
	100%	25%
Costo exergético del hogar del generador de vapor (MUSD)	174.6	\$60.
Superficies de intercambio de calor (MUSD)	\$101.2	\$21.5
Disipación de calor en el condensador (MUSD):	\$54.2	\$15.0
Turbina de vapor (MUSD):	\$39.5	\$8.91
Otros elementos (MUSD)	\$19.66	\$3.71
Costo Total de las irreversibilidades (MUSD)	\$409.6	\$112.3

Tabla 1 Costo termoeconómico de los elementos de la central termoeléctrica a los regímenes de carga del 25% y 100%

Fuente: *Elaboración Propia*

Desde el punto de vista termoeconómico, se concluye que las modificaciones en la operación o modernización de la central termoeléctrica deben de estar enfocadas en aquellos elementos que presentan las pérdidas económicas máximas, debido a las irreversibilidades, entre ellos: El hogar del generador de vapor, cuyas irreversibilidades máximas llegan a tener un costo de \$174.6 MUSD/Año de operación.

Las superficies de intercambio de calor que llegan a representar un costo exergético de \$101.2 MUSD/Año de operación.

Después se encuentran los costos debido a la exergía perdida en la disipación de calor en el condensador que llega a ser de \$54.2 MUSD/año de operación.

Las irreversibilidades producidas en la turbina de vapor llegan a ser de \$39.5 MUSD/Año y los otros elementos como lo son, las bombas de agua de alimentación y recirculación y los regeneradores de calor, llegan a tener un costo de \$19.66 MUSD/Año debido a las irreversibilidades en estos equipos.

Conclusiones y recomendaciones

En el presente estudio, se realizó el análisis exergético y energético de la central térmica, para ello se desarrolló un modelo de simulación incluyendo el análisis térmico del hogar del generador de vapor, las superficies de intercambio del generador de vapor y el análisis del ciclo Rankine con recalentamiento y regeneración.

Se estudió la operación de la central térmica a régimen de carga parcial con cálculos iterativos desde el 25% de carga hasta el 100%.

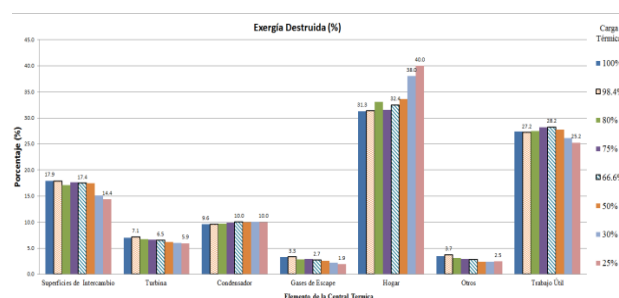


Figura 6 Porcentaje de Exergía Destruída en el ciclo térmico de vapor a diferentes regímenes de carga

Fuente: *Elaboración Propia*

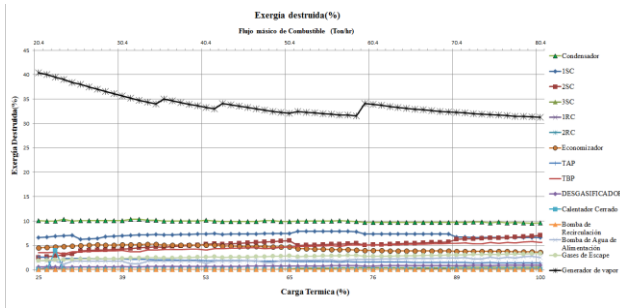


Figura 7 Porcentaje de destrucción de exergía en los elementos de la central termoeléctrica a regímenes de cargas variables

Fuente: Elaboración Propia

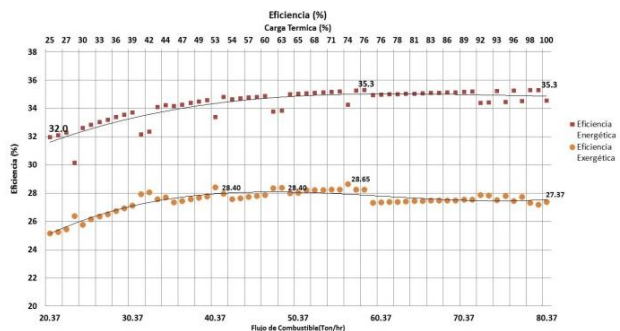


Figura 8 Eficiencia energética y exergética del ciclo térmico de vapor

Fuente: Elaboración propia

Se validó el modelo, con los datos de la temperatura del fluido de trabajo y posteriormente se modificaron los valores de las variables independientes para realizar el análisis energético, exergético y termoeconómico de ciclo térmico de vapor a régimen de carga parcial.

Al realizar la simulación de la operación de la central termoeléctrica a régimen de carga variable, se observó que la eficiencia energética del ciclo se encuentra en el rango del 32% - 35%. La eficiencia, se mantiene en el orden del $35\% \pm 1\%$, desde el régimen de carga 74% hasta el régimen de carga del 100%. Desde el punto de vista energético los tres mejores regímenes de operación óptimos son 100%, 98.4% y 93.32%. Con eficiencias del ciclo térmico de vapor del 35.55%, 35.3% y 35.2%, respectivamente.

No obstante, desde el punto de vista exergético se encontró que la eficiencia exergética máxima del ciclo es de 29.0%, que se presenta para dos regímenes de carga del 95.7% y 74.0%, se encontraron también, dos eficiencias muy cercanas al máximo de 28.65%, para los regímenes de carga del 75.04% y 74.04% respectivamente.

Se determinó que la eficiencia exergética del ciclo, bajo la carga térmica del 100% es de 27.37%, por lo que se concluye, tomando en consideración tanto la eficiencia energética como exergética que es recomendable operar la central a regímenes de carga altos $\geq 74\%$. En específico al 95.7%, 75.04% y 74.04%. Esto en base a los resultados de las simulaciones realizadas.

Se aprecia que la destrucción de exergía no tiene un comportamiento lineal con respecto al régimen de carga, se observa que el hogar del generador de vapor, cuando se opera a regímenes de carga menores (25%), llega a destruir hasta el 40% de exergía suministrada, en cambio para el régimen de carga del 100%, la exergía destruida es menor de 31.2%. Por otra parte, el condensador opera a una presión constante de 0.68 Bar, y mantiene una destrucción de exergía prácticamente constante de alrededor del 10%.

La destrucción de la exergía asociada a la transferencia de calor en las superficies intercambiadoras de calor (sobrecalentadores, recalentadores y economizador) representan entre el 14% y el 18% de la exergía destruida en el ciclo. Los gases de escape de la central termoeléctrica constituyen entre el 2% al 3% de la destrucción de exergía del ciclo.

Los equipos auxiliares como son las bombas de agua de alimentación, bombas de recirculación forzada y precalentadores de agua repercuten entre el 4% y el 2% de la destrucción de la exergía del ciclo.

Se observa también que es preferible operara en grados de operación mayores al 50%, ya que para grados menores las irreversibilidades aumentan considerablemente, principalmente en elementos como el condensador y el generador de vapor.

Con el análisis termoeconómico, se determinó que las pérdidas económicas máximas, asociados a los flujos exergéticos, se presentan en orden de mayor a mejor: el hogar del generador de vapor, las superficies de intercambio de calor, el condensador, la turbina y en los gases de combustión de desecho.

Por lo anterior, las alternativas y las recomendaciones viables para modernizar la central térmica, son aquellas modificaciones que mejoren el proceso de combustión, la eficiencia de transferencia de calor en las superficies de transferencia de calor del generador de vapor y aquellas modificaciones al ciclo térmico de vapor para incrementar la potencia (modificación de la presión de extracción del condensador, presión de recalentado, presión del domo de vapor, número de regeneraciones y mejorar la eficiencia isentrópica de los elementos de la central térmica), que necesitan estudio con mayor profundidad, para los cuales, la presente metodología y simulación será la base para manipular las variables independientes de la central térmica, y determinar a través de un estudio de sensibilidad, el efecto de las variables independientes sobre las eficiencias del ciclo y los costos asociados a la destrucción de exergía en el ciclo.

Referencias

- Bejan, A. & Kraus, A. (2003). *Heat transfer Handbook*, U.S.A.: John Wiley y Sons, Inc.
- Cengel, Y. A. & Boles, M.A. (2012). *Termodinámica* (6 Ed). México: Mc Graw Hill.
- CFE. (2012a). *Works Program and Investment Electricity Sector 2012 - 2016* Mexico D.F: Programming Branch, Planning Coordination, CFE.
- CFE. (2012b). *Costs and Benchmarks for formulating investment projects Electricity Sector*. México D.F.
- CFE. (1987). *Manual del Operación de la central termoeléctrica villa de reyes. San Luis Potosí*, México: Comisión Federal de Electricidad.
- CKTI. (1973). *Thermal calculation of steam generator Regulatory Method* (2 ed). Sankt Petersburg: CKTI.
- CKTI. (1998). *Thermal calculation of steam generator Regulatory Method* (3 ed.) Sankt Petersburg: CKTI.
- Duran M. (2004). *Thermoeconomic optimization of combined cycle gas turbine using genetic algorithms*, Tesis Doctoral, UPM, Madrid 2004.
- Ebenhocha R., Matha D, Marathe S., Cortes P. & Molins C. (2015). Comparative Levelized Cost of Energy Analysis. *Energy Procedia* 80 (2015), 108 – 122.
- Ganapathy, V., (1981). Estimate nonluminous radiation heat transfer coefficients. *Hydrocarbon Processing*, 235.
- Ganapathy, V. (1982). *Applied Heat Transfer. Tulsa OK: Penn Wll Book*.
- Habib, M. A., Said, S. A. & Al-Zaharna, I. (1999). Thermodynamic optimization of reheat regenerative thermal-power plants. *Applied Energy*, 63.
- Jiménez, J. (2015). *Análisis Exergético y Termoeconómico de un sistema de generación de energía, estudio del caso del generador de vapor de 305 MW instalado en la central termoeléctrica Villa de Reyes*. Tesis Doctoral. México. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Kitto, J., & Stultz, S. (2005). *Steam its generation and use* (41 Edition), USA: The Babcock y Wilcox Company.
- Kwak, H. Y., Kim, D. J., & Jeon, J. S. (2003). Exergetic and thermoeconomic analyses of power plants. *Energy*, 28, pp. 343-360.
- Moran M. (1997). Second Law application in thermal system design. In Boehm, R. (Ed.), *Developments in the Design of thermal Systems*. New York: Cambridge University Press.
- Moran, M. & Shapiro H. N. (2008). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. (6th Ed.). USA: John & Sons Inc.
- Moran M. (2005). Engineering Thermodynamics. In: Kreith, F. & Go swami D. Y., (Ed.). *The CRC handbook of Mechanical Engineering*. USA: The CRC press. Ch 2.
- Mullinger P. & Jenkins B. (2008). *Industrial Process Furnaces, Principles and Design*, Ed. Elsevier.
- Narula, R. G. (1995). Salient design considerations for an ideal combined cycle power plant. *Heat Recovery Systems y CHP*, pp. 97-104.

Ndlovu, M. & Majazi, T. (2014). Design and Optimization of Power Plant Utility Systems, *Computer Aided Chemical Engineering*, 34, 567-572.

Rovira A. (2004). *Desarrollo de un Modelo para la Caracterización Termoeconómica de Ciclos Combinados de Turbinas de Gas y de Vapor en Condiciones de Carga Variable*, Tesis Doctoral, UPM, Madrid, 2004.

SENER. (2017). Balance Nacional de Energía 2016. SENER. México.

Zhao, W., Zhang, T. & Tang, X. (2012). Application of Power Electronic Technology in Optimizing the Operation of Thermal Power Plants. *Advances in Mechanical and Electronic Engineering*, 177.

Prototipo electrónico de seguimiento solar sin sensores

Electronic prototype of monitoring solar without sensors

FRANCO-MARTINEZ, David†*, HERRERA-GOMEZ, Juan Alberto y MONROY-CARREÑO, Roberto

Centro Tecnológico, Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM

ID 1^{er} Autor: *David, Franco-Martinez* / CVU CONACYT ID: 69978

ID 1^{er} Coautor: *Juan Alberto, Herrera-Gomez*

ID 2^{do} Coautor: *Roberto, Monroy-Carreño*

Recibido Agosto 20, 2018; Aceptado Noviembre 30, 2018

Resumen

Se presenta el desarrollo de un prototipo electrónico de seguimiento solar que optimiza la captación de la irradiación solar de un concentrador cilíndrico parabólico, sin el uso de sensores fotosensibles para evitar conflictos con el contexto que le rodea y que sea de un costo accesible. Se describen los elementos que conforman el sistema electrónico, así como el proceso de seguimiento solar, también se mencionan las características de los componentes utilizados en el desarrollo del prototipo. Se explica el diseño del circuito electrónico seguidor solar, detallando cada una de las etapas que lo componen, así como el método utilizado para el diseño de un algoritmo que realice la función de seguimiento solar, se presentan los resultados de las simulaciones del software desarrollado. Al analizar los datos de los ángulos medidos con los calculados, se pudo observar que la diferencia era pequeña, el error permisible es de 5° para que este se encuentre en el punto óptimo de radiación solar, por lo cual indica que nuestro sistema satisface las necesidades, además que reduce en 2° el error. Por lo cual el sistema propuesto es funcional y cumple con lo requerido, además mantiene un costo bajo.

Seguidor, Solar, Concentrador

Abstract

The development of an electronic solar tracking prototype that optimizes the capture of solar radiation from a parabolic cylindrical concentrator is presented, without the use of photosensitive sensors to avoid conflicts with the surrounding context and that is of an accessible cost. The elements that make up the electronic system are described, as well as the solar tracking process. The characteristics of the components used in the development of the prototype are also mentioned. The design of the solar electronic follower circuit is explained, detailing each of the stages that compose it, as well as the method used to design an algorithm that performs the solar tracking function. The results of the simulations of the developed software are presented. When analyzing the data of the angles measured with the calculated ones, it could be observed that the difference was small, the permissible error is 5 ° so that it is at the optimal point of solar radiation, which indicates that our system satisfies the needs, plus it reduces the error by 2°. Therefore, the proposed system is functional and complies with the requirements, in addition to maintaining a low cost.

Tracking, Solar, Concentrator

Citación: FRANCO-MARTINEZ, David, HERRERA-GOMEZ, Juan Alberto y MONROY-CARREÑO, Roberto. Prototipo electrónico de seguimiento solar sin sensores. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2018. 2-7: 14-35.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

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

Introducción

Se presenta el desarrollo de un prototipo electrónico de seguimiento solar que optimiza la captación de la irradiación solar de un concentrador cilíndrico parabólico, sin el uso de sensores fotosensibles para evitar conflictos con el contexto que le rodea y que sea de un costo accesible. Tomando en cuenta que los concentradores cilíndrico parabólicos (CCP) son diseñados con estructuras ligeras y de bajo costo, teniendo una buena eficiencia y alto rendimiento. Con este tipo de sistemas se puede obtener razones de concentración geométrica de 216 para seguimiento de un eje, la concentración geométrica, hace referencia a la relación que existe entre el área de abertura del colector y el área de recepción. (Kalogirou, 2004).

Esta es la tecnología con mayor desarrollo para producir calor a temperaturas altas, las cuales superen los 200°C, ya sea para generación de electricidad o para aplicaciones de calor de procesos. (Duffie and Beckman, 1991). Los concentradores cilíndricos parabólicos presentan una composición como la representada en la figura 1.

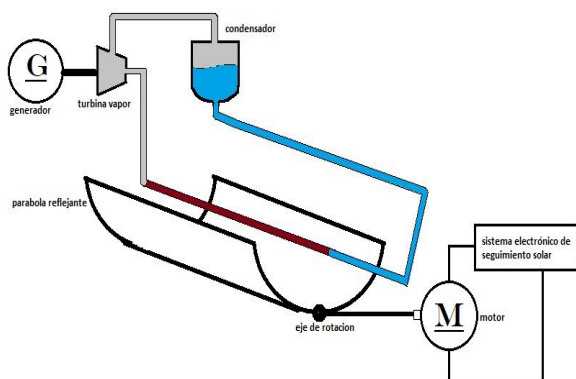


Figura 1 Diagrama del funcionamiento de un concentrador cilíndrico parabólico
Fuente: *Elaboración Propia*

En la anterior figura se observa los componentes de un sistema de concentración solar cilíndrico parabólico. Resalta entre sus componentes la estructura “parábola reflejante” la cual como su nombre lo indica refleja los rayos del sol concentrándolos en el “tubo concentrador” ubicado en el foco de la parábola.

De esta manera el agua contenida en el circuito de tuberías se calentará hasta alcanzar el punto de ebullición y se generará un flujo de vapor el cual se hace pasar a través de la “turbina”, dotando de movimiento a un generador eléctrico, posteriormente el vapor se dirige a un “condensador” el cual permite que el agua regrese a su estado líquido y se repita el ciclo.

Además, se observa que en la parte inferior de la parábola se encuentra un “eje de rotación” sobre el cual gira la parábola a lo largo del día siguiendo la trayectoria del sol, para que este movimiento sea posible es necesario un actuador electro-mecánico en este caso: un “motor” el cual a su vez es controlado por el “sistema electrónico de seguimiento solar” que contiene la configuración y los componentes electrónicos necesarios para realizar dicha función. La figura 2 ilustra los componentes del CCP utilizado en el desarrollo de esta tesis desde una vista frontal del mismo.

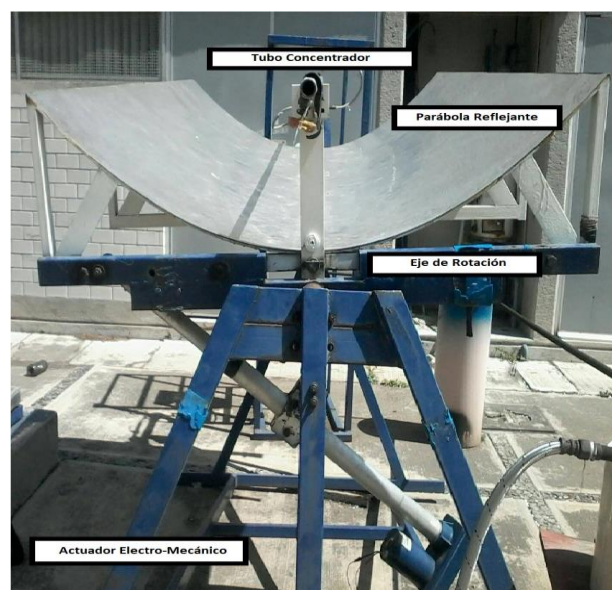


Figura 2 Vista frontal del Concentrador Cilíndrico Parabólico
Fuente: *Elaboración Propia*

El CCP fue construido por alumnos de Ingeniería Mecánica en el Centro Tecnológico Aragón; y cuenta con una parábola reflejante de aluminio, un chasis de hierro y un tubo concentrador de cobre, en la figura se indican puntos relevantes para la implementación del sistema electrónico de seguimiento solar, como el eje de rotación de la parábola y el actuador electro-mecánico, el cual es un motor de corriente directa acoplado mecánicamente a un tornillo sin fin por medio de un motor reductor. Este motor se detalla en capítulos posteriores de esta tesis.

1. Seguidor solar

Ya que los concentradores cilíndricos parabólicos, solo pueden aprovechar la radiación solar directa, exige que estos cuenten con un sistema que les permita el seguimiento de la trayectoria aparente del sol. El sistema más común para el seguimiento solar es un dispositivo que los posiciona en el punto óptimo por medio de un solo eje. (Hernández, Pérez & Bravo, 2009). Los sistemas de seguimiento solar tienen como objetivo, permitir que el colector se sitúe en la posición óptima para captar la mayor irradiación solar, que siga la trayectoria aparente del sol tanto en condiciones climáticas favorables como desfavorables (por ejemplo días nublados), que permita que el concentrador se sitúe en su posición inicial al final del día, y que funcione como un sistema de seguridad, manteniendo el equipo dentro de ciertos límites de movimiento.

Para ello se requiere de un sistema electrónico, a palabra sistema tiene un sinnúmero de interpretaciones, en aspectos generales concuerdan con que es un conjunto de elementos interactuantes con un propósito en común. Por su parte la electrónica ha tenido un gran avance en los últimos años y de alguna forma se ha vuelto vital para la vida cotidiana. Al desarrollar y evolucionar el uso de semiconductores para crear los dispositivos electrónicos discretos de estado sólido, las dimensiones de los sistemas se redujeron y se obtenían velocidades de operación extraordinarias.

Al analizar cualquier diseño de un sistema electrónico con una función específica, se puede representar con el diagrama de la figura 2.4.

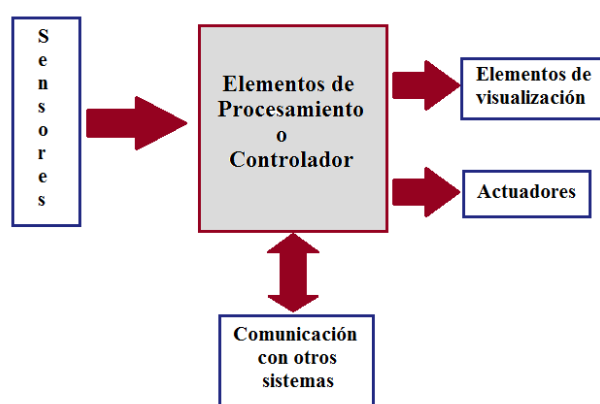


Figura 3 Diagrama a bloques de un Sistema electrónico
Fuente: Adaptado de SANTIAGO E (2012)

La funcionalidad que se le da al sistema viene definida por la necesidad del cliente, al plantear el diseño se toma en cuenta el contexto definido del problema. Al tener que solucionar alguna problemática el sistema tiene que tener entradas que lo relacionen con el medio ambiente lo cual se hace por medio de sensores.

El sensor tiene la finalidad de generar un formato reconocible para los elementos de procesamiento de la información que está en estudio. Tanto los actuadores como los elementos de visualización son las salidas de nuestro sistema. Los elementos de visualización son aquellos que muestran el estado actual y permiten tomar una decisión o recolectar datos. Por su parte los actuadores son aquellos que al analizar la información entrante permiten realizar una acción y modificar el ambiente.

Cuando un sistema es complejo se puede solucionar dividiendo este, de tal forma que se crean subsistemas más sencillos, que por medio de la comunicación permitirá la creación de interrelaciones entre estos. (SANTIAGO E, 2012). Utilizando el seguimiento, la energía total recibida en un día puede ser del orden de un 35% mayor que para el mismo colector estático.

Aunque este rendimiento se ve reducido en los casos de frecuentes nublados y en todas aquellas condiciones climatológicas en las que la relación entre la energía recibida por radiación directa y la recibida por radiación difusa tiende a disminuir, el aumento de energía así conseguido compensa sobradamente en muchos casos prácticos el consumo de energía y el costo de los propios mecanismos de seguimiento.

2. Trabajo previo al diseño del seguidor

De acuerdo con las necesidades del sistema mecánico para el cual se desarrolló el seguidor se deben mencionar los siguientes puntos:

Primero: el sistema de seguimiento solar funciona durante largos periodos de tiempo, de manera completamente autónoma.

Segundo: el sistema cuenta con un actuador electro mecánico el cual provee de movimiento a la parábola en determinados grados de libertad.

Tercero: el dispositivo se encuentra en la intemperie, por lo cual las condiciones atmosféricas afectan directamente al mismo, estas mismas nunca son idóneas y el sistema debe funcionar de manera constante sin importar los eventos climatológicos adversos.

En el diseño del seguidor solar se utilizó la agenda de alba y ocaso, en la cual se predice la fecha de amanecer y ocaso de un punto geográfico en base a sus coordenadas, Utilizando la localización más cercana al centro tecnológico para generar la agenda.

Por lo cual se utilizó la página www.sunearthtools.com (Francia) que es una página la cual cuenta con funciones como calculadoras de retorno de inversión fotovoltaica, calculadora de posición solar, convertidor de medidas y agenda de alba y ocaso, estas herramientas están basadas en las ecuaciones de J.J. Michalsky expuestas en el texto “Astronomical Algorithms, Meeus Jean (1991)”.

Cuando la herramienta terminó de realizar el cálculo genera una serie de tablas en la cual se muestra la hora de amanecer y ocaso de cada día del año, siendo un total de 2 datos por día, 720 datos totales por año, por lo cual se decidió realizar un promedio de las horas por mes para tener una menor cantidad de valores.

Al ser demasiados datos lo ideal es utilizar la media aritmética de los valores para cada mes, y así trabajar con solo 2 datos; la hora de amanecer y de ocaso promedio por mes (Tabla 1 ejemplo del mes de junio 2017).

Promedios junio 2017	
amanecer	ocaso
06:58:19	20:15:38

Tabla 1 Amanecer y ocaso promedio del mes de junio
Fuente: Adaptado de: *Sunearthtools*. (2009)

Posterior al cálculo de la hora de amanecer y ocaso promedio fue necesario el cálculo de la desviación estándar de dicho conjunto de datos, para simplificarlo fue necesario convertir cada dato de hora a segundos para así poder operar con números enteros; utilizando la ecuación para el cálculo de la desviación estándar.

Al sustituir los datos del amanecer para el mes de junio se obtuvo una desviación estándar de **3.399192** segundos, al realizar el proceso para la hora de ocaso se obtuvo **5.835063** segundos, y valores similares para otros conjuntos de datos correspondientes a otros meses del año. Por lo se decidió despreciar estos valores en el algoritmo.

3. Algoritmo de posicionamiento solar

Al conocer la hora de amanecer y ocaso de cada mes se logra proponer un algoritmo que permita saber la posición del sol durante el día, partiendo de la premisa en la que; nuestro concentrador solar parabólico se mueve en un único eje y describiendo una trayectoria de Este a Oeste, podemos determinar que tiene una exposición solar durante el día de 180° .

Lo primero que se necesita conocer son las horas totales de luz solar durante el día, este valor se calcula restando la hora de amanecer de la hora de ocaso.

$$h_{tl} = h_o \quad (1)$$

donde:

h_{tl} : son las horas de luz totales

h_o : la hora de ocaso

h_a : la hora de amanecer

Tomando el caso del mes junio del 2017; el valor de h_{tl} sería el siguiente:

$$h_{tl} = (20:15:38) - (06:58:19)$$

Sustituyendo horas a segundos y minutos a segundos:

$$h_{tl} = (20 * 3600 + 15 * 60 + 38) - (06 * 3600 + 58 * 60 + 19)$$

$$h_{tl} = (72938 \text{ segundos}) - (25099 \text{ segundos})$$

$$h_{tl} = 47839 \text{ segundos}$$

Se determinó que el sol se mueve 180° en función a un observador durante estas horas de luz de la siguiente manera:

$$t_{1^\circ} = \frac{h_{tl}}{180^\circ} \quad (2)$$

donde:

t_{1° : es el tiempo en el cual el sistema debe desplazarse 1°

Por lo cual si se aplican los valores obtenidos para h_{tl} en el ejemplo anterior:

$$t_{1^\circ} = \frac{47839 \text{ s}}{180^\circ}$$

$$t_{1^\circ} = 257.7722 \text{ segundos}$$

Lo siguiente fue conocer la hora actual para poder asignar el ángulo en el cual debería estar posicionado el dispositivo en cada momento del día, por lo cual se deben realizar lecturas del reloj de tiempo real (RTC) conectado al microcontrolador.

Suponiendo que la hora actual es 14:13:06 se realizó la conversión a segundos como se muestra en los ejemplos anteriores, por lo que:

$$h_r = (14 * 3600 + 13 * 60 + 6)$$

$$h_r = (51186 \text{ segundos})$$

Al realizar la lectura del reloj de tiempo real y obtener la fecha y hora actual en segundos es posible continuar con el cálculo del ángulo actual, entonces:

$$\alpha = \frac{h_{to} - h_r}{t_{1^\circ}} \quad (3)$$

Donde:

α es el ángulo en el que debe situarse el dispositivo en la hora actual

h_r es la hora actual leída del RTC

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 3 se obtuvo:

$$\alpha = \frac{72938 \text{ segundos} - 51186 \text{ segundos}}{257.7722^\circ}$$

$$\alpha = \frac{21752 \text{ segundos}}{257.7722^\circ}$$

$$\alpha = \frac{21752 \text{ segundos}}{257.7722^\circ}$$

$$\alpha = 84.3853^\circ$$

Finalmente al conocer el ángulo generado por el algoritmo anteriormente descrito, se pudo utilizar las diversas funciones del microcontrolador para poder proveer al dispositivo mecánico de un control de posición; el cual permita seguir la trayectoria solar a lo largo del día.

4. Diseño del seguidor solar

Una vez desarrollado el algoritmo el cual regula el funcionamiento del dispositivo microcontrolado se propone el siguiente sistema por etapas.

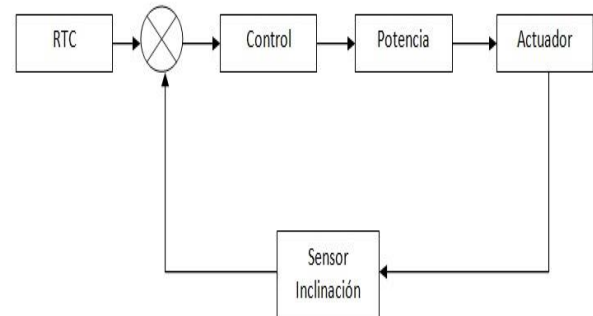


Figura 4 Diagrama de bloques del sistema electrónico de seguimiento solar

Fuente: *Elaboración Propia*

En la figura 4 se observa que el reloj de tiempo real y el sensor de posición proveen de variables, con las cuales la etapa de control realiza las configuraciones y cálculos necesarios para proveer de señales de control a la etapa de potencia, la cual que dota de movimiento al actuador electro-mecánico.

4.1. Etapa de control

Esta es la etapa en la cual se realizan los cálculos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema, durante el desarrollo del proyecto se indican una serie de puntos relacionadas a esta etapa, los cuales determinarían la composición del sistema.

- El sistema necesita un dispositivo el cual provea de la hora y fecha actual para el cálculo del ángulo.
- El dispositivo debe contar con una interfase simple que permita la configuración del mismo.
- El sistema debe de proveer señales de control las cuales permitan elegir la dirección de giro de un motor de CD.
- Para obtener la inclinación de la parábola es necesario utilizar un sensor de inclinación.

Por lo anterior es posible invertir el giro del motor para determinar el ángulo en el cual se posicionara la parábola haciendo uso de 2 pines de entrada y salida digital del microcontrolador y de esta manera elegir la dirección en la que gira el motor con señales digitales las cuales cumplan con la siguiente tabla de verdad. (Tabla 2).

Salida microcontrolador		Acción del motor
Pin 0	Pin 1	
0	0	detenido
0	1	Giro izquierda
1	0	Giro derecha

Tabla 2 Tabla de funcionamiento del motor

Fuente: *Elaboración Propia*

Como se observa en la tabla anterior se describe un funcionamiento característico en el control de motores de corriente continua por lo cual lo adecuado es la implementación de un puente H, el cual es un circuito que nos permite controlar la dirección de un motor de estas cualidades con señales digitales de baja corriente. El cuarto punto indica la necesidad de conocer la posición de la parabola para poder realizar una comparación entre el ángulo que provee el algoritmo y el ángulo actual del dispositivo mecánico; y así poder elegir la dirección en la que debe girar el motor, hasta ajustarse en un punto en el cual estos ángulos sean iguales.

Existen múltiples dispositivos los cuales cumplen la función de sensor de inclinación, los cuales pueden ser analógicos o digitales, durante el proceso de desarrollo del proyecto se consideraron múltiples opciones, como sistemas resistivos acoplados mecánicamente al eje de rotación de la parabola del concentrador solar, esta opción fue considerada para el desarrollo de los primeros prototipos del circuito y la realización de pruebas de funcionamiento.

Para esto se optó por el uso de un sensor de aceleración micromecanizado capacitivo, el cual auxiliado de las funciones del microcontrolador como el convertidor Analógico-Digital y los puertos digitales del mismo, nos permita realizar el control de la posición del eje rotacional del mecanismo. Por último atendiendo a los cuatro puntos anteriores se utilizó el microcontrolador ATMEGA328P, debido a que cuenta con periféricos como: el puerto I^2C ubicado en los pines 4 y 5 del puerto C el cual nos permitiera conectar el RTC, así mismo en dicho puerto conectaremos las terminales de nuestro sensor de posición; en los canales 0 y 1 del convertidor analógico a digital, el puerto B en el cual conectaremos el Display LCD y el puerto D en el cual conectaremos los controles que nos permitan modificar la fecha y la hora del RTC y las salidas que nos permitan controlar la dirección del giro del motor. Lo anterior se muestra en la siguiente figura 5.

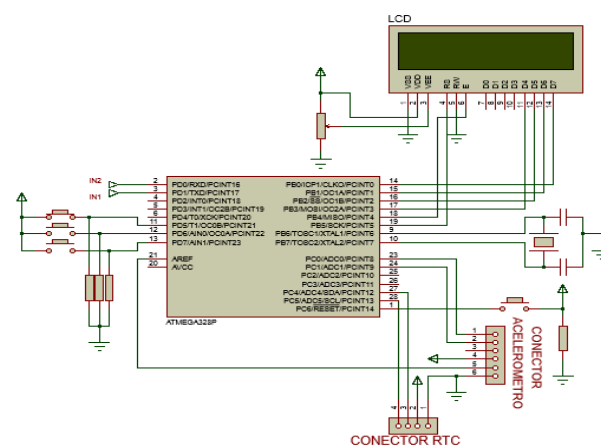


Figura 5 Diagrama de conexiones de la etapa de control

Fuente: *Elaboración Propia*

Controles

Los pines 11 (PD5), 12 (PD6) y 13 (PD7) funcionan como entradas digitales y a estas se conecta al módulo de controles (figura 7), conformado por pulsadores “push button” normalmente abiertos (B1, B2, B3), conectados a la fuente de alimentación Vcc. Cada uno de estos cuenta en su respectiva resistencia de “PULLDOWN” (RB1, RB2, RB3), que regulan la corriente que será recibida por los pines digitales del microcontrolador, cuando uno de estos pulsadores es presionado.

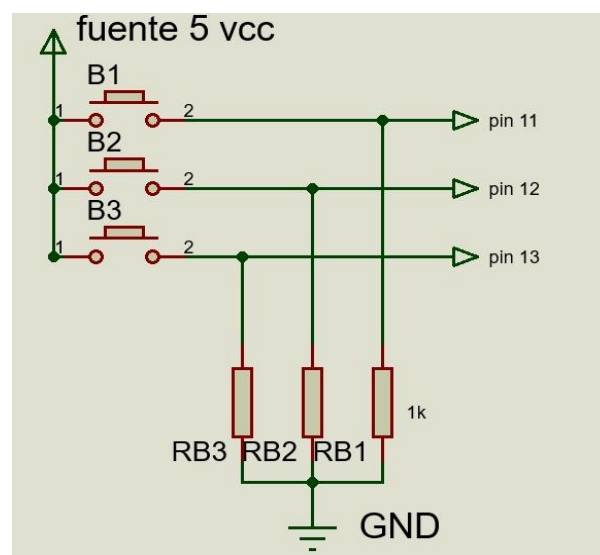


Figura 6 Diagrama de conexiones de los controles

Fuente: *Elaboración Propia*

4.2. Etapa de potencia

El microcontrolador cuenta con una salida de corriente en los pines de entrada y salida de 40 mA por lo cual al ser una corriente insuficiente para energizar el actuador electro-mecánico del dispositivo.

Es necesario implementar un circuito el cual suministre voltaje y corriente en magnitudes superiores a las que utiliza el microcontrolador, y necesarias para el funcionamiento del motor. Para ello se debe utilizar circuitos más robustos como transistores de potencia, transistores MOSFET, darlington, relevadores, etc.

Puente H

Un puente h es un circuito el cual permite determinar la dirección de giro de un motor eléctrico, existen circuitos integrados que cumplen con esta función, los cuales cuentan con uno o más puentes h dentro de ellos, algunos de estos son los circuitos L293d y el L298 los cuales permiten controlar motores con corrientes nominales de 2 y 4 amperes respectivamente, o bien pueden ser construidos con dispositivos como transistores (figura 7) o inclusive relevadores.

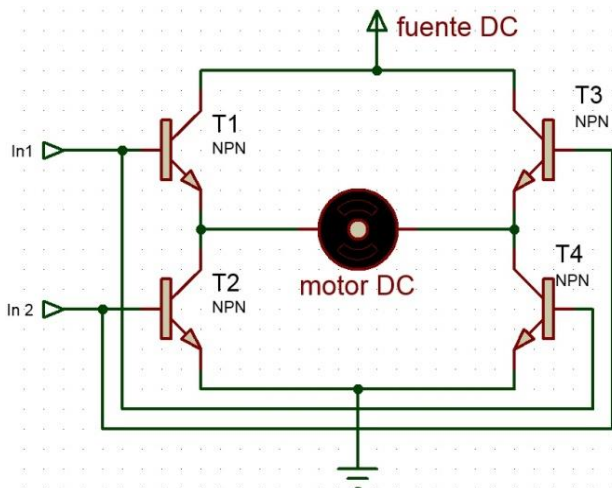


Figura 7 Circuito característico de un puente h realizado con transistores npn

Fuente: *Elaboración Propia*

El circuito con transistores permite determinar el sentido en el que energizamos el motor; al administrar un voltaje lógico en la entrada In1 los transistores T1 y T4 pasarán a modo saturación mientras T3 y T2 se mantendrán en corte permitiendo el giro del motor hacia el lado izquierdo, y al alimentar las bases de los transistores T2 y T3 estos pasarán a saturación mientras T1 y T4 se mantendrán en corte permitiendo el flujo de la corriente en sentido contrario, haciendo girar el motor hacia la derecha.

Puente H L298

Durante el desarrollo del prototipo se usaron ambos tipos de puentes h, de manera experimental se implementó una etapa de potencia basada en el circuito integrado L298 (Figura 8) el cual permite operar con corrientes de 2 amperes conectado de manera normal y hasta 4 amperes conectando en paralelo los 2 puentes con los que cuenta el circuito.

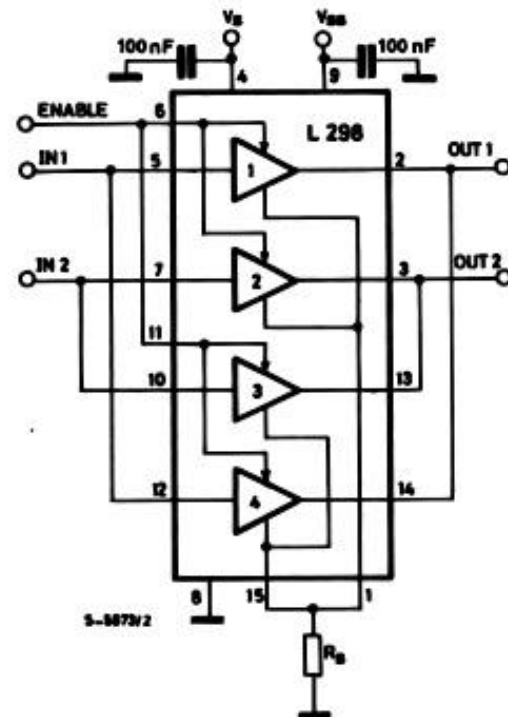


Figura 8 Circuito L298 conectado en paralelo para trabajar mayores corrientes

Adaptado de: *STMicroelectronics. (2000)*

Sin embargo durante la construcción y la evaluación de esta etapa, se encontraron errores de diseño los cuales fueron cruciales para determinar la opción de utilizar una etapa de potencia basada en componentes electrónicos de potencia, por lo cual se implementó un puente h con transistores darlington de propósito general TIP 142.

Tomando en cuenta el funcionamiento del puente h ilustrado en la figura 7 y las características eléctricas del motor se realizó el circuito de potencia con las características mostradas en la Figura 9

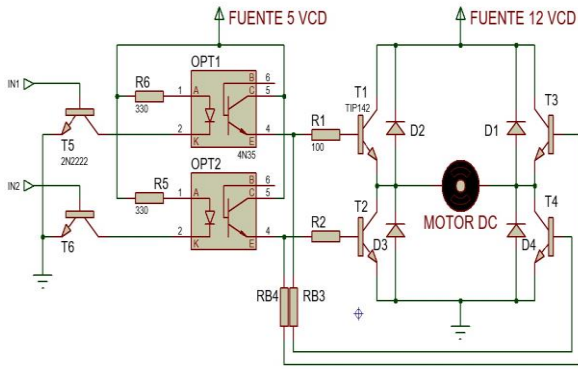


Figura 9 Diseño esquemático de la etapa de potencia

Fuente: Elaboración Propia

Al alimentar el motor directamente con una fuente se realizaron pruebas para conocer la corriente nominal del mismo, estas lecturas se realizaron con un multímetro conectado como amperímetro en serie entre la fuente de alimentación y el motor, al cerrar el circuito obtuvimos una corriente de 1.6 Amperes esto es comparable al valor obtenido bajo la ley de watt de la cual:

$$P = V \cdot I \tag{4}$$

Donde:

P es la potencia en watts

V el voltaje en volts

I la corriente en amperes

Despejando y sustituyendo por los valores de nuestro motor

$$I = \frac{P}{V} = \frac{18 \text{ watts}}{12 \text{ volts}} = 1.5 \text{ Amper} \tag{5}$$

Sin embargo este valor de corriente se eleva hasta 3 veces durante el arranque y los cambios de dirección del motor, así mismo cuando el motor presenta una carga mecánica alta por lo cual suponemos una corriente de arranque de 4.5 Amper. Al realizar pruebas para encontrar la corriente de arranque durante los cambios de dirección del motor se conectó de nuevo el amperímetro entre el motor y la fuente, esta vez elegimos la opción MAX/MIN del multímetro para determinar el valor más grande de corriente que circule en la bobina del estator del motor obteniendo una corriente de 5.15 Amper.

De esta manera se comprueba que no es posible utilizar un puente h que permita operar con corrientes menores a 6 Amperes, por lo cual se descarto la idea de utilizar el circuito L298 y se justifica la necesidad de usar transistores de potencia tales como el TIP 142 (Figura 10), el cual permite la circulación de corriente del colector a emisor de hasta 10 Amper, y un voltaje colector emisor de hasta 100 volts de corriente directa a continuación se presenta la tabla de valores máximos (Tabla 3).

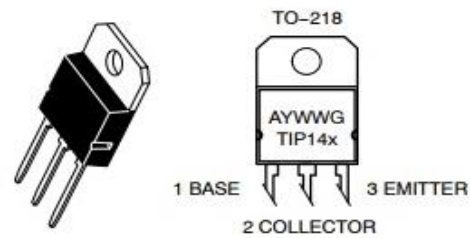


Figura 10 Transistor tip142 con distribución de pines
Adaptado de: ON Semiconductor (2012)

Rating	Symbol	TIP140 TIP145	TIP141 TIP146	TIP142 TIP147	Unit
Collector- Emitter Voltage	V_{CEO}	60	80	100	V_{dc}
Collector-Base Voltage	V_{EB}	60	80	100	V_{dc}
Emitter-Base Voltage	V_{EB}	5.0			V_{dc}
Collector Current Continuous	I_C	10			A_{dc}
Peak		15			
Base Current-Continuous	I_B	0.5			A_{dc}
Total Power Dissipation @ $T_c = 25^\circ C$	P_D	1.25			W
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_j, T_{stg}	-65 to +150			$^\circ C$

Tabla 3 Valores de corriente y voltaje máximos del tip 142
Adaptado de: ON Semiconductor (2012)

Mientras que la corriente de base como podemos observar es de 0.5 Amper por lo cual no es posible conectar el transistor en configuración colector común debido a la elevada corriente que suministra la fuente de 12 Volts, a si mismo la corriente suministrada por los pines digitales del microcontrolador es insuficiente. Esto hace necesaria la utilización de un circuito de acoplamiento el cual permita activar la base de transistor con la corriente de la fuente de nuestro circuito. El cálculo de la resistencia de base se realizó de acuerdo a esta ecuación:

$$R_b = \frac{V_b - 0.7}{I_c / h_{fe}} \quad (6)$$

Donde:

V_b es el voltaje en la base

I_c es la corriente de colector

h_{fe} es la ganancia de corriente

Al sustituir los datos de la hoja de datos en la ecuación y sabiendo que el voltaje aplicado a la base será de 5v debido a que es la fuente del circuito la que alimentará la base, tenemos que:

$$R_b = \frac{5 \text{ Volts} - 0.7}{10 \text{ Amper} / 500} = 215 \text{ Ohms} \quad (7)$$

Sin embargo como se observa en la figura 10 la corriente que entra en la base del transistor se divide entre 2 resistencias ya que para activar el puente “h” en una dirección es necesario alimentar 2 transistores, formando de esta manera un divisor de corriente, donde la corriente total es igual a la suma de las corrientes en R1 y R3 para el par de transistores T1 y T3, y R2 junto a R4 para los transistores R2 y R4 .

Para solucionar esto, se dividió el valor de la resistencia de base para cada transistor de manera que los 215 Ohms calculados para la resistencia de base ahora se convierten en 100 ohms para cada transistor debido a que 100 ohms es el valor comercial más cercano a los ideales 107.5 ohms. La ganancia de corriente se indica en la hoja de datos del transistor y es igual a 500, para valores de corriente de colector de 10 Amper y se muestra en la siguiente tabla 3.5.

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
DC current Gain ($I_c = 5.0 \text{ A}$, $V_{ce} = 4.0\text{V}$) ($I_c = 10.0 \text{ A}$, $V_{ce} = 4.0\text{V}$)	h_{FE}	1000 500	---	---	---
Colector-Emitter Saturation Voltage ($I_c = 5.0 \text{ A}$, $I_B = 10\text{mA}$) ($I_c = 10 \text{ A}$, $I_B = 40\text{mA}$)	$V_{CE(sat)}$	---	---	2.0 3.0	Vdc
Base-Emitter Saturation Voltage ($I_c = 10 \text{ A}$, $I_B = 40\text{mA}$)	$V_{BE(sat)}$	---	---	3.5	Vdc
Base-Emitter On Voltage ($I_c = 10 \text{ A}$, $V_{CE} = 4.0\text{vdc}$)	$V_{BE(On)}$	---	---	3.0	Vdc

Tabla 4 Valores de corriente y voltaje de encendido del tip 142

Adaptado de: ON Semiconductor (2012)

4.3. Optoacoplamiento

En la figura 10 se observa que entre la entrada digital y las terminales base de los transistores del puente “h” se encuentran 2 circuitos OPT1 y OPT2, estos son circuitos 4N35 optoacopladores NPN, estos circuitos aíslan la etapa de potencia de la etapa de control mediante un aislamiento óptico, los pines 1 y 2 son el ánodo y cátodo (respectivamente) de un led infrarrojo, y es necesario conectar una resistencia menor o igual a 1 kΩ entre el pin 1 y Vcc, y de esta manera reducir la corriente que circula a través del led infrarrojo asegurando que no sufra daños. mientras que los pines 4 y 5 son emisor y colector de un fototransistor NPN.

El pin 3 no se conecta así como el pin 6, esta disposición de pines se muestra en la figura 11.

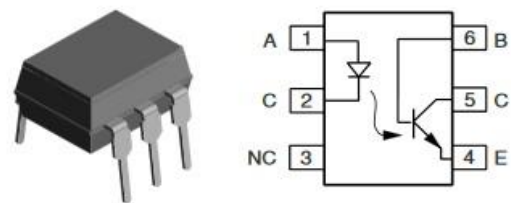


Figura 11 Optoacoplador 4n35 con distribución de pines Adaptado de: VISHAY INTERTECHNOLOGY (2017)

En la figura 8 que muestra el diagrama de la etapa de potencia se muestran 2 transistores de propósito general T5 y T6, dispuestos a la izquierda de los optoacopladores OPT1 y OPT2, estos son transistores BJT 2n2222, los cuales cumplen la función de interruptores, permitiendo el flujo de la corriente proveniente de la fuente de 5 Vcc a través del led infrarrojo correspondiente a la entrada del optoacoplador 4n35, la base de los transistores se conecta a los pines 2 y 3 del microcontrolador, ya que la corriente de salida de dichos pines es de 40 mA no es necesario agregar resistencias de base.

En la figura 3.12 se muestra la disposición de pines y el encapsulado característico de dichos transistores. La figura 9 indica que; el Colector (pin 3) se conecta al pin 2 del optoacoplador 4n35, la Base (pin 2) se conecta a la salida (pin 2 y pin 3) del microcontrolador y el Emisor (pin 1) se conecta a tierra (GND), de esta manera al recibir una señal correspondiente a un UNO lógico el transistor pasará de corte a saturación y permitirá que el led infrarrojo del circuito 4n35 sea energizado.

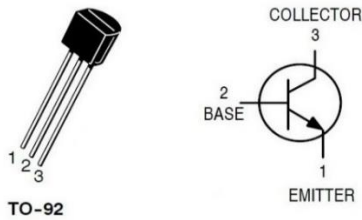


Figura 12 Transistor 2n2222 con distribución de pines
Adaptado de: ON Semiconductor (2013)

4.4. El Sensor de Inclinación

La etapa de control y la etapa de potencia conjuntamente determinan la dirección en la cual el motor gira, mientras la etapa de potencia alimenta con corriente y voltaje suficientes al actuador; la etapa de control asigna mediante salidas digitales la dirección que el dispositivo seguirá, sin embargo es necesario conocer la inclinación en la cual se encuentra el eje de rotación de la parábola y compararlo con el ángulo generado por el algoritmo de posicionamiento, y así cuando estos sean iguales detener el giro del motor ajustando la parábola al ángulo deseado.

El primer prototipo de sensor utilizado consistía en un potenciómetro rotativo, el cual se conectaría en una de las entradas analógicas del módulo ADC del microcontrolador, mientras el componente mecánico rotativo del mismo se acoplaría al eje de rotación de la parábola (figura 13) mientras el chasis del potenciómetro se encontraría fijo al armazón del concentrador solar, de esta manera el giro de la parábola permitiría variar los valores de voltaje leídos por el microcontrolador, y sabiendo que la salida del ADC entrega un dato de 10 bits, que numericamente puede tener valores de 0 a 1023 bits. se describe en este punto un arreglo matemático sencillo para interpretar los valores entregados por el potenciómetro.



Figura 13 Eje de rotación del concentrador solar parabólico (círculo rojo)
Fuente: Elaboración Propia

Un potenciómetro comercial cuenta con 3 pines, 2 de estos son los extremos de una resistencia de carbono esta es la parte fija del potenciómetro mientras que el pin intermedio suele ser el elemento rotacional, el cual se desplaza a través de la resistencia fija, de esta manera tenemos un divisor de voltaje entre los 3 pines del potenciómetro, algunos fabricantes especifican en sus hojas de datos el ángulo de rotación mecánica, y varía de acuerdo al modelo.



Figura 14 Representación esquemática del giro de un potenciómetro

Fuente: Elaboración Propia

Teniendo así que un potenciómetro genérico cuenta con una rotación aproximada de 290° (figura 15), de esta manera los valores leídos por el módulo ADC del microcontrolador deben ser convertidos a grados mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Bits desplazados} = \frac{1024 \text{ bits}}{290^\circ} \quad (8)$$

$$\text{Bits desplazados} = 3.5310 \text{ bits} * \text{grado}$$

Donde los 1024 bits son todos los valores numéricos que puede tener el resultado de la conversión analógica-digital, y los 290° son los grados que se desplaza el elemento rotacional del potenciómetro. Por lo cual tenemos que para cada grado de movimiento que presente el potenciómetro, la conversión analógica digital sumará 3.5310 bits. De esta manera si el resultado de la conversión analógica-digital resulta ser 512 bits se tiene que:

$$\text{ángulo} = \frac{\text{valor lectura}}{\text{Bits desplazados}} \quad (9)$$

$$\text{ángulo} = \frac{512 \text{ bits}}{3.5310 \text{ bits} * \text{grado}}$$

$$\text{ángulo} = 145.00^\circ$$

Posteriormente y durante la implementación del sistema en el equipo mecánico real; se utilizó un acelerómetro MMA7361 configurado como inclinómetro, para conocer la inclinación de la parábola del concentrador solar.

4.5. Acelerómetro MMA7361 como sensor de inclinación

El circuito MMA7361 (Figura 15) es un acelerómetro micro-mecanizado de bajo consumo de celdas capacitivas el cual detecta los cambios en la velocidad del desplazamiento de una masa, la cual es un elemento móvil suspendido dentro del encapsulado. Este componente mecánico o masa inercial junto con la carcasa del circuito integrado conforman un capacitor, al desplazarse la masa inercial se modifica la distancia entre ambas placas, y así midiendo la capacitancia del condensador podemos conocer la aceleración a la cual se somete el dispositivo.

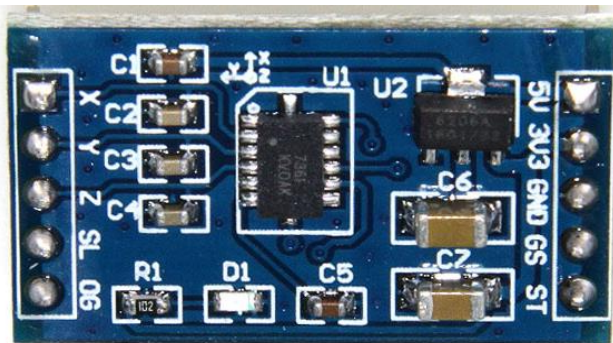


Figura 15 Acelerómetro MMA7361
Fuente: Elaboración Propia

El sensor cuenta con 3 pines de salida, correspondientes a los ejes en los que trabaja (X, Y, Z). Estos pines son salidas de señal analógica los cuales entregan valores de 0 a 3.6v y estos valores son equivalentes a aceleraciones en función de la gravedad. Dependiendo del eje en la que se desplace el circuito integrado este activará las salidas correspondientes, el circuito está construido de manera en que se puedan identificar los ejes de acuerdo a la posición del mismo y se ilustra en la figura 16.

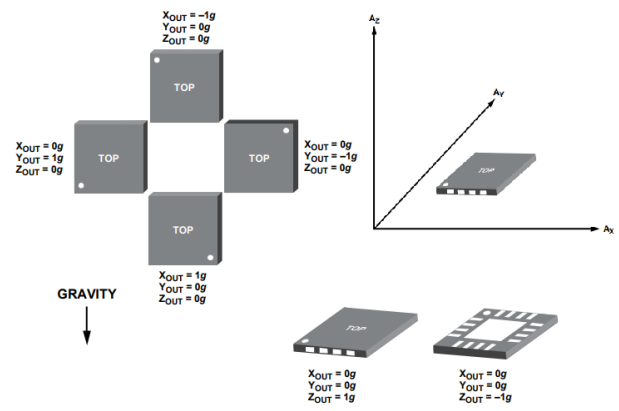


Figura 16 Respuesta de las salidas de acuerdo a la orientación del circuito MMA7361
Adaptado de: Sparkfun. (2008).

El sensor toma como referencia la aceleración de la gravedad ya que esta es primeramente a la que está sometida la masa inercial del sensor, por lo tanto el eje que se coloque de manera perpendicular a la superficie terrestre registrará una aceleración equivalente a -1g; donde g se refiere a la gravedad de la tierra. Si la misma cara, correspondiente a un eje se voltea 180° este registrará una aceleración de 1g, estos valores son equivalentes a los valores máximos y mínimos del voltaje de 3.6 Volts con el que se alimenta el sensor, por lo tanto:

Para -1g la salida correspondiente será de 0 Volts.

Para 1g la salida correspondiente será de 3.6 Volts.

Estos valores pueden ser interpretados gráficamente como vectores debido a que el sensor trabaja con una masa inercial por lo cual también pueden ser representados como fuerzas con magnitud y dirección.

Lo siguiente es asignar valores positivos y negativos mediante la programación a la magnitud de los valores leídos del sensor y mediante el cálculo trigonométrico descrito en el punto 3.4.1 determinar la dirección del vector resultante de las lecturas correspondientes al eje X y al eje Y.

Dentro de la programación se asignó un rango a los valores leídos por el ADC y se describe en la siguiente tabla 5.

Valor fuerza g	Valor Voltaje (V)	Salida ADC	Valor asignado
1g	~3.6	1023	500
0	~1.8	512	0
-1g	~0	0	-500

Tabla 5 Valores asignados a las lecturas del sensor de inclinación

Fuente: *Elaboración Propia*

4.6. Reloj de tiempo real DS1307

El modulo RTC (Figura 18) provee la hora actual, necesaria para el calculo del angulo mediante el algoritmo de posicion solar, el dispositivo cuenta con una unidad de memoria NV RAM (No Volatil Random Access Memory) en la cual se almacena y lleva la cuenta de los datos de la fecha y la hora en formato BCD (Binary Coded Decimal), el modulo se comunica mediante el puerto I^2C del microcontrolador, y mantiene el conteo de la hora durante largos periodos de tiempo gracias a la bateria de litio de 3.6V con la que cuenta. Sin embargo es necesario configurar los datos de fecha y hora del dispositivo; para esto se diseñó un menu basico similar al de los relojes digitales convencionales y auxiliado del microcontrolador junto a una serie de pulsadores es posible realizar la carga de los valores de fecha y hora.

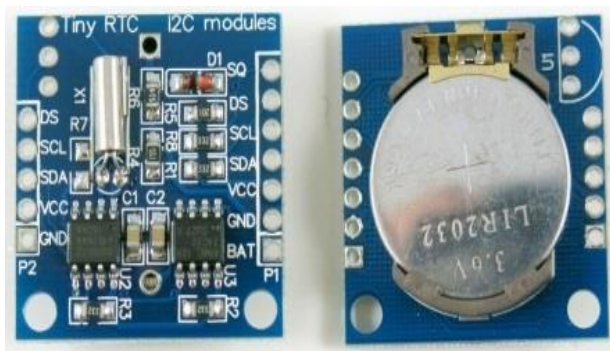


Figura 17 Modulo reloj de tiempo real (RTC) DS1307

Fuente: *Elaboración Propia*

5. Diseño del Algoritmo de funcionamiento

El objetivo del sistema electrónico es mantener la inclinación de la parábola en el ángulo calculado por el algoritmo de posición solar. Y de esta manera obtener durante la mayor porción de tiempo posible una óptima radiación solar en la superficie reflejante de la parábola.

Pseudocódigo.

Conociendo los requerimientos del sistema mencionados al principio de este capitulo,

junto con las funciones del ATmega328 se generó el siguiente pseudocódigo, el cual describe el comportamiento del algoritmo con el que funcionara el circuito seguidor.

1. Asignar variables operativas.
2. Configurar puertos entrada/salida, ADC, I^2C .
3. Inicializar RTC, LCD, comunicación I^2C .
4. Asignar valores promedio de amanecer y ocaso.
5. Leer RTC conectado a los pines I^2C .
6. Leer sensor acelerómetro conectado al canal 0 y 1 del módulo ADC.
7. Calcular posición solar.
8. Ajustar posición de la parábola mediante comparación de ambos ángulos.
9. Mostrar fecha y hora en LCD.
10. Configurar datos del RTC.

Diagramas de flujo

Previo a realizar el diseño del diagrama de flujo del algoritmo fue necesario organizar las funciones de manera modular, esto quiere decir que dentro del ciclo principal únicamente se llaman las funciones específicas, de manera que es más fácil asignar el orden en el cual se ejecutan. Debido a ello es necesario describir diagramas de flujo para cada función.

Diagrama de flujo inicial

En base al anterior pseudocódigo se realizó el diagrama de flujo inicial (Figura 18), el cual describe el programa con el que funciona el dispositivo sin embargo no es el único dentro de el mismo encontramos la función del menú principal la cual se describirá posteriormente en su respectivo diagrama de flujo.

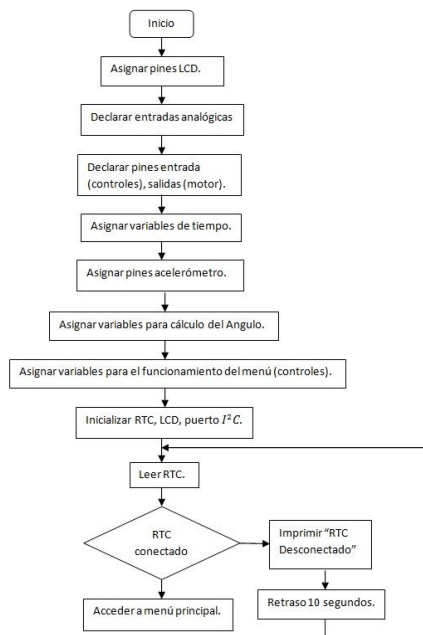


Figura 18 Diagrama de flujo inicial del programa

Fuente: *Elaboración Propia*

- Asignar pines LCD. Mediante esta función y gracias a la librería del display LCD se asignan los pines 0-5 del puerto C, en los cuales se conectara dicho dispositivo el cual funciona como interface gráfica para conocer el estado del dispositivo y configurar los valores de fecha y hora.
- Declarar entradas analógicas. Se declaran las entradas analógicas del acelerómetro.
- Declarar pines entrada, salida. Se definen los pines 0-1 del puerto D como salidas con las que se determinara la dirección de giro del motor, y 5-7 del puerto D como entradas para los pulsadores que funcionan como controles.
- Asignar variables de tiempo. Se generan variables equivalentes a la hora, minutos, segundos, día, mes, año. Las cuales nos permiten contener los valores que provee el RCT para operar con ellos y poderlos mostrar en el menú principal.
- Asignar pines acelerómetro. En esta función se asignan los pines 0-1 (ADC0, ADC1) como entradas analógicas en las cuales se conectaran las salidas del acelerómetro “X” y “Y” respectivamente.
- Asignar variables para cálculo del Angulo. Se generan las variables con las que operara el algoritmo de posicionamiento solar (mencionadas en el punto 3.2).
- Asignar variables del funcionamiento del menú. En esta función se asignan las

variables que nos permiten cambiar el estado del menú principal así como configurar la fecha y hora.

- Inicializar RTC, LCD, puerto I^2C . Mediante la librería de estos módulos se llama a inicializarlos.
- Leer RTC. Comprueba que el RTC está conectado y funcionando enviando y recibiendo datos a través del puerto I^2C .
- RTC conectado (condicional). Se comprueba la recepción de datos del puerto I^2C , a recibir respuesta se accede al Menú principal. Si no se obtiene respuesta del reloj de tiempo real se imprime en el LCD la frase “RTC desconectado” y se procede a un Retraso de 10 segundos, posterior a ello se vuelve a realizar la lectura del RTC.

Estas funciones corresponden a la configuración del dispositivo y la declaración de variables operativas, las siguientes funciones constituyen el ciclo principal del programa. Diagrama de flujo del menú principal.

La función Acceder al Menú principal. Se compone por 3 secciones, Cargar valores amanecer/ocaso, Cambio de estado pin “Modo” (condicional), y el Menú principal. Como se ilustra en el siguiente diagrama de flujo (Figura 19).

Esta sección comprende la parte del ciclo principal del programa por lo cual se ejecuta constantemente. Cargar valores Amanecer/Ocaso. En esta función se cargan los valores promedio de hora de amanecer y ocaso promedios indicados en el punto 3.1.1 de este capítulo, estos valores se determinan por medio de una función Switch/Case en la cual se evalúa el mes para determinar el valor que deben tomar las variables, que posteriormente serán utilizadas en el cálculo del Angulo mediante el algoritmo de posicionamiento solar.

Cambio de estado pin “Modo”. En esta función condicional se evalúa si existe un cambio en el estado del pin 7 del puerto D, configurado como entrada digital para el pulsador encargado de cambiar las diferentes pantallas del menú de configuración del dispositivo. Si registra un cambio incrementa en uno la variable “status menú”.

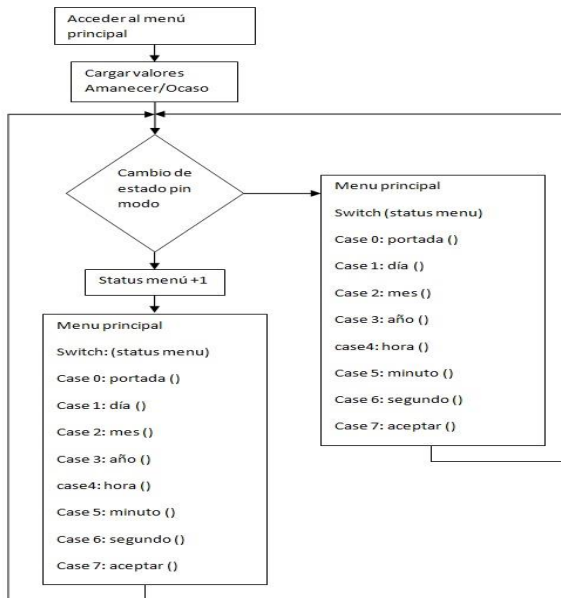


Figura 19 Diagrama del menú principal

Fuente: *Elaboración Propia*

El Menú principal. Es esencialmente una estructura Swith/Case de 8 estados, y se encuentra en función de la variable “status Menú”. De manera que al presionar el pulsador “pin modo” los valores de esta variable se incrementaran, y se accederá a las funciones contenidas en cada uno de sus “Case” a continuación se describen cada uno de estos casos:

- Case 0: se accede a la pantalla principal de la portada(), en la cual se ejecutan las funciones de lectura del RTC, lectura del acelerómetro, cálculo del Angulo de posición solar, ajuste de la parábola. Todo esto mientras se muestra la fecha y la hora en un formato de reloj, calendario.
- Case 1-6: en estos casos se accede a una pantalla en la cual se introduce manualmente el valor de los datos de fecha y hora (día, mes, año, hora, minuto, segundo), mediante un pulsador “pin más”, conectado en el pin 6 del puerto D, el cual se encuentra configurado como entrada digital, al cambiar su estado se incrementa el valor de una variable, la cual constantemente se muestra en el display LCD, y el dato se almacena temporalmente.

- Case 7: en este caso se requiere una confirmación del usuario, la función aceptar (), muestra en la pantalla la frase “¿confirmar?: más” al presionarse el “pin más” todos los valores establecidos en las pantallas anteriores se cargan conjuntamente al RTC, si se presiona el “pin modo” se incrementa la variable “status menú” y se regresa al Case 0, sin realizar ningún cambio en los valores del RTC.

Las funciones específicas correspondientes al algoritmo de posicionamiento solar, lectura de los valores del RTC, lectura del acelerómetro, ajuste de la parábola y pantalla principal se describen individualmente a continuación. Lectura de los valores del RTC. Esta función se encarga de tomar los valores contenidos en la memoria RAM no volátil del módulo DS1307, y almacenarlos en variables con las cuales se realizara el cálculo del Angulo de posición solar.

Gracias a la librería del módulo es posible extraer los valores mediante código simplificado y almacenarlos en la memoria RAM del micro controlador. A continuación (Figura 20) se ilustra mediante diagrama de flujo la manera en la que se realiza dicha lectura.

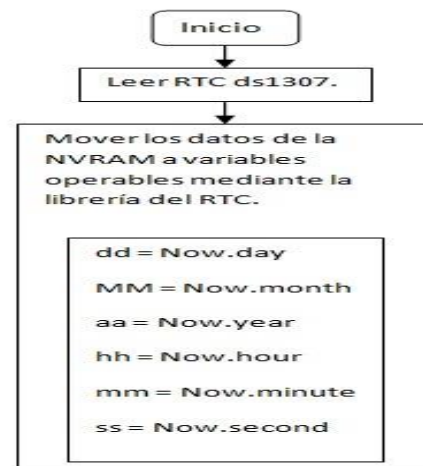


Figura 20 Diagrama de flujo de la carga de los datos del RTC

Fuente: *Elaboración Propia*

De esta manera los valores en contenidos en las variables “dd, MM, aa, hh, mm, ss” pueden ser utilizados en las posteriores funciones.

Calculo del Angulo de posicionamiento solar

(Figura 21). Esta función calcula el ángulo en el cual debe colocarse la parábola mediante el algoritmo de posicionamiento solar que se menciona en el punto 3.2 de este capítulo, auxiliado de la función anterior es posible realizar el cálculo, para ello todos los valores deben ser convertidos a segundos.

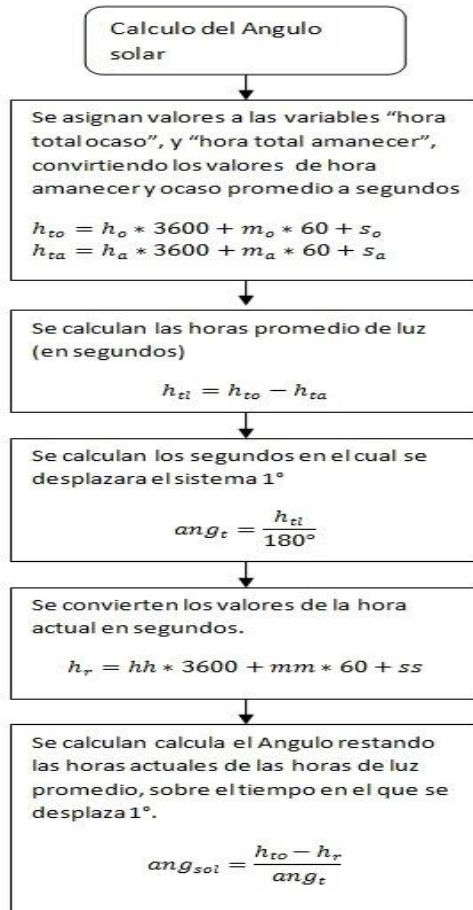


Figura 21 Diagrama del cálculo del Angulo de posicionamiento solar
Fuente: Elaboración Propia

Lectura del acelerómetro

Esta función se encarga de interpretar los valores leídos en los canales 0 y 1 del módulo ADC del micro controlador, correspondientes a las salidas X y Y del módulo Acelerómetro MMA7361, para conocer el Angulo en el cual se encuentra dirigido el eje de rotación de la parábola del concentrador. Para que posteriormente pueda ser posible su ajuste.

Como se observa en la figura 22 el resultado del cálculo de la tangente inversa esta dado en radianes, por lo cual es necesario convertir dicho valor a grados.

Así mismo como se menciona en este capítulo es necesario usar un arreglo “if” para leer las inclinaciones superiores a los 90° convirtiéndolos en valores a enteros positivos, esto se ilustra en el siguiente diagrama de flujo, donde sí los valores generados mediante el cálculo son menores a 0 es decir valores negativos, se calcula la diferencia con los 90° para posterior mente sumarse al Angulo limite leído (90°).

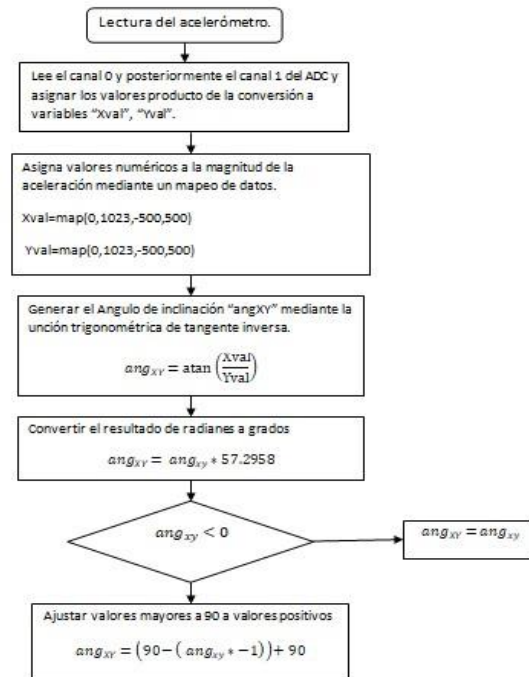


Figura 22 Diagrama de flujo de la función de lectura del acelerómetro MMA7361
Fuente: Elaboración Propia

Ajuste de la parábola

Mediante esta función se determinan bajo qué condiciones se realizara el giro del motor y hacia qué dirección girara, para ello se consideran valores como la hora actual h_r , la hora de amanecer y ocaso promedio, h_{ta} , h_{to} , los ángulos generados por el algoritmo de posicionamiento solar ang_{sol} y el Angulo leído del acelerómetro ang_{xy} . Todo bajo condicionales “if” en las cuales se determinan los horarios dentro de los cuales funcionara el seguidor, así como los grados de tolerancia que tendrá el ajuste de la parábola. El ajuste de la parábola, se compone de 2 secciones principales, la primera determina los horarios en los cuales trabajara el seguidor solar, estos horarios son las horas totales de luz, la segunda sección es el control o ajuste de la posición de la parábola, en el cual se comparan el Angulo leído del sensor y el Angulo solar.

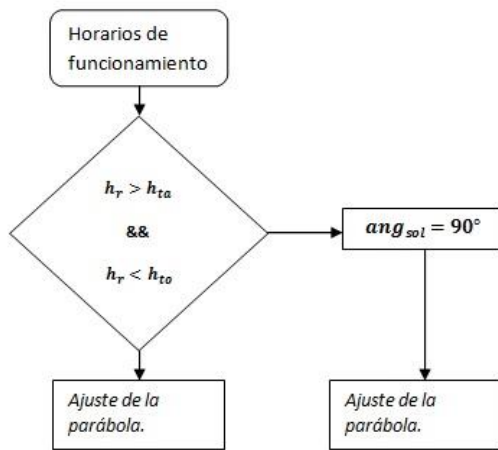


Figura 23 Diagrama de flujo del método para determinar horarios de trabajo
Fuente: *Elaboración Propia*

Como se observa en la figura 23 mediante una condición “if” se evalúa si los valores de la hora actual h_r se encuentran dentro de las horas de luz, de ser así se realiza el ajuste de la parábola, de lo contrario se iguala el Angulo solar a 90° y se realiza el ajuste de la parábola (Figura 24); de esta manera el sistema entrara en un estado de reposo en el cual no se modificara el Angulo hasta el amanecer del día siguiente.

El ajuste se realiza evaluando el Angulo ang_{xy} y el Angulo ang_{sol} mediante una condición “if”, de esta manera si el valor producido por el sensor de inclinación es menor al Angulo solar el motor girara hacia la izquierda, si no es menor se evalúa si es mayor, de ser así el giro se realizara hacia la derecha. Si ninguna de estas condiciones se cumple quiere decir que el Angulo ang_{xy} es igual al Angulo solar y por lo cual el motor se mantendrá detenido.

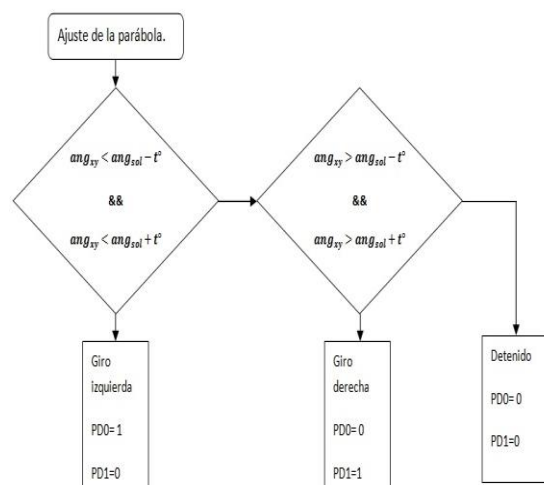


Figura 24 Diagrama de flujo del ajuste de la parábola
Fuente: *Elaboración Propia*

El ángulo t° es el número de grados de tolerancia, este valor permite a la parábola ajustarse n grados extra con relación al Angulo solar, y de esta manera evitar inestabilidad en el movimiento del dispositivo mecánico.

6. Simulación del programa

El programa se simuló en la herramienta Proteus®, este es un software de simulación electrónica el cual permite realizar pruebas de funcionamiento del programa del seguidor solar, el software cuenta con librerías de los componentes, entre ellas las del micro controlador ATmega3280p, el display LCD, el RTC ds1307.

Como se muestra en la figura 26 estos elementos se agrupan en bloques, sin embargo no existe una librería que simule el funcionamiento del acelerómetro MMA7361 por lo que el modulo correspondiente al sensor fue sustituido con 2 potenciómetros los cuales sustituyen las salidas analógicas X y Y del módulo sensor de inclinación, y se conectan a las entradas analógicas ADC0 y ADC1.

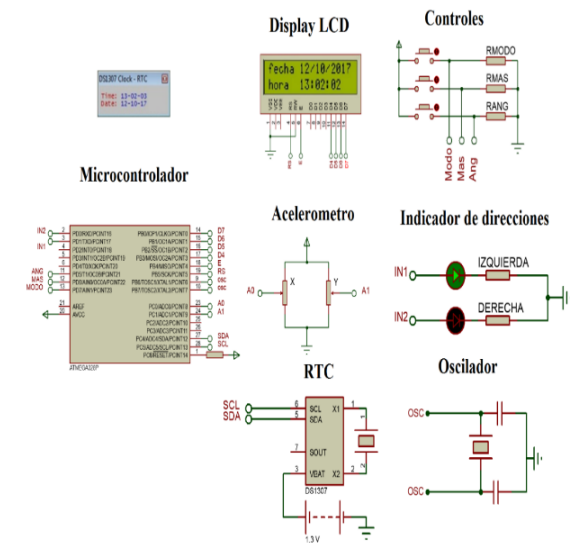


Figura 25 Simulación de la función de portada del programa del seguidor
Fuente: *Elaboración Propia*

En la figura 25 se muestra la portada principal del circuito seguidor, en el “display LCD” observamos la fecha y la hora, la cual es igual obtenida del módulo RTC, mientras el modulo “indicadores dirección” muestra una salida alta en el pin PD0 y una salida baja en el pin PD1, indicando un giro hacia la izquierda.

Cuando el motor presenta un giro en dirección a la izquierda el voltímetro conectado al motor presentara un flujo de corriente en sentido contrario por lo cual se observarían valores aproximados a -12 Volts Corriente continua. Esto se evidencia en la figura 30.

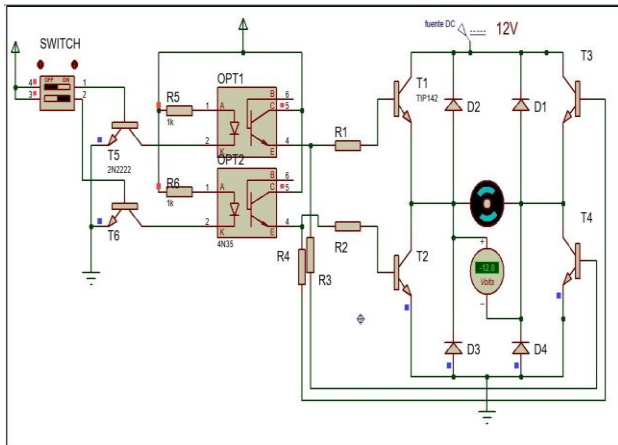


Figura 30 Simulación del giro en dirección a la izquierda del motor DC por medio de la etapa de potencia
Fuente: Elaboración Propia

Por último en la figura 31 se muestra al motor detenido y un valor registrado por el voltímetro de 0 Volts corriente continua.

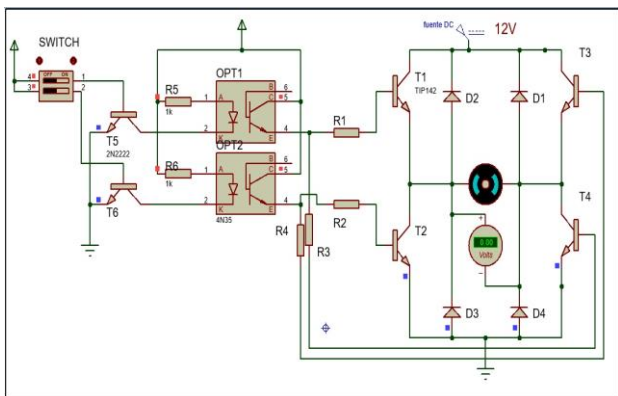


Figura 31 Simulación del estado detenido del motor
Fuente: Elaboración Propia

De esta manera se comprueba que el puente “H” de la etapa de potencia funciona adecuadamente.

Diagrama eléctrico del sistema

A continuación se presenta un diagrama eléctrico de las etapas antes descritas en este capítulo (figura 32)

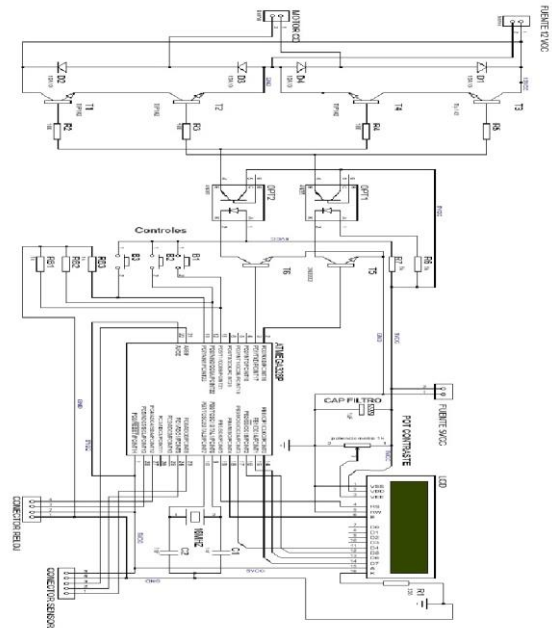


Figura 32 Diagrama eléctrico del sistema
Fuente: Elaboración Propia

7. Análisis y evaluación de los resultados obtenidos

Al tener integrado todo el equipo, fue puesto en funcionamiento el 27 de octubre del 2017 en el Centro Tecnológico de Aragón situado en la Facultad de Estudios Superiores de Aragón, ubicado en Avenida Hacienda de Rancho Seco S/N, Impulsora Popular Avícola, 57130 Nezahualcóyotl, MEX, y actualmente sigue en operación, los resultados mostrados en este capítulo corresponden a las mediciones que permitieron encontrar el mejor funcionamiento para este sistema, por lo cual se eligió dos pruebas las cuales se pueden considerar como días típicos representativos. En la figura 33 se ilustra como las pruebas pertinentes para observar el funcionamiento del sistema.



Figura 33 Pruebas al sistema
Fuente: Elaboración Propia

La tabla 6 muestre las mediciones correspondientes al 17 de noviembre del presente año, recabando la información de la temperatura de la parte inferior, media y superior del concentrador solar, así como los ángulos de inclinación de este.

Hora	Temperatura ambiente (C)	Mediciones de temperatura (C)			Ángulos	
		Inferior	Media	Superior	Teórico	Medición
11:48	17	54	81	83	114°	117°
11:51	17	63	82	95	113°	115°
11:59	17	65	122	101	111°	113°
12:02	17	78	128	103	110°	112°
12:07	17	78	133	110	109°	108°
12:11	18	88	135	113	108°	111°
12:17	19	91	137	114	106°	108°
12:23	20	96	139	119	105°	107°
12:31	20	99	138	123	103°	105°
12:41	20	100	138	123	100°	98°
12:45	20	100	138	124	99°	97°
12:55	20	101	137	123	96°	95°
13:11	20	102	137	127	91°	93°
13:18	20	101	135	126	90°	92°
13:23	20	101	134	126	89°	88°
13:28	20	100	134	126	87°	88°

Tabla 6 Medición de la Temperatura en el foco del concentrador solar (17/11/2017)

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 34 se estima una curva de las mediciones para esta prueba, los datos obtenidos nos permiten analizar su comportamiento desde un punto de vista estadístico.

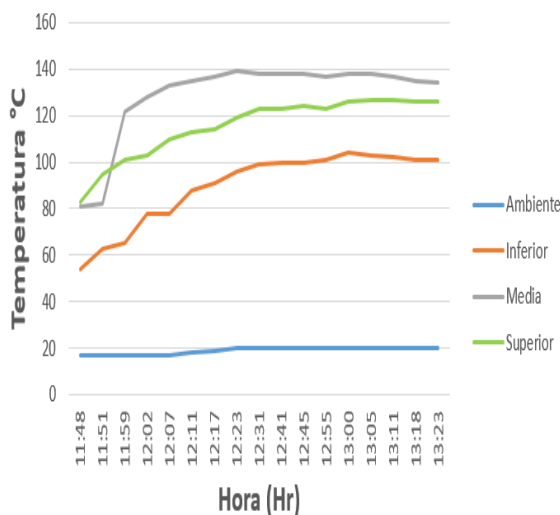


Figura 34 Temperatura vs hora del día (17/11/17)

Fuente: Elaboración Propia

Para esta población de 18 datos (medición inferior), se obtuvo un valor promedio de 90.22°C y una desviación estándar de 15.33°C (Tabla 7). EL valor promedio es la suma de todos los valores divididos entre la cantidad de valores, es decir nos indica cual es el valor que obtendríamos si se distribuyera los valores en partes iguales.

La desviación estándar se obtiene a partir de la raíz cuadrada de la varianza, a su parte la varianza es el promedio de las distancias entre de cada valor y la media.

Por lo que el valor de 15.33 nos indica la dispersión de los datos con respecto al valor promedio de este. Es decir para este caso nuestro intervalo de valores va de 74.89°C a 105.55°C, lo que nos indica es que los valores que estén entre ellos están previstos para la medición y entre más cerca se encuentren del valor promedio nos será más conveniente estos. La tabla 7 engloba el análisis de los datos obtenidos con respecto a esta prueba de temperatura.

Mediciones	Valor promedio (C)	Desviación estándar (C)	Intervalo de confianza (C)
Inferior	90.22	15.33	74.89 -105.55
Media	129.11	17.32	111.79-146.43
Superior	116.05	12.55	103.5-128.6

Tabla 7 Dispersión de los datos para la medición de temperatura (17/11/17)

Fuente: Elaboración Propia

Así mismo la figura 35, representa los ángulos obtenidos, es de suma importancia observar la relación entre los valores teóricos y los medidos, dado la estructura del concentrador solar con el que se cuenta, el foco puede tener una dispersión de $\pm 5^\circ$.

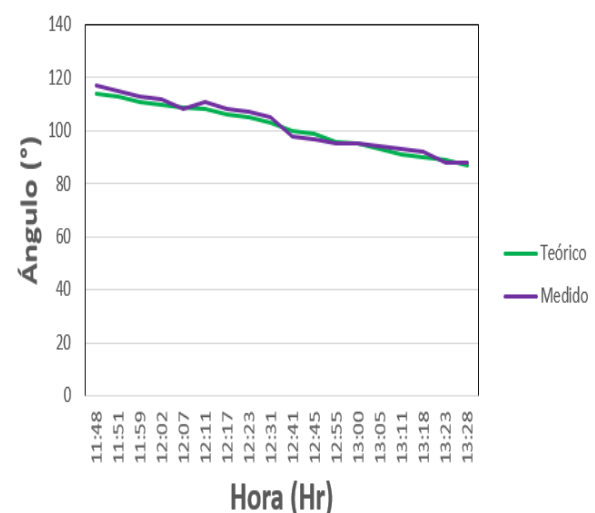


Figura 35 Angulo vs Hora del día (17/11/17)

Fuente: Elaboración Propia

Al comparar los datos se puede observar que el margen de error es de $\pm 3^\circ$ lo cual nos da una buena relación de estos ya que está dentro de los parámetros previstos, además no llega a los límites antes mencionados.

Las pruebas como tal permiten reajustar tanto parámetros, como modificar el funcionamiento, por lo cual se consideró el día 21 de noviembre del 2017 como día típico representativo y nos permitiera llegar a compararlos con los datos antes obtenidos. En la tabla 8 se recaban los datos de esta prueba.

Hora	Temperatura ambiente (C)	Mediciones de temperatura (C)			de Ángulos	
		Inferior	Media	Superior	Teórico	Medición
12:51	21	121	159	148	97°	97°
12:55	21	122	158	146	96°	97°
13:00	22	118	156	146	95°	96°
13:05	22	116	156	146	94°	97°
13:14	22	114	153	142	91°	90°
13:23	22	115	156	141	89°	89°
13:31	22	114	153	142	86°	83°
13:36	21	113	147	140	85°	83°
13:40	21	111	147	137	84°	85°
13:44	21	109	144	131	83°	85°
13:49	21	104	140	128	81°	83°
14:00	21	103	137	126	78°	78°
14:07	21	103	136	125	77°	78°
14:12	21	102	135	122	76°	77°
14:20	21	102	133	120	74°	71°
14:22	21	102	133	120	73°	71°
14:25	21	100	133	120	72°	72°

Tabla 8 Medición de la Temperatura en el foco del concentrador solar (21/11/2017)

Fuente: Elaboración Propia

De igual manera, analizamos los datos para poder interpretar que pasa con estos y la relación entre ellos. La figura 37 se muestra la gráfica representativa a estas temperaturas divididas por sección

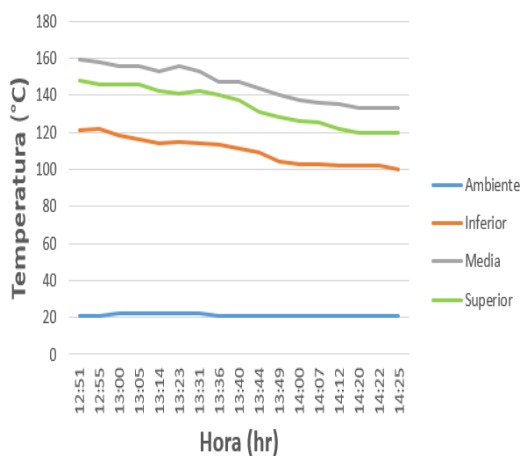


Figura 37 Temperatura vs hora del día (21/11/17)

Fuente: Elaboración Propia

De manera similar que la anterior serie de datos mostrados, se observa que la parte media de la parábola es la que posee los valores más altos de temperatura. Para esta muestra de datos se obtuvieron los siguientes valores representativos de esta población

Mediciones	Valor promedio (C)	Desviación estándar (C)	Intervalo de confianza (C)
Inferior	109.94	7.11	102.83-117.05
Media	145.65	9.58	136.07-155.23
Superior	134.12	10.21	123.91-144.33

Tabla 9 Dispersión de los datos para la medición de temperatura. (21/11/17)

Fuente: Elaboración Propia

Como se muestra en la Tabla 9, los valores obtenidos con respecto a la tabla 7, son mejores, tanto la temperatura promedio incremento y la dispersión de los datos se redujo, lo que nos indica que los valores tienden más a dicho valor promedio. Como se mencionó antes el sistema puede tener un margen de error de 5°, por lo cual se analizan los valores obtenidos en esta prueba, de manera gráfica podemos observar la dispersión de las dos curvas en la figura 38.

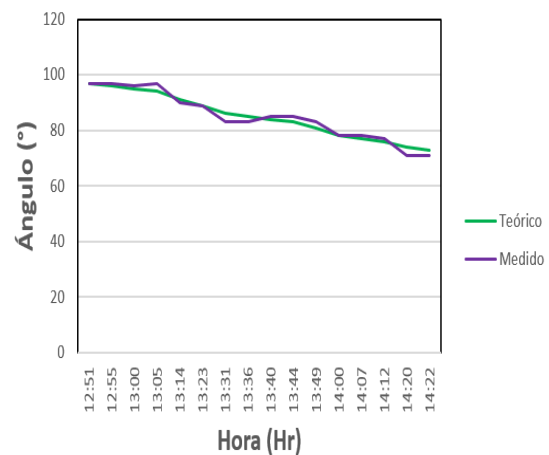


Figura 38 Angulo vs Hora del día (21/11/17)

Fuente: Elaboración Propia

De igual manera los datos muestran una pequeña separación entre sus respectivas gráficas, y sigue la tendencia de tener un error de 3°, lo cual entra dentro del intervalo estimado. Para estas pruebas encontramos algunos aspectos que modifican las mediciones, se debe tener en cuenta que el posicionamiento debe ser el correcto, es muy importante que se encuentre sobre una superficie que tenga un área de apoyo óptimo para este, y disminuir el impacto de agentes externos, las pruebas mostradas comparten las características de que el día se realizaron el clima era soleado y el viento era moderado, al revisar el impacto del viento no afectaba el posicionamiento de este, sin embargo este llevaba partículas que quedaban impregnadas en la superficie de la parábola por lo cual hay que tener una limpieza de esta ya que merma los valores obtenidos.

Es importante mencionar que los valores registrados en la tabla 4.4 tienden a descender esto es debido a que los valores máximos se alcanzaron cuando el sol se encontró en el punto más alto conocido como zenit, por ello después de este punto los valores disminuyen conforme se acerca el ocaso.

Agradecimiento

Se agradece el apoyo de: Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, al área del PAPIIT.

Conclusiones

El panorama de las energías ha evolucionado de forma paulatina, con un gran avance en el último periodo, para que estas fuentes de energía puedan competir con las convencionales se necesita un mayor impulso económico referente a su investigación, ya que se debe optimizar el proceso y reducir los costos. Desde un punto de vista optimista las energías renovables deberían ir desbancando a las generadas por hidrocarburos y con ello disminuir el daño ambiental. Para este trabajo, se contó con un concentrador parabólico, dado las especificaciones de este tipo de concentradores, para obtener buenos resultados con este equipo, se necesita de un sistema de seguimiento solar que lo posicione en el punto donde se encuentra la mayor irradiación solar.

Para llevar a cabo cualquier sistema, son esenciales la etapa de diseño y simulación, las que nos dan la pauta de visualizar el funcionamiento y el panorama de las principales problemáticas con las que nos podemos encontrar. Desde la visión del cliente, se consideró que se necesitaba un sistema funcional, de buenas especificaciones tales como son la precisión, exactitud y seguridad, sin perder de vista el menor costo posible.

Existen algunos sistemas austeros que tienen un funcionamiento basado en seguir la trayectoria solar por medio de dispositivos que reaccionan al cambio de luz, los cuales son baratos, pero no son idóneos para este tipo de equipos, dado las especificaciones de los sensores utilizados se necesita de una limpieza constante y estos tienden a estar oscilando, lo que hace que el concentrador este en constante movimiento, por lo cual se descartó la idea de emplear esta tecnología.

De igual manera cuando se estaba en la etapa de simulación, el sistema está basado en un PID (Proporcional Integrativo Derivativo), por lo cual como primer elemento de comparación se consideró colocar una resistencia variable o potenciómetro de uso convencional, como se mencionó en el capítulo III por las condiciones de este se optó por cambiar este elemento mecánico, por un acelerómetro el cual nos permite obtener mejores resultados, hay que tener en cuenta que a este dispositivo se le diseñó un chasis de tal manera que minimizara cualquier variación externa.

Las pruebas realizadas al sistema electrónico de seguimiento solar, nos arrojaron datos que permitieron retroalimentar dicho sistema hasta obtener los resultados esperados, los datos mostrados fueron aquellos donde el sistema ya estaba en un óptimo funcionamiento. Al analizar dichos valores, se observó que la temperatura obtenida es muy buena, en relación a las condiciones climáticas de esos días, esto es un aspecto muy importante a tomar en consideración ya que aunque la radiación solar este presente todos los días sin importar el clima, no se tendrán los mismo resultados en un día soleado que en un día nublado o lluvioso.

Sin incluir el sensor para ajustar el eje de la parábola, el sistema no cuenta con sensores para el seguimiento solar, si no su funcionamiento está basado en el estudio de la carta solar, es decir el circuito de control cuenta con un algoritmo que calcula los ángulos de posicionamiento, además incluye código de protección que limita el movimiento y lo coloca en su posición original al finalizar el día.

Al analizar los datos de los ángulos medidos con los calculados, se puede observar que su diferencia es pequeña, claro está que se tiene que tener un parámetro que nos indique si es correcta esta desviación, dada la estructura de la parábola y principalmente su eje, el error permisible es de 5° para que este se encuentre en el punto óptimo de radiación solar, por lo cual indica que nuestro sistema satisface las necesidades, además que reduce en 2° el error. Por lo cual el sistema propuesto es funcional y cumple con lo requerido, además mantiene un costo bajo, hay que tener en cuenta que el precio mostrado se incrementa, ya que se fabrica de manera individual.

Referencias

Appleyard, D. (2009). Solar trackers: Facing the sun. *Renewable Energy World*, 12(3), 41-53.

Areny, R. P. (2004). *Sensores y acondicionadores de señal*. Editorial Marcombo.

Bohórquez, L., Martínez, S., & Gallego, H. A. (2012). Diseño y construcción de un prototipo autónomo para la práctica experimental de laboratorios de física. *Scientia et Technica*, 17(52). Universidad Tecnológica de Pereira.

CEMAER (2016). *Energía solar en México*. Revisión 08 de julio del 2017. Sitio web: <http://www.cemaer.org/energia-solar-en-mexico/>

Corona, L., Abarca, G., & Mares, J. (2015). *Sensores y Actuadores: Aplicaciones con Arduino*. Grupo Editorial Patria.

EngineersGarage. (2012). LCD. agosto 07, 2017, de EngineersGarage Sitio web: <https://www.engineersgarage.com/electronic-components/16x2-lcd-module-datasheet>

Escobar, L. G. V. (2007). *Colector de canal parabólico para la generación directa de vapor para calor de proceso* (Doctoral dissertation, Tesis doctoral inédita), Centro de investigación de energía. Universidad Nacional Autónoma de México.

Jaime, G. V. (2009). *Energías renovables*. Editorial Revert.

Medina, V. (2016). *Microprocesador vs Microcontrolador*. Julio 16, 2017, de Ritsa Sitio web: <http://www.ritsasv.com/tag/diferencias-microprocesador-y-microcontrolador/>

Meeus Jean (1991). *Algoritmos astronómicos*, Willmann-Bell

SANTIAGO E, F. (2012). *Los Microcontroladores AVR de ATMEL*. MEXICO: Universidad Tecnológica de la Mixteca.

VISHAY INTERTECHNOLOGY© (2017), 4N35, 4N36, 4N37 Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection, Hoja de datos disponible en: <https://www.vishay.com/docs/81181/4n35.pdf>

Generador de energía eléctrica a través de energía limpia

Generator of electric power through clean energy

PÉREZ-GALINDO, Liliana Eloisa†*, HERNÁNDEZ-BORJA, Carlos, ALVARADO-GONZÁLEZ, Ángel y LÓPEZ-VICENTE, Jade

Universidad Tecnológica Fidel Velázquez

ID 1^{er} Autor: *Liliana Eloisa, Pérez-Galindo* / ORC ID: 0000-0001-6016-2595

ID 1^{er} Coautor: *Carlos, Hernández-Borja* / ORC ID: 0000-0002-8138-9016

ID 2^{do} Coautor: *Ángel, Alvarado-González* / ORC ID: 0000-0003-1102-1192

ID 3^{er} Coautor: *Jade, López-Vicente* / ORC ID: 0000-0002-6075-4723

Recibido Septiembre 27, 2018; Aceptado Diciembre 30, 2018

Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo y estudio de un prototipo del cual se obtiene energía eléctrica, utilizando tecnologías no contaminantes. El prototipo propuesto, es una tabla creada a partir de madera y plástico que se utiliza para la generación de energía eléctrica el cual proviene de la deformación o tensión mecánica de los materiales piezoeléctricos colocados sobre este. La energía eléctrica se almacena en baterías, durante los lapsos a los que son sometidos a tensión mecánica los materiales piezoeléctricos. A mayor tensión mecánica aplicada sobre los materiales piezoeléctricos, mayor es la energía eléctrica generada, por lo que resulta conveniente aplicarlo en lugares donde se transita mayormente, como en caminos y carreteras, centros comerciales, o lugares por donde la gente camine de manera habitual. Los principales elementos que constituyen el prototipo son los materiales piezoeléctricos, un circuito electrónico utilizado para convertir la energía eléctrica de corriente alterna a corriente directa, además de filtrar, almacenar y regular el voltaje generado. Se utilizaron otros materiales para su construcción, como cable, madera, baterías y etilvinilacetato. Para las pruebas experimentales, se utiliza una plataforma modular, NI ELVIS II de National Instruments, que integra los instrumentos utilizados como el osciloscopio y multímetro.

Piezoeléctricos, Tecnologías no Contaminantes, Plataforma Modular

Abstract

In this article we present the development and study of a prototype from which electrical energy is obtained. Using clean technology. The proposed prototype is a table made from wood and plastic that is used for the generation of electrical energy which comes from the deformation or mechanical stress of the piezoelectric materials placed on it. The electrical energy is stored in batteries, during the periods to which the piezoelectric materials are subjected to mechanical stress. The higher mechanical stress applied to piezoelectric materials, the greater electrical energy generated, so it is convenient to apply it in places where it is mostly traveled, such as roads and highways, shopping centers, or places where people walk in a habitual way. The main elements that make up the prototype are piezoelectric materials, an electronic circuit used to convert electrical energy from alternating current to direct current, as well as filtering, storing and regulating the generated voltage. Other materials are used for its construction, such as wire, wood, batteries and ethyl vinyl acetate. For the experimental tests is used a modular platform, NI ELVIS II of National Instruments which integrates the instruments used as the oscilloscope and multimeter.

Piezoelectrics, Clean Technology, Modular Platform

Citación: PÉREZ-GALINDO, Liliana Eloisa, HERNÁNDEZ-BORJA, Carlos, ALVARADO-GONZÁLEZ, Ángel y LÓPEZ-VICENTE, Jade. Generador de energía eléctrica a través de energía limpia. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2018. 2-7: 36-41.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (lipega74@hotmail.com)

1. Introducción

Con la creación y colocación de las baldosas en las principales avenidas de la ciudad con mayor afluencia, se pretende reducir el consumo de energía eléctrica de las lámparas utilizadas para la iluminación de estas, la cual será generada por el tránsito de las personas en los caminos concurridos. Se aprovechará la energía mecánica generada por los pasos de los peatones al pisar las baldosas colocadas en las calles y caminos con mayor afluencia, esta energía es transformada en corriente alterna por medio de piezoeléctricos que se encuentran en las baldosas.

Las baldosas funcionan con el principio básico de la inducción eléctrica la cual es mencionada en: “La ley de Faraday inducción electromagnética”, la cual dice - En el caso que nos ocupa, provocamos variaciones en el flujo magnético que provoca una fuerza electromotriz, manteniendo una diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito abierto (Marimar, 2018).

1.1 Problemática

De acuerdo a un comunicado de la Secretaría de Energía (Sener), entre 1997 y 2007 el consumo de electricidad para iluminación en México creció a un ritmo del 3.9% anual, y al cierre del 2009 dicho consumo representó el 18% del total de la energía eléctrica consumida en el país, a través de un parque estimado en 290 millones de lámparas (tubos fluorescentes, focos incandescentes y lámparas fluorescentes compactas) (Iluminet, 2010).

Para la producción de energía eléctrica se hace uso de los recursos naturales, lo que conlleva a generar emisiones a la atmósfera ocasionando una gran contaminación y daño al medio ambiente. Es por esto por lo que, surge la necesidad de producir energía eléctrica a través de tecnologías no contaminantes para el medio ambiente y esta puede ser mediante el uso de ciertos cristales, los cuales al ser sometidos a una fuerza mecánica generan una cantidad de energía, a esta propiedad se le llama piezoelectricidad, la cual no genera contaminación alguna y es muy fácil de obtener.

1.2 Hipótesis

Los piezoeléctricos transforman las vibraciones a una fuerza electromotriz, tomando esta característica, se piensa que la fuerza aplicada por el peso de las personas convertirá la energía mecánica liberada al caminar a un voltaje de corriente alterna, la cual por medio de diodos será rectificadora transformándola en voltaje de corriente directa para su almacenamiento en baterías de ion de litio de 1.5 volts.

Se cree que la energía almacenada en la batería no realimentará el circuito debido a las características eléctricas de los diodos.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Generar energía eléctrica por medio de la transformación de energía mecánica mediante el paso continuo de las personas a través de un dispositivo compuesto por sensores piezoeléctricos.

3. Marco Teórico

3.1 Concepto de Energías Limpias

Existen en la actualidad la producción de energía eléctrica a través de energía limpia obtenida de cuatro elementos básicos: agua, luz, aire y la misma tierra. Pero es de suma importancia mencionar que también se puede obtener de ciertos cristales que a través de estar sometidos a una fuerza mecánica generan energía, a esta propiedad se le conoce como piezoelectricidad.

3.2 Transducción piezoeléctrica

Los materiales piezoeléctricos tienen la propiedad de convertir una tensión mecánica aplicada en ellos en energía eléctrica, lo que se denomina como efecto piezoeléctrico directo. A su vez, de forma contraria, se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico, fenómeno denominado como efecto piezoeléctrico inverso.

El fenómeno piezoeléctrico se basa en la estructura fundamental de una red cristalina. Ciertas estructuras cristalinas tienen un balance de carga con polarización positiva y negativa, que se neutralizan a lo largo del eje polar imaginario.

Cuando este balance de carga es perturbado con un estrés externo sobre la malla cristalina, la energía es transferida por portadores de carga eléctrica creando una corriente en el cristal, induciendo un campo eléctrico (efecto piezoeléctrico directo). A la inversa, cuando se le aplica una diferencia de potencial, esta creará un desequilibrio en el estado de carga neutral causando un estrés mecánico (efecto piezoeléctrico inverso).

Existe una estrecha relación entre el efecto piezoeléctrico y la simetría de una red cristalina, dado que solo se puede observar el efecto piezoeléctrico en cristales que carezcan de simetría. Dicha relación se puede detallar con las estructuras basadas en monocristales y policristales.

Con la notación de la figura 1, donde se han dispuesto dos placas metálicas de manera que se constituye un condensador, se tiene, para un material dioeléctrico no pizoeléctrico, que al aplicarle una fuerza F , según la ley de Hooke (apartado 1), en el margen elástico aparece una deformación.

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} = \epsilon_0 \bar{E} + \bar{P} \tag{1}$$

Donde \bar{D} es el vector de desplazamiento, ϵ es la constante dieléctrica, $\epsilon_0=8.85\text{pF/m}$ es la permitividad el vacío y \bar{P} es el vector polarización resorte (Areny, R. P., 2004).

3.3 Conversión de energía mecánica a eléctrica con fórmulas

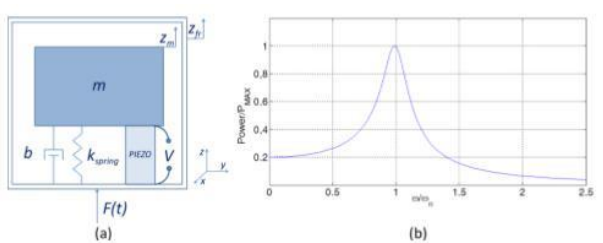


Figura 1 Modelo equivalente de los PEH y su comportamiento resonante

Fuente: Francesco Cottone, "Introduction to Vibration Energy Harvesting", ESIEE Paris, Agosto, 2011

Representa el modelo equivalente de los cosechadores de energía eléctrica a partir de vibraciones y su comportamiento resonante.

$$(t)m+'(t)b+zm(t)k=F(t) \tag{2}$$

Donde "m" representa la masa, "b" el coeficiente de amortiguamiento, que se divide en la suma de las pérdidas mecánicas "bp" y el coeficiente basado en la conversión de energía "be", y "k" la rigidez del resorte (Areny, R. P., 2004).

3.3.1 Modo de Operación

El efecto piezoeléctrico consiste en la aparición de una polarización eléctrica en un material al deformarse bajo la acción de un esfuerzo. Es un efecto reversible de modo que al aplicar una diferencia de potencial eléctrico entre dos caras de un material piezoeléctrico (Gabriela, 2008).

3.4 Circuito de Acondicionamiento

El último paso para alimentar dispositivos electrónicos o cargar sus baterías es el diseño del circuito de acondicionamiento que permita transformar la señal AC que se obtiene a partir del transductor piezoeléctrico en una señal DC útil que pueda ser almacenada o aprovechada directamente. Una estructura típica y básica de la circuitería de conversión se representa con el esquemático de la figura 2 (Cottone, F., 2011).

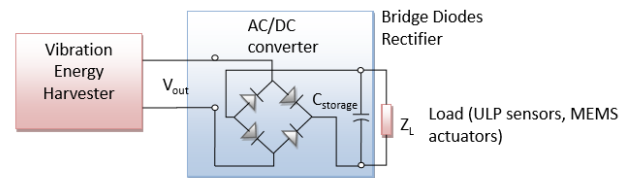


Figura 2 Circuito de conversión de energía de CA a CD Fuente: Francesco Cottone, "Introduction to Vibration Energy Harvesting", ESIEE Paris, Agosto, 2011

Los generadores piezoeléctricos son fuentes AC por lo que, su salida tiene que ser rectificadas y reguladas antes de alimentar a los dispositivos electrónicos o ser almacenada.

Para rectificar esta señal AC se hace uso de un puente rectificador de diodos de onda completa. Una vez rectificadas, esta se almacena en un condensador. Esta estructura de convertidor AC-DC suele ser continuada por otro convertidor DC-DC para regular el voltaje y para una optimización energética, haciendo que la transferencia de potencia sea máxima mediante adaptación de impedancias.

4. Metodología de Investigación

4.1 Diseño

Dadas las características de los piezoeléctricos se procedió a diseñar una estructura que aplicará una fuerza proporcional a toda su área, esto con el fin de distribuir la presión sobre dicha estructura, en la cual estarán repartidos los piezoeléctricos, ya que son componentes delgados y frágiles se colocará una sección amortiguante fabricada de etilvinilacetato que es un plástico blando, el cual absorberá parte de la presión ejercida al caminar. Los discos piezoeléctricos serán conectados en serie para sumar las cargas generadas por cada uno.

De ahí se continuó con el diseño del circuito el cual transformará la energía alterna a corriente directa, almacenándola en un capacitor electrolítico para controlar la descarga de la energía de este a una batería.

4.2 Experimentación

A continuación, se muestra el diagrama a bloques general del circuito utilizado para almacenar la energía:



Figura 3 Diagrama a bloques general
Fuente: Elaboración Propia

En primera instancia se midió el voltaje acumulado en la batería recargable de litio como se muestra en la siguiente figura.

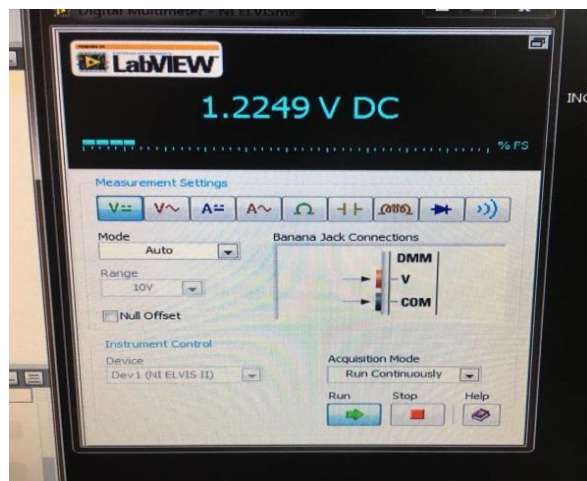


Figura 4 Medición inicial de voltaje
Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente se montó el circuito rectificador y regulador de voltaje como se muestra en la figura 5.

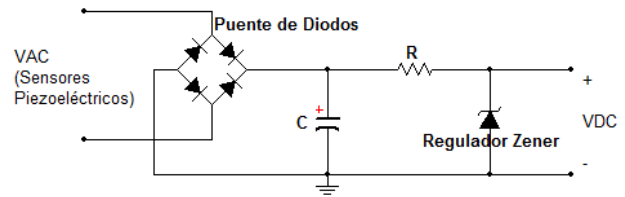


Figura 5 Circuito rectificador con filtro y regulador de voltaje
Fuente: Elaboración Propia

El circuito antes mostrado se armó en la plataforma de pruebas NI ELVIS II de National Instruments, la cual integra los instrumentos utilizados como el osciloscopio y multímetro, en ella se conectó el circuito con la batería a cargar, como se muestra a continuación.

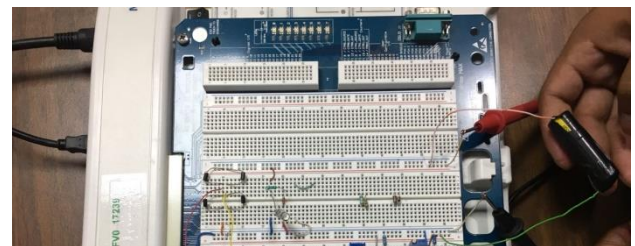


Figura 6 Plataforma de pruebas NI ELVIS II de National Instruments
Fuente: Elaboración Propia

Se procedió a la aplicación de fuerza a través de pisadas en el prototipo (baldosa) para observar el comportamiento de esta, teniendo como resultado el aumento de energía la cual será almacenada en la batería (figura 7).

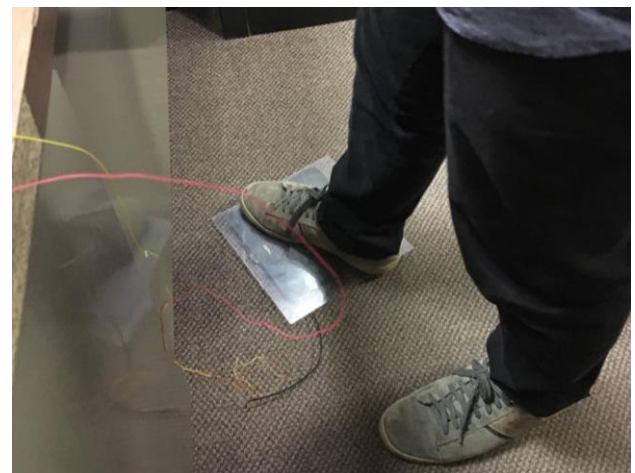


Figura 7 Baldosa
Fuente: Elaboración Propia

Después de esta acción se pudo observar un incremento de voltaje, el cual quedaba almacenado como lo muestra la medición realizada en la siguiente figura.

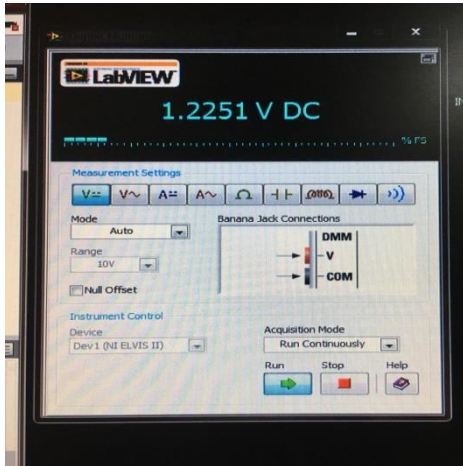


Figura 8 Medición de voltaje incrementado
Fuente: Elaboración Propia

Una vez que se observó un incremento en el voltaje se dejó de aplicar fuerza sobre la baldosa dejando el circuito y prototipo conectados durante 30 min. Observando un aumento de voltaje ocasionado por las mismas vibraciones cercanas al prototipo.



Figura 9 Medición de voltaje
Fuente: Elaboración Propia

5. Resultados

Se logró obtener energía eléctrica a través de energía limpia, generada mediante el uso de materiales piezoeléctricos empleados en la construcción de una baldosa, la cual al ser expuesta a una fuerza por medio de las pisadas de las personas libera energía mecánica que es transformada a energía eléctrica.

Así como también se pudo comprobar que una vez que es cargada la batería, esta no realimenta el circuito debido a las características eléctricas de los diodos.

Referencias

Areny, R. P. (2004). *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo.

CONICYT. (2013) *¿Qué es la ferroelectricidad?* Acercando la Ciencia y la Tecnología a la comunidad. Santiago, Chile. Explora: un programa de CONICYT. Recuperado de <https://www.explora.cl/455-sabias-que/sabias-fisica/1245-que-es-la-ferroelectricidad-1#>

Cottone, F. (2011). *Introduction to vibration energy harvesting*. NiPS Energy Harvesting Summer School, 1-5.

Desconocido. (2016). *Energía química*. Energía Nuclear. Recuperado de <https://energia-nuclear.net/definiciones/energia-quimica.html>

Gabriela. (2008). *SENSORES PIEZOELECTRICOS*. Mediciones. España. WordPress.com. Recuperado de <http://gabrielamorales.wordpress.com/sensores-piezoelectricos/>

Hernández, José. (2011) *¿Como funcionan los Piezoeléctricos? Teoría General. Piezoelectricidad*. Electrónica. Recuperado de <http://smdelectronicayalgomas.blogspot.com/2011/08/como-funcionan-los-piezoelectricos.html#.W6vldXszbct>

Iluminet. (2010). En Mexico 18% de la energía eléctrica se destina a iluminación. D.F., México. Revista de Iluminación ON LINE. Recuperado de <https://www.iluminet.com/en-mexico-18-de-la-energia-electrica-se-destina-a-iluminacion/>

Marimar. (2018). *LEY DE FARADAY / INDUCCIÓN ELECTROMAGNETICA*. ESPACIOCIENCIA.COM. Madrid, España.: Tendencias Media S.L. Recuperado de <https://espaciociencia.com/ley-de-faraday-induccion-electromagnetica/>

Pavegen Systems. (2018). Pavegen. London, England. Recuperado de <http://www.pavegen.com/>

Pérez Flores, Martina., Olmo Carrasco, Satur., Sánchez Carretero, Ana. (2014). *DIPOLOS Y POLARIZACIÓN*. Universidad de Castilla – La Mancha. España. Departamento de Física Aplicada de la UCLM. Recuperado de <https://previa.uclm.es/profesorado/maarranz/Documentos/alumnosmateriales0506/G1-ppt1111.pdf>

Sistema de Control de Iluminación para Aulas

Lighting Control System for Classrooms

ESPEJEL-BLANCO, Daniel Fernando†*, CHÁVEZ, José Manuel, HOYO-MONTAÑO, José Antonio y HERNÁNDEZ-AGUIRRE, Fredy Alberto

Instituto Tecnológico de Hermosillo / Tecnológico Nacional de México

ID 1^{er} Autor: *Daniel Fernando, Espejel-Blanco* / ORC ID: 0000-0002-9692-013X, CVU CONACYT ID: 304845

ID 1^{er} Coautor: *José Manuel, Chávez* / CVU CONACYT ID: 806766

ID 2^{do} Coautor: *José Antonio, Hoyo-Montaño* / ORC ID: 0000-0002-3669-3895, CVU CONACYT ID: 202439

ID 3^{er} Coautor: *Fredy Alberto, Hernández-Aguirre* / CVU CONACYT ID: 611800

Recibido Septiembre 27, 2018; Aceptado 30 Diciembre, 2018

Resumen

Es muy importante gestionar y controlar el consumo de energía eléctrica en edificios ya que así se logrará optimizar el consumo energético. Los edificios consumen el 40% del total de energía a nivel mundial. El uso de iluminación artificial es indispensable en nuestros días ya que de ello depende el correcto desarrollo de las actividades productivas diarias. La iluminación es la carga que más contribuye al consumo total en edificios comerciales, en Estados Unidos los edificios de oficinas consumen un 39% del total. Por ello, se propone el desarrollo de un sistema de control para la iluminación en las aulas empleando una SBC (Single on Board Computer) para controlar el encendido y apagado de las lámparas dependiendo del itinerario de uso de las aulas. La SBC controlará las lámparas a través de un actuador quien estará enlazado con ella a través de una red inalámbrica utilizando módulos XBEE. Se pretende con el desarrollo de este proyecto disminuir en al menos un 7% el consumo de energía. Además, serán reemplazadas las lámparas fluorescentes actuales por lámparas con tecnología LED, lo cual aportará un 30% adicional de ahorros.

Eficiencia Energética, Control de iluminación, Luz LED

Abstract

It is very important to manage and control the consumption of electrical energy in buildings, because this achieves the optimal energy consumption. Buildings consume 40% of the total energy worldwide. The use of artificial lighting is indispensable in our days, because it is necessary for the correct development of our daily productive activities. Lighting is the most important load in commercial buildings, accounting for 39% of the energy consumption in commercial buildings in the United States. Therefore, a lighting control system is proposed to reduce the energy consumption of a classroom. This control system will use an SBC (Single on Board Computer) for Turn ON/OFF the lamps depending on the itinerary of use of the classrooms. The SBC will control the lamps through an actuator who will be linked to it through a wireless network using XBEE modules. It is intended with the development of this project to reduce energy consumption by at least 7%. In addition, current fluorescent lamps will be replaced by lamps with LED technology, which will provide an additional 30% savings.

Energy Efficiency, Lighting Control, LED Lighting

Citación: ESPEJEL-BLANCO, Daniel Fernando, CHÁVEZ, José Manuel, HOYO-MONTAÑO, José Antonio y HERNÁNDEZ-AGUIRRE, Fredy Alberto. Sistema de Control de Iluminación para Aulas. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2018. 2-7: 42-50.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

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

Introducción

La forma en que la energía es consumida en los edificios es altamente dependiente de los siguientes factores (Ma et al., 2016): 1) La función para la que fue construido el edificio; 2) El comportamiento de sus ocupantes; 3) Los materiales de construcción; y 4) La estrategia energética de operación.

En la estrategia energética que se selecciona para el funcionamiento de un edificio, se refiere a la forma en que se utiliza la energía para la funcionalidad del edificio, es decir, luces, sistemas de enfriamiento y/o calefacción, computadoras, refrigeradores, televisiones, etc. Los 4 factores antes mencionados, deben de ser tomados en cuenta al momento de diseñar y construir un edificio. Para edificios ya existentes donde se desee implementar sistemas de control automático de consumo de energía, se requiere encontrar el correcto balance entre el consumo óptimo de energía de las cargas sin sacrificar el confort de los ocupantes.

Para lograr la eficiencia energética, primero se debe identificar cuales cargas son las que mayormente afectan el consumo de energía eléctrica del edificio, para así poder buscar su óptimo consumo de energía sin sacrificio de confort. Por ejemplo, En EEUU de los diversos edificios comerciales existentes, los edificios de oficinas consumen más del 17% del total de la energía eléctrica que se consume en ese sector, y las cargas que más consumen son la iluminación, con un 39%; HVAC con el 14% del consumo; y el equipo de oficina con 15% de consumo de energía (Sehar, Pipattanasomporn, & Rahman, 2017).

Dada la aportación al consumo de energía eléctrica por parte de la iluminación, este rubro puede ser analizado para hacerlo más eficiente, dicho rubro que se encuentra incrustado en la estrategia energética de operación. Es importante recalcar que en la actualidad el empleo de energía eléctrica para fines de iluminación artificial de oficinas, comercios, industrias, etc., se sitúa entre el 11 y 20% del total de consumo (Neweys online, 2013) (U.S. Energy Information Administration, 2017) (Muhamad, Zain, Wahab, Aziz, & Kadir, 2010).

Según la Administración de Información sobre Energía de EEUU (EIA, siglas en inglés de Energy Information Administration) el sector comercial fue responsable del 11% del consumo de energía eléctrica en iluminación del sector en el 2016 (U.S. Energy Information Administration, 2017). Es por esta razón que el control de los sistemas de iluminación han recibido atención como una forma de hacer más eficiente el consumo energético de las organizaciones (Martirano, 2011) (Bellido-Outeirino, Flores-Arias, Domingo-Perez, Gil-De-Castro, & Moreno-Munoz, 2012) (Parise & Martirano, 2013) (Tariq, Zhou, Wu, MacUha, & Sato, 2012).

El uso de iluminación artificial es indispensable en nuestros días, dado de que de ella depende el correcto desarrollo de las actividades productivas diarias. La tecnología para proporcionar iluminación artificial a partir de energía eléctrica ha evolucionado desde la aparición de la lámpara incandescente a finales del siglo 19 han sido investigados diversos métodos para producir iluminación artificial con luz blanca, una de ellas ha sido la luz blanca producida a través de LED, que tienen impactos considerables en el consumo de energía, eficiencia, medio ambiente e incluso salud de las personas (Pimputkar, Speck, DenBaars, & Nakamura, 2009). En eficiencia, según (Bessho & Shimizu, 2012), para el 2010, las lámparas LED alcanzaron eficiencias de 100 lm/W y se esperaba que para el 2015 alcanzaran eficiencias de 150 lm/W.

Una forma de mejorar el consumo de energía eléctrica por iluminación en edificios es el reemplazo de las luminarias incandescentes, fluorescentes y HID por lámparas con tecnología LED. Este solo cambio puede representar un ahorro de hasta el 22% del consumo anual en este rubro (Hoyo-montano, Espejel-blanco, & Schurch-sanchez, 2016).

En países como Malasia, en 2006 se tuvo que del total de energía eléctrica utilizada en edificios comerciales y públicos el 19% se empleó en iluminación (Neweys online, 2013); en el Reino Unido, la iluminación representa el 20% del consumo de energía eléctrica (U.S. Energy Information Administration, 2017).

En Estados Unidos durante el 2011 representó el 21% (Muhamad et al., 2010) y en México durante el 2010 representó el 18% (Secretaría de Energía, 2010), de manera que representa una aplicación importante y sujeta a optimización para reducir su impacto económico y ambiental.

El objetivo de este proyecto es desarrollar un control automático utilizando una SBC (del inglés Single on Board Computer, Computadora de Tarjeta Sencilla) para controlar el encendido y apagado de las luces en un aula de clases del Instituto Tecnológico de Hermosillo, con la intención de promover el desarrollo tecnológico y el ahorro de energía eléctrica.

Desarrollo.

Una forma de controlar el consumo de energía en diversos tipos de cargas se logra a través de la implementación de sistemas de control y automatización de edificios (BACS por las siglas en inglés de Building Automation and Control System) (Hoyo-Montano, Valencia-Palomo, Galaz-Bustamante, & Espejel-Blanco, 2016).

El uso de redes alámbricas e inalámbricas para la implementación de BACS (Bellido-Outeirino et al., 2012) (Tariq et al., 2012) ha reportado buenos resultados en la reducción del uso de energía eléctrica en iluminación.

Aunado al uso de esta tecnología, se está presentando también un cambio en la naturaleza de las fuentes de iluminación. El uso de Diodos Emisores de Luz de alta intensidad (HB LED por las siglas en inglés de High Brightness Light Emitting Diode) es cada vez más atractivo como un elemento adicional de ahorro energético por su alta eficiencia luminosa, la cual actualmente puede fácilmente alcanzar rangos de 100lm/W (Secretaría de Energía, 2010) (Tan, Huynh, & Wang, 2013).

En el año 2016 (Philips, 2016), La compañía Philips anunció una lámpara LED con eficiencia luminosa de 200 lm/W, llamada lámpara Dubai, y de acuerdo con ellos, es la lámpara comercial de mayor eficiencia energética con tecnología LED disponible en el mercado.

Algunas de las estrategias de administración que se pueden implementar en los BACS son las siguientes (Hoyo-Montano, Valencia-Palomo, Galaz-Bustamante, & García-Barrientos, 2015): 1) Dividir por zonas el sistema de iluminación de acuerdo a su uso y requerimientos de luz; 2) Programar el encendido/apagado del interruptor general por medio de un actuador remoto; 3) Integrar el uso de luz natural con artificial en las áreas a iluminar; 4) Controlar el encendido/apagado de las luces en respuesta a la ocupación real en las diferentes zonas a controlar la iluminación; 5) Controlar el encendido/apagado y temperatura de operación de equipos HVAC (del inglés Heat, Ventilation and Air Conditioning); y 6) Definir posibles escenarios donde sea posible el control manual del sistema por medio de interruptores manuales.

La implementación de los BACS requiere de una infraestructura de comunicación. Esta infraestructura puede ser implementada por medio de dispositivos y estándares de tipo abierto como BACNet, LonWorks, KNX, DALI o Zigbee (Bellido-Outeirino et al., 2012; Tariq et al., 2012). Cada una de estas soluciones tiene sus pros y sus contras.

Existen varios desarrollos de controles de iluminación que emplean tecnología Zigbee, que incluyen aplicaciones en alumbrado exterior (Lee et al., 2006) (Siddiqui, Ahmad, Yang, & Lee, 2012), oficinas (Hsu, Yang, Hsu, & Wu, 2010; Hung & Bai, 2010), y casas (Han, Lee, & Park, 2009; Wang & Wang, 2010). Existen estudios que estiman que se puede lograr con el empleo de BACS una reducción del consumo de energía eléctrica de un 20% a un 30% para el control de iluminación y HVAC (Fugate, Fuhr, & Kuruganti, 2011).

El control de las diferentes cargas de un edificio, en particular la iluminación y de los equipos de HVAC, utilizando una aplicación de control automático, permite que se tenga control sobre dichas cargas y esto a su vez permite disminuir el consumo diario de energía eléctrica de las mismas. Si esto lo ponemos en el escenario de consumo excesivo de los aparatos de uso cotidiano, y que gran parte de este consumo es destinado a sistemas de iluminación artificial y HVAC, el uso de tecnologías de control que garanticen un ahorro en el consumo de energía eléctrica se convierte en una opción viable a considerar (Hoyo-Montano et al., 2016).

El desarrollo de BACS modernos permite optimizar el consumo de energía eléctrica sin sacrificar el confort de sus ocupantes, en particular en edificios de oficinas y edificios industriales (Hoyo-Montano et al., 2016). Esto se puede lograr a través de la utilización de software y hardware computacional para controlar los itinerarios de encendido y apagado de las cargas presentes de iluminación y HVAC. El sistema de control de iluminación se instalará en el aula A58, aula que pertenece al edificio A5 del Instituto Tecnológico de Hermosillo.

Dicha aula tiene una superficie de 60.48 metros cuadrados, esto es, 7.2 metros de largo y 8.4 metros de ancho. En primer lugar el sistema de iluminación con lámparas fluorescentes que actualmente tiene dicha aula, será reemplazado con un sistema de iluminación con lámparas de tecnología LED. Además, se requiere controlar el encendido y apagado de las lámparas que se utilizan para dar iluminación artificial a dicha aula, por ello, se instalará el actuador de iluminación en el lugar que ocupan los interruptores de las mismas.

Se desarrollará un actuador de iluminación que será controlado por una Raspberry Pi 3 quien será la responsable de encender y/o apagar las lámparas según sea la programación del uso de cada una de las aulas. El uso de las aulas se encuentra cargado en el Sistema Integral de Información (SII) del ITH, que es el sistema donde se programan las clases que cursarán los estudiantes, incluyendo las aulas. Dicho sistema es alimentado por las Jefaturas de carrera y por las coordinaciones de carrera, para que contenga los horarios de las clases, los profesores y las aulas.

Resultados

El primer paso para realizar el proyecto consiste en el reemplazo de las lámparas fluorescentes actuales por lámparas con tecnología LED. El sistema de iluminación actual consta de 4 gabinetes de dos tubos fluorescentes de 48 pulgadas tipo T8 de 32W. La Figura 1 muestra el aula A58 con el sistema de iluminación fluorescente.



Figura 1 Aula A58 con sistema de iluminación Fluorescente

Fuente: Elaboración Propia

El sistema de iluminación propuesto con lámparas de tecnología LED está integrado por 9 gabinetes de lámpara sencilla de 48 pulgadas con tubos T8 de tecnología LED de 12W con una eficiencia luminosa de 140 lumens/W. La Figura 2 muestra el plano de instalación de las lámparas en el techo del aula y la Figura 3 muestra el aula A58 con el sistema de iluminación LED propuesto.

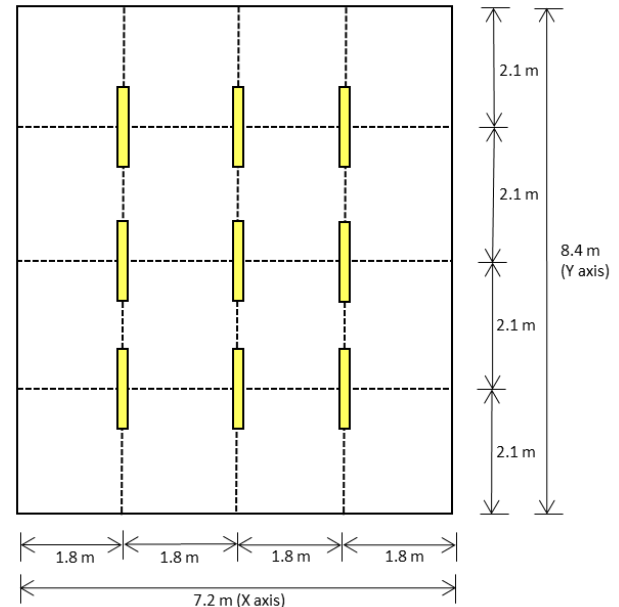


Figura 2 Plano de distribución de lámparas LED

Fuente: Elaboración Propia



Figura 3 Aula A58 con sistema de iluminación LED
Fuente: *Elaboración Propia*

Se utilizó un medidor de calidad de la energía marca Fluke modelo 43B para monitorear el consumo de energía de ambos sistemas de iluminación. Los resultados de las mediciones se muestran en la Tabla 1.

Sistema de Iluminación	Consumo energético (W)
Fluorescente	342
LED	155

Tabla 1 Consumo de energía en ambos sistemas de iluminación
Fuente: *Elaboración Propia*

Como se puede apreciar en la Tabla 1, el solo reemplazo de las lámparas fluorescentes por las lámparas LED logra una reducción del 54.7% en el consumo de energía eléctrica. Para poder integrar soluciones de control automático que integren software y hardware, es necesario tomar en cuenta los diferentes factores que contribuyen al consumo energético. Estos factores van desde el diseño y desarrollo del sistema de control, hasta los elementos que se involucran para controlar el sistema de iluminación artificial.

3.1 Diseño del Actuador de Iluminación

En el diseño del actuador para controlar el encendido y apagado de las lámparas del edificio, se construyó un interruptor de estado sólido con un TRIAC 2N6344A de 8 amperes. El circuito está integrado además de un módulo XBEE S2C para tener comunicación inalámbrica con el circuito de control. La Tabla 2 muestra la lista de materiales utilizados en el desarrollo del actuador para iluminación y la Figura 4 el circuito esquemático.

Cantidad	Referencia	Parte
2	C1,C2	100nF
1	Q1	2N2222A
1	Q2	2N6344A
1	R1	10kΩ
1	R2	220Ω
1	R3	180Ω
1	R4	1kΩ
1	U1	Xbee S2C
1	U2	LM1086
1	U3	MOC3031

Tabla 2 Lista de materiales del actuador de iluminación
Fuente: *Elaboración Propia*

El circuito mostrado en la Figura 1, el XBEE recibe la instrucción vía inalámbrica (a través de otro XBEE) de enviar un “alto” en su pin 20, el cual polariza la base del transistor Q1 poniéndolo en conducción y alimenta el MOC3031 que permite que el TRIAC se encienda. De igual forma sucede lo contrario para el apagado pero con el envío de un “bajo” para el pin 20 del XBEE. El TRIAC, tiene conectado entre sus terminales T1 y T2 las lámparas que se desean controlar. Se diseñó el circuito impreso del actuador y se construyó un prototipo del mismo para realizar las pruebas de encendido y apagado de las lámparas así como la comunicación vía XBEE del actuador con una Raspberry Pi funcionando como control. La Figura 5 muestra el circuito impreso desarrollado (a) y una foto del prototipo construido (b).

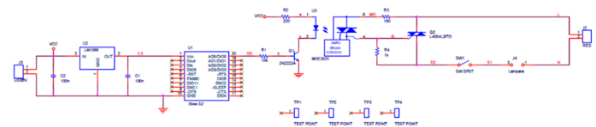


Figura 4 Circuito esquemático del actuador de iluminación
Fuente: *Elaboración Propia*

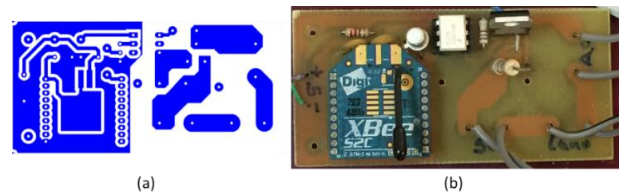


Figura 5 (a) Circuito impreso del actuador, (b) foto de actuador construido
Fuente: *Elaboración Propia*

3.2 Conexión de la Raspberry Pi 3 con el Actuador de Iluminación

Con el diseño del actuador para el control del encendido y apagado de las lámparas del edificio, se realizó la programación de los XBEE que funcionarían como enlace entre la Raspberry y el actuador. Lo principal es que ambos XBEE tengan la misma “PAN ID” para que puedan funcionar en la misma red, se utiliza “FFFF” para los 2 XBEE a utilizar en esta conexión.

La dirección de destino alta (DH) del primer XBEE debe ser la dirección alta (SH) del otro XBEE, y la dirección de destino baja (DL) del primer XBEE debe ser la dirección baja (SL) del otro XBEE. Ambos números de dirección (alta y baja) se pueden ver en el software XCTU o están impresos en la etiqueta debajo del módulo XBEE.

Por cuestiones de orden y fácil localización en la red con el software XCTU, se le asigna un nombre a cada XBEE, en este caso se llaman “Coord2” y “luces”, para la conexión con la Raspberry y el actuador respectivamente. Hay que modificar la configuración en el XBEE coordinador y habilitar la capacidad de funcionar como coordinador.

El parámetro AP de ambos XBEE se coloca en 1 (API enabled, Application Programming Interface) ya que este modo en los XBEE permite la comunicación de un XBEE como coordinador con varios XBEE en la misma red. El resto de los parámetros de ambos XBEE se dejan los de default.

Se conecta un XBEE a la Raspberry (coordinador) a través de una base “XBEE USB explorer” (es una base para poder conectar un XBEE a través de un puerto USB) y se conecta de forma directa a uno de los puertos USB de la Raspberry. Se coloca el XBEE en la base del circuito impreso mostrado en la Figura 5(b) y se ejecuta el programa mostrado en el Figura 6. En la Figura 7 se muestra el circuito de conexión de la Raspberry y el Actuador.

```
File Edit Format Run Options Windows Help
from digi.xbee.io import IOLine, IOValue, IOMode
from digi.xbee.devices import XBeeDevice
import traceback
import time
import threading

# Variables de configuración, cambiar estos valores a los que se utilizaran para el script:
io_line = IOLine.DIGI_ADO_ADO # Pin de IO a modificar
io_value = IOValue.HIGH # Estado a cambiar del IO
port = "/dev/ttyUSB0" # Puerto utilizado para la comunicación
baud_rate = 9600 # Velocidad configurada en XBee local para comunicación
node_id = "luces" # Node Identifier del XBee remoto con el que se conectará

try:
    local_device = XBeeDevice(port, baud_rate) # Crea un objeto XBee con la velocidad y el puerto a comunicarse
    local_device.open() # Inicializa la comunicación con el XBee declarado previamente
    xbee_network = local_device.get_network() # Obtiene la red de XBee's a la cual pertenece el XBee local
    device = xbee_network.discover_device(node_id) # Se conecta con el XBee remoto con el NI (Node ID) definido

    stop = False
    th = None

    try:
        def io_detection_callback():
            while not stop:
                device.set_io_value(io_line, io_value) # Cambia el pin de la línea 'io_line' y lo pone a 'io_value'
                time.sleep(0.2)

            th = threading.Thread(target=io_detection_callback) # Crea un nuevo thread
            device.set_io_configuration(io_line, IOMode.DIGITAL_OUT_LOW) # Cambia la configuración del XBee remoto
            time.sleep(0.2)

            th.start() # Inicia el thread en espera para llamar el método arriba.

        finally:
            stop = True # Detiene el thread
            if th is not None and th.is_alive():
                th.join()

    except Exception as ex:
        print((type(ex).__name__ + ": " + str(ex)))
        traceback.print_exc()

    finally:
        if local_device: # En caso de que todavía exista el objeto y haya comunicación, cierra el link con el objeto
            local_device.is_open()
            local_device.close()

Un local
```

Figura 6 Programa en Python para controlar el XBEE conectado a la Raspberry y el XBEE conectado al actuador de iluminación
Fuente: Elaboración Propia

El programa mostrado en la Figura 6 realiza la conexión entre el XBEE que se encuentra conectado por el puerto USB a la Raspberry con el XBEE que está en el circuito del actuador. El programa mostrado es una modificación del ejemplo de comunicación entre dispositivos XBEE que vienen en la librería de digi-xbee.

La única función que realiza es la habilitación del pin ADO del XBEE (pin 20), que es el pin que se utiliza para activar el TRIAC del circuito del actuador y así encender y/o apagar las lámparas conectadas a él. En la Raspberry se debe instalar la librería para manejar los XBEE de Digi a través de la instrucción “sudo pip3 install digi-xbee”.

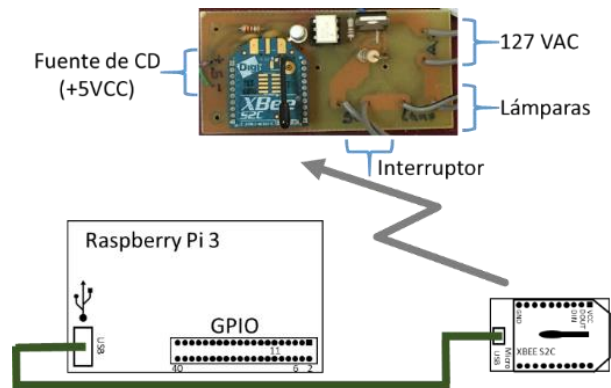


Figura 7 Circuito de conexión entre la Raspberry y el Actuador
Fuente: Elaboración Propia

Una vez puesto en marcha el sistema de control propuesto, implementado en el aula A58 del ITH, se espera obtener ahorros en el consumo de energía eléctrica, los cuales pueden oscilar entre el 5% y el 7% por concepto de iluminación, adicionales al ahorro obtenido por el reemplazo de las lámparas fluorescentes por las lámparas LED, dependiendo de la programación de uso de las aulas.

Agradecimiento

Agradecimiento especial al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Hermosillo, por proporcionar los fondos para que este proyecto se llevara a cabo.

Conclusiones

Se presentó un sistema de control automático para encender y/o apagar las lámparas del aula A58 con el fin de promover el desarrollo tecnológico y el ahorro energético. Dicho control se logra a través de una Raspberry Pi 3 utilizando XBEE para la conexión inalámbrica con el actuador y así poder encender y apagar las lámparas vía remota.

Se logró una disminución del consumo de energía del 54.7% con el reemplazo del sistema de iluminación artificial utilizado con lámparas fluorescentes por un sistema de iluminación con lámparas de tecnología LED. Además se espera lograr más ahorros de energía al controlar el encendido y apagado de las lámparas en el horario programado de uso.

Se está trabajando en este momento con el manejo del “cron” en la Raspberry para poder ejecutar el itinerario de encendido y apagado de las lámparas, lo anterior en función de la programación oficial del uso de aula. Con esta opción se permitirá el control de las lámparas sólo en los horarios que este en ocupación, en los horarios en que el espacio esté desocupado el actuador estará deshabilitado y las lámparas no podrán ser encendidas con el interruptor destinado a ello.

Referencias

- Bellido-Outeirino, F. J., Flores-Arias, J. M., Domingo-Perez, F., Gil-De-Castro, A., & Moreno-Munoz, A. (2012). Building lighting automation through the integration of DALI with wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 58(1), 47–52. <https://doi.org/10.1109/TCE.2012.6170054>
- Bessho, M., & Shimizu, K. (2012). Latest trends in LED lighting. *Electronics and Communications in Japan*, 95(1), 1–7. <https://doi.org/10.1002/ecj.10394>
- Fugate, D., Fuhr, P., & Kuruganti, T. (2011). Instrumentation systems for commercial building energy efficiency. In *2011 Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings* (pp. 21–24). Oak Ridge, TN, USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/FIIW.2011.6476826>
- Han, J., Lee, H., & Park, K. R. (2009). Remote-Controllable and Energy-Saving Room Architecture based on ZigBee Communication. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 55(1), 264–268. <https://doi.org/10.1109/TCE.2009.4814444>
- Hoyo-montano, J. A., Espejel-blanco, D. F., & Schurch-sanchez, D. G. (2016). Retrofitting and Energy Control of an Academic Building. In *IEEE Conference on Technologies for Sustainability* (pp. 114–118). Phoenix.
- Hoyo-Montano, J. A., Valencia-Palomo, G., Galaz-Bustamante, R. A., & Espejel-Blanco, D. F. (2016). Software Development of a Building Automation and Control System for Educational Institutions. *XIII Congreso Internacional Sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET 2016*, 1–6.
- Hoyo-Montano, J. A., Valencia-Palomo, G., Galaz-Bustamante, R. A., & García-Barrientos, A. (2015). Sistema De Control De Consumo De Energía Eléctrica Para Edificios. *Congreso Internacional En Ingeniería Electrónica. Mem. Electro 2015*, 37, 176–180.

- Hsu, C. L., Yang, S. Y., Hsu, T. Y., & Wu, W. Bin. (2010). Practical design of active & intelligent energy-saving system with modules strategy. In *2010 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, ICMLC 2010* (Vol. 6, pp. 3002–3008). <https://doi.org/10.1109/ICMLC.2010.5580737>
- Hung, C.-H., & Bai, Y.-W. (2010). Halftone control method in white light LEDs by using an embedded remote controller with zigbee communication. *23rd Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2010*, 1–6.
- Lee, J. D., Nam, K. Y., Jeong, S. H., Choi, S. B., Ryoo, H. S., & Kim, D. K. (2006). Development of Zigbee based street light control system. In *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2006 - Proceedings* (pp. 2236–2240). <https://doi.org/10.1109/PSCE.2006.296311>
- Ma, L., Liu, N., Wang, L., Zhang, J., Lei, J., Zeng, Z., ... Cheng, M. (2016). Multi-party energy management for smart building cluster with PV systems using automatic demand response. *Energy and Buildings*, *121*, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.072>
- Martirano, L. (2011). Lighting systems to save energy in educational classrooms. In *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEEIC.EU 2011 - Conference Proceedings* (pp. 1–5). Rome: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEEIC.2011.5874691>
- Muhamad, W. N. W., Zain, M. Y. M., Wahab, N., Aziz, N. H. A., & Kadir, R. A. (2010). Energy Efficient Lighting System Design for Building. In *2010 International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation* (pp. 282–286). Liverpool: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISMS.2010.59>
- Neweys online. (2013). Reducing the Energy Consumption of Light. Retrieved January 29, 2017, from <http://www.neweysonline.co.uk/Reducing-The-Energy-Consumption-Of-Light/Static.raction>
- Parise, G., & Martirano, L. (2013). Daylight impact on energy performance of internal lighting. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *49*(1), 242–249. <https://doi.org/10.1109/TIA.2012.2229454>
- Philips. (2016). Dubai Municipality and Philips Lighting announce launch of Dubai Lamp Initiative. Retrieved August 23, 2018, from <http://www.newsroom.lighting.philips.com/news/2016/20161005-dubai-municipality-and-philips-lighting-announce-launch-of-dubai-lamp-initiative#>
- Pimputkar, S., Speck, J. S., DenBaars, S. P., & Nakamura, S. (2009). Prospects for LED lighting. *Nature Photonics*, *3*(4), 180–182. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2009.32>
- Secretaria de Energia. (2010). Boletín 001.2010. Retrieved February 5, 2015, from <http://www.sener.gob.mx/portal/Default.aspx?id=902>
- Sehar, F., Pipattanasomporn, M., & Rahman, S. (2017). Integrated automation for optimal demand management in commercial buildings considering occupant comfort. *Sustainable Cities and Society*, *28*, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.08.016>
- Siddiqui, A. A., Ahmad, A. W., Yang, H. K., & Lee, C. (2012). ZigBee based Energy Efficient Outdoor Lighting Control System. *Advanced Communication Technology (ICACT), 2012 14th International Conference On*, 916–919.
- Tan, Y. K., Huynh, T. P., & Wang, Z. (2013). Smart personal sensor network control for energy saving in DC grid powered LED lighting system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *4*(2), 669–676. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2219887>
- Tariq, M., Zhou, Z., Wu, J., MacUha, M., & Sato, T. (2012). Smart grid standards for home and building automation. In *2012 IEEE International Conference on Power System Technology, POWERCON 2012* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/PowerCon.2012.6401448>
- U.S. Energy Information Administration. (2017). How much electricity is used for lighting in the United States? - FAQ - U.S. Energy Information Administration (EIA). Retrieved May 21, 2018, from <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=99&t=3>

Wang, Y., & Wang, Z. (2010). Design of Intelligent Residential Lighting Control System Based on ZigBee Wireless Sensor Network and Fuzzy Controller. In *2010 International Conference on Machine Vision and Human-Machine Interface (MVHI)* (pp. 561–564). <https://doi.org/10.1109/MVHI.2010.9>

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 Eléctrica. 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]

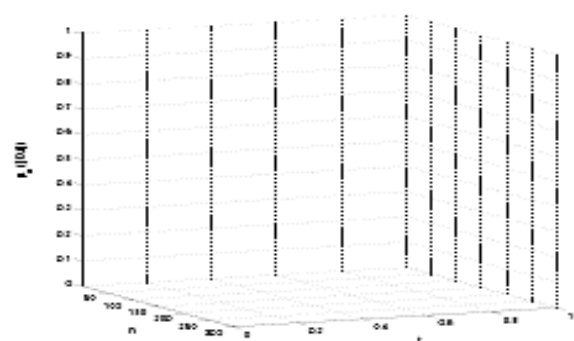


Gráfico 1 Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

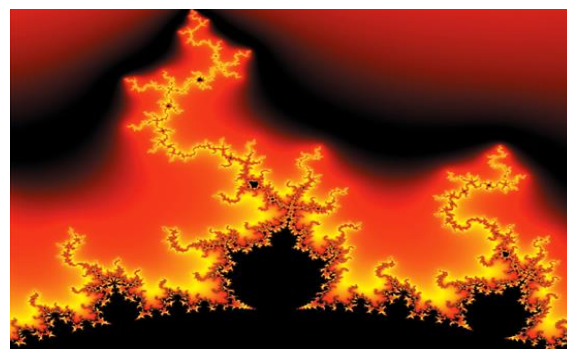


Figura 1 Titulo y Fuente (*en cursiva*)

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.

Instrucciones para la Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

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 Eléctrica 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 Eléctrica 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 Perú 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-Mexico, S.C en su Holding Perú para su Revista de Ingeniería Eléctrica, 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 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)

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

SUYO-CRUZ, Gabriel. PhD

Editores de Producción

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Administración Empresarial

REYES-VILLAGO, 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 Eléctrica

“Análisis exergetico y termoeconómico de la Central Termoeléctrica, Villa de Reyes, operando a carga parcial”

JIMENEZ-GARCIA, Juan A., DURAN-GARCIA, Maria D., CALDERON-NEPAMUCENO, Dora María y TORRES-TOVAR, Rigoberto

Universidad Autónoma del Estado de México

“Prototipo electrónico de seguimiento solar sin sensores”

FRANCO-MARTINEZ, David, HERRERA-GOMEZ, Juan Alberto y MONROY-CARREÑO, Roberto

Centro Tecnológico, Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM

“Generador de energía eléctrica a través de energía limpia”

PÉREZ-GALINDO, Liliana Eloisa, HERNÁNDEZ-BORJA, Carlos, ALVARADO-GONZÁLEZ, Ángel y LÓPEZ-VICENTE, Jade

Universidad Tecnológica Fidel Velázquez

“Sistema de Control de Iluminación para Aulas”

ESPEJEL-BLANCO, Daniel Fernando, CHÁVEZ, José Manuel, HOYO-MONTAÑO, José Antonio y HERNÁNDEZ-AGUIRRE, Fredy Alberto

Instituto Tecnológico De Hermosillo

