

ISSN 2523-2517

Volumen 3 Número 8 — Enero — Marzo — 2019

Revista de Ingeniería Eléctrica



ECORFAN®

Editor en Jefe

QUINTANILLA - CÓNDOR, Cerapio. PhD

Directora Ejecutiva

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Editorial

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

Diseñador Web

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

Diagramador Web

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Asistente Editorial

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

Traductor

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

Filóloga

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

Revista de Ingeniería Eléctrica, Volumen 3, Número 8, de Enero a Marzo 2019, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Perú. La Raza Av. 1047 No. - Santa Ana, Cusco-Perú. Postcode: 11500. WEB: www.ecorfan.org/republicoferu, revista@ecorfan.org. Editor en Jefe: QUINTANILLA - CÓNDOR, Cerapio. 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 Marzo 2019.

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 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.

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 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

GUZMÁN - ARENAS, Adolfo. PhD
Massachusetts Institute of Technology

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

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

FERNANDEZ - ZAYAS, José Luis. PhD
University of Bristol

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

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

TIRADO - RAMOS, Alfredo. PhD
University of Amsterdam

VAZQUEZ - MARTINEZ, Ernesto. PhD
University of Manitoba

AYALA - GARCÍA, Ivo Neftalí. PhD
University of Southampton

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

Comité Arbitral

TECPOYOTL - TORRES, Margarita. PhD
Universidad Autónoma del Estado de Morelos

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

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

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

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

GUTIÉRREZ - VILLEGAS, Juan Carlos. PhD
Universidad de Guadalajara

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

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

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

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

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

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 mandara a arbitraje y se rescindirá de la recepción del Artículo notificando a los Autores responsables, reivindicando que el plagio académico está tipificado como delito en el Código Penal.

Proceso de Arbitraje

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

Instrucciones para Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

Área del Conocimiento

Los trabajos deberán ser inéditos y referirse a temas de 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, *Dimensionamiento de un horno de fundición por inducción electromagnética y cálculo de los parámetros eléctricos*, por PÉREZ-PÉREZ, Arnulfo, TÉLLEZ-MARTÍNEZ, Jorge Sergio, HORTELANO-CAPETILLO, Gregorio y BARRAZA-FIERRO, Jesús Israel, con adscripción en la Universidad Politécnica de Juventino Rosas, como segundo artículo presentamos, *Los armónicos que aportan los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red un problema latente*, por DELGADO-PONCE, Luis, VARGAS-HERNÁNDEZ, Oscar Joel, MARTÍNEZ-MAGDALENO, Arturo y MENÉNDEZ-BENAVENTE, Luis Martín, con adscripción en la Universidad Tecnológica de Salamanca, como tercer artículo presentamos, *Medidor bidireccional trifásico interconectado a la red con monitoreo de la generación de energía eléctrica del conjunto panel-microinversor*, por HERNÁNDEZ-AGUIRRE, Fredy Alberto, TÁNORI-RUÍZ, Víctor Alfonso, ORRANTE-SAKANASSI, Jorge Alberto y VÁZQUEZ-PALMA, Martín Gustavo, con adscripción en el Instituto Tecnológico de Hermosillo, como último artículo presentamos, *Evaluación de la energía mareomotriz en el norte del Golfo de California con fines de generación de energía eléctrica*, por QUIÑONEZ-OSUNA, José Ramón, MARINONE-MOSCHETTO, Silvio Guido, FLORES-AGUILAR, María Dolores y CARMONA-DUARTE, Domingo, con adscripción en el Instituto Tecnológico de Mazatlán.

Contenido

Artículo	Página
Dimensionamiento de un horno de fundición por inducción electromagnética y cálculo de los parámetros eléctricos PÉREZ-PÉREZ, Arnulfo, TÉLLEZ-MARTÍNEZ, Jorge Sergio, HORTELANO-CAPETILLO, Gregorio y BARRAZA-FIERRO, Jesús Israel <i>Universidad Politécnica de Juventino Rosas</i>	1-4
Los armónicos que aportan los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red un problema latente DELGADO-PONCE, Luis, VARGAS-HERNÁNDEZ, Oscar Joel, MARTÍNEZ-MAGDALENO, Arturo y MENÉNDEZ-BENAVENTE, Luis Martín <i>Universidad Tecnológica de Salamanca</i>	5-20
Medidor bidireccional trifásico interconectado a la red con monitoreo de la generación de energía eléctrica del conjunto panel-microinversor HERNÁNDEZ-AGUIRRE, Fredy Alberto, TÁNORI-RUÍZ, Víctor Alfonso, ORRANTE-SAKANASSI, Jorge Alberto y VÁZQUEZ-PALMA, Martín Gustavo <i>Instituto Tecnológico de Hermosillo</i>	21-32
Evaluación de la energía mareomotriz en el norte del Golfo de California con fines de generación de energía eléctrica QUIÑONEZ-OSUNA, José Ramón, MARINONE-MOSCHETTO, Silvio Guido, FLORES-AGUILAR, María Dolores y CARMONA-DUARTE, Domingo <i>Instituto Tecnológico de Mazatlán</i>	33-39

Dimensionamiento de un horno de fundición por inducción electromagnética y cálculo de los parámetros eléctricos

Dimensioning of an induction heating furnace and calculation of the electrical parameters

PÉREZ-PÉREZ, Arnulfo †, TÉLLEZ-MARTÍNEZ, Jorge Sergio, HORTELANO-CAPETILLO, Gregorio y BARRAZA-FIERRO, Jesús Israel

Universidad Politécnica de Juventino Rosas

ID 1^{er} Autor: *Arnulfo, Pérez-Pérez* / ORC ID: 0000-0001-6354-8899, CVU CONACYT ID: 176434

ID 1^{er} Coautor: *Jorge Sergio Téllez-Martínez* / ORC ID: 0000-0003-0587-0059, CVU CONACYT ID: 40084

ID 2^{do} Coautor: *Gregorio, Hortelano-Capetillo* / ORC ID: 0000-0002-3702-4853, CVU CONACYT ID: 347496

ID 3^{er} Coautor: *Jesús Israel, Barraza-Fierro* / ORC ID: 0000-0003-0905-5924, CVU CONACYT ID: 170811

DOI: 10.35429/JEE.2019.8.3.1.15

Recibido: 18 de Enero, 2019; Aceptado 09 de Marzo, 2019

Resumen

En este trabajo se determinó las dimensiones de un horno para fundición de aleaciones ferrosas. El horno tiene un sistema de calentamiento por inducción electromagnética. Además, se calculó los parámetros de alimentación de energía eléctrica como la frecuencia y la potencia. Se propuso una masa de acero fundida de 5kg con una densidad de 7.81 kg/dm³. Esto equivale a un volumen del crisol de 0.641 dm³. La frecuencia se obtuvo de tablas existentes las cuales toman en cuenta el diámetro del crisol y su valor fue de 1 KHz. La potencia requerida se determinó con el calor requerido para llevar el acero a la temperatura de 1740 K, las pérdidas energéticas a través de las paredes, fondo del crisol y parte superior. Este valor se dividió entre el tiempo de calentamiento (30 minutos) y resultó en una potencia de 4.5 KW. El desarrollo de los cálculos evidencia que la fundición por inducción es un proceso eficiente y permite un calentamiento rápido aleaciones ferrosas.

Calentamiento por inducción, Crisol, Frecuencia

Abstract

In this work, the dimensions of a furnace for melting of ferrous alloys were determined. The furnace has an electromagnetic induction heating system. In addition, the parameters of electrical power supply such as frequency and power were calculated. A 5kg cast steel mass with a density of 7.81 kg / dm³ was proposed. This corresponds to a crucible volume of 0.641 dm³. The frequency was obtained from tables, which take into account the diameter of the crucible, and its value was 1 KHz. The energy consumption was determined with the heat required to bring the steel to the temperature of 1740 K, the energy losses through the walls, bottom and top of the crucible. This value was divided between the heating time (30 minutes) and resulted in a power of 4.5 KW. The development of the calculations shows that the induction heating is an efficient process and allows a fast melting of ferrous alloys.

Induction Heating, Crucible, Frequency

Citación: PÉREZ-PÉREZ, Arnulfo, TÉLLEZ-MARTÍNEZ, Jorge Sergio, HORTELANO-CAPETILLO, Gregorio y BARRAZA-FIERRO, Jesús Israel. Dimensionamiento de un horno de fundición por inducción electromagnética y cálculo de los parámetros eléctricos. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2019 3-8: 1-4

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Un método ampliamente utilizado en la industria -cuando se requiere el calentamiento o fundición de metales, en una atmósfera controlada y libre de oxígeno- es el calentamiento por inducción electromagnética. Este proceso se puede modelar mediante la utilización de las leyes de Faraday, Ampere y la aplicación del efecto Joule.

Para aumentar la temperatura del metal que se desea fundir se requiere someter la muestra a un campo magnético variable en el tiempo, y de amplitud considerable.

Bajo estas condiciones, en el interior de la muestra se inducen corrientes que producen disipación de potencia; la cual se manifiesta con un incremento en la temperatura, pudiendo llegar al valor correspondiente que permita la fundición.

Objetivo general

Obtener los parámetros eléctricos y el dimensionamiento de un horno de fundición de acero por el proceso de inducción electromagnética utilizando las ecuaciones que se recomiendan en la bibliografía.

Metodología

Los pasos para generar el diseño de un horno de inducción son los siguientes:

1. Diseño del crisol que incluye la determinación de la relación altura/diámetro (L_w / D_w), diámetro de la bobina al diámetro de carga D_c / D_w y el grosor de la pared del crisol.
2. Selección de la frecuencia: La especificación física de la pieza de trabajo y su dimensión determinan la frecuencia de la fuente de alimentación para el proceso térmico. Esta frecuencia debe ser mayor que la frecuencia crítica dada en la siguiente ecuación.

$$f_c = \frac{6.45 \rho}{\mu D_w^2} \quad (1)$$

f_c = Frecuencia crítica.

ρ = resistividad (ohm/m).

μ = permeabilidad (H/m).

D_w^2 = diametro de la carga (m).

3. Determinación de la potencia requerida: la fuente de alimentación se selecciona en base a la potencia y frecuencia requerida para el proceso de fusión. La potencia requerida consiste en: la potencia relativa para fundir la carga y las pérdidas de calor acompañadas del proceso de fusión.
4. Diseño de la bobina de inducción: el cual consiste en el número de conductores de cobre con la sección apropiada para satisfacer la refrigeración requerida.
5. Determinación del enfriamiento requerido.

Diseño del crisol y grosor de la pared. La cantidad de acero que se desea fundir es 5 kg, que dado una densidad de 7800 kg/m^3 , resulta un volumen de 0.641 litros o 0.641 dm^3 . Luego, se propone un diámetro de 7 cm y entonces la altura es de 16.7 cm. Se recomienda que la relación diámetro/altura sea menor que la unidad y estos datos propuestos cumplen con esa relación, así que son aceptados. El grosor de la pared del crisol se propone de 2 cm.

Selección de la frecuencia. Esto se hace a partir de tablas. Para un diámetro de carga de entre 40 y 175 mm la frecuencia de calentamiento para el acero es de 1000 Hz, misma a la que corresponde una profundidad de referencia (Por el efecto piel) de 13.7 mm.

Potencia requerida. La potencia requerida deberá entregar el calor necesario para la fundición en un tiempo que se propone. El calor para la fundición se calcula con la siguiente ecuación.

$$H = \rho V [C_s (T_m - T_o) + H_f + C_l (T_p - T_m)] \quad (2)$$

Donde ρ =densidad del acero, V = volumen que se va a fundir, C_s = Calor específico del acero sólido, T_m = Temperatura de fusión, T_o = Temperatura ambiente, H_f = Calor latente de fusión del acero, C_l =calor específico del acero en estado líquido y T_p = Temperatura de colada. Sustituyendo los datos en (2), el calor H necesario para la fundición es

$$H = 5 \text{ kg} \left[473 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} (1689 \text{ K} - 296.15 \text{ K}) + 221274 \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 721 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} (1740 \text{ K} - 1689 \text{ K}) \right]$$

$$H = 4 \ 584 \ 670 \ \text{J}$$

Si se propone un tiempo de fusión de 30 minutos (1800 s), la potencia requerida para el baño será

$$P=H/t = 4\ 584\ 670\text{J}/1800\text{s} = 2.5\ \text{KW}. \quad (3)$$

A este calor de fusión se agregan las pérdidas de energía a través de la pared del crisol del fondo y del baño descubierto. Para la pared del crisol, el cálculo de la pérdida de energía utiliza la ecuación:

$$P_1 = \frac{\kappa}{\Delta x} (T_c - T_b) (S_1 + S_2) \quad (4)$$

$$P_1 = \frac{1.3 \frac{W}{m \cdot K}}{0.02\ m} (1740\text{K} - 353\text{K})(0.024\text{m}^2 + 0.009\text{m}^2) = 3.0\ \text{KW}$$

Donde P_1 son las pérdidas a través de la pared del crisol, κ es la conductividad térmica del mismo, T_c es la temperatura del lado caliente, T_b es la temperatura del aire, y Δx es el espesor de la pared, S_1 y S_2 son la superficie lateral y del fondo del crisol respectivamente.

En el baño descubierto, la ecuación que se usa es la de transferencia de calor por radiación

$$P_3 = \varepsilon \sigma S T_s^4 \quad (5)$$

Donde ε es la emisividad del acero (0.8 adimensional), σ es la constante de Stefan-Boltzman ($5.67 \times 10^{-8}\ \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$), S el área de la superficie emisora de calor y T la temperatura del cuerpo emisor.

$$P_2 = (5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4})(0.8) * (1740\text{K})^4 * 0.009\text{m}^2 = 3.7\ \text{KW}$$

Con esta información se determina la potencia total requerida para la fundición

$$P_T = P_{\text{baño}} + P_1 + P_2 \quad (6)$$

$$P_T = 2.5\ \text{KW} + 3.0\ \text{KW} + 3.7 = 9.2\ \text{KW}.$$

Diseño de la bobina de inducción. El material que se utilizará en la bobina será un tubo de cobre de diámetro 3/8 de pulgada. Dadas las características del crisol, el diámetro de la bobina será de 11 cm y una longitud de 168 mm. El número de espiras se obtiene con la relación

$$\text{No de espiras} = \frac{L}{\text{diámetro del tubo} + \text{separación entre espiras}} \quad (7)$$

Sustituyendo datos

$$\text{No de espiras} = \frac{169\ \text{mm}}{\left(\frac{3}{8}\ \text{in}\right)\left(\frac{\text{mm}}{\text{in}}\right) + 1\ \text{mm}} = 16\ \text{espiras}$$

La longitud del conductor de cobre necesario para la bobina se determina con la siguiente ecuación:

$$l = 2 * \pi * r * \text{No de espiras} \quad (8)$$

$$l = 2 * \pi * 6\ \text{cm} * 16 = 603\ \text{cm}$$

Resultados

Después de haber seguido la metodología propuesta para el diseño de un horno de inducción, se han determinado los parámetros que se muestran en la tabla 1.

Parámetro	Valor
Capacidad	5 Kg
Volumen de la cámara	0.64 l
No de espiras del inductor	16
Diámetro interior del crisol	7 cm
Altura del crisol	17 cm
Potencia	9.2 KW
Tiempo para la fusión	30 min
Frecuencia	1 khz

Tabla 1 Parámetros eléctricos y dimensiones calculadas para un horno de fundición de acero por inducción electromagnética

La figura 1 muestra las dimensiones que se aplicarían a la carga (material fundido), las dimensiones de la bobina y el espesor del crisol

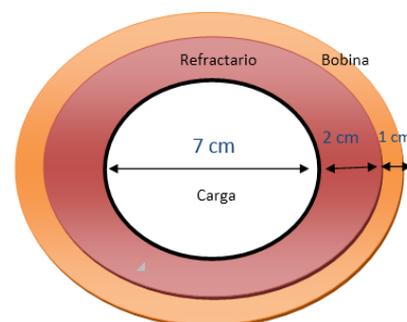


Figura 1 Dimensiones del horno de inducción propuesto

Conclusiones

Como lo demuestran los cálculos realizados, la potencia requerida para la fundición estará en función al tiempo propuesto para llevar a cabo la fundición.

Hay otros valores que quedarían fijos y que no dependen del tiempo como es la pérdida de energía en las paredes que solo dependen de las temperaturas a las que se maneje el baño de acero.

Considerando la potencia requerida para el calentamiento de baño y las pérdidas, la potencia total requerida será de 9.2 KW para fundir en un tiempo de 30 minutos.

Puesto que se pretende fundir una masa de 5 kg para elaborar probetas que van a ser utilizadas en trabajos de investigación, las dimensiones del crisol deberán ser de una altura de 17 m y un diámetro interior de 7 cm con un espesor de pared de 2 cm.

Aunque aquí no se plantea, se debe calcular un sistema de enfriamiento del inductor para evitar un sobrecalentamiento que incremente la resistividad eléctrica y disminuya la eficiencia eléctrica del equipo.

Bibliografía

Alfredo Acevedo. (Noviembre 2007). Metodología para la Construcción de un horno de Inducción Electromagnética.

ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. USA 2005.

Carlos Eduardo Márquez de la Torre. (2002). Tratamiento térmico de Anillos de Acero AISI 4140 (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería mecánica y eléctrica. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

Federico Gonzalo Ochoa Mate. (2006). Prolongación de la vida útil del revestimiento refractario de un horno de inducción INTRANET. 2006, de Escuela asociación politécnica de litoral.

José Luis Enrique Berciano, Et. Al. Monografías sobre tecnología del acero. Parte III. Colada del acero. Madrid 2009.

Luis Fernando Idarraga Ortiz y Rafael Afanador Muñoz. (2006). Calentamiento por inducción: Diseño y construcción del sistema de control de un puente resonante. (Tesis licenciatura). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Omar David Muñoz (2011). Design Strategy for a 3-Phase Variable Frequency Drive (VFD). Senior project. California Polytechnic State University. San Luis Obispo, Cal. USA.

Sunil M. Jaraliker. (2013). Performance Analysis of an Induction Furnace Employing 12 Pulse Converter- A Case Study. 18/10/2016, de International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering.

William D. Callister, Jr. Fundamentals of materials Science and Engineering. An interactive e-text. Fifth edition. USA 2001.

Los armónicos que aportan los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red un problema latente

Harmonics that provide the solar photovoltaic power supply systems interconnected to the electrical grid, are a latent problem

DELGADO-PONCE, Luis†*, VARGAS-HERNÁNDEZ, Oscar Joel, MARTÍNEZ-MAGDALENO, Arturo y MENÉNDEZ-BENAVENTE, Luis Martín

Universidad Tecnológica de Salamanca

ID 1^{er} Autor: *Luis, Delgado-Ponce* / ORC ID: 0000-0003-0761-1464, Researcher ID Thomson: E-8843-2019, CVU CONACYT ID: 997254

ID 1^{er} Coautor: *Oscar Joel, Vargas-Hernández* / ORC ID: 0000-0001-6258-4388, CVU CONACYT ID: 335453

ID 2^{do} Coautor: *Arturo, Martínez-Magdaleno* / ORC ID: 0000-0003-1004-9716, CVU CONACYT ID: 997300

ID 3^{er} Coautor: *Luis Martín, Menéndez-Benavente* / ORC ID: 0000-0002-4843-3409, CVU CONACYT ID: 997264

DOI: 10.35429/JEE.2019.8.3.5.20

Recibido Febrero 20, 2019; Aceptado Marzo 30, 2019

Resumen

La energía eléctrica que las generadoras suministran a los usuarios (CFE para México), requiere de especificaciones determinadas para la operación segura y eficiente de equipos y maquinaria. Parte importante de un sistema fotovoltaico interconectado es el inversor y por ser una carga no lineal, inevitablemente distorsionará la onda sinusoidal de voltaje, cuyas componentes pueden ser dañinas para los equipos mencionados, dependiendo del grado de distorsión armónica total que resulte de la operación de estos inversores. El problema de los armónicos originados por los SFVI se agrava por dos situaciones: 1. La tendencia actual del uso de este tipo de sistemas va en aumento, debido a los beneficios, económicos, ambientales y sociales. 2. La forma de conexión conocida como generación distribuida, hace que esté más cerca de los consumidores, es decir los componentes armónicos de la onda distorsionada tendrán mayor impacto. Este estudio de distorsión armónica generada en los inversores es urgente que se analice y se determinen procedimientos y especificaciones para seleccionar el equipo mejor y para minimizar este fenómeno latente, que desafortunadamente no se puede eliminar, pero si reducir sus efectos.

Fotovoltaicos, Inversores, Armónicas

Abstract

The electric power that generators supply to users (in Mexico, CFE), requires specifications for the safe and efficient operation of equipment and machinery. An important part of an interconnected photovoltaic system is the inverter and because it is a non-linear load, it will inevitably distort the voltage sine wave, whose components can be harmful for the aforementioned equipment, depending on the degree of total harmonic distortion that results from the operation of these investors. The problem of the harmonics originated by the SFVI increases because of two situations: 1. The current trend of the use of this type of systems is increasing, due to the economic, environmental and social benefits. 2. the way of connection for SFVI called distributed generation, produce electricity close to the end users of power, means the harmonic components of the distorted wave will have greater impact. This study of harmonic distortion generated in the investor, it is urgent to analyze and determine procedures and specifications to select the best equipment and to minimize this latent phenomenon, which unfortunately can not be eliminated, but only to reduce its effects.

Photovoltaics, Inverters, Harmonics

Citación: DELGADO-PONCE, Luis, VARGAS-HERNÁNDEZ, Oscar Joel, MARTÍNEZ-MAGDALENO, Arturo y MENÉNDEZ-BENAVENTE, Luis Martín. Los armónicos que aportan los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red un problema latente. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2019. 3-8: 5-20

† Investigador contribuyendo como primer Autor.

*Correspondencia al Autor correo electrónico: (luisdelponce@gmail.com)

Introducción

La calidad de la energía eléctrica se define en términos de las características, instantáneas y a lo largo del tiempo, de sus principales parámetros y variables (basicamente amplitud de la tensión y duración de las variaciones que presenta) y de que estas sean compatibles o no con las que requieren las cargas conectadas a ella para poder funcionar correctamente.

Este concepto de calidad de la energía eléctrica, que se denomina calidad de servicio de la distribución de energía eléctrica, se define como el conjunto de características, técnicas y comerciales, inherentes al suministro eléctrico y exigibles por los consumidores, a las empresas distribuidoras de energía eléctrica.

Algunas de esas características son:

- La continuidad de suministro, relativa al número y duración de las interrupciones del suministro eléctrico.
- La calidad del producto, relativa a las características de la onda de tensión.

El análisis de la calidad de la red eléctrica se realiza en el punto de suministro o punto común de conexión, que es el punto de la red de distribución al que se conectan las cargas o el consumidor (Ibáñez, Camiña, Torres, & Bolaño, 2013).

Los valores instantáneos de las magnitudes eléctricas de un circuito o de un sistema eléctrico, como la tensión o la corriente, generalmente varían en el tiempo. Esta variación permite realizar su análisis y estudio mediante señales y sus correspondientes formas de onda.

Existen muchos tipos de señales alternas, pero a pesar de ello en el estudio de la electricidad, la denominación de señal alterna se suele restringir a un tipo especial de estas, que son las señales alternas sinusoidales.

El análisis de circuitos eléctricos en régimen sinusoidal, es decir, cuando las fuentes de excitación producen tensiones que varían en el tiempo de una forma periódica según una expresión sinusoidal, se realiza mediante fasores. (Ibáñez, Camiña, Torres, & Bolaño, 2013).

A continuación, se observa una representación fasorial de ondas sinusoidales:

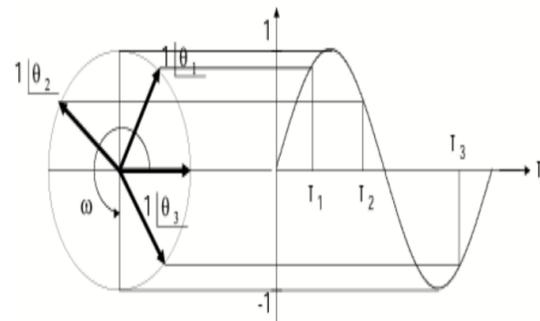


Figura 1 Representación fasorial de ondas sinusoidales Fuente. Alimentación de cargas críticas y calidad de la energía eléctrica. (Ibáñez, Camiña, Torres, & Bolaño, 2013)

A principios del siglo XIX, el matemático y físico Jean-Baptiste Joseph Fourier demostró que cualquier función que sea periódica y continua por tramos se puede descomponer como la suma de una constante y de infinitos términos funcionales sinusoidales, llamados armónicos. Así, si una señal periódica $g(t)$ cumple las siguientes condiciones:

- Ser continua o tener un número finito de discontinuidades en un periodo.
- Tener un número finito de máximos y mínimos en un periodo.
- Tener un valor medio finito.

Se puede descomponer como una serie suma de términos de senos y cosenos de la forma:

$$g(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \{b_k \cos(k\omega t) + c_k \sen(k\omega t)\} \quad (1)$$

Donde k es un número entero y la pulsación ω es:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

Siendo f y T la frecuencia y el periodo de la señal $g(t)$.

A esta suma de términos se le denomina serie de Fourier. El coeficiente a_0 representa la componente continua de la onda, el término $a_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$ se denomina componente fundamental y tiene la misma frecuencia de la señal $g(t)$, y a cada uno de los términos $a_k \cos(k\omega t + \varphi_k)$ restantes se le denomina armónico de orden k de la serie.

En la siguiente figura se muestra la forma de onda, una vez suprimida la componente continua, considerado hasta distintos valores de k .

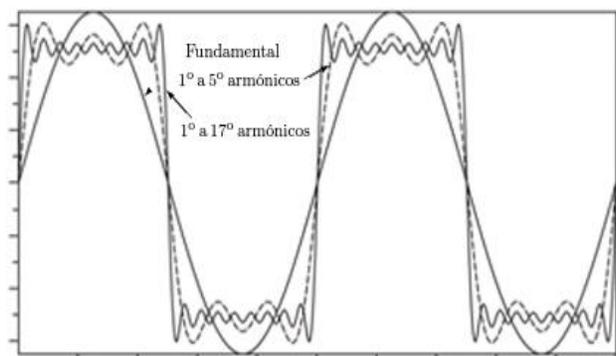


Figura 2 Onda fundamental y armónicos

Fuente: Alimentación de cargas críticas y calidad de la energía eléctrica. (Ibáñez, Camiña, Torres, & Bolaño, 2013)

Como se puede observar, la onda fundamental representa la onda que proporciona el suministro eléctrico, ya sea a 50 o 60 Hz, la onda punteada contiene la fundamental y los armónicos hasta el 5º y finalmente se muestra el resultado de superponer la onda fundamental y sus armónicos hasta el orden 17º (Ibáñez, Camiña, Torres, & Bolaño, 2013).

En la actualidad, gracias al constante crecimiento y auge de la tecnología, en los sistemas eléctricos tanto de baja como de media tensión hay conectado un número cada vez mayor de cargas no lineales a la red, es decir, de cargas en las que la relación entre la intensidad que circula por ellas y la caída de tensión entre sus terminales no se puede representar mediante una función lineal.

Algunos ejemplos de cargas no lineales son:

- Equipos de soldadura, hornos de arco y sistemas electrolíticos.
- Convertidores electrónicos, como rectificadores, inversores y fuentes de alimentación.
- Variadores de velocidad de máquinas eléctricas, tanto de A.C. como de D.C.
- Equipos de informática, de oficina y electrodomésticos.
- Los balastos electrónicos utilizados para iluminación con lámparas fluorescentes y con lámparas de descarga.

El problema con este tipo de cargas radica en que al aplicar una tensión sinusoidal a una carga no lineal la corriente que circula por ella es no sinusoidal. Además, muchas de ellas contienen sistemas de conmutación con componentes electrónicos de potencia que utilizan solo una parte de la onda de tensión y en consecuencia, demandan corriente solo en ciertos instantes, en forma de pulsos, lo que hace que la intensidad demandada e inyectada en la red este fuertemente distorsionada. Esas corrientes no sinusoidales, a su vez, al circular por las impedancias de la propia red de alimentación, hacen que las caídas de tensión en ellas sean también no sinusoidales. En consecuencia, todo este proceso da lugar a que tanto las tensiones como las corrientes que hay en el sistema eléctrico de distribución sean no sinusoidales, aunque la tensión de alimentación si lo sea.

Las cargas no solo se pueden ver afectadas por esa distorsión de las ondas de tensión y de intensidad, las cuales se denominan distorsión armónica, sino que en muchos casos también el origen de ella. El estudio de la distorsión armónica se distingue entre la distorsión de tensión asociada generalmente al sistema de alimentación de energía eléctrica, y la distorsión de corriente, asociada a las cargas no lineales que hay conectadas en él (Ibáñez, Camiña, Torres, & Bolaño, 2013).

A continuación, se muestra una tabla con los valores de la frecuencia, empezando por la fundamental que es de 60 Hz, hasta el 9º armónico, mostrando la amplitud relativa y secuencia para cada caso, la cual se determina considerando negativo cuando el armónico es del orden $(3n - 1)$, positiva cuando es $(3n + 1)$ y 0 cuando es del orden $(3n)$.

Orden del armónico	Frecuencia	secuencia	Amplitud relativa
Fundamental	60 Hz	+	100%
3º	180 Hz	0	33%
5º	300 Hz	-	20%
7º	420 Hz	+	14%
9º	540 Hz	0	11%
Orden n	60n Hz	...	100/n %

Tabla 1 Contenido armónico para una frecuencia fundamental de 60 Hz

Fuente. Basada de las notas de aplicación de Power Electronics "Armónicos en sectores industriales" (Sales, Chilet, & Grau, 2011)

Este fenómeno al estar siempre presente en las redes eléctricas de distribución y transporte de energía eléctrica afectan de forma permanente a la propia red y a las cargas conectadas a ella.

El efecto de los armónicos sobre los equipos depende de la naturaleza de estos, así como de la magnitud, frecuencia y fase de estos. Algunos de los efectos directos más importantes que producen son:

- Pérdidas en capacitores y transformadores, además de calentamientos que afectan su vida útil.
- Calentamiento en fusibles de protección.
- Fallos en el aislamiento de los cables por calentamiento.
- Aumento de temperatura en balastos.
- Disparo intempestivo de protecciones.
- Fallos en equipos electrónicos como computadoras, sistemas de comunicaciones y equipos de control.
- En las propias redes eléctricas los armónicos incrementan sus pérdidas por calentamiento, especialmente en conductores neutros de baja tensión, transformadores y motores, ocasionando la degradación de los aislamientos y acortando su vida útil.
- Deterioro a la forma de onda. (Solá, 2017)

Las energías alternativas como los sistemas fotovoltaicos producen corriente continua mientras que las cargas que se utilizan en la industria y viviendas son de corriente alterna, por lo que es necesario un convertidor de potencia que permita la conversión de C.D a C.A, o como mejor se le conoce, un inversor.

Los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red (SFVI) son equipos que aprovechan la radiación solar, la convierten en electricidad y continúa interactuando con la red eléctrica.

Hay tres principales componentes de un SFVI, los cuales son los siguientes:

- Paneles solares (convierten la radiación solar en electricidad)
- Inversor de corriente (convierte la corriente de C.D a C.A)
-

- Medidor bidireccional (mide cuanta electricidad se consume de la red eléctrica y “descuenta” la electricidad que se entrega a la red)

A continuación, se muestra un diagrama de cómo está constituido un SFVI (ENERCEN, 2013):

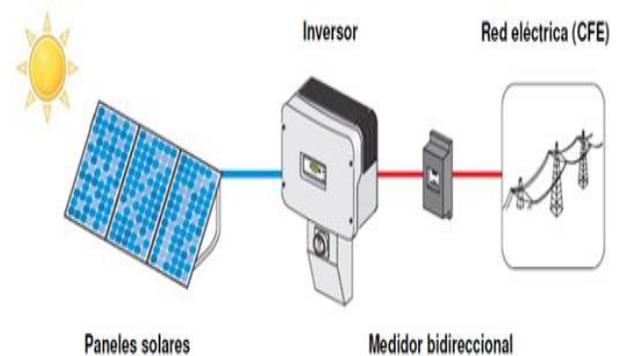


Figura 3 Diagrama de un SFVI.

Fuente. ENERCEN

El inversor después de convertir la corriente eléctrica para que esta sea compatible con la red eléctrica, este la inyecta a la red con la calidad que genera.

El número de inversores conectados a la red eléctrica está en aumento, comportándose como cargas no lineales, esto gracias a que estos aparatos constan de una etapa de potencia realizada con transistores, que trocean la corriente C.D alterándola y creando una forma de onda casi sinusoidal. La salida puede ser monofásica o trifásica dependiendo de las características y potencia de la carga.

Por lo tanto, al estar constituidos por elementos de electrónica de potencia, consumen corrientes no sinusoidales, produciendo una distorsión de la tensión de la red eléctrica, provocando un consumo de potencia reactiva y de distorsión que degrada el rendimiento de las centrales energéticas y de sus líneas de distribución (Sales, Chilet, & Grau, 2011).

Las señales de tensión y corriente generadas por los inversores presentan componentes armónicas y dado a que este fenómeno no puede erradicarse en su totalidad, si puede haber soluciones para reducir la distorsión armónica, un ejemplo es el uso de filtros pasivos o activos.

Esto es, después de aplicar una adecuada técnica de modulación, se añade al sistema un filtro pasivo a la salida que permita el paso de la componente fundamental e impida el paso a las restantes componentes armónicas.

En la siguiente figura se aprecia un diagrama para reducir los armónicos generados por un inversor (Sales, Chilet, & Grau, 2011).

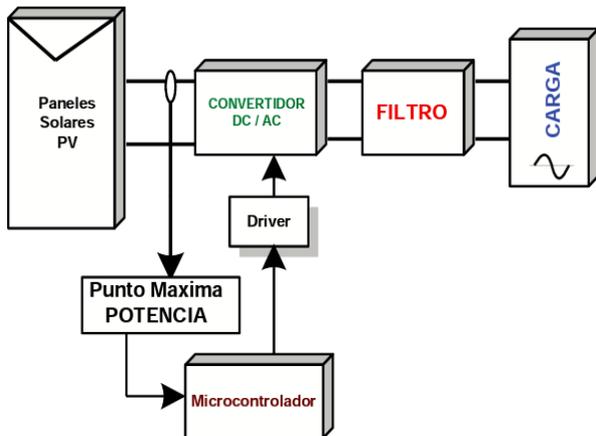


Figura 4 Diagrama de un sistema fotovoltaico
Con filtro pasivo

Fuente. *Convertidores electrónicos: energía solar fotovoltaica. Aplicaciones y diseño*

Hipótesis

Los SFVI aportan armónicos a la red por lo que la calidad de la energía que suministra la red se afectará en la medida en que cada vez más sistemas fotovoltaicos se interconecten a la misma, como es el objetivo respecto a las energías renovables.

Metodología

Para determinar el grado de distorsión armónica que generan los inversores de los SFVI a la red, fue necesario realizar mediciones y pruebas a 4 diferentes inversores, 2 de ellos de modelos y fabricantes diferentes y los otros configurados en el laboratorio de energías renovables de la UTS.

Para las mediciones y análisis a los inversores se utilizó un analizador de energía calibrado, HT Instruments PQA 824 el cual se muestra a continuación:



Figura 5 Analizador de energía PQA 824
Fuente: *Elaboración Propia*

El PQA 824 es un analizador de red trifásico y monofásico, este permite la visualización de los parámetros en las modalidades numérica y gráfica, tanto para el análisis periódico como para el análisis armónico. Entre sus principales funciones están:

- Medición de voltaje CA/CD en sistemas monofásico/trifásico Max 1000 V
- Corriente CA/CD en sistemas monofásico/trifásico Max 3000 A
- Factor de potencia
- Armónicos de tensión y corriente hasta el 64° con THD%
- Anomalías de tensión (huecos, picos)
- Flickers
- Corriente de neutro
- Formas de onda de tensión y corriente
- Tablas o histogramas de armónicos y THD% (HT-Instruments, 2019)

Con este analizador se compara el nivel de THD (distorsión armónica total) generada por los diferentes inversores bajo estudio y plantear una solución que disminuya este fenómeno.

La especificación CFE L0000-45 permite saber las desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica. Según esta especificación, el contenido armónico de la tensión en el punto de acometida para formas de onda periódica debe limitarse a los niveles que marca la siguiente tabla:

Tensión kV	Componente Armónico Individual Máximo de Tensión (CAIMT)	Distorsión Armónica Total de Tensión (DATT) %
Menor de 1	6	8
De 1 a 35	5	6.5
Mayor de 35	2	3

Tabla 2 Límites máximos de CAIMT y DATT

Fuente: Especificación CFE L0000-45

Además, los consumidores deben limitar el contenido armónico que generan a la corriente que demandan según su impedancia relativa y su nivel de tensión, de acuerdo con la siguiente tabla.

Impedancia relativa (I_{cc}/I_L)	Distorsión Armónica Total de Demanda (DATD) %
$(I_{cc}/I_L) < 20$	5
$20 \leq (I_{cc}/I_L) < 50$	8
$50 \leq (I_{cc}/I_L) < 100$	12
$100 \leq (I_{cc}/I_L) < 1000$	15
$(I_{cc}/I_L) \geq 1000$	20

Tabla 3 Distorsión armónica máxima permitida en corriente para baja, media y alta tensión hasta 69kV

Fuente: Especificación CFE L0000-45

Pruebas a inversores

SUNFORCE 1000-Watt

Potencia de salida 1000 Watts, especificaciones:

Especificaciones	
1000 W	
Potencia de salida	
Continua	1000 W
De arranque	2000 W
Entrada de CC a la batería	
Sistema 12V CC	12V CC nominal (11-15V) operativo
Inverter ac output	
Tensión	110V CA RMS +/- 10%
Frecuencia	60Hz +/- 2%
Forma de onda	Onda sinusoidal pura
Eficiencia	90%
Distorsión Armonizada Total	4% +/- 1%
Variación de la Tensión de Salida	110 VAC +/- 10%
Variación de Frecuencia	60Hz +/- 2%
Total KVA (+/- 10%)	1.4

Tabla 4 Especificaciones del inversor SUNFORCE

Fuente. SUNFORCE Products

A este inversor se le realizó una prueba sin carga o “en vacío” para determinar el grado de THD que genera, a continuación, se muestran las lecturas obtenidas:

Sin carga

En la figura 6, se muestra la forma de onda del voltaje a la salida del inversor con un alto grado de distorsión.

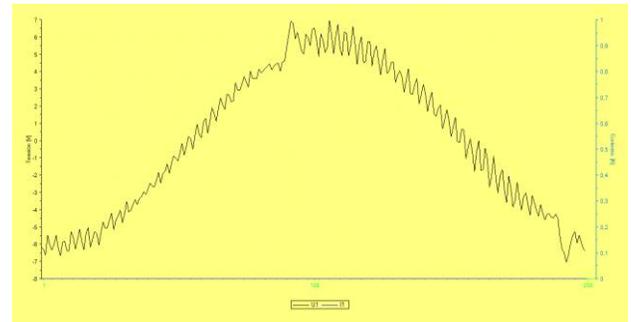


Figura 6 Forma de onda de voltaje del inversor sin carga

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 7 se puede apreciar el espectro de frecuencias que genera el inversor al trabajar sin carga conectada, aquí se ve el grado de distorsión que se genera y hasta el orden 64°

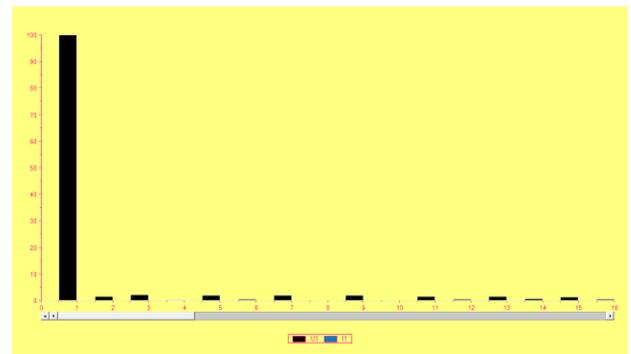


Figura 7 Espectro de frecuencias para inversor sin carga

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 8 se puede apreciar en el multímetro el grado de THD para cuando el inversor está trabajando sin carga, en el cual se muestra un THD_V de 7.13% y un THD_I de 0%.

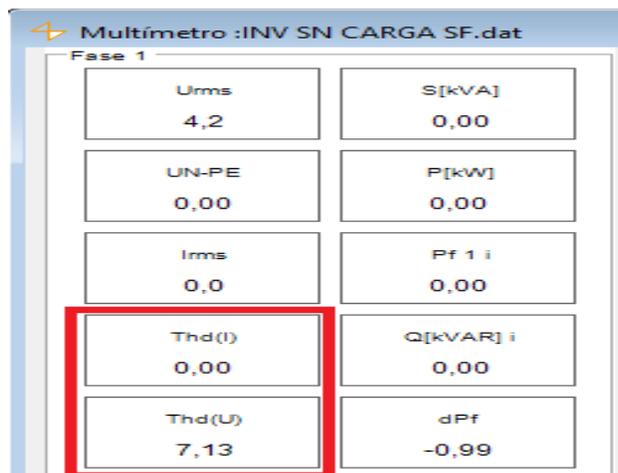


Figura 8 Valores de THD para inversor sin carga

Fuente: Elaboración Propia

Además, a dicho inversor se le realizaron las pruebas trabajando con las siguientes cargas conectadas:

- Carga resistiva
- Carga resistiva - inductiva - capacitiva
- Carga no lineal

Las primeras pruebas se realizaron conectando una carga a la vez, a continuación, se muestran las lecturas obtenidas por el analizador de energía donde se ve el grado de THD tanto para voltaje como para corriente.

Prueba a carga resistive

Como se puede ver a en la figura 9, se muestra la forma de onda tanto de voltaje (color negro) como de corriente (color azul) a la salida del inversor, en la cual se puede apreciar el aporte de distorsión en cada una de ellas siendo la onda de corriente la más afectada ya que es la que presenta mayor distorsión.



Figura 9 Forma de onda de voltaje y corriente del inversor con carga resistiva.

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 10 se observa el espectro de frecuencias en el cual se aprecia el THD y el número de armónicos presentes, para este caso hasta el 63° armónico.

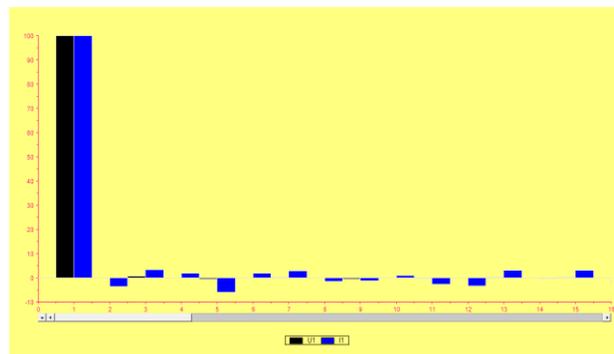


Figura 10 Espectro de frecuencias para inversor con carga resistiva

Fuente: Elaboración Propia

Por último, se observa en el multímetro el grado de THD para voltaje y corriente que aporta el inversor al estar trabajando con esta carga conectada, donde el THD_V es de 1.52% y el THD_I es igual a 13.81%.

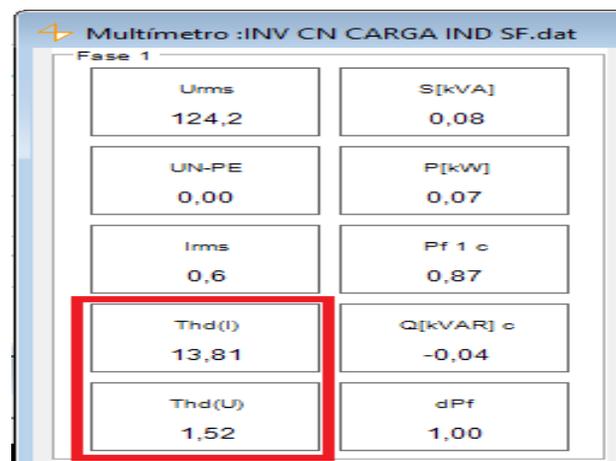


Figura 11 Valores de THD para inversor con carga resistiva

Fuente: Elaboración Propia

Carga capacitiva/inductiva

Como se puede ver a continuación en la figura 12, se muestra la forma de onda de voltaje a la salida del inversor, en la cual se aprecia cierto grado de distorsión en dicha onda.

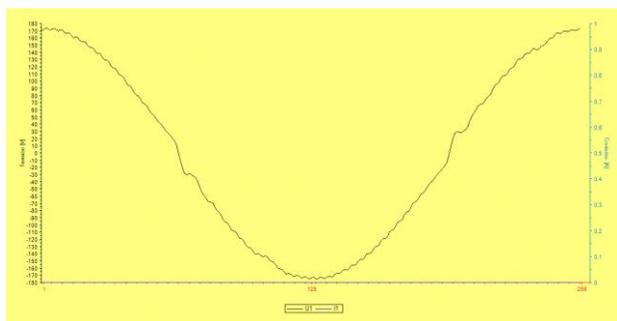


Figura 12 Forma de onda de voltaje del inversor con carga capacitiva/inductiva

Fuente: Elaboración Propia

Enseguida en la figura 13 se muestra el espectro de frecuencias en el cual se aprecia el THD y el número de armónicos presentes, para este caso hasta el 35° armónico.

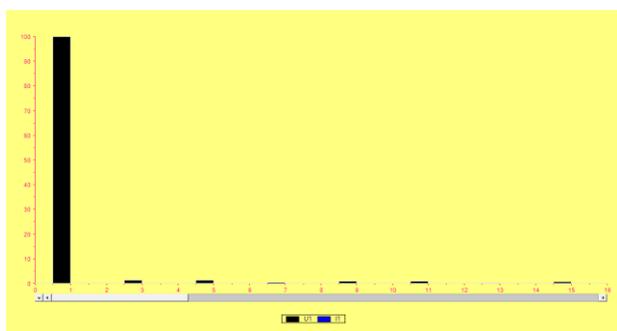


Figura 13 Espectro de frecuencias para inversor con carga capacitiva/inductiva.

Fuente: Elaboración Propia

Por último, se observa en el multímetro el grado de THD para voltaje que aporta el inversor al estar trabajando con esta carga conectada, donde el THD_V es de 2.95% y el THD_I es igual a 0%.

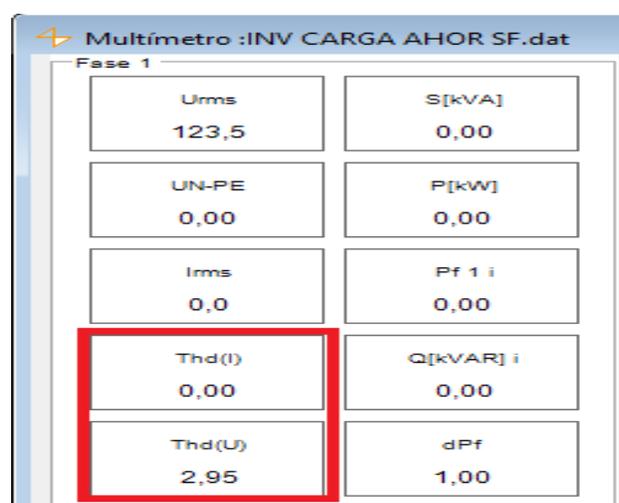


Figura 14 Valores de THD para inversor con carga capacitiva/inductiva

Fuente: Elaboración Propia

Carga no lineal

Como se ve en la figura 15, la forma de onda de voltaje a la salida del inversor, en la cual se aprecia cierto grado de distorsión en dicha onda.

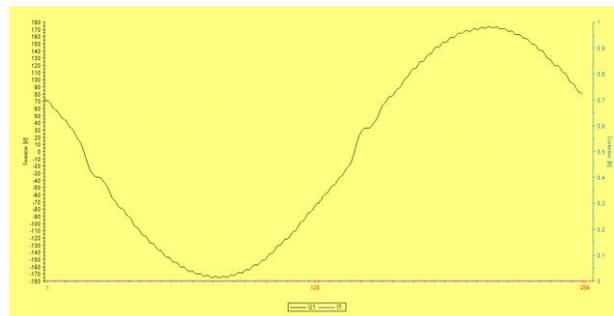


Figura 15 Forma de onda de voltaje del inversor con carga no lineal

Fuente: Elaboración Propia

Enseguida en la figura 16 se muestra el espectro de frecuencias en el cual se aprecia el THD y el número de armónicos presentes, para este caso hasta el 29° armónico.

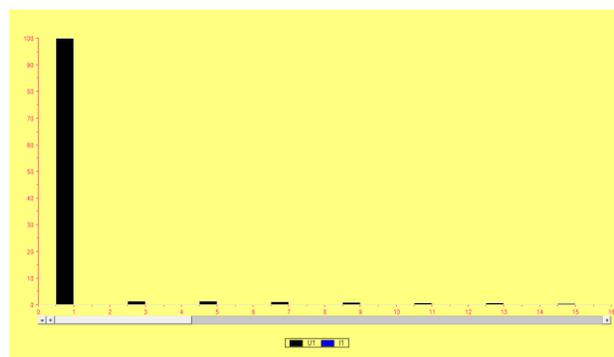


Figura 16 Espectro de frecuencias para inversor con carga no lineal

Fuente: Elaboración Propia

Por último, se observa en el multímetro el grado de THD para voltaje que aporta el inversor al estar trabajando con esta carga conectada, donde el THD_V es de 2.92% y el THD_I es igual a 0%.

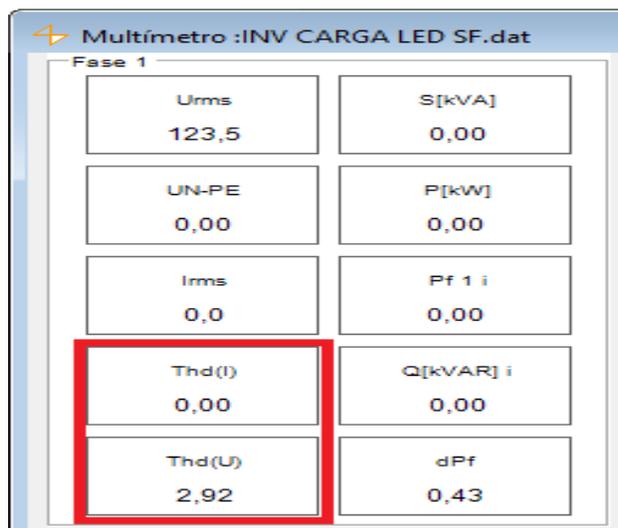


Figura 17 Valores de THD para inversor con carga no lineal

Fuente: Elaboración Propia

Una vez realizadas las pruebas al inversor conectando una carga a la vez, se realizaron combinaciones para ver su efecto, las combinaciones fueron las siguientes:

Resistiva – no lineal

Resistiva – capacitiva/inductiva

No lineal – capacitiva/inductiva

A continuación, se muestran las lecturas obtenidas por el analizador de energía donde se ve el grado de THD tanto para voltaje como para corriente.

– Resistiva – no lineal

En la figura 18, se muestra la forma de onda tanto de voltaje (color negro) como de corriente (color azul) a la salida del inversor, en la cual se aprecia cierto grado de distorsión en cada una de ellas siendo la onda de corriente la más afectada ya que es la que presenta mayor distorsión.

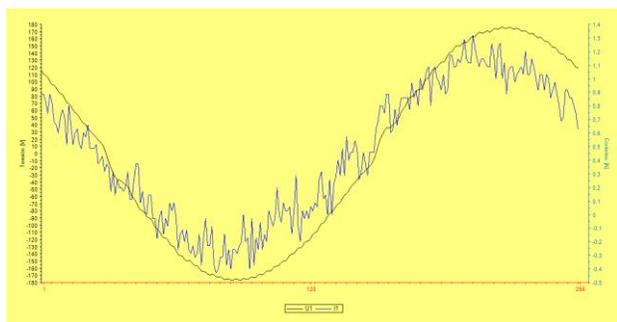


Figura 18 Forma de onda de voltaje y corriente del inversor con carga resistiva – no lineal.

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 19 se muestra el espectro de frecuencias en el cual se aprecia el THD y el número de armónicos presentes, para este caso hasta el 63° armónico.

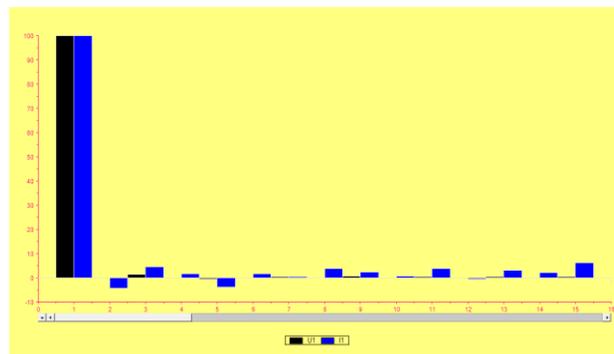


Figura 19 Espectro de frecuencias para inversor con carga resistiva – no lineal.

Fuente: Elaboración Propia

Por último, se puede observar en el multímetro el grado de THD para voltaje y corriente que aporta el inversor al estar trabajando con esta carga combinada, donde el THD_V es de 2.40% y el THD_I es igual a 15.05%.

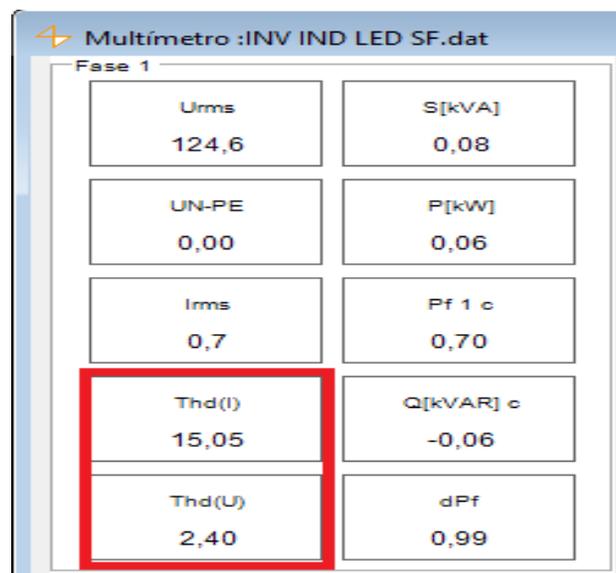


Figura 20 Valores de THD para inversor con carga resistiva – no lineal

Fuente: Elaboración Propia

– Resistiva – capacitiva/inductiva

A continuación, en la figura 21, se muestra la forma de onda tanto de voltaje (color negro) como de corriente (color azul) a la salida del inversor, en la cual se aprecia cierto grado de distorsión en cada una de ellas siendo la onda de corriente la más afectada ya que es la que presenta mayor distorsión.

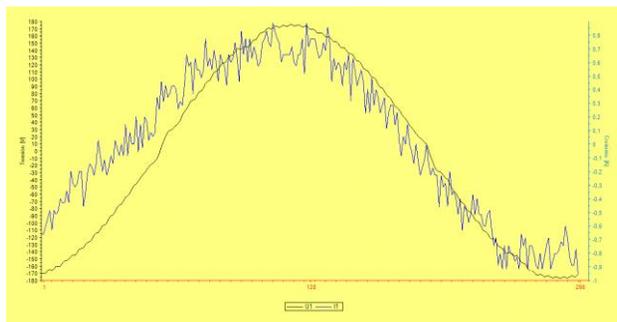


Figura 21 Forma de onda de voltaje y corriente del inversor con carga resistiva – capacitiva/inductiva
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 22 se muestra el espectro de frecuencias en el cual se puede apreciar el THD y el número de armónicos presentes, para este caso hasta el 63° armónico.

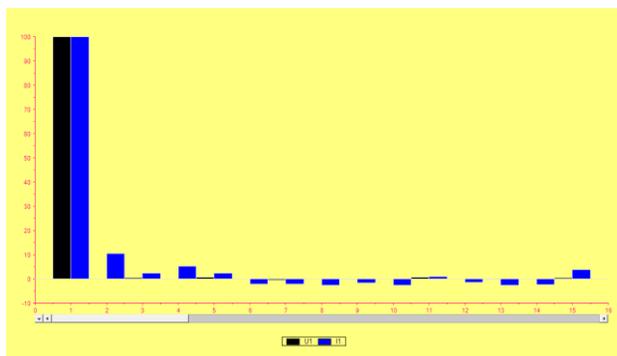


Figura 22 Espectro de frecuencias para inversor con carga resistiva – capacitiva/inductiva
Fuente: Elaboración Propia

Por último, se observa en el multímetro el grado de THD para voltaje y corriente que aporta el inversor al estar trabajando con esta carga combinada, donde el THD_V es de 1.77% y el THD_I es igual a 16.48%.

Multímetro :INV IND AHOR SF.dat	
Fase 1	
Urms 123,7	S[kVA] 0,07
UN-PE 0,00	P[kW] 0,06
Irms 0,5	Pf 1 c 0,94
Thd(I) 16,48	Q[kVAR] c -0,02
Thd(U) 1,77	dPf 0,96

Figura 23 Valores de THD para inversor con carga resistiva – capacitiva/inductiva
Fuente: Elaboración Propia

– No lineal – capacitiva/inductiva

En la figura 24, se muestra la forma de onda tanto de voltaje (color negro) como de corriente (color azul) a la salida del inversor, en la cual se puede apreciar cierto grado de distorsión en cada una de ellas siendo la onda de corriente la más afectada ya que es la que presenta mayor distorsión.

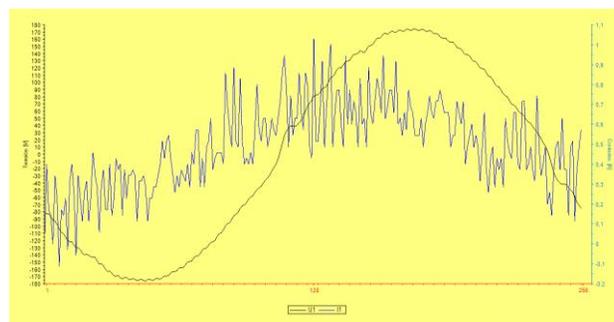


Figura 24 Forma de onda de voltaje y corriente del inversor con carga no lineal – capacitiva/inductiva
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 25 se muestra el espectro de frecuencias en el cual se aprecia el THD y el número de armónicos presentes, para este caso hasta el 63° armónico.

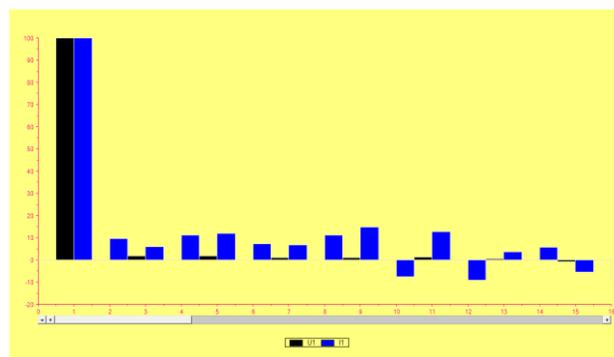


Figura 25 Espectro de frecuencias para inversor con carga no lineal – capacitiva/inductiva
Fuente: Elaboración Propia

Por último, se puede observar en el multímetro el grado de THD para voltaje y corriente que aporta el inversor al estar trabajando con esta carga combinada, donde el THD_V es de 3.71% y el THD_I es igual a 48.90%.

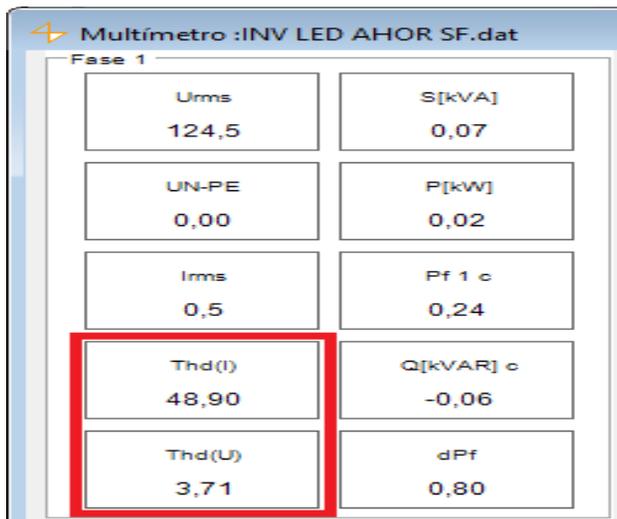


Figura 26 Valores de THD para inversor con carga no lineal – capacitiva/inductive
Fuente: Elaboración Propia

Inversor trifásico configurado en el laboratorio

Este inversor tiene la característica que puede comportarse también como rectificador, esto gracias a que está compuesto de tiristores, los cual al variar su ángulo de disparo provoca que este se comporte ya sea como uno u otro.

Para realizar la prueba fue necesario variar el ángulo de disparo de los tiristores para identificar en que ángulo este pasaba de rectificador a inversor, empezando desde su máximo que son 179.3° hasta el mínimo 0°, en la figura 27 se puede apreciar el ángulo de disparo a su máximo que son 179.3°



Figura 27 Angulo de disparo al máximo a 179.3°
Fuente: Elaboración Propia

Al estar a este ángulo, el aparato se comporta como rectificador comportándose como se muestra en la figura 28.



Figura 28 Gráfico y parámetros a 179.3°
Fuente: Elaboración Propia

A partir de ahí se fue modificando el ángulo disminuyéndolo poco a poco, no fue hasta que el ángulo llego a 53. 4° que se observaron cambios, tanto en la forma de onda como en la potencia, en la figura 29 se aprecia el ángulo y en la figura 30 se pueden observar los cambios.



Figura 29 Angulo de disparo a 53. 4°
Fuente: Elaboración Propia



Figura 30 Gráfico y parámetros a 53. 4°
Fuente: Elaboración Propia

Aunque los cambios son mínimos en este punto, se puede ver que cumple con su función y que al ir disminuyendo su ángulo este se comporta como inversor, en la siguiente figura 31 se aprecia que el ángulo de disparo es de 15° y en la figura 32 se pueden apreciar mejor los cambios en la forma de onda y un aumento de la potencia.

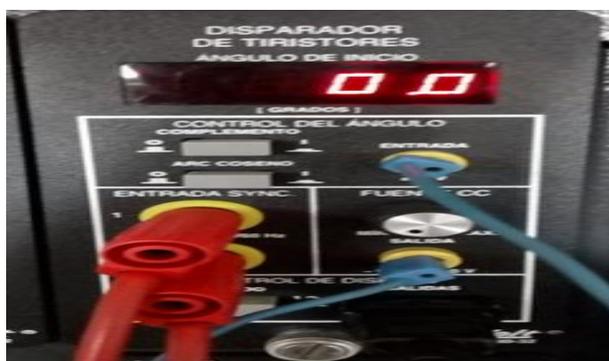


Figura 31 Ángulo de disparo a 0°
Fuente: Elaboración Propia

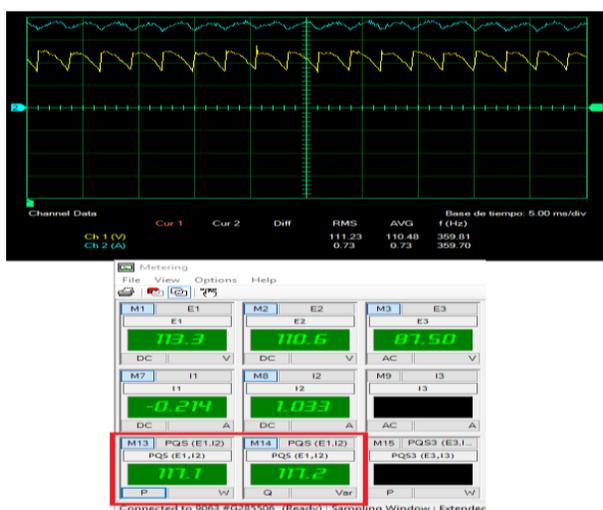


Figura 32 Gráfico y parámetros a 0°
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 33 se aprecia las formas de onda de las tres fases tanto para voltaje (negro, café, rosa) como para corriente (azul, café, verde) cuando el ángulo de disparo está en 0° , en la cual se puede ver que la corriente es la más afectada por los armónicos debido a que es la que presenta mayor distorsión.

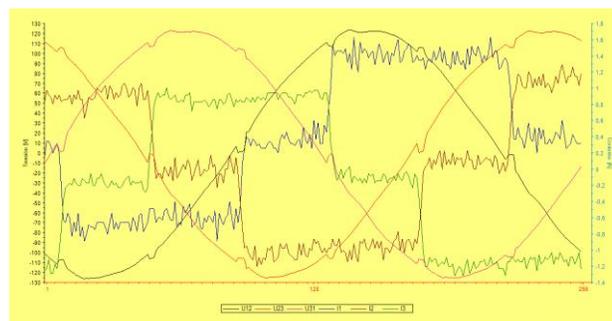


Figura 33 Formas de onda de voltaje y corriente a la salida del inversor
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 34 se muestra el espectro de frecuencias, en el cual se puede apreciar el THD de voltaje y corriente (tonos azules), para este caso hay presencia hasta el 63° armónico.



Figura 34 Espectro de frecuencias inversor trifásico
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 35 se puede observar en el multímetro el grado de THD para voltaje y corriente de cada fase que aporta el inversor.

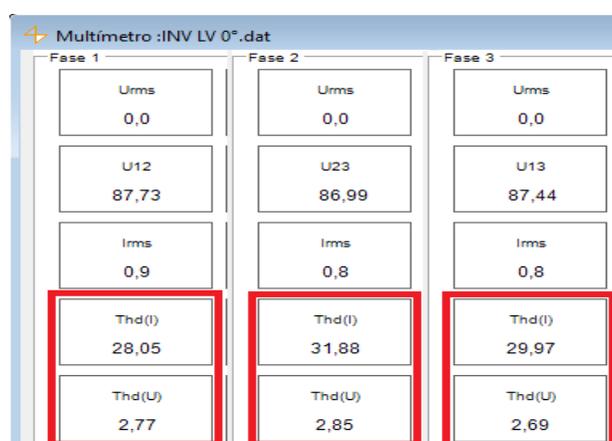


Figura 35 Valores de THD para inversor trifásico
Fuente: Elaboración Propia

Se puede ver en la figura del multímetro que el THD es casi el mismo para cada fase tanto para voltaje como para corriente, siendo estos valores:

- Fase 1: $THD_V = 2.77\%$ y $THD_I = 28.05\%$
- Fase 2: $THD_V = 2.85\%$ y $THD_I = 31.88\%$
- Fase 3: $THD_V = 2.69\%$ y $THD_I = 29.97\%$

Micro inversor

Este micro inversor fue configurado en el laboratorio de energías renovables, en este caso es monofásico al cual se le aplico una carga combinada la cual fue resistiva e inductiva para ver qué efectos tiene, de igual manera que en los casos anteriores, en la forma de onda de voltaje y corriente y los armónicos que aporta.

En la figura 36 se puede apreciar la forma de onda de voltaje (negro) y corriente (azul), en la cual se aprecia que la más afectada es la corriente siendo esta la que tiene mayor distorsión.

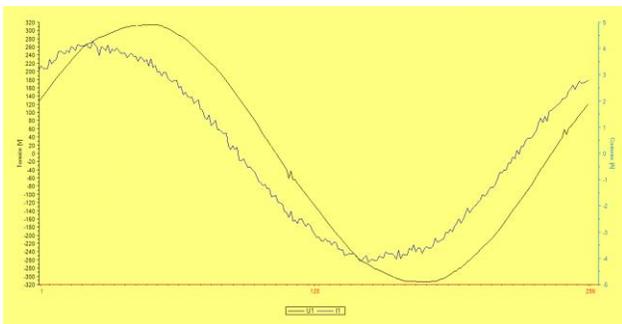


Figura 36 Formas de onda de voltaje y corriente del micro inversor
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 37 se muestra el espectro de frecuencias en el cual se aprecia el THD en voltaje (negro) y corriente (azul), en este caso hay presencia hasta 61° armónico.

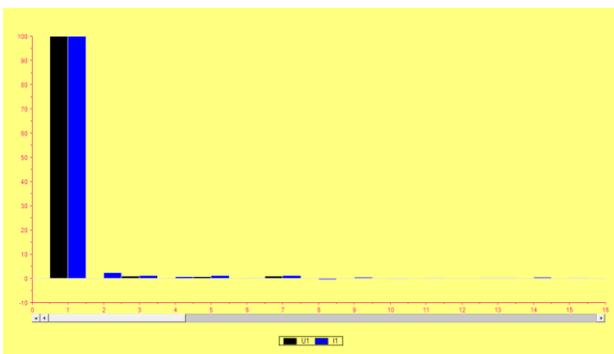


Figura 37 Espectro de frecuencias del micro inversor
Fuente: Elaboración Propia

Por último, en la figura 38 se observa en el multímetro el grado de THD para voltaje y corriente, siendo para THD_V un porcentaje del 1.58% y para THD_I un 3.70%.

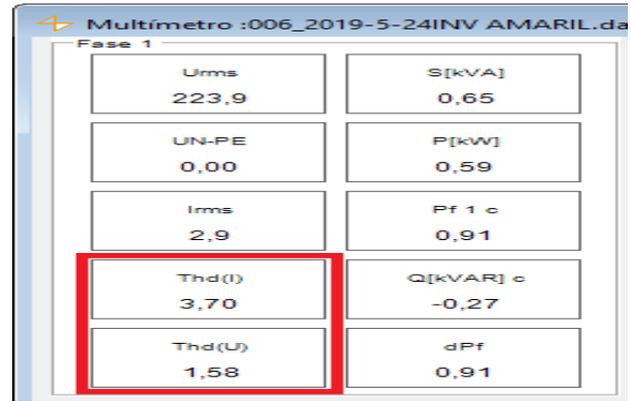


Figura 38 Valores de THD para micro inversor
Fuente: Elaboración Propia

Inversor KACO Blueplanet 3.0 TL1

El cual forma parte de un SFVI a la red con capacidad de 3.6 KW máximo, este sistema se encuentra instalado en la azotea de un edificio, figura 39.



Figura 39 SFVI caso real.
Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se muestra una tabla en la cual indica las especificaciones más importantes de dicho inversor:

DC Input data	
Max. recommended PV generator	3600W
MPP range	140 – 510 V
Operating range from V to V	125 – 550 V
Starting voltage	150 V
Max. Input current	2 x 11 A
Max. Short circuit current	2 x 13,2 A
Max. Input power per tracker	3100 W
AC output data	
Rated output	3000 VA
Max. Power	3000 VA
Line voltage	230 V (1/N/PE)
Rated frequency (range)	50 / 60 Hz
Rated current	13 A
Max. Current	14,5 A
Cos phi	0 – 95% / 0.30 ind. – 0.30 cap.
THD %	1.42%
General data	
Max efficiency	97.2%
Standby consumption	3W

Tabla 5 Especificaciones inversor KACO.
Fuente: Technical Data (KACO)

El sistema eléctrico donde se conectó el inversor ya es un sistema conflictivo con alto aporte de armónicos, por lo tanto, se conectó el inversor a este sistema para ver qué tanta distorsión aporta.

Pruebas a sistema eléctrico edificio

Se analizó el sistema eléctrico del tablero F, sin SFVI conectado, para determinar niveles de armónicos. En la figura 40 se aprecian las ondas de voltaje (negro, café y rosa) y corriente (azul, café y verde) del sistema eléctrico, en el cual hay una gran aportación de armónicos, siendo las ondas de corriente las más afectadas, en el neutro (rojo) se observa que también hay una gran cantidad de armónicos.

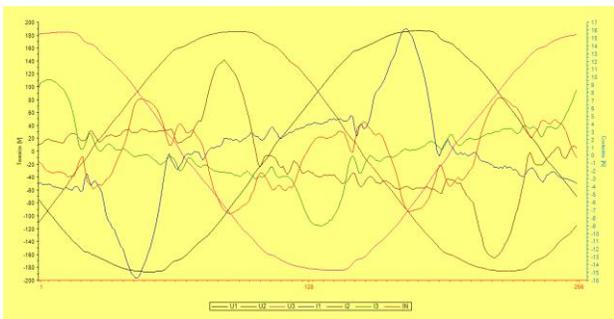


Figura 40 Formas de onda de voltaje, corriente y neutro del sistema eléctrico del edificio
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 41 se aprecia el espectro de frecuencias en el cual se observa el nivel de THD para voltaje (negro, rosa y naranja) y corriente (tonos azules) de cada fase, además del neutro (verde) para este caso hasta el 63° armónico.

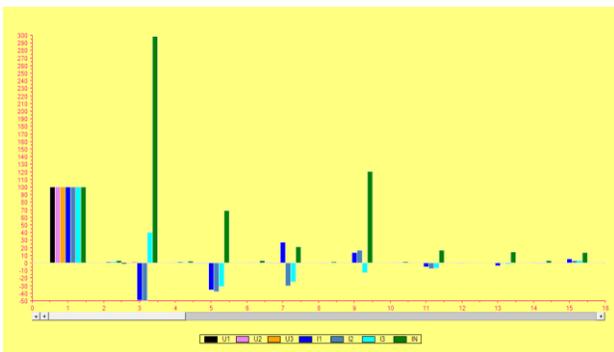


Figura 41 Espectro de frecuencias del sistema eléctrico del edificio
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 42 se aprecia en el multímetro el grado de THD para voltaje y corriente en cada fase, siendo para cada fase los siguientes valores:

- **Fase 1:** THD_V = 1.97% y THD_I = 68.95%
- **Fase 2:** THD_V = 1.78% y THD_I = 72.73%
- **Fase 3:** THD_V = 2.04% y THD_I = 60.53%

Multímetro :SFV SN.dat								
Fase 1			Fase 2			Fase 3		
Urms	132,3		Urms	132,5		Urms	131,9	
U12	229,70		U23	228,73		U13	228,67	
Irms	6,1		Irms	5,0		Irms	3,9	
Thd(I)	68,95		Thd(I)	72,73		Thd(I)	60,53	
Thd(U)	1,97		Thd(U)	1,78		Thd(U)	2,04	

Figura 42 Valores de THD para el sistema eléctrico del edificio
Fuente: Elaboración Propia

Como el multímetro no indica el grado de THD para el neutro se tiene que obtener ese valor del indicador de THD del espectro de frecuencias, el cual indica un valor de THD de 333.66% para el neutro, en la figura 43 se muestra dicha cifra.

Parám	Val.	%	THD
<input checked="" type="checkbox"/> I1	0	0	68,95
<input checked="" type="checkbox"/> I2	0	0	72,73
<input checked="" type="checkbox"/> I3	0	0	60,53
<input checked="" type="checkbox"/> IN	0	0	333,66

Figura 43 Valor de THD para el neutro del sistema eléctrico del edificio
Fuente: Elaboración propia

Pruebas a sistema eléctrico del edificio conectando el sistema fotovoltaico

Después de analizar el sistema eléctrico, se procedió a realizar las pruebas conectando el sistema fotovoltaico a él para determinar qué tanta distorsión aporta este.

A continuación, en la figura 44 se muestra que el inversor marcaba que el SFVI estaba generando 2.51 kW el día de las pruebas.



Figura 44 Nivel de kW generados por el SFVI
Fuente: *Elaboración Propia*

En la figura 45 se puede apreciar las ondas de voltaje (negro, café y rosa) y corriente (azul, café y verde) del sistema eléctrico cuando ya se le ha conectado el sistema fotovoltaico y este está generando, en el cual se aprecia que hay una aportación considerable de armónicos, siendo las ondas de corriente las más afectadas, también se puede observar la onda del neutro (rojo) en el cual también hay una gran cantidad de armónicos.

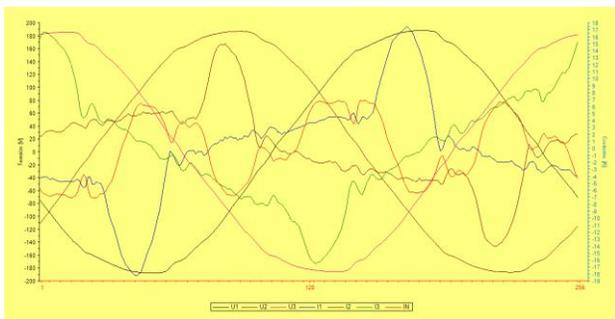


Figura 45 Formas de onda de voltaje, corriente y neutro del sistema eléctrico con el SFV conectado a él
Fuente: *Elaboración Propia*

En la figura 46 se muestra el espectro de frecuencias en el cual se puede ver el nivel de THD para voltaje (negro, rosa y naranja) y corriente (tonos azules) de cada fase, además del neutro (verde) para este caso se tiene presencia hasta el 63° armónico.



Figura 46 Espectro de frecuencias del sistema eléctrico con el SFV conectado a él
Fuente: *Elaboración Propia*

En la figura 47 se muestra en el multímetro el grado de THD para voltaje y corriente en cada fase, siendo para cada fase los siguientes valores:

- **Fase 1:** $THD_V = 2.15\%$ y $THD_I = 70.09\%$
- **Fase 2:** $THD_V = 1.73\%$ y $THD_I = 66.15\%$
- **Fase 3:** $THD_V = 2.19\%$ y $THD_I = 33.47\%$

Multímetro :SFV SOLO INV.dat								
Fase 1			Fase 2			Fase 3		
Urms	133,0		Urms	133,0		Urms	132,4	
U12	230,64		U23	229,52		U13	229,81	
Irms	7,1		Irms	5,9		Irms	7,8	
Thd(I)	70,09		Thd(I)	66,15		Thd(I)	33,47	
Thd(U)	2,15		Thd(U)	1,73		Thd(U)	2,19	

Figura 47 Valores de THD para el sistema eléctrico con el SFV conectado a él

Fuente: *Elaboración Propia*

El grado de THD para el neutro, marca un valor de THD de 378.11%, en la figura 48 se puede apreciar dicha cifra.

Parám	Val.	%	THD
<input checked="" type="checkbox"/> 11	0	0	70,09
<input checked="" type="checkbox"/> 12	0	0	66,15
<input checked="" type="checkbox"/> 13	0	0	33,47
<input checked="" type="checkbox"/> IN	0	0	378,11

Figura 48 Valor de THD para el neutro del sistema eléctrico del edificio

Fuente: *Elaboración Propia*

Agradecimiento

Agradecemos al Rector de la Universidad Tecnológica de Salamanca, Ing. Alfredo López Herrera, las facilidades para la elaboración del presente estudio y al CIERMMI por la invitación a participar.

Conclusiones

1. Los armónicos indicados en los datos de placa de inversores no son fijos dependen de la incidencia solar, a mayor incidencia solar, mayor es la distorsión armónica.
2. La “pureza” de la forma sinodal que aportan los inversores depende de la calidad de su fabricación y diseño (generalmente precio).
3. Actualmente se usan 2 tipos de sistema de inversores, los conmutados por red y los auto conmutados.
4. Los convertidores conmutados por red son inversores que usan 6 o 12 pulsos que pueden producir armónicos enteros, este tipo de inversores no controla la potencia reactiva y consume potencia reactiva – inductiva.
5. El inversor auto conmutado es modulado por ancho de pulso que usa principalmente transistores IGBT, estos inversores controlan ambas potencias activa y reactiva, por lo tanto, tienen la capacidad de proveer para la demanda en la potencia reactiva y a conmutaciones a alta frecuencia que los hacen producir altos armónicos e interarmónicos.
6. Dado que los sistemas de generación de energía eléctrica a partir de energías limpias favorecen la generación distribuida, el aporte de armónicos es latente.
7. Solo los excedentes de potencia van a la red, por lo que para asegurar que los armónicos no se inyecten a la misma las propuestas de los SFVI no deben ser de 100% del consumo de energía eléctrica, se debe realizar el estudio para cada sistema en particular, con la premisa que todo lo generado por el SFVI sea consumido por el circuito alimentado y evitando así que no se inyecten armónicos a la red de CFE.

Referencias

- Carpio, I. J., Míguez, C. J. V., & Guirado, T. R. (2013). *Alimentación de cargas críticas y calidad de la energía eléctrica*. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com>.
- Cunill Solà, J. (2017). *Estudio y Caracterización Armónica de las Lámparas Fluorescentes Compactas de Baja Potencia*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Enercen.com.mx. (2019). *Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red / Enercen*. (online) Available at: <https://www.enercen.com.mx/sistemas-fotovoltaicos-interconectados-a-la-red/>
- Gimeno, S. F. J., Seguí, C. S., & Orts, G. S. (2011). *Convertidores electrónicos: Energía solar fotovoltaica, aplicaciones y diseño*. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com>
- Kaco-newenergy.com. (n.d.). *KACO new energy* (online) (2016). Available at: <https://kaco-newenergy.com>.

Medidor bidireccional trifásico interconectado a la red con monitoreo de la generación de energía eléctrica del conjunto panel-microinversor

Three-phase bidirectional meter interconnected to the network with monitoring of the electric power generation of the panel-microinverter set

HERNÁNDEZ-AGUIRRE, Fredy Alberto^{†*}, TÁNORI-RUIZ, Víctor Alfonso, ORRANTE-SAKANASSI, Jorge Alberto y VÁZQUEZ-PALMA, Martín Gustavo

Instituto Tecnológico de Hermosillo, Tecnológico Nacional de México, División de Estudio de Posgrado e Investigación

ID 1^{er} Autor: *Fredy Alberto, Hernández-Aguirre* / ORC ID: 0000-0001-9208-5299, CVU CONACYT ID: 611800

ID 1^{er} Coautor: *Víctor Alfonso, Tánori-Ruíz* / ORC ID: 0000-0002-8727-1430, CVU CONACYT ID: 869159

ID 2^{do} Coautor: *Jorge Alberto, Orrante-Sakanassi* / ORC ID: 0000-0002-3272-8034, CVU CONACYT ID: 209418

ID 3^{er} Coautor: *Martín Gustavo, Vázquez-Palma* / ORC ID: 0000-0001-8982-9883

DOI: 10.35429/JEE.2019.8.3.21.32

Recibido Febrero 20, 2019; Aceptado Marzo 30, 2019

Resumen

El objetivo principal del presente artículo es dar a conocer las actividades realizadas y los resultados obtenidos durante el diseño de un medidor bidireccional trifásico para un sistema fotovoltaico interconectado a la red. Se describen las pruebas para la validación y puesta en marcha del medidor bidireccional utilizado para la medición y monitoreo inalámbrico de los principales parámetros de consumo y generación de energía eléctrica: voltaje, corriente, potencia activa (W), potencia aparente (VA), factor de potencia y consumo energético (kWh). Este medidor bidireccional surge como una propuesta para resolver la problemática relacionada con la medición de la energía eléctrica en sistemas fotovoltaicos interconectados a la red, ya que los medidores bidireccionales que actualmente se instalan por la compañía de suministro (CFE, Comisión Federal de Electricidad) presentan el inconveniente que solo pueden ser distribuidos e instalados por la misma compañía. Es un medidor bidireccional de bajo costo y fácil instalación. La principal ventaja de este medidor bidireccional es la facilidad que ofrece al usuario para la lectura e interpretación de las mediciones realizadas, mostradas en la pantalla de una computadora personal o una aplicación móvil. Además, el historial en el consumo energético (kWh) mostrado en la base de datos del medidor, sirve de ayuda al usuario en la toma de decisiones relacionada con la reducción de costos.

Abstract

The main objective of this paper is to present the activities carried out and the results obtained during the design of a three-phase bidirectional meter for a photovoltaic system interconnected to the network. The tests for validation and start up of the bidirectional meter used for wireless measurement and monitoring of the main consumption parameters and electric power generation are described: voltage, current, active power (W), apparent power (VA), power factor and power consumption (kWh). This bidirectional meter was born as a proposal to solve the problem related to the measurement of electric power in photovoltaic systems interconnected to the network, since the bidirectional meters currently installed by the power company (CFE, Comisión Federal de Electricidad) have an inconvenience, they can only be distributed and installed by the same company. It is a low cost and easy installation bidirectional meter. The main advantage of this bidirectional meter is the facility offered to the user to read and understand the readings of the measurements made, displayed on a personal computer screen or a mobile application. Furthermore, the history of the power consumption (kWh) show in the meter database helps the user in making decisions regarding cost reduction.

Medidor Bidireccional, Microinversor, Acondicionamiento, Fotovoltaico

Bidirectional meter, Microinverter, Photovoltaic

Citación: HERNÁNDEZ-AGUIRRE, Fredy Alberto, TÁNORI-RUIZ, Víctor Alfonso, ORRANTE-SAKANASSI, Jorge Alberto y VÁZQUEZ-PALMA, Martín Gustavo. Medidor bidireccional trifásico interconectado a la red con monitoreo de la generación de energía eléctrica del conjunto panel-microinversor. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2019. 3-8: 21-32

[†] Investigador contribuyendo como primer Autor.

*Correspondencia al Autor correo electrónico: (faha.singapur@gmail.com)

Introducción

El 6 de junio de 2012 se publicó la Ley General de Cambio Climático en el Diario oficial de la Federación [1], estableciendo entre sus principales propósitos garantizar el derecho a un medio ambiente sano, convocando a los tres niveles de gobierno (municipal, estatal y federal) a unir esfuerzos para la elaboración y aplicación de políticas públicas en dos ejes rectores: la adaptación al cambio climático y la mitigación en las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero.

En cuanto a mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, se establecen instrumentos regulatorios (el Inventario Nacional de Emisiones y el Registro Nacional de Emisiones) y económicos (sistema voluntario de comercio de permisos de emisiones, es decir, mercado de bonos de carbono; así como el Fondo para el Cambio Climático), para el cumplimiento de metas de reducción de emisiones. Así, México se compromete a reducir 30 por ciento sus emisiones hacia 2020; así como 50 por ciento hacia 2050, en relación con las emisiones de 2000. Respecto a las medidas de adaptación, la ley establece instrumentos de diagnóstico, como el Atlas Nacional de Riesgo para 2013, o la creación de instrumentos de planificación urbana y prevención ante desastres naturales.

De acuerdo con la Ley, la electricidad verde debe alcanzar el 35% de la producción total de energía eléctrica en México para el 2024. Por lo que las demandas de dispositivos complementarios para el uso de energía renovable irán en aumento [2]. Según el reporte "Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026" [3], elaborado por la Secretaría de Energía, los costos unitarios de generación de las tecnologías de energías renovables continuarán disminuyendo durante 2012-2035; las principales causas de este decrecimiento serán el aumento en la implantación de las tecnologías, que acelera el progreso tecnológico, y el desarrollo de economías de escala en la fabricación de los equipos asociados. En particular, se espera que los costos de la tecnología solar fotovoltaica en grandes centrales y sistemas integrados en edificios disminuyan considerablemente sus costos. De igual forma pasará con las plantas solares de concentración y los parques eólicos marinos.

De acuerdo con el estudio técnico de un sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica, realizado por Caicedo Gómez [4], es urgente la necesidad de implementar sistemas para la generación de energía eléctrica por métodos no convencionales como los sistemas fotovoltaicos, esto permitirá la sostenibilidad del medio ambiente para futuras generaciones, reduciendo en gran medida el calentamiento global y los niveles de dióxido de carbono, provocados por los sistemas convencionales utilizados para la generación de energía eléctrica.

De acuerdo con la *Revista UIS Ingenierías*, 18(3), 67-74 [5], Lubo U.D. (2019) propone un mayor incremento en los incentivos económicos para la compra y transferencia de tecnología relacionada con energías renovables, esto permitirá un aumento considerable en el interés por las instalaciones de sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica en instalaciones residenciales y comerciales, lo cual repercutirá de manera directa en la mitigación del cambio climático.

Durante la revisión de literatura se encontraron algunos trabajos relacionados con el tema de investigación.

El microinversor propuesto en [6], Estados Unidos Patente US20130242617 A1, 2013, está basado en puentes H para su conexión a la red. Se tiene un Puente H de alta frecuencia basado en MOSFET (*Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor*) y otro de baja frecuencia basado en SCR (*Silicon Controlled Rectifier*); los dos inversores están enlazados a través de un transformador de alta frecuencia con salida rectificadora.

El esquema cuenta con la implementación de cálculos de MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) en una microcomputadora de un solo chip, sistema de sincronía y modulador PWM implementado en un CPLD (*Complex Programmable Logic Device*). El puente H de MOSFET genera señales de alta frecuencia con una modulación sinusoidal PWM, facilitando la operación del puente H de SCR.

El sistema propuesto en [7], Estados Unidos Patente número US 20140084695 A1, 2014, utiliza un conjunto de microinversores conectados en serie, el objetivo es eliminar el uso de transformadores al conectar en serie varios microinversores, que al sumar sus voltajes de salida generan la magnitud requerida en la red.

Una unidad de control se encarga de realizar las funciones de MPPT, coordinar que la fase de los voltajes de salida de los microinversores sea la misma que la del voltaje de red; además, este control realiza tareas de protección y de activación de los interruptores del microinversor. En caso de falla de alguno de los módulos microinversores del arreglo, el controlador activa un dispositivo que elimina su conexión del resto del arreglo, permitiendo la operación continua del sistema. Un módulo de comunicaciones permite enlazarse vía internet hacia una estación remota de monitoreo para realizar control de flujo de potencia.

La alternativa de microinversor presentada en [8], Estados Unidos Patente número US 2014 0112041 A1, 2014, implementa su control en un solo procesador. Este procesador realiza las funciones de monitoreo de las variables eléctricas de entrada y salida, temperatura ambiente cerca del panel, control del microinversor y comunicación vía PLC y/o enlace inalámbrico. Su capacidad de comunicación puede emplearse para un enlace con la red eléctrica y realizar funciones de administración de energía.

El objetivo de este proyecto es diseñar circuitos electrónicos para desarrollar un medidor bidireccional trifásico que pueda ser instalado en un sistema fotovoltaico interconectado a la red, para la medición y monitoreo inalámbrico de los principales parámetros de consumo y generación de energía eléctrica, como son el voltaje efectivo (V_{rms} , *root mean square*), corriente efectiva (A_{rms}), potencia activa (W), potencia aparente (VA), factor de potencia y consumo energético (kWh).

El reto tecnológico consiste en desarrollar un medidor bidireccional de bajo costo y fácil instalación, comparado con los medidores bidireccionales instalados por la compañía de suministro (CFE, Comisión Federal de Electricidad), que muestre los valores medidos en la pantalla de una computadora personal.

En un visualizador de cristal líquido LCD (*Liquid Cristal Display*) o en una aplicación móvil, organizados de forma sencilla para una fácil interpretación del usuario, de manera tal que le permita la toma de decisiones con respecto a la reducción de los costos generados por altos consumos de energía eléctrica (kWh) en las cargas conectadas en la red.

Metodología

Para validar el correcto funcionamiento, de acuerdo a las especificaciones del medidor bidireccional desarrollado, se utilizó la metodología científica basada en el diseño de circuitos electrónicos y pruebas eléctricas.

La arquitectura propuesta para el medidor bidireccional consiste en el diseño de una tarjeta para la adquisición de datos basada en un sensor de corriente de efecto hall y un sensor de voltaje de corriente alterna, así como el código desarrollado en programación Python® para la plataforma Raspberry Pi®. Esta plataforma es utilizada para la adquisición y comunicación de las mediciones realizadas y los cálculos de los parámetros relacionados con la calidad de la energía y el consumo energético (kWh) de las cargas conectadas a la red.

El método científico y experimental utilizado para la validación de la arquitectura del medidor, está fundamentado en el diseño de circuitos electrónicos para el acondicionamiento de las señales de voltaje y corriente alterna, tomado como base la teoría de los amplificadores de instrumentación y las leyes de los circuitos eléctricos. Se realizaron pruebas para caracterizar los sensores de corriente y voltaje, y se conectaron a los circuitos para el procesamiento digital de la información con la plataforma Raspberry Pi 3.

Todos los trabajos realizados relacionados con las pruebas eléctricas, diseño de circuitos electrónicos, diseño y fabricación del circuito impreso, desarrollo del software y la integración del medidor bidireccional en el sistema fotovoltaico interconectado a la red, se llevaron a cabo en el laboratorio de posgrado del Instituto Tecnológico de Hermosillo, en vinculación con personal de la empresa Diseño e Ingeniería sustentable S.A. de C.V.

Las investigaciones realizadas para fundamentar el estado del arte del proyecto, los circuitos electrónicos diseñados, el código desarrollado para la programación del firmware y las pruebas realizadas para la configuración y puesta en marcha del sistema fotovoltaico interconectado a la red, contribuyen de manera satisfactoria en la transferencia de tecnología, formación de recursos humanos, participación en congresos de divulgación científica y generación de patentes por la empresa Diseño e Ingeniería Sustentable S.A de C.V.

Propuesta de solución

El prototipo del medidor bidireccional consiste básicamente en la medición de la corriente alterna suministrada a la carga a través de la acometida de CFE, y de la corriente generada por el sistema fotovoltaico interconectado a la red (panel y microinversor).

La señal analógica obtenida en los circuitos de acondicionamiento de señal se aplica a una etapa de conversión analógica-digital para poder ser procesada en un módulo Raspberry Pi®, a través de los algoritmos desarrollados en programación Python®. Después del procesamiento digital de las señales, los parámetros de interés calculados pueden ser transmitidos a través de comunicación inalámbrica para su visualización y monitoreo en una computadora personal. A continuación, se describen cada una de las etapas desarrolladas para el diseño del medidor bidireccional trifásico.

Características del conjunto panel-microinversor

La solución propuesta para la problemática planteada con respecto a la medición bidireccional de la energía eléctrica total consumida en un sistema trifásico, se muestra en el diagrama a bloques de la figura 1. El suministro de la energía eléctrica es a través de la acometida de Comisión Federal de Electricidad (CFE) y de un sistema fotovoltaico interconectado a la red. El medidor bidireccional consiste básicamente en las siguientes etapas: sensores de voltaje y de corriente *rms* (*root mean square*), circuitos para el acondicionamiento de señal, convertidores analógico-digital, la unidad central de procesamiento con Raspberry Pi, comunicación inalámbrica y firmware desarrollado en lenguaje Python.

El prototipo propuesto para el medidor bidireccional es una interfaz conectada en el nodo común con la red de suministro de corriente alterna de CFE y la salida del microinversor del sistema fotovoltaico interconectado en la misma red, esto permite al sistema del panel solar operar en paralelo con la red proporcionada por CFE, de modo que la energía puede fluir en ambas direcciones entre la red y el medidor bidireccional. El microinversor tarda de 2 a 5 minutos para sincronizarse (misma fase y misma frecuencia) y empezar a inyectar energía en la red. De este modo, el medidor bidireccional considera ambas cantidades de energía (red de suministro y el sistema fotovoltaico) para calcular el valor neto de energía total en kWh para ser facturado.

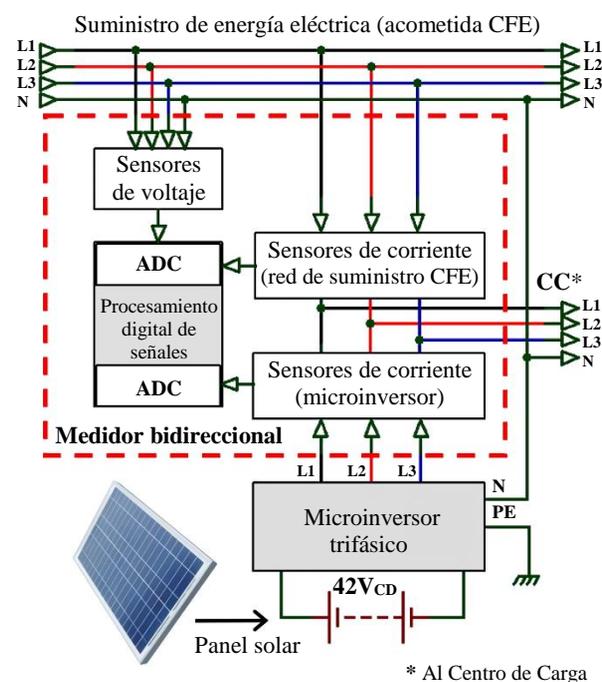


Figura 1 Diagrama a bloques del medidor bidireccional trifásico

Fuente: Elaboración Propia

Generar electricidad con un sistema fotovoltaico interconectado a la red, implica que la carga puede obtener la energía del mismo sistema o de la red de suministro de CFE, es decir, el sistema no es independiente, dejará de producir electricidad cuando no hay energía solar (durante la noche) y entonces toda la energía en la carga será proporcionada por la red de suministro CFE. Durante el día (luz solar), la energía suministrada por el sistema fotovoltaico es utilizada por la carga y de esta manera se reduce el consumo de la red de suministro, impactando en forma directamente proporcional en la reducción de la factura correspondiente [9].

Caracterización y acondicionamiento de la señal

Para las mediciones del voltaje y la intensidad de corriente suministradas por la red de CFE y generadas por el conjunto panel-microinversor interconectado a la red y la carga, se utilizan circuitos de acondicionamiento de señal. En la figura 2 se muestra la arquitectura general para el acondicionamiento de señal para la medición de voltaje y corriente alterna (*rms*: *root mean square*). Las características, configuración y funcionalidad de cada una de las etapas se describen a continuación.

Sensor de voltaje *rms* (*root mean square*). El sensor utilizado para la medición de voltaje es un transformador de corriente alterna, 115:6.3 V y 90 mA, con un divisor de voltaje conectado en el secundario para acondicionar la señal.

El diagrama esquemático correspondiente al circuito de acondicionamiento de señal para la medición de voltaje se muestra en la figura 3. La señal sinusoidal, acondicionada por el divisor de voltaje conectado en el secundario del transformador, se aplica a la etapa de conversión analógica-digital. Se utiliza el amplificador de instrumentación AD623 para mover el voltaje promedio (voltaje de *offset*) de la señal, de este modo la señal aplicada en la etapa del convertidor analógico-digital es una señal sinusoidal positiva en ambos semiciclos. En la figura 4 se muestra la configuración del amplificador AD623 [10].

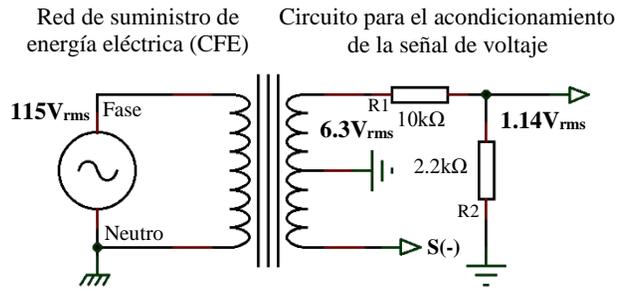
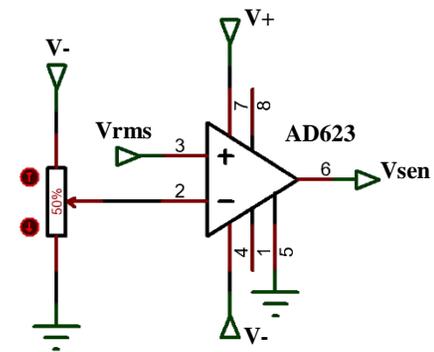


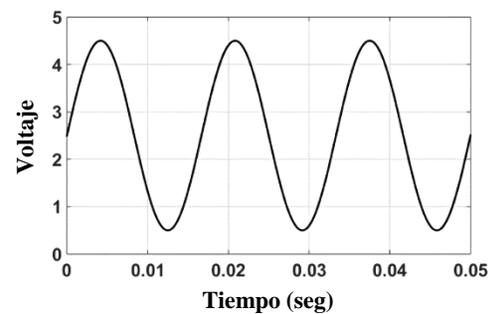
Figura 3 Acondicionamiento de la señal para la medición de voltaje *rms* (*root mean square*)
Fuente: Elaboración Propia

Sensor de corriente *rms* (*root mean square*)

El sensor utilizado para la medición de corriente alterna en la carga es el sensor de efecto Hall bidireccional ACS770LCB-050B, mostrado en la figura 5, con voltaje de alimentación de 5V_{CD}. Sus principales características: voltaje de salida directamente proporcional a la corriente en la carga, sensibilidad de 40mV/A, capacidad máxima de medición de 50Arms, voltaje de salida para corriente nula de 2.5V_{CD} (*offset*) y temperatura de operación de -50°C a 150°C [11].



(a) Amplificador de instrumentación (restador).



(b) Señal sinusoidal positiva.

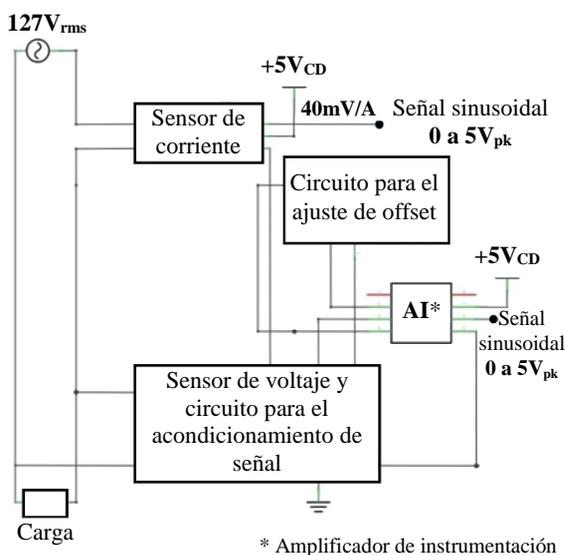


Figura 2 Arquitectura general para el acondicionamiento de señal para la medición de voltaje y corriente alterna.
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4 Circuito para ajustar el voltaje promedio (*offset*) para la señal sinusoidal
Fuente: Elaboración Propia

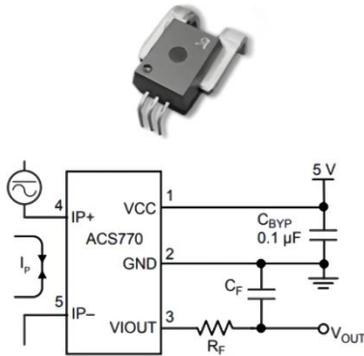
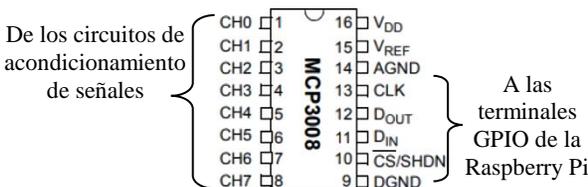


Figura 5 Sensor de efecto Hall utilizado para la medición de corriente rms (*root mean square*) [11].

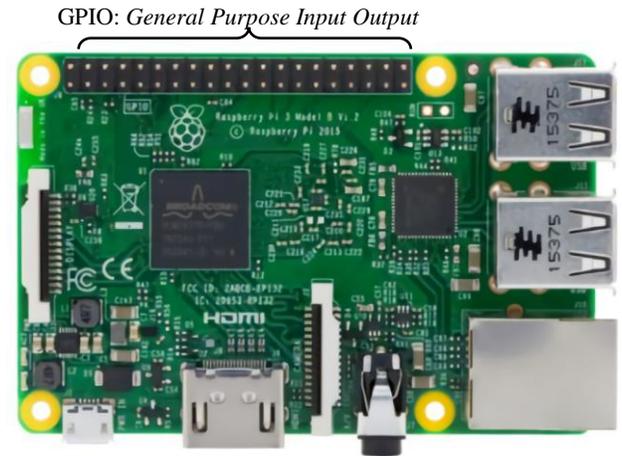
Adquisición y procesamiento digital de las mediciones realizadas

Para la adquisición de datos se utiliza el convertidor analógico-digital MCP3008, configurado y controlado con el protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*), programado en la plataforma de procesamiento central Raspberry Pi 3. En la figura 6 se muestra la interconexión de las señales SPI del circuito convertidor AD con las terminales GPIO (*General Purpose Input/Output*) de la Raspberry.

El circuito MCP3008 es un convertidor ADC del tipo aproximaciones sucesivas, con una resolución de 10 bits, tecnología CMOS, cuenta con ocho canales para entradas analógicas referenciadas a tierra (o cuatro entradas en modo diferencial), voltaje de alimentación de 5V_{CD}, frecuencia de muestreo de 200 ksp/s y temperatura de operación de -40°C a 85°C [12]. El módulo utilizado como unidad central de procesamiento es la Raspberry Pi 3 (8.5cm x 5.3cm), con procesador de 1.2GHz de 64 bits con núcleo ARM, incluye protocolo de comunicación inalámbrica 802.11n, Bluetooth 4.1, RAM de 1 GB, GPIO de 40 pines, puerto micro SD para cargar el sistema operativo y datos, micro USB para alimentación de 5V a 2.5A [13].



(a) Circuito ADC [12].



(b) Módulo Raspberry Pi [13].

Figura 6 Circuito para la interconexión del convertidor ADC MCP3008 y los GPIO de la Raspberry Pi

Arquitectura propuesta para el medidor trifásico bidireccional

En la figura 7 se muestra el diagrama esquemático de las conexiones para el circuito de potencia del conjunto panel-microinversor trifásico conectado a la red de suministro de CFE (Comisión Federal de Electricidad). La señal de salida de cada sensor de corriente (4mV/A) se conecta en un canal del circuito MCP3008 para la conversión analógica-digital a través del protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*) en la Raspberry Pi. En la figura 8 se pueden apreciar las conexiones de la señal de salida de los sensores de corriente en los canales correspondientes del circuito MCP3008.

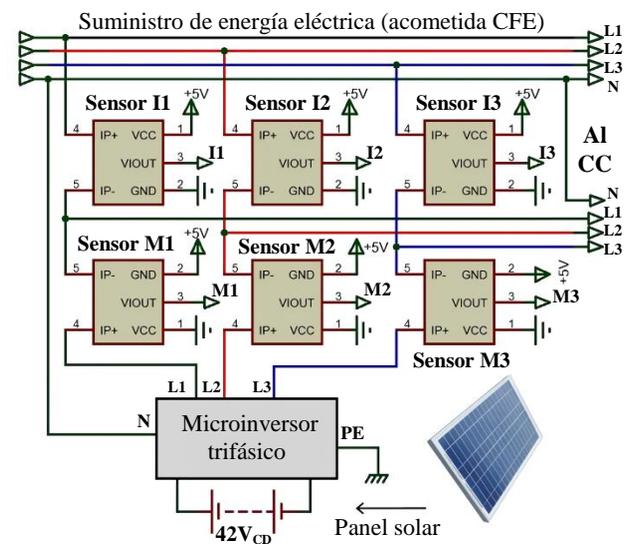


Figura 7 Conexión del suministro de energía eléctrica, microinversor trifásico y los sensores de corriente Fuente: Elaboración Propia

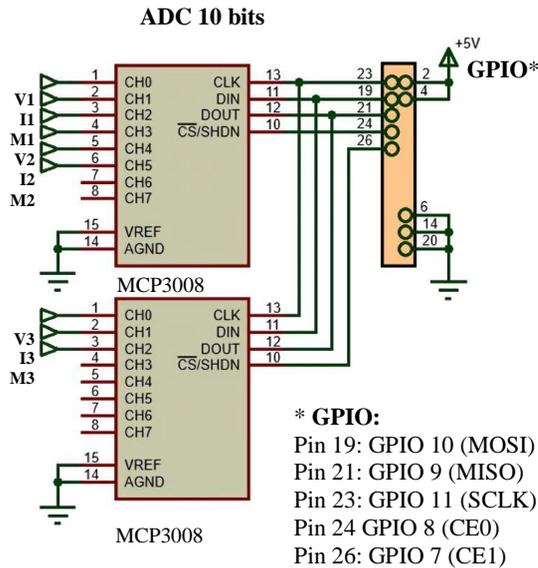


Figura 8 Conexión del circuito ADC MCP3008
Fuente: *Elaboración Propia*

Algoritmos para el cálculo de los parámetros eléctricos

A continuación, se describen los algoritmos desarrollados en el lenguaje de programación Python, para el cálculo de los parámetros relacionados con la generación y consumo energético.

Algoritmo para la adquisición de datos

El algoritmo utilizado para la adquisición de datos está desarrollado en lenguaje de programación Python, y se puede presentar de manera resumida en los siguientes pasos:

1. Importar las librerías para configurar y comunicar el circuito convertidor analógico-digital MCP3008 con la Raspberry a través de los pines GPIO: Adafruit_GPIO, Adafruit_MCP3008 y wringpi.
2. Crear el objeto mcp (MCP3008 virtual) y la función data, para la lectura de los datos SPI.
3. Utilizar la función read_adc() del objeto mcp, para leer los valores de los sensores de voltaje y corriente.
4. Calcular el tiempo que tarda en ejecutarse la función data, para obtener la frecuencia de muestreo f_s .
5. Crear la función data, para generar una tabla con los datos obtenidos a partir de las mediciones realizadas.

En la figura 9 se muestra el diagrama que representa la definición de la función data, para la generación de una tabla con los datos medidos.



Def data (voltageChannel, currentChannel, samples):

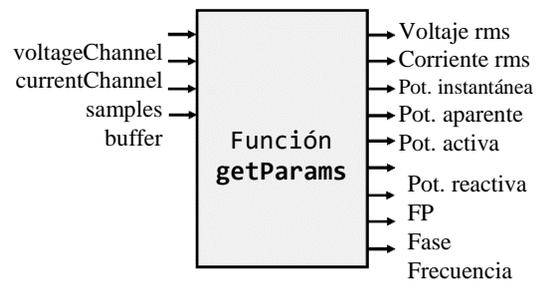
Samples	voltageWindow	currentWindow
1	1.34V	1.11A
2	2.45V	0.34A
3	1.50V	1.00A
...
...

Figura 9 Función generada en Python para la adquisición de los datos medidos

Fuente: *Elaboración Propia*

Algoritmo para el cálculo de los parámetros

Una vez que se han capturado los valores medidos, se desarrolla el algoritmo para el cálculo de los parámetros que se quieren mostrar en pantalla. Para esto, es necesario crear la función getParams, mostrado en la figura 10.

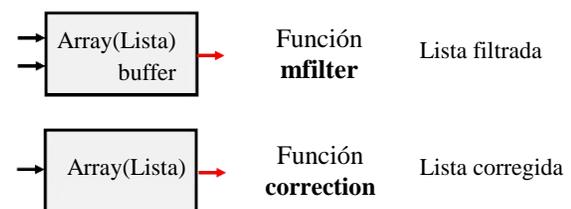


Def getParams(voltageChannel, currentChannel, samples, buffer):

Figura 10 Función generada en Python para el cálculo de los parámetros en el medidor bidireccional.

Fuente: *Elaboración Propia*

Antes de realizar los cálculos de cada uno de los parámetros para mostrar en el medidor bidireccional, es necesario filtrar las señales y modificar el nivel de offset generado por el circuito de acondicionamiento de señal. Para el filtrado de las señales se genera la función mfilter, para la corrección del offset la función correction, representados en la figura 11.



```
windows = data(voltageChannel, currentChannel, samples)
voltage = correction(mfilter(windows['voltageWindow'], buffer))
current = correction(mfilter(windows['currentWindow'], buffer))
```

Figura 11 Función generada en Python para el filtro de las señales capturadas y la corrección del offset.

Fuente: *Elaboración Propia*

El resultado de la lista de los valores filtrados y corregidos representan el voltaje y la corriente instantánea, de acuerdo con las ecuaciones:

$$v(t) = V_p \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

$$i(t) = I_p \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

Funciones desarrolladas en Python para el cálculo de los parámetros eléctricos

Potencia instantánea:

```
power = multiply(voltage, current)
```

Se multiplica elemento por elemento para generar la lista $p(t)$.

Valores efectivos de voltaje y corriente:

```
vrms = rms(voltage)
```

```
irms = rms(current)
```

Para una mejor precisión en los cálculos de los valores efectivos, la función utiliza la ecuación definida por:

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) dt} \quad (3)$$

Potencia aparente:

```
apparentPower = vrms * irms
```

Potencia promedio (real o activa):

```
realPower = mean(power)
```

Para una mejor precisión en los cálculos de la potencia real en la carga, la función utiliza la ecuación:

$$P_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^T v(t) i(t) \quad (4)$$

Factor de potencia:

```
powerFactor = realPower/apparentPower
```

Ángulo de fase:

```
angleRad = math.acos(powerFactor)
```

```
angleDeg = angleRad*180/math.pi
```

Potencia reactiva:

```
reactivePower = apparentPower * math.sin(angleRad)
```

Frecuencia y THD (Total Harmonic Distortion)

Para calcular la **frecuencia** y la distorsión armónica total **THD**, se utiliza la función `powerQuality(voltage, fs)`. Las entradas a la función son la lista de voltaje y la frecuencia de muestreo, y entrega los valores de la frecuencia y el valor de THD:

```
powerQuality(voltage,fs)
analysis = powerQuality(voltage, windows['fs'])
...
frequency = analysis['frequency']
thd = analysis['thd']
```

Se utiliza la librería `numpy(np)` para:

- Calcular la transformada rápida de Fourier (FFT: *Fast Fourier Transform*) de la lista de voltaje, la componente de mayor magnitud es la que determina la frecuencia fundamental:


```
x = np.array(voltage)
y = np.fft.fft(x)
```
- Para calcular la distorsión armónica total:


```
thd = 100 * math.sqrt(components) /yscaled[np.argmax(yscaled)]
```

Energía neta (kwh):

```
energy = 0
```

```
delta = 0
```

```
energy = realPower * delta / 3600000.0 + energy
```

Resultados

En la figura 12 se muestra la mesa de trabajo utilizada para las pruebas realizadas al medidor bidireccional.

La conexión de los componentes para el sistema fotovoltaico interconectado a la red se puede apreciar la figura 13. El panel solar utilizado es de 300W, 36V_{CD} a 8.17A, conectado a un microinversor trifásico, con una potencia máxima de salida de 900W, voltaje nominal de 120V/208V y corriente nominal de 2.5A por fase.

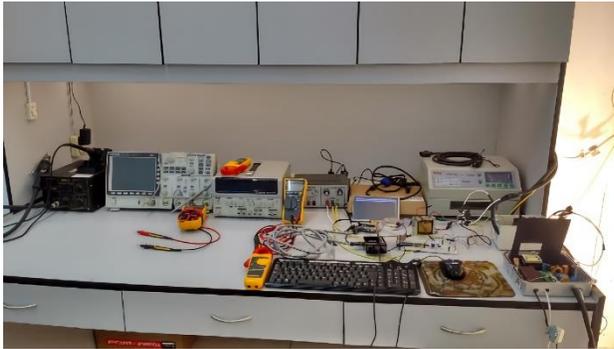


Figura 12 Mesa de trabajo para las pruebas con el prototipo del medidor bidireccional
Fuente: *Elaboración Propia*

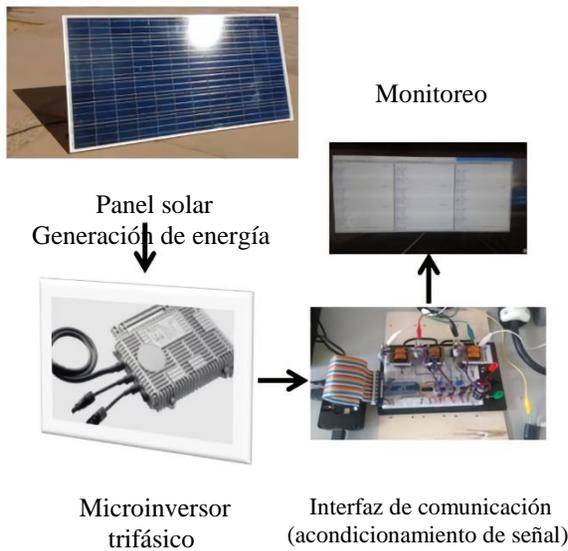


Figura 13 Interconexión de los componentes del sistema fotovoltaico y medidor bidireccional.
Fuente: *Elaboración Propia*

En la figura 14 se muestra la interconexión de la red de suministro a la tarjeta de adquisición de datos. Ambos circuitos, sistema fotovoltaico y red de suministro, se interconectan al circuito de acondicionamiento de señal para realizar las pruebas y ajustes de acuerdo con los valores esperados.

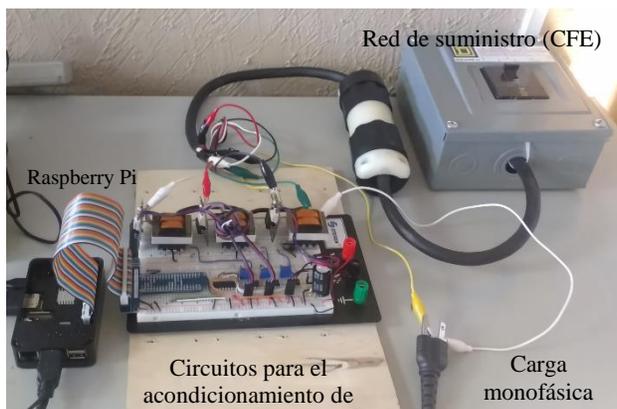


Figura 14 Circuito para el acondicionamiento de señal del medidor bidireccional
Fuente: *Elaboración Propia*

En la figura 15 se puede observar el diseño del circuito impreso para la tarjeta de adquisición de datos, después de haber validado su fabricación de acuerdo con las pruebas realizadas. En la figura 16 se muestra la conexión de tres lámparas, una por línea, y en la figura 17 se pueden ver las lecturas de un medidor comercial de voltaje, corriente, potencia y factor de potencia, utilizado para comparar los parámetros obtenidos con el medidor bidireccional trifásico.

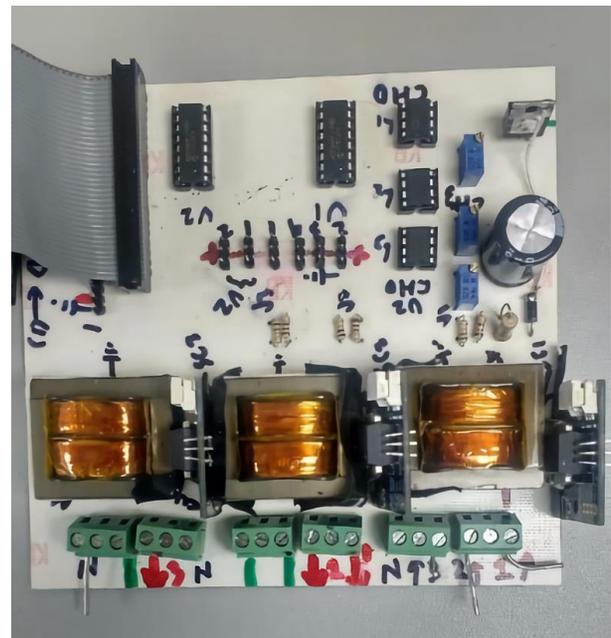


Figura 15 Tarjeta de adquisición de datos para el medidor bidireccional trifásico
Fuente: *Elaboración Propia*

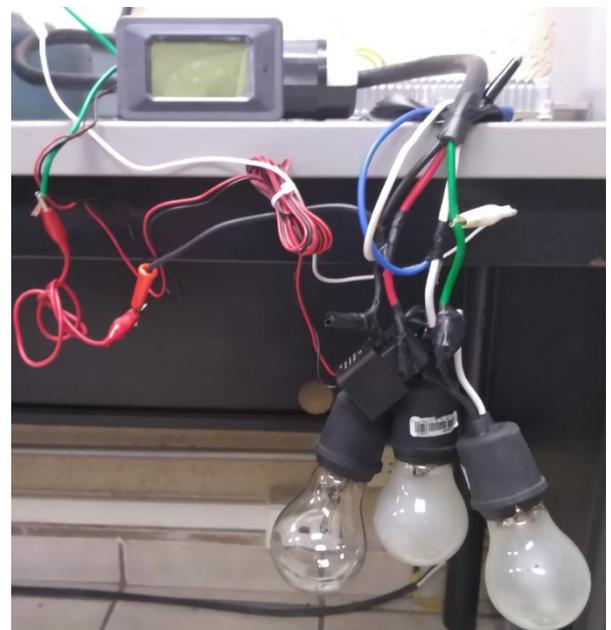


Figura 16 Conexión de lámparas como cargas monofásicas
Fuente: *Elaboración Propia*



Figura 17 Conexión de un medidor comercial para comparar con el medidor bidireccional
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 18 se muestra la conexión de un motor trifásico y el uso de un medidor comercial de voltaje, corriente, potencia y factor de potencia.



Figura 18 Conexión de un motor trifásico al suministro de energía con el microinversor interconectado a la red.
Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 1 se muestran los resultados de las pruebas realizadas con lámparas incandescentes conectadas como cargas, una en cada línea trifásica.

Parámetros	CFE	Micro-inversor	Medidor comercial
Línea 1			
Vrms	132 V	132 V	132 V
Irms	0.08 A	0.5 A	0.58 A
Potencia (W)	10.44 W	65.27 W	75.79 W
Potencia (VA)	10.56VA	66VA	76.56VA
FP	0.989	0.989	0.99
Línea 2			
Vrms	131.8 V	131.8 V	132 V
Irms	0.51 A	0.5 A	1.01 A
Potencia (W)	66.5 W	65.17 W	132 W
Potencia (VA)	67.22VA	65.9 VA	133.3VA
FP	0.989	0.989	0.99
Línea 3			
Vrms	131.8 V	131.8 V	132 V
Irms	0.08 A	0.5 A	0.58 A
Potencia (W)	10.43 W	65.17 W	75.79 W
Potencia (VA)	10.54VA	65.9 VA	76.56VA
FP	0.989	0.989	0.99

Tabla 1 Mediciones con carga monofásica

En la tabla 2 se muestran las mediciones realizadas con un motor trifásico conectado como carga.

Parámetros	CFE	Micro-inversor	Medidor comercial
Línea 1			
Vrms	132 V	132 V	132 V
Irms	1.12 A	0.5 A	1.41 A
Potencia (W)	14.78 W	64.68 W	19.5 W
Potencia (VA)	147.8VA	66 VA	186.1VA
FP	0.1	0.98	0.1
Línea 2			
Vrms	131.8 V	131.8 V	132 V
Irms	1.2 A	0.5 A	1.64 A
Potencia (W)	23.73 W	62.61 W	36.8 W
Potencia (VA)	158.2VA	65.9 VA	216.5VA
FP	0.15	0.95	0.17
Línea 3			
Vrms	131.8 V	131.8 V	132 V
Irms	1.3 A	0.5 A	1.64 A
Potencia (W)	30.84 W	62.61 W	36.8W
Potencia (VA)	171.34	65.9VA	216.5VA
FP	0.18	0.95	0.17

Tabla 2 Mediciones con carga trifásica

En la figura 19 se muestran las gráficas de voltaje y corriente generadas en Python, a partir de las mediciones registradas por el medidor bidireccional, y en la figura 20 los valores obtenidos con un medidor comercial.

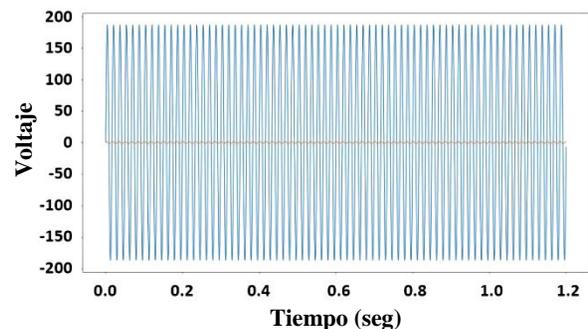


Figura 19 Gráficas del voltaje y la corriente de la línea 2 en el medidor trifásico

Fuente: Elaboración Propia



Figura 20 Mediciones registradas con un medidor comercial

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 21 se presenta una pantalla generada en Python para visualizar las mediciones por línea, registradas con el medidor bidireccional. En este caso, se pueden comparar con las mediciones realizadas, línea 2, con el medidor comercial (figura 20).

```

----- Línea 2 -----
Vrms: 131.995623
P: 55.501332
S: 191.383418
Angulo: 73.142000
Q: 183.158987
Irms: 1.449922
F.P: 0.290001
F: 60.000000

```

Figura 21 Pantalla generada en Python con los datos registrados por el prototipo del medidor bidireccional.

Fuente: *Elaboración Propia*

Conclusiones

El uso de nuevas tecnologías de la informática, la electrónica y el Internet de las cosas (*IoT: Internet of Things*), es fundamental para el desarrollo y actualización de propuestas relacionadas con proyectos alternativos para la generación de energía eléctrica.

Se realizó la conexión de un panel solar de 300W a un microinversor trifásico con corriente nominal de 2.5A de salida, para generar energía eléctrica en un sistema fotovoltaico interconectado a la red, en las instalaciones del laboratorio de electrónica del edificio de posgrado, en el Instituto Tecnológico de Hermosillo.

Para la medición de la corriente alterna generada por el conjunto panel-microinversor, y la corriente suministrada por la red a las cargas trifásicas y monofásicas, se utilizó el medidor bidireccional trifásico presentado en este artículo. Esto permitió validar las mediciones realizadas relacionadas con los principales parámetros del consumo energético (kWh), potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia. El código desarrollado permite analizar y visualizar por separado estos parámetros, con la finalidad de presentar al usuario el costo neto a pagar por el consumo de energía (kWh), considerando la energía generada por el sistema fotovoltaico y la energía suministrada por CFE.

Los resultados de las pruebas realizadas y la validación de las mismas, utilizando un medidor comercial como patrón, permiten establecer en conclusión que se puede utilizar el medidor bidireccional en instalaciones residenciales e industriales para las mediciones eléctricas con la misma precisión que un medidor bidireccional utilizado actualmente por la compañía de suministro de energía eléctrica.

El desarrollo tecnológico propuesto para el medidor bidireccional es fundamental para el avance científico en el diseño y aplicación de nuevas tecnologías para la generación y gestión de energías renovables. La principal aportación sugerida por los resultados obtenidos, se basa fundamentalmente en el diseño de los circuitos de acondicionamiento de señal para la medición de voltaje y corriente, tanto generada como consumida por las cargas conectadas al sistema fotovoltaico interconectado a la red, así como un novedoso sistema para la conversión de las señales analógicas a digitales a través del protocolo SPI. Además, el código desarrollado en lenguaje Python presenta algunas funciones innovadoras para el tratamiento digital de las señales, para el cálculo de los parámetros eléctricos y su visualización en la pantalla de una computadora o aplicación móvil a través de comunicación WiFi (Wireless Fidelity).

Agradecimiento

Un agradecimiento muy especial al Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico de Hermosillo, por todo el apoyo proporcionado con las instalaciones para los trabajos de laboratorio y las pruebas realizadas al medidor bidireccional, y a la empresa Diseño e Ingeniería Sustentable por el apoyo económico para la compra de materiales y equipos a través del programa PEI (programa de estímulos a la innovación) de CONACYT.

5. Referencias

- [1] C. d. E. S. y. d. O. Pública, Energías renovables: evolución y objetivos en Estados Unidos y México, Cámara de diputados, 2016.
- [2] Solarcentury, Energía Solar, Estado Actual y Perspectivas, Solarcentury, 2015.
- [3] Prospectivas del Sector Eléctrico 2012-2026, Secretaría de Energía, México 2012.

- [4] Caicedo Gómez, S. (2019). Estudio técnico de un sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica en la Universidad Piloto de Colombia como caso de estudio.
- [5] Lubo, U. D. (2019). Cargos de respaldo por uso de la red eléctrica en el costo unitario de energía distribuida: desafíos y oportunidades para la planificación. *Revista UIS Ingenierías*, 18(3), 67- 74.
- [6] H. Zhang, H-Bridge micro inverter grid-connected device. Estados Unidos Patente US20130242617 A1, 19 09 2013.
- [7] M. Fornage, Serially connected micro-inverter system having concertina output voltage control. Estados Unidos Patente US 20140084695 A1, 27 03 2014.
- [8] S. Collin, «Single chip grid connected solar micro inverter». Estados Unidos Patente US 2014 0112041 A1, 24 04 2014.
- [9] <http://calefaccion-solar.com/beneficios-de-un-medidor-bidireccional.html> (Consulta: 18 de septiembre de 2019).
- [10] <https://www.analog.com/en/products/ad623.html#product-overview> (Consulta: 20 de septiembre de 2019)
- [11] <https://www.digikey.com.mx/es/supplier-centers/a/allegro-microsystems> (Consulta: 20 de septiembre de 2019).
- [12] <https://www.digikey.com.mx/product-detail/es/microchip-technology/MCP3008-I-P/MCP3008-I-P-ND/319422> (Consulta: 20 de septiembre de 2019).
- [13] <https://www.adafruit.com/?q=raspberry> (Consulta: 23 de septiembre de 2019).

Evaluación de la energía mareomotriz en el norte del Golfo de California con fines de generación de energía eléctrica

Tidal energy evaluation in the north of the Gulf of California for power generation purposes

QUIÑONEZ-OSUNA, José Ramón†*, MARINONE-MOSCHETTO, Silvio Guido, FLORES-AGUILAR, María Dolores y CARMONA-DUARTE, Domingo

Instituto Tecnológico de Mazatlán

ID 1^{er} Autor: *José Ramón, Quiñonez-Osuna* / ORC ID: 0000-0001-9182-6171

ID 1^{er} Coautor: *Silvio Guido, Marinone-Moschetto* / ORC ID: 0000-0002-0294-9186

ID 2^{do} Coautor: *María Dolores, Flores-Aguilar* / ORC ID: 0000-0002-2017-9197

ID 3^{er} Coautor: *Domingo, Carmona-Duarte*

DOI: 10.35429/JEE.2019.8.3.33.39

Recibido Febrero 20, 2019; Aceptado Marzo 30, 2019

Resumen

Las corrientes de marea constituyen una fuente limpia e inagotable de energía. Determinar su magnitud en la zona norte del Golfo de California con miras a su aprovechamiento, representó el objeto central de este trabajo. La metodología comprendió una búsqueda exhaustiva de mediciones de corrientes de marea, la generación del archivo de texto de parejas ordenadas tiempo-velocidad (historial de velocidades a manera de tabulación) a partir de los gráficos de velocidades encontrados, y finalmente su procesamiento, lo cual consistió en la obtención de los historiales de densidad de potencia de la corriente y de potencia generada por una turbina estándar, así como las gráficas correspondientes de frecuencia y equivalencia respecto a una planta de generación continua. Los resultados obtenidos muestran que la energía disponible en las corrientes de marea de la región norte del Golfo de California resulta inferior que la de otras zonas del mundo con cambios radicales de marea, sin embargo se considera que la instalación de varias granjas en lugar de una sola, situadas en los sitios donde las corrientes alcanzan mayores velocidades, aunado al aprovechamiento de otras fuentes renovables disponibles en la región, constituyen en conjunto una opción importante que se debe considerar.

Energía mareomotriz, Central mareomotriz, Sitios con cambios radicales de marea

Abstract

The tidal currents constitute a clean and inexhaustible source of energy. The determination of its magnitude in the north of the Gulf of California with a view to its use, represented the central objective of this work. The methodology included an exhaustive search of measurements of tidal currents, the generation of a text file of ordered time-speed data (history of speeds as a tabulation) from the found graphs of speeds, and finally its processing, which consisted of the histories of the current power density and power generated by a standard turbine, as well as the corresponding graphs of frequency and equivalence with respect to a continuous generation plant. The results show that the energy available in the tidal currents of the northern region of the Gulf of California is lower than that of other areas of the world with radical tidal changes; however, it is considered that the installation of several farms instead of one, located in the places where the currents reach higher speeds, together with the use of other renewable sources available in the region, constitute altogether an important option that must be considered.

Tidal energy, Tidal power plant, Locations of largest tidal ranges

Citación: QUIÑONEZ-OSUNA, José Ramón, MARINONE-MOSCHETTO, Silvio Guido, FLORES-AGUILAR, María Dolores y CARMONA-DUARTE, Domingo. Evaluación de la energía mareomotriz en el norte del Golfo de California con fines de generación de energía eléctrica. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2019. 3-8: 33-39.

† Investigador contribuyendo como primer Autor.

*Correspondencia al Autor correo electrónico: (jrquinonez@itmazatlan.edu.mx)

Introducción

La atmósfera de la Tierra se encuentra en una condición seria de deterioro, la necesidad mundial de duplicar en 15 años la producción de energía eléctrica involucra un severo desequilibrio en caso de no llevar a cabo mejoras sustanciales en los métodos de generación, según lo establece la Agencia Internacional de Energía (IEA). Por ello, a partir de mediciones de velocidad realizadas a 20 m. de profundidad por el CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada), a lo largo de un ciclo completo de marea, se evalúa la potencia generada por una turbina mareomotriz estándar, en un sitio localizado al sureste de San Felipe Baja California (Figura 1).

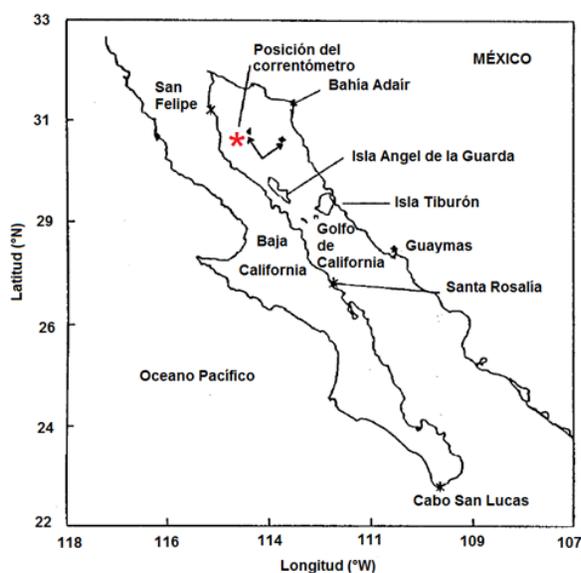


Figura 1 Localización del correntómetro empleado por los investigadores del CICESE para obtener registros longitudinales y transversales de velocidad de las corrientes de marea en el Golfo de California

Para ello fue necesario llevar a cabo una búsqueda de mediciones de velocidad de corrientes de marea, en zonas viables de la zona Golfo de California. Las mediciones fueron conseguidas a manera de 2 gráficas: una de velocidades longitudinales (a lo largo del golfo) y otra de velocidades transversales (perpendiculares a las primeras). Las gráficas fueron obtenidas por el Dpto. de Oceanografía Física del CICESE en marzo de 1988 [1]. Las mediciones fueron realizadas en lapsos de una hora, a una profundidad de 20 m. durante un periodo de marea muy parecido al correspondiente del 2018, como puede apreciarse en el gráfico 1. La gráfica superior corresponde a marzo 1988 y la inferior a marzo 2018.

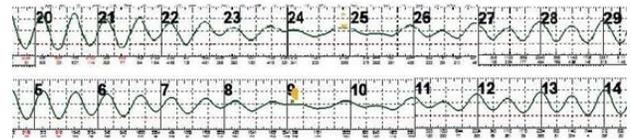


Gráfico 1 Gráficas comparativas de mareas de los meses de marzo 1988 (gráfica superior) y marzo 2018 (gráfica inferior) [2]

Por otra parte, después de una revisión bibliográfica sobre los métodos existentes para extraer la energía de las mareas y de las tecnologías empleadas por cada uno, fue seleccionado el método de corrientes de mareas, empleando turbinas situadas perpendiculares al flujo, por su bajo daño al medio ambiente, menor costo y buena eficiencia.

Las gráficas de velocidad aportadas por el CICESE se muestran en el Gráfico 2. Las características del sitio de medición son las siguientes: diferencia máxima de mareas: 6m; tipo de marea: semidiurna (dos mareas altas diferentes y dos mareas bajas diferentes); profundidad: 100 m; anchura del golfo: 5 km.

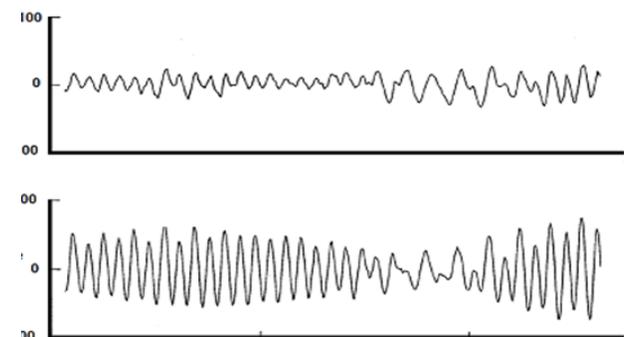


Gráfico 2 Valores de velocidad transversal (gráfica superior) y longitudinal (gráfica inferior) en cm/seg, aportados por el CICESE, correspondientes al mes de marzo 1988

El EPRI (Electric Power Research Institute) establece que mediciones de corriente como las mostradas en la Figura 3 son confiables por un periodo de 30 años [3]. Así mismo, se señala que existe muy diversa información sobre el aprovechamiento de la energía de las mareas en México, y particularmente en la región Norte del golfo de California, donde se presentan diferencias críticas del nivel del mar. Sin embargo, no se encontraron publicaciones basadas en mediciones continuas de velocidad. Mejía et al. [4] e Hiriart Le Bert [5] presentan para esta zona predicciones de velocidades de corrientes de marea y potencia probable de generación, basadas en modelos enteramente teóricos.

La energía cinética de una corriente de fluido se determina por la conocida expresión:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Donde m y v representan respectivamente la masa y la velocidad del agua. Luego, la potencia disponible en la corriente de marea que atraviesa una sección A perpendicular al flujo es obtenida dividiendo la energía cinética entre el tiempo:

$$P = \int_A \frac{E_c}{t} = \int_A \frac{0.5mv^2}{t} = \int_A \frac{0.5\rho Vv^2}{t} = \int_A \frac{0.5\rho Av^2}{t} = \int_A 0.5\rho Av^3 \quad (2)$$

donde P es la potencia, la densidad del agua de mar está dada por $\rho \approx 1.027 \text{ kg/m}^3$, v representa la velocidad instantánea del flujo, m la masa, t el tiempo y V el volumen. Luego, si se considera que el flujo es uniforme sobre la sección transversal A entonces la expresión 2 se puede escribir como se muestra en la ecuación 3 para determinar la densidad de potencia (P/A).

$$P/A = 0.5\rho v^3 \quad (3)$$

El comportamiento de la eficiencia de una turbina estándar de corrientes se muestra en el Gráfico 3, el cual aporta la eficiencia correspondiente a cada velocidad registrada. De esta manera, la potencia generada por metro cuadrado de sección transversal del rotor de una turbina estándar, se consigue multiplicando la ecuación 3 por la eficiencia correspondiente, resultando así la ecuación 4. Es importante notar que para una turbina estándar, las velocidades por debajo de 0.5 m/s y mayores 3.6 m/s implican una potencia nula, como lo muestra el Gráfico 3.

$$P/A = 0.5\eta\rho v^3 \quad (4)$$

Para el cálculo de una granja de turbinas mareomotrices con capacidad semejante a la de un generador eléctrico continuo, se consideró el área bajo la gráfica potencia-tiempo de este, a lo largo de un periodo de mareas, así como una distribución ficticia de turbinas mareomotrices, generando potencia ininterrumpidamente a lo largo del periodo, de manera que pudiera conseguirse aproximadamente la misma área.

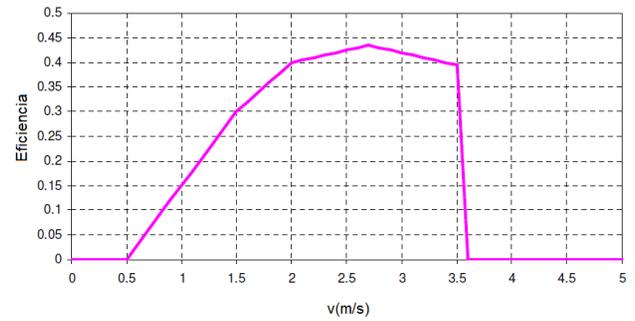


Gráfico 3 Curva de eficiencia para una turbina de corrientes de mareas típica [6]

El trabajo se compone de cuatro secciones principales: 1) Metodología, donde se presenta el método empleado para calcular la potencia a generar por una turbina estándar, 2) Historial de velocidades y elipse de corrientes de marea, que muestra la tabulación (tiempo, velocidad) elaborada a partir de las gráficas de velocidad aportadas por el CICESE (Gráfico 2), el cual representa el historial presentado a manera de parejas ordenadas, y que es indispensable de esta manera para poder evaluar tanto la energía mareomotriz como la potencia que se puede generar.

Así mismo se incluyen en esta sección, las graficas de la tabulación obtenida y su comparación con las gráficas aportadas por el CICESE, además de la elipse de corrientes de marea, la cual brinda la dirección dominante de la corriente y por tanto la posición optima de las turbinas, las cuales se colocan perpendiculares a esta dirección. La tercera sección: 3) Historiales de energía y potencia, que presenta los historiales de energía disponible en la corriente y de potencia generada por una turbina de 18 m., los cuales permiten visualizar el grado de disponibilidad de energía eléctrica a partir de las corrientes de marea. Finalmente se incluye la sección 4 que consiste en el Cálculo de una granja de turbinas mareomotrices con capacidad semejante a la de un generador eléctrico continuo

Metodología

La metodología se desarrolla de acuerdo con el siguiente procedimiento; las gráficas aportadas por el CICESE (Gráfico 2) son convertidas a un archivo de texto de tercias ordenadas tiempo - velocidad longitudinal - velocidad transversal (historial de velocidades a manera de tabulación).

Enseguida es graficada cada pareja de velocidades de la tabulación con el objeto de obtener la elipse de corrientes de marea, cuya finalidad es aportar la dirección dominante de la corriente. Posteriormente se obtiene la velocidad resultante correspondiente a cada tercia ordenada y finalmente, mediante las ecuaciones 1- 4, se determinan respectivamente, para cada tercia ordenada: energía cinética, potencia disponible en la corriente de marea, densidad de potencia y potencia generada por metro cuadrado de sección transversal de rotor, de una turbina estándar.

Historial de velocidades y elipse de corrientes de marea.

El archivo de texto de parejas ordenadas tiempo-velocidad generado a partir de las gráficas de velocidad aportadas por el CICESE (Gráfico 2) se presenta en el Anexo 1. Por su parte, el Gráfico 4 muestra en color negro la gráfica del historial de velocidades, tal cual se presentó en el Gráfico 2 y en azul, la obtenida de la tabulación elaborada. La elipse de corrientes de marea (Figura 2) se obtiene al graficar la tabulación del Anexo 1.

La gráfica de velocidad resultante, su histograma de frecuencias y su gráfica de probabilidad acumulada, se muestran en los Gráficos 5, 6 y 7 respectivamente.

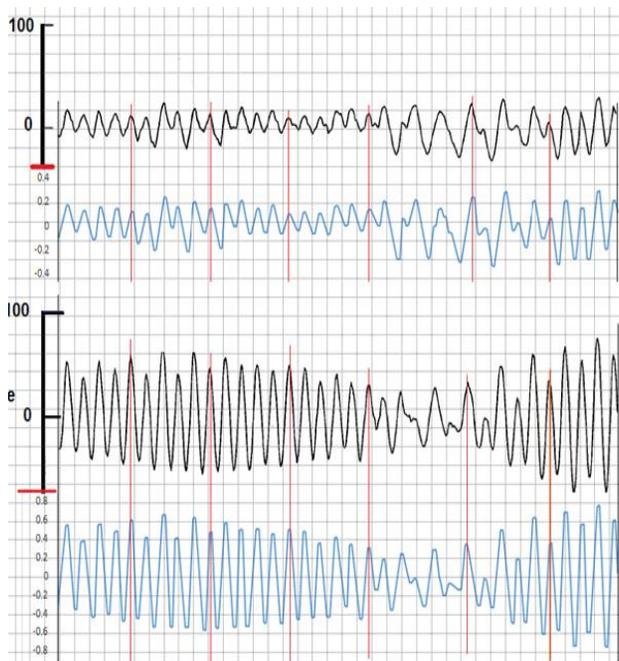


Gráfico 4 Comparación entre las graficas originales de velocidad (color negro) y las obtenidas de la tabulación generada a partir de estas (color azul)

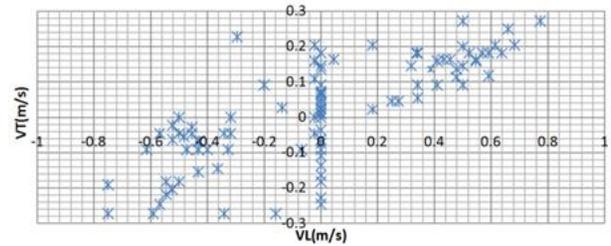
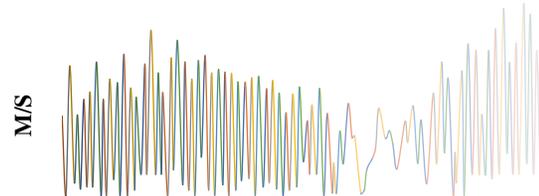


Figura 2 Elipse de la corriente de marea



DIAS

Gráfico 5 Historial de velocidad resultante

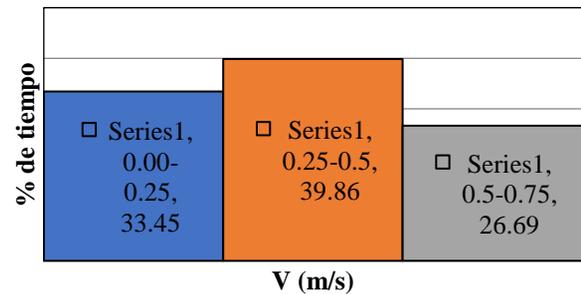


Gráfico 6 Histograma de frecuencias de velocidad

Historiales de energía cinética y potencia a generar

De acuerdo con la metodología presentada son calculados los historiales de energía cinética disponible en la corriente y de potencia generada por una turbina estándar de 18 m. de diámetro (Gráficos 8 y 9) empleando las ecuaciones 3 y 4 respectivamente.

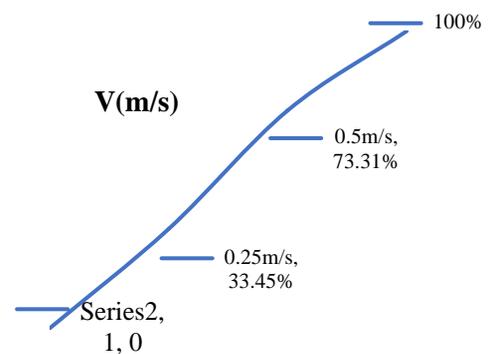


Gráfico 7 Curva de probabilidad acumulada de velocidad

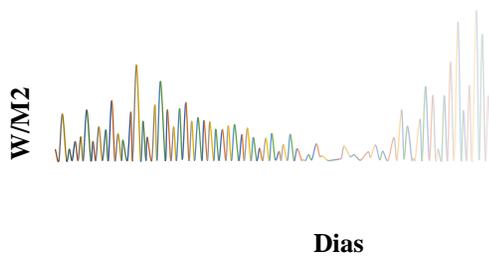


Gráfico 8 Historial de energía cinética

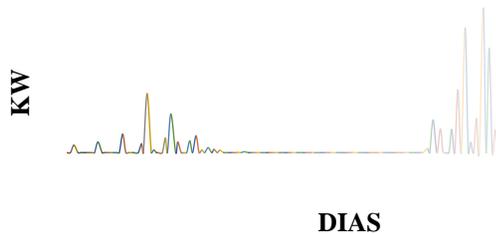


Gráfico 9 Historial de potencia generada por una turbina de 18 m. de diámetro

Cálculo de una granja de turbinas mareomotrices con capacidad semejante a la de un generador eléctrico continuo

En la Figura 3 se muestra de color rojo el área integrada bajo la curva del historial de potencia generada (gráfico 9), de manera condensada, sobreencimado en el centro de este mismo gráfico. Por su parte la Figura 4 muestra esta área y las dos parciales consideradas para conseguir una aproximación a la potencia de un generador continuo con capacidad igual a la máxima obtenida por una turbina mareomotriz de 18 m. en el sitio analizado, es decir de 7 KWh.

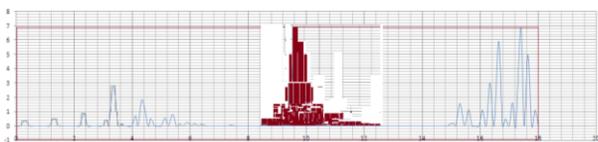


Figura 3 Área total integrada bajo la curva del historial de potencia generada por una turbina de 18 m

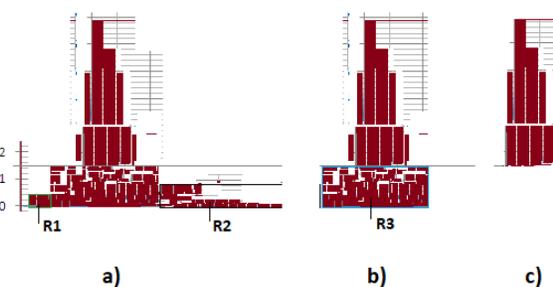


Figura 4 Área integrada bajo la curva del historial de potencia generada por una turbina de 18 m.: a) área total, b) área parcial (sin regiones R1 y R2), c) área parcial (sin regiones R1, R2 y R3)

La Figura 5 muestra el plano potencia-tiempo correspondiente a un periodo de marea tal cual se mostró en el gráfico 9, cubriéndose el área correspondiente a un generador eléctrico continuo (de 18 días por 7 KW), de manera aproximada en color rojo, por la producción de 20 turbinas mareomotrices (las cuales en realidad operarían de manera simultánea y no como se muestra ficticiamente, considerando 10 regiones parciales tipo b y 10 tipo c, de acuerdo con la Figura 4).

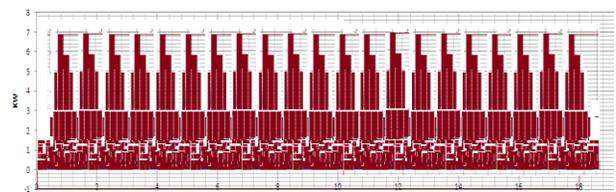


Figura 5 Producción de 20 turbinas mareomotrices, considerando 10 áreas parciales tipo b y 10 áreas parciales tipo c, de acuerdo con la Figura 13

Resultados

Con respecto de la elipse de la corriente (Figura 2), se tiene que su dirección dominante es de 5.19 grados con respecto al centro longitudinal del golfo.

En relación con el histograma de frecuencias de velocidad (Gráfico 7), así mismo se observa que en el sitio estudiado, la magnitud de la velocidad es aprovechable por aproximadamente 5 días (26.7% del tiempo) mientras que no lo es por alrededor de 13 días.

Con referencia a la potencia generada, se puede observar en el Gráfico 9, que esta alcanza valores aceptables entre los días 2 y 6 del periodo y valores máximos los dos últimos días.

Finalmente se señala, tomando en cuenta la Figura 5, que la producción de 20 turbinas de marea de 18 m. de diámetro equivale aproximadamente a un generador eléctrico continuo de 7 kwh.

Conclusiones

A diferencia de otros sitios en el mundo con diferencias críticas de marea, la velocidad media en el sitio analizado es reducida. Mientras que en Canadá (Quebec y Pasaje Minas) se presentan velocidades medias de la corriente de 2 a 3 m/s [6] y en Francia (Costa Norte de Brittany) de 1.5 a 2 m/s [7], en el sitio estudiado es de 0.41 m/s.

El presente estudio sugiere que se puede aprovechar al máximo la energía disponible en las corrientes del norte del golfo de California, donde estas muestran energía adecuada, por ejemplo en el sitio estudiado y entre las islas, donde Badan et al. [8] reportan velocidades de hasta 1.5 m/s. Es importante considerar que empleando varias granjas en vez de una sola, se puede producir en cinco días lo que no es posible el resto del periodo de marea, brindando así mismo durante estos días, una proporcional disminución de emisiones contaminantes.

En relación con la distribución de las turbinas, se recomienda sobremanera que estas debieran instalarse a distancias mayores de las consideradas en otros sitios del mundo donde las velocidades de la corriente son superiores, con el objeto de que la energía cinética posterior a un frente de turbinas, no se vean tan afectadas.

Por otro lado se señala, que tanto la energía del viento como del sol son de magnitud adecuada en varias inmediaciones del golfo, por lo que se puede llevar a cabo un aprovechamiento en conjunto de estas tres fuentes renovables de energía.

Finalmente se desea agregar, que es de suma importancia para cualquier tipo de central de energía renovable situada a lo largo del Golfo de California, tanto el empleo de materiales resistentes al medio salino como cuidados especiales a los equipos, con el objeto de prolongar su vida útil y con ello hacer más redituable la inversión, sobre todo en aquellas granjas que solo podrían generar electricidad por periodos cortos, como es el caso de la de turbinas de marea.

Agradecimientos

Se desea agradecer al CICESE, por aportar las graficas de velocidad empleadas para desarrollar el presente trabajo

Referencias

[1] S. G. Marinone y M. F. Lavín, «Mareas y corrientes residuales en el Golfo de California,» de *Contribuciones a la Oceanografía Física en México. Monografía No. 3*, M. F. Lavín, Ed., Unión Geofísica Mexicana, pp. 113-139.

[2] «Calendarios,» CICESE, [En línea]. Available: predmar.cicese.mx/calendarios/. [Último acceso: 2018].

[3] G. Hagerman y B. Polagye, «EPRI North American Tidal in Stream Power Feasibility Demonstration Project,» EPRI, 2006.

[4] C. J. Mejia-Olivares, I. D. Haigh, C. Neil, D. S.Coles, M. J. Lewis y S. P. Neill, «Tidal-stream energy resource characterisation for the Gulf of California, México,» *Energy*, 2018.

[5] G. Hiriart Le Bert, «Potencial energético de las mareas para generar electricidad,» *Revista Digital Universitaria UNAM*, vol. 10, n° 6, 2009.

[6] Canadian Hydraulics Center, «Guidance for Assessing Tidal Current Energy Resource,» NRC Canadian, Quebec, 2008.

[7] L. Pineau, «Tidal Streams along Brittany Northern Coast, France,» *International Hydrographic Review*, vol. 2, n° 2, pp. 54-65, 2001.

[8] M. L. Argote, M. F. Lavín y A. Amador, «Barotropic eulerian residual circulation in the Gulf of California due to the M2 tide and wind stress,» *Atmósfera*, vol. 11, n° 3, pp. 173-197, 1998.

Anexo 1

Archivo de texto de tiempo, velocidades longitudinales y tangenciales

t	VL	VT
0	-0.32727273	-0.09090909
0.14376997	0	0
0.28753994	0.52272727	0.18181818
0.4600639	0	0.05454545
0.57507987	-0.34090909	-0.04545455
0.69009585	0	0.02727273
0.81948882	0.38636364	0.13636364
0.93450479	0	0.03636364
1.04952077	-0.43181818	-0.09090909
1.15015974	0	-0.03636364
1.29392971	0.54545455	0.16363636
1.46645367	0	0
1.55271565	-0.4	-0.09090909
1.66773163	0	0
1.7971246	0.47727273	0.13636364
1.94089457	0	0.06818182
2.08466454	-0.47272727	-0.09090909
2.18530351	0	0
2.32907348	0.59090909	0.11818182
2.45846645	0	0
2.58785942	-0.43181818	-0.15454545
2.73162939	0	0.02727273
2.78913738	0.40909091	0.09090909
2.97603834	0	-0.09090909
3.11980831	-0.52272727	-0.20454545

3.19169329	0	-0.09090909
3.34984026	0.65909091	0.25
3.52236422	0	0.09090909
3.62300319	-0.52272727	-0.02272727
3.73801917	0	0.09090909
3.79552716	0.40909091	0.15909091
3.98242812	0	0
4.11182109	-0.54545455	-0.21818182
4.19808307	0	-0.10909091
4.34185304	0.63636364	0.18181818
4.54313099	0	0.04545455
4.62939297	-0.56818182	-0.04545455
4.77316294	0	0.02272727
4.88817891	0.47727273	0.13636364
5.00319489	0	0
5.13258786	-0.54545455	-0.18181818
5.24760383	0	-0.16363636
5.3913738	0.56818182	0.18181818
5.52076677	0	0.02272727
5.63578275	-0.52272727	-0.02272727
5.75079872	0	0
5.89456869	0.5	0.2
6.05271565	0	0.04545455
6.13897764	-0.52272727	-0.06363636
6.2827476	0	0
6.38338658	0.5	0.14545455
6.54153355	0	0.02272727
6.62779553	-0.48181818	-0.05454545
6.7571885	0	0.06363636
6.90095847	0.45454545	0.16363636
7.04472843	0	0.07272727
7.14536741	-0.5	-0.04545455
7.27476038	0	0
7.40415335	0.5	0.09090909
7.57667732	0	0.03636364
7.70607029	-0.45454545	-0.02727273
7.80670927	0	0.05454545
7.93610224	0.47727273	0.11363636
8.0798722	0	0.02727273
8.18051118	-0.43181818	-0.06818182
8.32428115	0	0
8.43929712	0.34090909	0.09090909
8.5686901	0	0.02272727
8.69808307	-0.42727273	-0.06818182
8.84185304	0	0.03636364
8.94249201	0.43181818	0.16363636
9.08626198	0	0.14545455
9.24440895	-0.31818182	0
9.33067093	0	0.09090909
9.41693291	0.34090909	0.18181818
9.58945687	0	0.09090909
9.70447284	-0.45454545	-0.04545455
9.86261981	0	0
9.99201278	0.31818182	0.14545455
10.1789137	0	0.01363636
10.2364217	-0.13636364	0.02727273
10.3370607	0	0.00909091
10.4664537	0.18181818	0.20454545
10.5958466	0	0.13636364
10.7827476	-0.36363636	-0.14545455
10.9265176	0	-0.24545455
11.0271565	0.25	0.04545455
11.2571885	0	0.00909091
11.3865815	-0.02272727	0
11.4872204	-0.02272727	0.10909091
11.7028754	-0.02272727	0.15909091
11.8178914	-0.02272727	0.20454545
11.9329073	-0.29545455	0.22727273
12.1773163	0	-0.24545455
12.3354633	0.27272727	0.04545455
12.4648562	-0.2	0.09090909
12.6230032	-0.06818182	-0.09090909
12.9249201	-0.15909091	-0.27272727
13.0255591	0	-0.22727273
13.2268371	0.33636364	0.18181818

13.399361	0	-0.13636364
13.528754	-0.31818182	-0.04545455
13.7444089	-0.02272727	-0.04545455
13.9888179	-0.34090909	-0.27272727
14.1182109	0	-0.13636364
14.3051118	0.5	0.27272727
14.4057508	0	0.18181818
14.5495208	-0.5	0
14.7364217	0	0
14.8083067	0.18181818	0.02272727
14.8658147	0	-0.06363636
15.0670927	-0.5	-0.18181818
15.1533546	0	0
15.2971246	0.61363636	0.20454545
15.4552716	0	0.09090909
15.5990415	-0.61363636	-0.09090909
15.7140575	0	-0.09090909
15.8146965	0.34090909	0.05454545
15.9584665	0	-0.09090909
16.0734824	-0.56818182	-0.24545455
16.2028754	0	-0.07272727
16.3322684	0.68181818	0.20454545
16.4760383	0	0.09090909
16.6341853	-0.75	-0.27272727
16.7635783	0	-0.18181818
16.8642173	0.54545455	0.15909091
16.9936102	0	-0.09090909
17.1086262	-0.59090909	-0.27272727
17.2236422	0	-0.09090909
17.3961661	0.77272727	0.27272727
17.5111821	0	0.13636364
17.6405751	-0.75	-0.19090909
17.7699681	0	-0.09090909
17.884984	0.59090909	0.18181818
18	0.04545455	0.16363636

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]

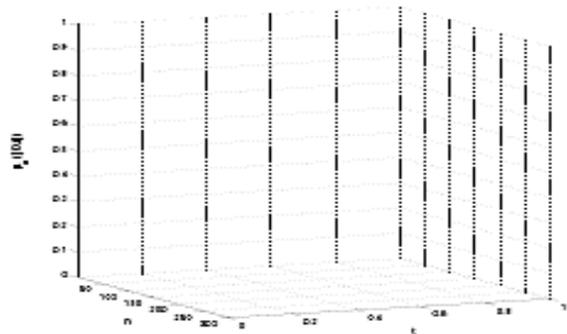


Gráfico 1 Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

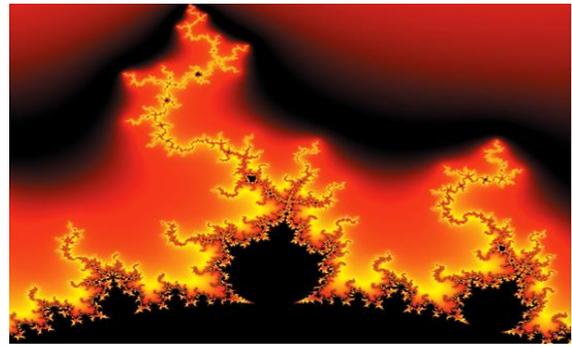


Figura 1 Titulo y Fuente (*en cursiva*)

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.

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

1047 Avenida La Raza -Santa Ana, Cusco-Perú. Tel: +52 1 55 6159 2296, +52 1 55 1260 0355, +52 1 55 6034 9181; Correo electrónico: contact@ecorfan.org www.ecorfan.org

ECORFAN®

Editor en Jefe

QUINTANILLA - CÓNDOR, Cerapio. PhD

Directora Ejecutiva

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Editorial

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

Diseñador Web

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

Diagramador Web

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Asistente Editorial

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

Traductor

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

Filóloga

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

Publicidad y Patrocinio

(ECORFAN® Republic of Peru), 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

1047 Avenida La Raza -Santa Ana, Cusco-Perú.

Revista de Ingeniería Eléctrica

“Dimensionamiento de un horno de fundición por inducción electromagnética y cálculo de los parámetros eléctricos”

PÉREZ-PÉREZ, Arnulfo, TÉLLEZ-MARTÍNEZ, Jorge Sergio, HORTELANO-CAPETILLO, Gregorio y BARRAZA-FIERRO, Jesús Israel

Universidad Politécnica de Juventino Rosas

“Los armónicos que aportan los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red un problema latente”

DELGADO-PONCE, Luis, VARGAS-HERNÁNDEZ, Oscar Joel, MARTÍNEZ-MAGDALENO, Arturo y MENÉNDEZ-BENAVENTE, Luis Martín

Universidad Tecnológica de Salamanca

“Medidor bidireccional trifásico interconectado a la red con monitoreo de la generación de energía eléctrica del conjunto panel-microinversor”

HERNÁNDEZ-AGUIRRE, Fredy Alberto, TÁNORI-RUÍZ, Víctor Alfonso, ORRANTE-SAKANASSI, Jorge Alberto y VÁZQUEZ-PALMA, Martín Gustavo

Instituto Tecnológico de Hermosillo

“Evaluación de la energía mareomotriz en el norte del Golfo de California con fines de generación de energía eléctrica”

QUIÑONEZ-OSUNA, José Ramón, MARINONE-MOSCHETTO, Silvio Guido, FLORES-AGUILAR, María Dolores y CARMONA-DUARTE, Domingo

Instituto Tecnológico de Mazatlán

