

Recibido 13 Septiembre 2019. Aceptado 25 Noviembre 2019. Publicación 20 Diciembre 2019.

ISSN 2448-7775

# Interacción de la energía undimotriz con cargas invariantes

**PAULINA CUEVAS, XIOMARA GONZÁLEZ\*, IVÁN HERNÁNDEZ, JESÚS MARTÍNEZ**

División de Ingenierías, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Guanajuato, Salamanca, Gto., México.

pl.cuevasmunoz@ugto.mx

x.gonzalez@ugto.mx (\*Autor de correspondencia)

**RESUMEN** Debido al creciente aumento del uso de los recursos fósiles utilizados para la generación de energía eléctrica, y al aumento de los índices de contaminación ocasionados por el uso de estos recursos, se ha optado por la búsqueda de nuevas alternativas para su generación. Se ha incursionado en el estudio de las energías renovables ya que el índice de contaminación generado por la utilización de estos recursos es menor. Un recurso para la generación de energía eléctrica es la proveniente de los océanos, especialmente la proveniente del oleaje, por tanto, el presente trabajo propone el desarrollo de una herramienta encargada de simular el potencial eléctrico undimotriz en la zona costera de México. El desarrollo de dicha herramienta está basado en los parámetros característicos del oleaje como altura significativa ( $H_s$ ) y periodo pico ( $T_p$ ) de diferentes puntos de estudio, los cuales son tomados por cada hora, durante un periodo de seis años.

**PALABRAS CLAVE**— Energía undimotriz, oleaje, energías renovables, herramienta de simulación.

## I. INTRODUCCIÓN

En el siglo XX se trabajó con energías a base de combustibles fósiles tales como el petróleo, el gas o el carbón. En el siglo XXI se abren las puertas a las energías renovables, que además de que emiten menos contaminantes son inagotables, y se perfilan como la gran solución para un mundo donde el consumo de energía es indispensable [1]. A grandes rasgos, el objetivo primordial de las naciones en cuanto a recursos energéticos radica en abastecer de energía a todas sus comunidades con precios competitivos, calidad y eficiencia a lo largo de la cadena productiva, por lo que se hace necesario promover el uso eficiente de la energía, el desarrollo y aprovechamiento eficiente de fuentes de energías renovables.

Una gran fuente de energía renovable con la que se cuenta es la proveniente de los océanos, debido a que es una fuente de energía inagotable, tan solo México está rodeado por dos océanos, la anchura del mar territorial es de 12 millas náuticas, es decir, se extiende hasta unos 22.2 km; y tiene unos 11.122 km de costa, por lo tanto, se puede tener un gran aprovechamiento de la energía proveniente del oleaje.

De los recursos del océano se puede obtener energía eléctrica a través de diferentes metodologías de conversión, obteniéndose energías como la mareomotriz (mareas),

undimotriz (oleaje) y maremotérmica, y energías provenientes de corrientes marinas y gradiente salino [2].

El potencial teórico mundial de suministro de energía, que se estima podría aportar estas fuentes, ronda los 82,950 TWh anualmente, destacando la maremotérmica con 53%, undimotriz con 36%, mareomotriz 9%, y el aprovechamiento del gradiente salino con 2% [3].

En enero del 2017 la SENER conformó el Centro Mexicano de Innovación en Energías del Océano (CEMIE - Océano) [1]. En diciembre del mismo año se publicó el mapa de ruta tecnológica, con el objetivo de identificar los retos y barreras en el aprovechamiento del recurso marino para el año 2030, en él se considera factible tener una capacidad instalada de 500 a 1000 MW para generar electricidad a través de proyectos demostrativos y comerciales [4]. De acuerdo con el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC, por sus siglas en inglés *The European Marine Energy Centre*), EE. UU., el Reino Unido y Australia presentan los principales proyectos de desarrollo undimotriz en su zona costera [5]. Además, el Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano (CEMIE - Océano) ha estado desarrollando dos proyectos de energía de olas que se instalarán en el mar, específicamente en: Puerto Saual en Baja California, y Lázaro Cárdenas en Michoacán. Se está invirtiendo en la instalación de un OTEC (Ocean

Thermal Energy Conversion) en Acapulco, Guerrero [2], lo que quiere decir que se está invirtiendo en un método de generación basado en la conversión de la energía térmica oceánica para la instalación en la zona costera de Acapulco, Guerrero.

Debido a que México se encuentra rodeado por dos océanos, este se ha visto como un gran recurso de aprovechamiento para la generación de energía eléctrica. Por tanto, en este trabajo se presenta el desarrollo de una herramienta de simulación del potencial eléctrico Undimotriz en las zonas costeras de México, el desarrollo de dicha herramienta fue posible gracias a la adquisición de datos de los parámetros de altura significativa ( $H_s$ ) y periodo pico ( $T_p$ ) tomadas cada hora durante un periodo de seis años de estudio, en diferentes puntos de las vertientes del Golfo de México.

## II. EXTRACCIÓN DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ

De la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, una fracción se invierte en un calentamiento desigual de la misma, lo que provoca en la atmósfera zonas de altas y bajas presiones, generando desplazamientos del aire (viento) de mayor o menor intensidad. El oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar, la intensidad del oleaje depende de la intensidad del viento, de su duración y de la longitud sobre la cual éste transmite energía a la ola [6].

### A. POTENCIA MÁXIMA ABSORBIDA POR UN CUERPO ASIMÉTRICO

El movimiento de un cuerpo rígido se caracteriza por sus seis grados de libertad o modos de movimiento, los cuales corresponden a tres traslacionales y tres rotacionales [7], es decir, que si un cuerpo no tiene algún tipo de restricción dispone de seis grados de libertad: tres a través de los ejes y tres alrededor de dichos ejes, pero cada restricción limita el movimiento de una forma específica. En la Fig. 1 se pueden identificar los movimientos traslacionales como 1, 2 y 3, y los movimientos rotacionales como 4, 5 y 6.

Si una ola sinusoidal incide con una densidad de potencia, expresada por la siguiente ecuación

$$J = \frac{\rho g^2 T_e H_s^2}{64\pi} \quad (1)$$

sobre un cuerpo rígido, de acuerdo con sus grados de libertad esta podrá absorber un máximo de potencia de [7][8]:

$$P_{max} = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right) J \quad (2)$$

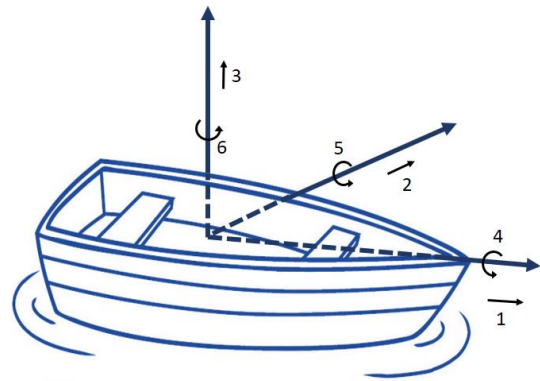


Fig. 1. Grados de libertad de un cuerpo asimétrico [9].

La cual corresponde a un movimiento vertical, punto de absorción o un solo grado de libertad. Donde  $\lambda$  es equivalente a la longitud de onda (m).

### B. DATOS DE OLAJE Y ANÁLISIS

Se tomaron datos de los parámetros del oleaje de 11 puntos de estudio en la Vertiente del Golfo de México con cercanía a los estados de Campeche y Veracruz, localizados tal y como se muestra en la Fig. 2. En forma más detallada se indican algunas características geográficas en la Tabla I, donde se muestra la localización geográfica y las claves de cada punto con las que se manejó cada una de las zonas de estudio. Los datos fueron tomados de la base de datos ERDDAP (Environmental Research Division's Data Access Program) [10], el cuál es un servidor de datos que proporciona de una manera simple y consistente datos oceanográficos.

El estudio fue realizado en los 11 puntos (Fig. 2). Para llevar a cabo el análisis se tomaron datos cada hora tanto de la altura significativa ( $H_s$ ) como el periodo pico ( $T_p$ ), desde el año 2010 al 2016.

De acuerdo con los datos obtenidos durante seis años de estudio, de la altura significativa ( $H_s$ ) y el periodo pico ( $T_p$ ), se analizaron los datos estadísticamente con el fin de obtener datos base, esto para tener un fácil manejo de la información, posteriormente se relacionaron los parámetros con las ecuaciones de potencia máxima absorbida por un cuerpo asimétrico de un grado de libertad Ec. (2).



Fig. 2 Puntos de estudio del Golfo de México.

TABLA I. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

	Estado	Municipio Cercano	Clave	Ubicación	
				Lat.	Lon.
Campeche		Campeche	CAM-Cam.Zona.I	20°N	91° O
		Champotón	CAM-Cham.Zona.I	19°30' N	91°30' O
			CAM-Cham.Zona.II	19°30' N	91° O
		Carmen	CAM-Car.Zona.II	19° N	91°30' O
			CAM-Car.Zona.I	19° N	92° O
			CAM-Car.Zona.III	19° N	92°30' O
Veracruz		San Andrés Tuxtla	VER-Tuxtla-Zona II	18°30' N	94°30' O
		Lechuguillas	VER - Zona V	20° N	96°30' O
		Papantla	VER-Papantla - Zona I	20°30' N	97° O
		Tuxpan	VER-Tuxpan-Zona III	21° N	97° O
		Ensenada de Mangles	VER - Zona IV	22° N	97°30' O

Los datos de la potencia máxima absorbida por un cuerpo asimétrico de un grado de libertad fueron analizados de manera anual, es decir se obtuvo la potencia promedio anual de cada punto de estudio tal y como se muestra en la Fig. 3. Una vez realizado el análisis de la potencia máxima anual se encontró que en el punto de estudio donde se obtiene un mayor potencial es en *VER\_Zona IV* el cual corresponde al estado de Veracruz en el municipio de Ensenada de Mangles con 29.21 kW de potencia promedio anual, y el punto de estudio donde se encontró un menor potencial promedio anual es en *CAM-Cham.Zona.II* con 1.94 kW.

### III. IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA

A continuación, se describen los elementos que conformaron la herramienta de simulación para conocer la interacción de la energía undimotriz con cargas invariantes.

La herramienta de simulación del potencial eléctrico Undimotriz desarrollada con base a los datos de la zona costera

de México, permite al usuario identificar (de una forma sencilla) la aportación que pudiera entregar un captador undimotriz, correspondiente a un cuerpo asimétrico de un grado de libertad, al sistema eléctrico en los diferentes puntos de estudio.

La simulación realizada corresponde a un sistema de 120V, el captador undimotriz contiene el máximo potencial absorbido por un cuerpo asimétrico de un grado de libertad en los diferentes puntos de estudio, la conexión realizada para dicha herramienta se ilustra en Fig. 4.

#### A. BLOQUE RED ELÉCTRICA O SIN

Este bloque consiste en una red monofásica de corriente alterna, está conectado a la red eléctrica, o al Sistema Interconectado Nacional (SIN), a través de un transformador que reduce el voltaje de 6.6 kV a 120 V.

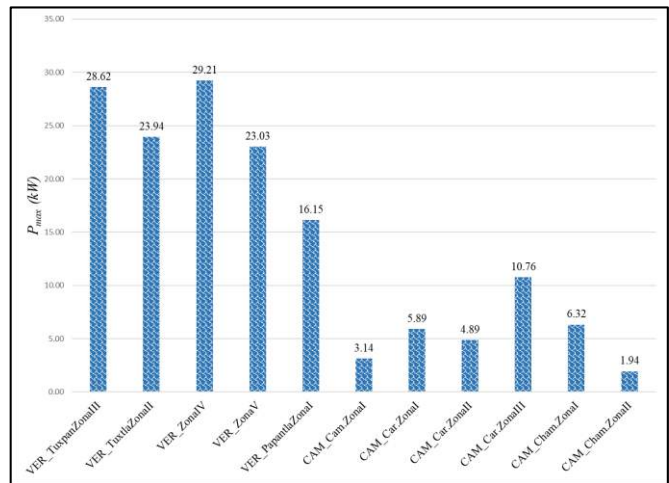


Fig. 3.  $P_{max}$  promedio en un año de los puntos de estudio.

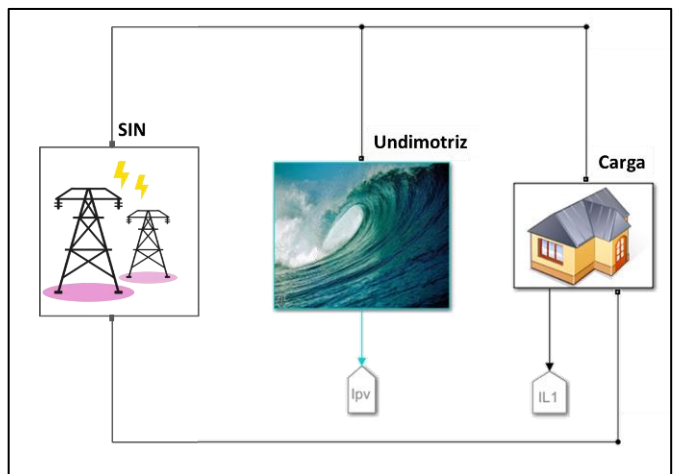


Fig. 4. Herramienta undimotriz interconectada.

### B. BLOQUE UNDIMOTRIZ

El bloque undimotriz es un sistema integrado por datos, analizados estadísticamente, del comportamiento de la potencia undimotriz máxima absorbida por un cuerpo asimétrico de un grado de libertad, en diferentes puntos de estudio en la vertiente del Golfo de México, es importante mencionar que dichos datos fueron adquiridos de una base de datos y manejados mediante diferentes metodologías estadísticas para un fácil manejo de la información, este sistema se encuentra interconectado con la red eléctrica tal y como se vio en la Fig. 4.

### C. BLOQUE CARGA

El bloque de la carga en la simulación corresponde a resistencias, cuyo valor resistivo es invariante con respecto al tiempo, es decir, su valor no cambia, estas cargas se encuentran conectadas en paralelo, el valor de estas resistencias puede ser modificado, pero no durante el tiempo de simulación, se tomó este tipo de carga por fines de simplificación pues el objetivo de este trabajo es identificar la variación de la potencia Undimotriz y su aportación.

## IV. RESULTADOS

Para la verificación del funcionamiento de dicha herramienta se ingresaron los datos correspondientes de *CAM-Car.Zona. II* del mes de enero con una carga total de 25 kVA y 753 kVA, el análisis fue realizado para un rango de 24 horas en la Fig. 5 y Fig. 6, respectivamente.

En la Fig. 5 se puede apreciar que la potencia aparente requerida por la carga es en gran parte suministrada por el sistema suministrador de energía convencional, en el momento en que empieza a producir energía el captador undimotriz, se empieza a reducir el consumo de energía por parte del sistema suministrador de energía convencional o por el Sistema Interconectado Nacional (SIN). En la Fig. 6 al ser demandada menor potencia por la carga, gran parte de esta potencia es suministrada por el captador undimotriz, y la potencia que no es posible ser suministrada por el captador undimotriz es suministrado por el sistema, así bien la potencia producida por el captador undimotriz que no es aprovechada por la carga es suministrada al sistema convencional. Cabe destacar que fue comprobado en ambos casos la ley de la conservación de la potencia y en efecto la potencia entregada por la fuente es igual a la potencia absorbida por la carga.

El comportamiento de la potencia undimotriz máxima absorbida por un cuerpo asimétrico de un grado de libertad simulada en el punto de *Cam-Car.Zona.II* durante 24 horas del primer día del mes de enero, se observa en la Fig. 7, el comportamiento de dicha potencia se comporta variable con respecto al tiempo pues claramente se ve que a inicios del día

la potencia suministrada por el captador undimotriz alcanza los 434.4 VA pero al cabo de 8 horas este potencial se ve disminuido a 256.7 VA, unas horas más tarde el potencial tiene una elevación de 1.21 kVA, por lo cual es indispensable que este tipo de captador se encuentre interconectado, debido a la variación del potencia que este tiene a lo largo del día. El comportamiento de la potencia mostrada en las Fig. 5, Fig. 6 y Fig. 7 es el mismo lo único que cambia en el caso de la Fig. 5 y Fig. 6 es el valor del potencial absorbido por la carga y la potencia aportada por el SIN.

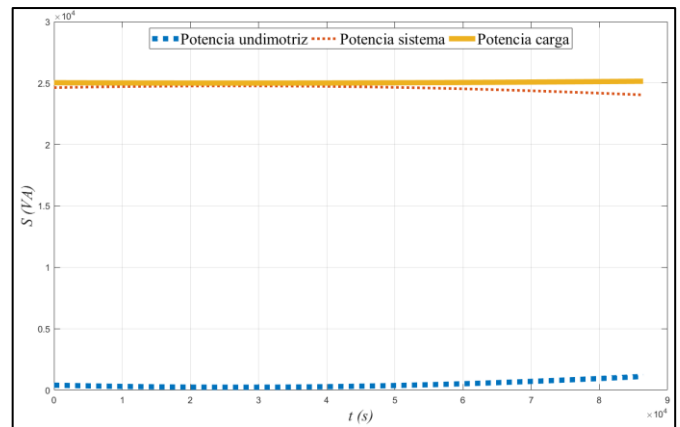


Fig. 5. Potencia de simulación con carga 25 kVA.

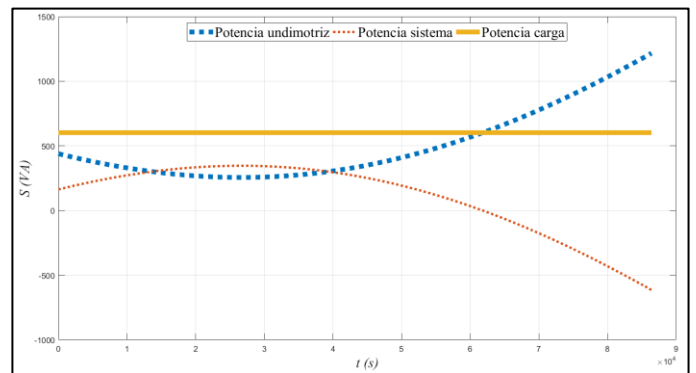


Fig. 6. Potencia de simulación con carga 753 VA.

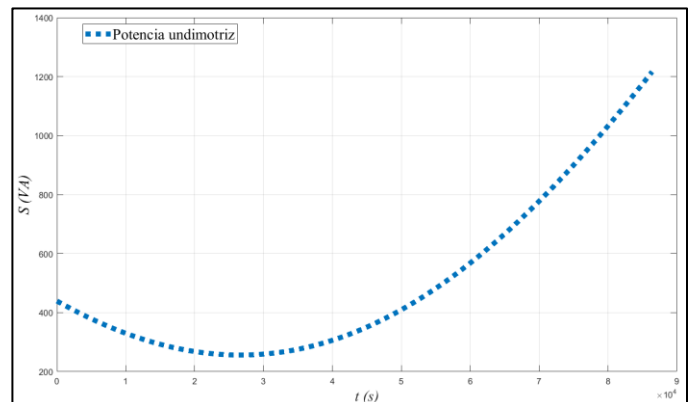


Fig. 7. Energía undimotriz en *CAM-Car.Zona. II* durante un día del mes de enero.



La potencia entregada mediante el captador Undimotriz es variante con respecto al tiempo, esto es porque los parámetros del oleaje varían dependiendo del viento, otra de las variantes para la obtención del potencial eléctrico en dichos puntos de estudio es su localización geográfica, es decir en donde se encuentran localizados los captadores pues, debido a esto, se adquiere mayor potencial en el estado de Veracruz ya que, los puntos de estudio localizados en el estado de Campeche, como se muestra en la Fig. 2, se encuentran cercanos a una bahía y esta zona se comporta como un disipador natural de energía, por lo cual en esta zona es generado menor potencial, Fig. 3, en comparación con los puntos localizados en la zona costera de Veracruz, ya que los parámetros de altura significativa  $H_s$  y periodo energético  $T_e$  en el estado de Campeche son relativamente menores que los parámetros en el estado de Veracruz.

La herramienta de simulación del máximo potencial absorbido por un cuerpo asimétrico de un grado de libertad expresa el máximo potencial eléctrico entregado, cabe destacar que por fines de simplificación en este documento únicamente se abordó la información referente al comportamiento del potencial durante un día en *CAM-Car.Zona. II* en el mes de enero, en dicho punto las primeras horas del día el potencial es cero, esto es mostrado de esta forma debido a que al ser realizado el estudio de potencia promedio entregada durante seis años en el respectivo horario, la potencia máxima se aproxima a cero, cabe destacar que en el estado de Campeche este es el punto que cuenta con un potencial promedio anual de 4.89 kW, lo que nos indica que de los puntos de estudio del estado de Campeche este entrega un valor de potencia promedio anual intermedio. En la simulación al cabo del transcurso del día la potencia comienza a aumentar alcanzando 1.2 kVA a las 24 horas.

Una casa habitación normalmente cuenta con un contrato de 2.3 kW de potencia, por lo cual un captador Undimotriz es capaz de alimentar este tipo de viviendas en prácticamente casi todos los puntos de estudio.

## V. CONCLUSIONES

La herramienta de simulación y el análisis de los parámetros en puntos de estudio permitió analizar el comportamiento de la potencia undimotriz máxima absorbida por un cuerpo asimétrico de un grado de libertad en un lapso de 24 horas en el punto de *CAM-Car.Zona. II* de la vertiente del Golfo de México, así como también identificar cuanta potencia pudiese ser aprovechada por la carga, además le permite al usuario ampliar su conocimiento respecto al potencial obtenido a partir del oleaje en diferentes puntos de estudio en la vertiente del Golfo de México, además de identificar en que épocas del año u horas del día el potencial Undimotriz es mayor.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Guanajuato por el financiamiento del trabajo a través del apoyo de la Convocatoria Institucional de Investigación Científica 2019, con el proyecto No. 314/2019.

## REFERENCIAS

- [1] CEMIE Océano. “Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano”, 2017. [Online]. Recuperado de: <https://cemieoceano.mx/>.
- [2] The Executive Committee of Ocean Energy Systems. “Annual report an overview of ocean energy activities in 2017”. Ocean Energy Systems (OES), pp.12, 19, 2017.
- [3] Secretaría de Energía (SENER). “Prospectiva de energías renovables 2012 – 2026”. México, 2012.
- [4] Secretaria de Energía (SENER). “Prospectivas de Energías Renovables 2018-2032”. México, D. F., 2018.
- [5] EMEC. “Wave developers”. 2016 (Accessed on 21 November 2019). Recuperado de <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-developers/>.
- [6] Fernández Díez, P. F. “Energía de las olas”. Universidad de Cantabria: Departamento de Ingeniería eléctrica y energética, 2005. Obtenido de Energía del mar: <http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=5>
- [7] J. Falnes, Ocean Waves and Oscillating Systems. 2002.
- [8] J. Falnes, “A review of wave-energy extraction”, Marine Structures, Volume 20, Issue 4, October 2007, Pages 185-201, ISSN 0951-8339, <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2007.09.001>.
- [9] P. Cuevas, X. González. “Wave energy potential in Veracruz state coast”. ROC&C 2018/2019, México, 2019.
- [10] ERDDAP. “Easier access to scientific data,” 2016. Recuperado de <http://oos.soest.hawaii.edu/erddap/index.html>.

## BIOGRAFÍAS

**PAULINA LIZETH CUEVAS MUÑOZ** es estudiante de licenciatura en la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato, en la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca, Salamanca, Guanajuato, México.

**XIOMARA GONZÁLEZ RAMÍREZ** obtuvo el grado de Ingeniera Electricista en la Universidad del Valle (Cali, Colombia) en 2008; obtuvo el grado de Maestría en 2010 y el grado de Doctorado en 2015 en Ingeniería Eléctrica en la especialidad de Sistemas Eléctricos de Potencia en el CINVESTAV-Guadalajara. Ha trabajado en el campo de sustentabilidad energética con CONACYT y la Secretaría de Energía. En la actualidad es profesora en la Universidad de Guanajuato en el Departamento de Ingeniería Eléctrica.

**IVAN ABEL HERNÁNDEZ ROBLES** recibió un título en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato en 2002, y M.Sc. y Ph.D. títulos en Ingeniería Eléctrica del Campus CINVESTAV Guadalajara en 2005 y 2013, respectivamente. En la actualidad es profesor en la Universidad de Guanajuato en el Departamento de Ingeniería Eléctrica. Sus intereses de investigación se encuentran en el análisis numérico aplicado al diseño de máquinas eléctricas.

**JESÚS MARTÍNEZ PATIÑO** Profesor de la Universidad de Guanajuato desde 2004. Doctorado en Energías Renovables y Eficiencia Energética (Universidad de Zaragoza, 2008). Master en Ecoeficiencia, Ahorro Energético y Ecología Industrial (Universidad de Zaragoza, 2004). Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Guanajuato en Salamanca, 2002