

DOI:10.24850/j-tyca-2018-04-05

Artículo

**Simulación y revisión de un dispositivo de pequeña
escala para la conversión de energía del oleaje**
**Simulation and review of a small-scale device for wave
energy conversion**

Iván A. Hernández-Robles¹Xiomara González-Ramírez²Alejandro Pizano-Martínez³Jesús Martínez-Patiño⁴Miguel A. Gómez-Martínez⁵

¹Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Salamanca, Guanajuato, México, ia.hernandez@ugto.mx

²Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Salamanca, Guanajuato, México, x.gonzalez@ugto.mx

³Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Salamanca, Guanajuato, México, apizano@ugto.mx

⁴Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Salamanca, Guanajuato, México, jesusmp23@ugto.mx

⁵Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Salamanca, Guanajuato, México, gomezma@ugto.mx

Autor para correspondencia: Xiomara González Ramírez,
x.gonzalez@ugto.mx

Resumen

En este trabajo de investigación se aborda la exploración y el análisis del potencial energético undimotriz en la costa mexicana a través del análisis y la simulación electromagnética del dispositivo transductor, para la conversión de energía del oleaje en electricidad; un dispositivo que se desarrolló para este propósito es el generador eléctrico lineal (GEL) de imanes permanentes. El potencial energético del oleaje, obtenido en un trabajo preliminar, en diversos puntos en aguas costeras mexicanas,

proporciona un panorama precedente para el diseño de estos dispositivos. La utilización de generadores eléctricos lineales para conseguir energía eléctrica por fuentes alternas es una temática que cada vez toma mayor fuerza para el progreso de nuevos sistemas de generación distribuida (microrredes), por lo que este trabajo, además de determinar el potencial energético a través de la simulación electromagnética del dispositivo, analiza el rendimiento y calidad energética proporcionada por GEL. El análisis de simulación desarrollado en este trabajo se fundamenta con base en la obtención del espectro de desplazamiento, en función de la altura significativa de las olas y su periodicidad en los puntos costeros mexicanos analizados en el trabajo preliminar. Además, se contribuye al diseño y desarrollo de dispositivos enfocados a la microgeneración por undimotriz, lo que abre el abanico de posibilidades para el modelado y desarrollo de convertidores de electrónica de potencia, para ayudar al control y la calidad energética de estos dispositivos generadores eléctricos lineales.

Palabras clave: conversión de energía por oleaje, energía undimotriz, generador eléctrico lineal, microrredes, sustentabilidad energética.

Abstract

The exploration and analysis of wave energy potential in some Mexican coastal nodes is complemented by this work, which presents an electromagnetic analysis and simulation of the transducer device for converting wave energy into electricity. The device developed for this purpose is the permanent magnet linear electric generator (LEG). The wave energy potential obtained in a preliminary work at various points in Mexican coastal waters provides a precedent for the design of this device. The application of linear generators to obtain electrical energy from alternative sources of energy is a topic that is increasingly of interest for the progress of new distributed generation system. Therefore, in addition to determining the energy potential through electromagnetic simulation, this work also analyzes the performance and energy quality supplied by a linear generator. The simulation developed in this work is based on the displacement spectrum, and is a function of the significant wave height and its periodicity in the Mexican coastal points analyzed in the preliminary work. This study also contributes to both the design and development for micro-generation systems based on wave power, widening the range of electric power converters to assist in the energy control and quality of these linear generator devices.

Keywords: Wave energy, wave energy conversion, linear generator, micro-grids, energy sustainability.

Recibido: 26/05/2017

Aceptado: 23/01/2018

Introducción

Actualmente, la industria de la energía eléctrica en México está sufriendo algunos cambios indispensables y necesarios en la forma de distribuir la energía; además, se pretende aprovechar sus recursos energéticos de forma racional, sustentable, eficiente, con beneficio social y económico. Las metas nacionales tienen como objetivo abastecer de energía a todas las comunidades del país, con precios competitivos y calidad. La generación distribuida (microrredes) es una opción viable para que la industria de la energía la implemente. Al presente, existen diseños y desarrollos de generación eólica y fotovoltaica; sin embargo, México aún está rezagado en la investigación y uso de dispositivos para el aprovechamiento de las nuevas alternativas energéticas. Así, este trabajo se enfoca en el diseño, análisis e investigación del rendimiento del generador eléctrico lineal que se utiliza en la conversión de energía de las olas en energía eléctrica. Un panorama del rendimiento y calidad energética proporcionada por un GEL para el aprovechamiento de energía undimotriz ayudará al diseño de una microrred eléctrica por undimotriz, aprovechando su energía de manera óptima y eficiente. Con la microgeneración se abre la oportunidad al desarrollo de nuevos dispositivos de conversión de energía, capaces de aprovechar las energías alternas y sustentables, tal es el caso del GEL, desarrollado y ensayado para aprovechar la energía undimotriz (Vining, Lipo, & Venkataramanan, 2011; Viola, Trapanese, & Franzitta, 2014). De igual forma, el GEL se ha utilizado en la generación eléctrica por medio de pistones de combustión interna (Wang & Howe, 2005; Wang, West, Howe, Zelaya-de-la-Parra, & Arshad, 2007); con aplicaciones en vehículos híbridos (Rinderknecht, & Herzog, 2010). Se revisó el diseño del GEL de Danielsson, Eriksson y Leijon (Danielsson, Eriksson, & Leijon, 2006), donde se describe y desarrolla este dispositivo, para acoplarse a un sistema de Conversión de Energía de Oleaje (CEO) utilizando una boya (Polinder, Damen, & Gardner, 2005) y una cámara de llenado de aire sumergida, conocida por Archimedes Wave Swing (AWS). En México (López-González, Silva-

Casarín, & Mendoza-Baldwin, 2011) se reportan resultados de las pruebas de un hidrogenerador llamado Impulsa para aprovechamiento de las corrientes marinas.

Para la conversión de energía por sistema CEO existen movimientos no uniformes e irregulares de las olas, lo que repercute en los valores de voltaje y potencia de salida del GEL, y con el propósito de optimizar la potencia de salida (De-la-Villa-Jaen, García-Santana, & Montoya-Andrade, 2014) presenta un método de control. Con estos antecedentes y con la exploración del potencial energético desarrollado en el trabajo preliminar surge el interés de desarrollar e investigar el rendimiento y las características de calidad energética proporcionada por un GEL cuando éste sea implementado por algún sistema CEO en puntos costeros de México. El estudio realizado en este trabajo tiene como objetivo conocer el rendimiento y la calidad energética proporcionada por un sistema CEO a través de la simulación electromagnética y la experimentación de un prototipo de pequeña escala. Del mismo modo proporciona bases para establecer modelos matemáticos eficientes para estudios de flujos de potencia en sistemas de microgeneración utilizando el sistema CEO, y ayudar en la especificación de los posibles componentes de electrónica de potencia, adecuados para garantizar estabilidad y calidad energética de un GEL en sistema CEO.

Generalidades del diseño para el generador eléctrico lineal

El generador eléctrico lineal (considerado en este trabajo) está diseñado de manera tubular (cilíndrico). Se definió de esta forma por su facilidad en la simulación electromagnética tanto bidimensional (2D) como tridimensional (3D); de forma general, el GEL diseñado presenta cuatro elementos a dimensionar: 1) *estator*: hospeda el flujo magnético inducido; 2) *actuador*: pieza que capta el movimiento axial de la ola; 3) *imanes permanentes*: piezas que proporcionan la potencia magnética necesaria para inducir voltaje; 4) *devanados*: donde se induce la fuerza electromotriz (o voltaje inducido). Los devanados considerados para el GEL se simularon tanto para una sola fase (voltaje monofásico) como para tres fases (voltaje trifásico); esta última configuración hace al GEL más compacto, en comparación con el diseñado para una sola fase; los devanados se forman con bobinas tipo dona conectadas en serie. El proceso de diseño es iterativo (ver diagrama de flujo, Figura 1).

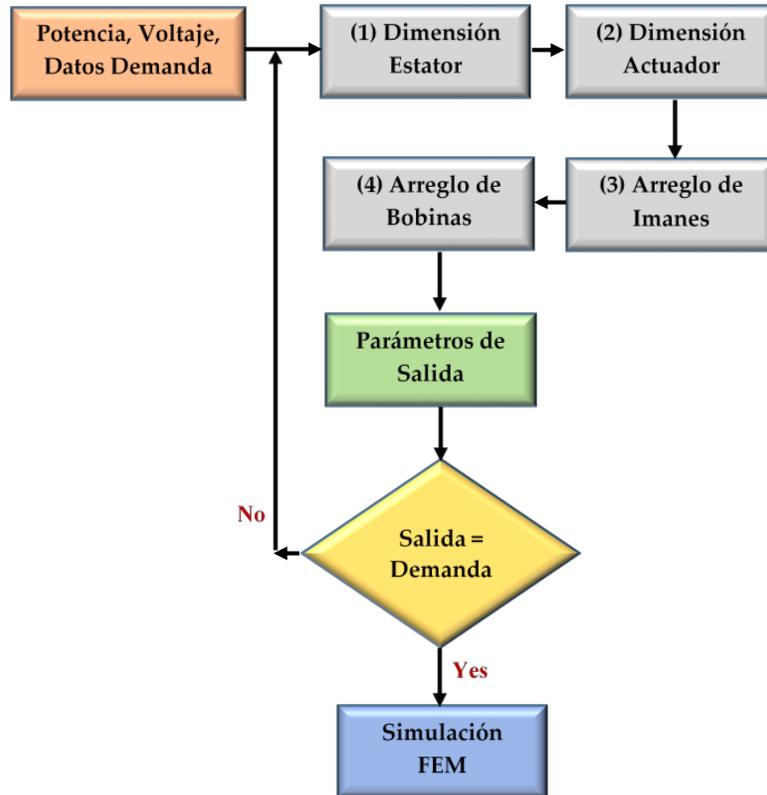


Figura 1. Diagrama de flujo con el proceso de diseño utilizado para el GEL.

En la etapa inicial del proceso se introducen las variables de entrada: potencia deseada, voltaje generado, carrera y velocidad promedio con que se moverán los imanes. Para nuestro trabajo, la carrera depende de la altura significativa (P_{in} promedio de la ola), que fue determinada en los puntos costeros analizados en el trabajo preliminar; la velocidad promedio depende del periodo del oleaje (T_z). Lo siguiente es determinar las dimensiones de la pieza *estator*, donde se encuentran los conductores necesarios para generar el voltaje. Es posible determinar las dimensiones de superficie del estator por medio de:

$$A_s = \frac{\sqrt{2}P_{in}}{B_m J_m v_m r_m} \quad (1)$$

donde A_s es la dimensión de la superficie del estator dada en m^2 ; como el dispositivo es tubular, A_s es la superficie del cilindro, dada por $\pi \cdot D_s \cdot L_s$; donde D_s se refiere al diámetro del estator (m) y L_s es su longitud axial (m); P_{in} es la tasa de potencia deseada (Watts); B_m es la densidad de

flujo magnético promedio en el estator y cuya unidad es el Tesla (T); J_m (Ampere/m²) es la densidad de corriente en el estator; r_m (m), el espesor radial del estator y v_m (m/s) es la velocidad axial de los imanes.

Se procede a calcular la parte *actuador*, pieza en movimiento axial; aquí se calcula el diámetro de la flecha y su longitud necesaria en función del número de imanes requeridos que se le acoplarán.

Para determinar las dimensiones del actuador se puede resumir por:

$$A_a = \frac{A_g B_g}{2B_a} = \frac{\tau \pi D_g B_g}{2B_a} \quad (2)$$

donde A_a (m²) es la sección transversal de la flecha donde se montarán los imanes, con ella es posible obtener su diámetro D_a (m); A_g (m²) es la sección transversal del cilindro del entrehierro, la cual es dada por $\tau \cdot \pi \cdot D_g$, siendo τ (m) el paso por polo y D_g (m) el diámetro medio de la circunferencia del entrehierro; B_g (T) es la densidad de flujo magnético en el entrehierro; B_a (T) es la densidad de flujo magnético en la flecha o actuador. Los imanes permanentes utilizados son de neodimio de grado N40 a N52; de acuerdo con fabricantes de imanes, la densidad de campo magnético residual B_r de esta calidad de imanes ronda el 1.25 T para N40 y 1.43 T para N52 (Magnetika Saiffe, 2017); los imanes considerados tienen la forma de anillo cuando son utilizados en dirección magnética perpendicular a las caras del anillo, pero también el proceso de diseño contempla imanes de forma sectorizada (para formar un anillo), en caso que se requiera una dirección magnética radial al anillo formado. El ancho o espesor axial del anillo del imán está dado por el paso por polo τ y el número de imanes seleccionado.

Se procede entonces a determinar el número requerido de vueltas, dimensiones de los devanados con base en el calibre del conductor. Para dimensionar la bobina se parte del cálculo de número de vueltas del estator N_s , necesario para generar el voltaje deseado V_{gen} (V); el cálculo del número de vueltas se determina por:

$$N_s = \frac{\sqrt{2} V_{gen}}{B_m A_s v_m} \quad (3)$$

Con el dimensionamiento de las cuatro entidades del generador será posible estimar las pérdidas y, con ellas, calcular el porcentaje de eficiencia de la máquina $\% \eta$ por medio de:

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{losses}} \quad (4)$$

Donde P_{losses} (Watts) representa las pérdidas de la máquina en los conductores por el paso de la corriente eléctrica y pérdidas por corrientes inducidas en el estator y actuador. La fuerza (N) para la generación puede determinarse por:

$$F_{gen} = \frac{\frac{P_{in}}{\eta} - P_{mec}}{v_m} \quad (5)$$

P_{mec} son las pérdidas mecánicas por fricción en los soportes de la flecha; por simplicidad para el diseño del generador, estas pérdidas se consideraron despreciables.

La etapa de comparación consiste en revisar las variables de salida del voltaje generado, carrera y potencia de salida; si éstos no cumplen con los valores de entrada, entonces se inicia un nuevo proceso calculando nuevas dimensiones del estator, actuador y bobinas hasta satisfacer con los valores requeridos en la entrada; cuando esto se cumple, se procede a validarlo por medio de simulación electromagnética con el método de elemento finito (MEF). Se desarrolló un prototipo de pequeña potencia de 100 W, 50 V monofásico, que además de experimentar permitió validar el diseño y ampliar el conocimiento de fabricación para un posible prototipo de mayor potencia. El modelo geométrico del GEL se muestra en la Figura 2, donde es posible observar los elementos que lo conforman; el estator, formado por discos de hierro dulce con permeabilidad relativa μ_r aproximada de 4 000; los devanados, fabricados con conductores de cobre; para el actuador se contempló el mismo material que el del estator (*black iron*); los imanes montados son de neodimio.

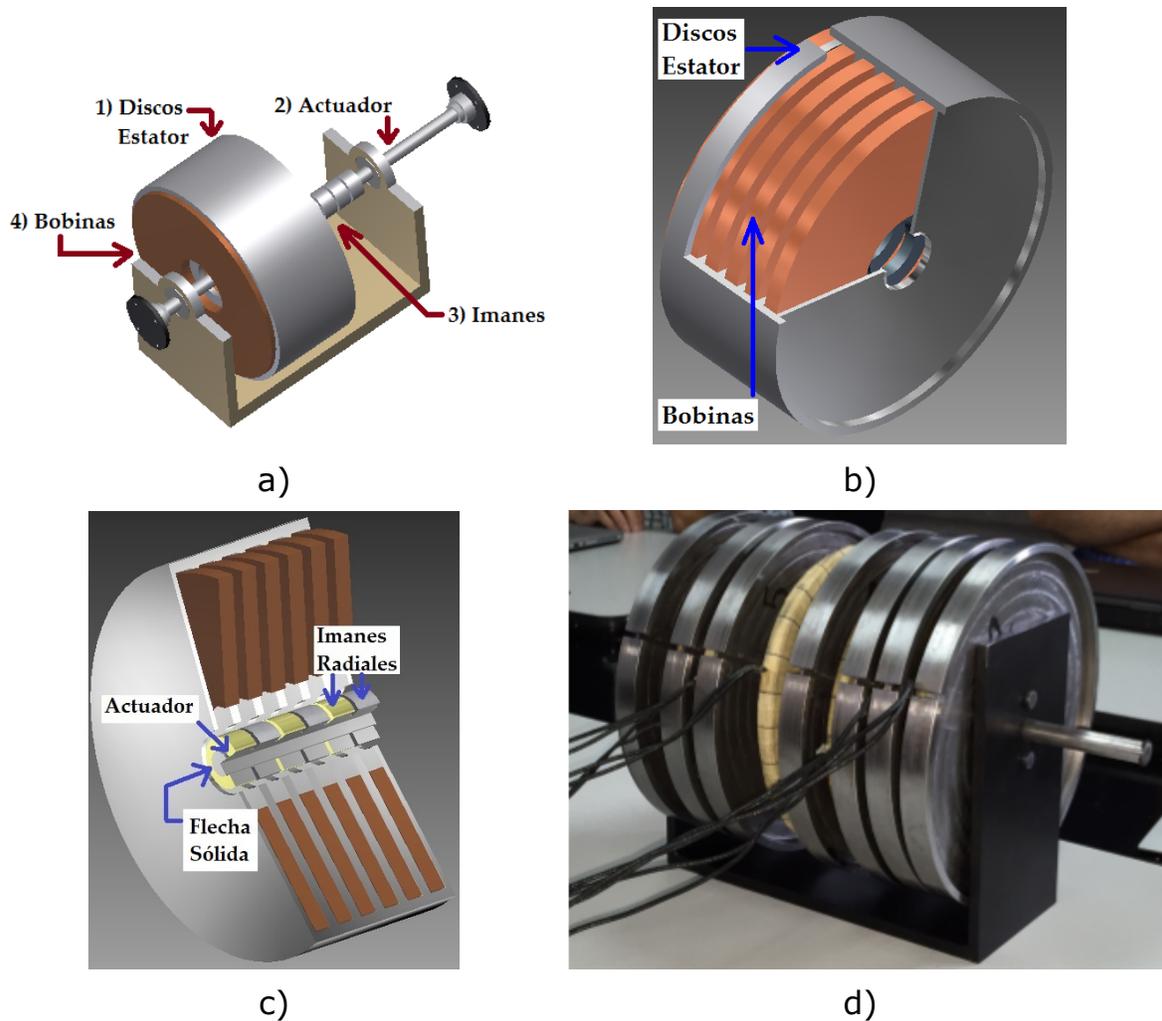


Figura 2. Esquema del GEL analizado y simulado: a) esquema de componentes principales; b) esquema interior del estator; c) esquema interior del actuador; d) ensamble real de un prototipo GEL de 100 W para experimentación.

Dinámica del movimiento del oleaje utilizado para la generación

La energía undimotriz es una alternativa energética muy atractiva para la generación distribuida en costas mexicanas. De acuerdo con el trabajo preliminar, el uso del GEL parece lo más conveniente para aprovechar

esta fuente de energía. El esquema general para la microgeneración por undimotriz se muestra en la Figura 3, donde es posible notar dos componentes. El primero es la unidad de CEO, que contiene un elemento boya, el traductor de la energía de la ola; dicho elemento se acopla al eje del GEL. El segundo elemento es la unidad de control y estabilidad de potencia, que se utiliza para almacenar y atenuar fluctuaciones de potencia a la salida del GEL; esta unidad contiene los componentes de electrónica de potencia y control necesarios para obtener transmisión de energía estable a la red o a la carga local. En el sistema CEO, el movimiento ascendente y descendente de la ola es absorbido por la boya, creando energía mecánica que se convertirá en electricidad por medio del GEL, por lo tanto, la característica de la ola influye de modo considerable en el diseño del GEL. En este trabajo, la característica de la ola se obtuvo de los datos obtenidos en el estudio preliminar (González, Hernández, & Barrios, 2017).

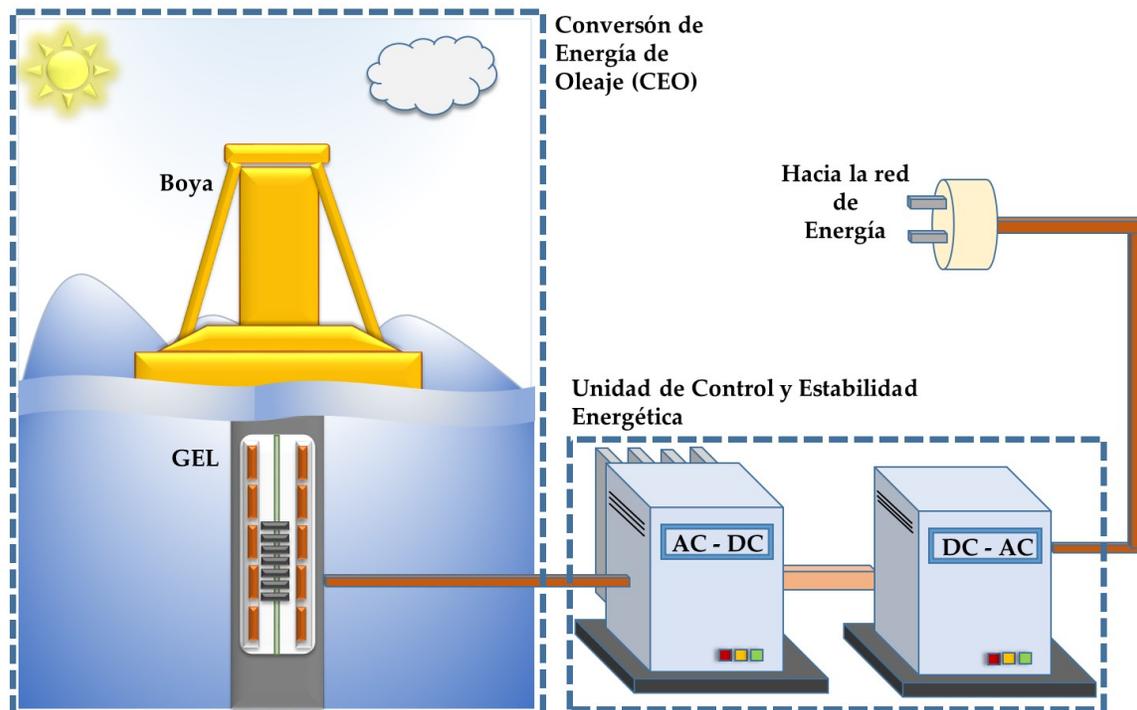


Figura 3. Esquema general del sistema de generación distribuida por aprovechamiento de energía undimotriz empleando un GEL.

Los diferentes movimientos o grados de libertad que puede tener un cuerpo asimétrico flotante, como es el caso de una boya (Figura 4), son seis y están descritos de la siguiente manera (González *et al.*, 2017): 1) Traslación en el eje x (*surge*): indica avance del cuerpo, positivo hacia

adelante; 2) traslación en el eje y (*sway*): indica desplazamiento lateral, se considera positivo hacia la izquierda; 3) traslación en el eje z (*heave*): indica altura del cuerpo, positivo hacia arriba; 4) rotación en el eje x (*roll*): indica balanceo lateral del cuerpo, positivo es hundir la parte derecha del cuerpo; 5) rotación en el eje y (*pitch*): indica cabeceo vertical, positivo es hundir la parte de adelante del cuerpo; 6) rotación en el eje z (*yaw*): indica cabeceo horizontal del cuerpo, positivo es girar hacia la izquierda.

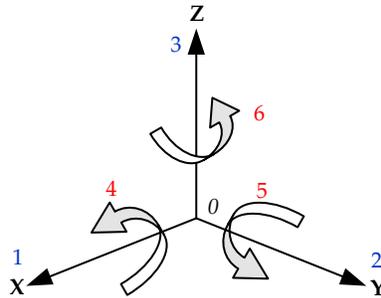


Figura 4. Seis grados de libertad de un cuerpo flotante (González *et al.*, 2017).

La dinámica del movimiento de la parte móvil del GEL puede determinarse por la ecuación que gobierna el movimiento del CEO; por simplicidad se consideró un solo grado de libertad en la boya; esto significa sólo movimiento vertical $y(t)$ ascendente y descendente, por lo que, aplicando la segunda Ley de Newton en esta dirección, la ecuación que gobierna el movimiento se puede escribir como:

$$m\ddot{y}(t) = f_h(t) + f_m(t) \quad (6)$$

Donde f_h representa a las fuerzas hidrostáticas de la ola y f_m representa todas las fuerzas mecánicas del sistema presentes en CEO, considerando todas las componentes de fuerzas presentes en el sistema:

$$f_h(t) = f_e(t) - (A\ddot{y}(t) + B\dot{y}(t)) - \rho g S y(t) \quad (7a)$$

$$f_m(t) = -K y(t) - C \dot{y}(t) \quad (7b)$$

es posible resumir (6) como:

$$(m + A)\ddot{y} + (B + C)\dot{y} + (\rho gS + K)y = f_e(t) \quad (8)$$

La ecuación del movimiento en el dominio de Laplace:

$$X(s) = \frac{F_e(s)}{(m + A)s^2 + (B + C)s + (\rho gS + K)} \quad (9)$$

Donde f_e es la fuerza de excitación de la ola; una ola regular tiene un perfil de una simple función sinusoidal para olas regulares; m es la masa de la boya, adicionándole la masa del actuador A , del GEL; B es el coeficiente de amortiguación que depende del cuerpo de la boya y de su frecuencia. Una ola regular en zonas costeras mexicanas tiene periodos típicos de 3 a 10 s, el diseño del GEL implica considerar movimientos del actuador con frecuencias bajas (menores a 0.3 Hz); C se le conoce como coeficiente de carga y es la capacidad de conversión de energía; K representa la constante del resorte; ρgS es la fuerza hidrostática de la boya, que depende de la densidad del agua ρ , aceleración debida a la gravedad g , y la sección transversal de la boya S . Se recomienda acudir a diversos autores (Shi, Cao, Liu, & Qu, 2016; Ekstrom, Ekergard, & Leijon, 2015) para más detalles en la obtención y solución del movimiento de la boya y el pistón del GEL.

Para la simulación se considera la dinámica de la ola $f_e(t)$ con perfil de una onda sinusoidal para una ola regular; para el caso de una ola irregular se basó en modelos de distorsión obtenidos por el espectro de Pierson y Moskowitz (Pierson & Moskowitz, 1964). Con el objetivo de tener una simulación más real con los datos obtenidos para la altura significativa y periodicidad de la ola en los diferentes puntos de la costa mexicana se obtuvo un modelo de distorsión que permite emular la dinámica del oleaje; este modelo está compuesto por una suma de términos de Fourier:

$$\begin{aligned} x(t) = Hs[& A_0 + A_1 \cos(w \cdot t) + B_1 \sin(w \cdot t) + \dots \\ & A_2 \cos(2 \cdot w \cdot t) + B_2 \sin(2 \cdot w \cdot t) + A_3 \cos(3 \cdot w \cdot t) + B_3 \sin(3 \cdot w \cdot t) + \dots \quad (10) \\ & A_4 \cos(4 \cdot w \cdot t) + B_4 \sin(4 \cdot w \cdot t) + A_5 \cos(5 \cdot w \cdot t) + B_5 \sin(5 \cdot w \cdot t)] \end{aligned}$$

Donde los valores de A_0 a A_5 y B_1 a B_5 denotan la amplitud de la función; esto significa que el valor eficaz de la función estará en la altura

significativa H_s deseada. La Tabla 1 contiene el resumen de los valores utilizados para estas constantes (ecuación (10)); también contiene el parámetro w , que denota la frecuencia promedio de la ola, y está en función de la periodicidad T_z , y puede calcularse por:

$$w = \frac{2\pi}{5T_z} \quad (11)$$

Tabla 1. Valores para la emulación del desplazamiento del GEL diseñado.

Constantes		
	<i>A_i</i>	<i>B_i</i>
<i>i</i> = 0	0.0049	---
<i>i</i> = 1	- 0.0161	- 0.0156
<i>i</i> = 2	- 0.0206	- 0.0400
<i>i</i> = 3	0.0237	- 0.1679
<i>i</i> = 4	- 0.0705	- 0.0552
<i>i</i> = 5	0.7530	0.5812

La mayoría de los puntos analizados de la costa mexicana tiene un modelo individual dado por la ecuación (10), debido a que cada punto tiene características propias de oleaje y periodicidad (Tabla 2); en este trabajo (ecuación (10)) se representa un modelo del desplazamiento promedio del actuador del GEL durante un día completo. Simular un día completo (86 400 s) en MEF es inconveniente debido al gasto y tiempo computacional, además de que el modelo (ecuación (10)) es una serie continua y repetitiva, con amplitud aleatoria, por lo que la simulación de 10 min (600 s) pudiera considerarse como representativa. Para el estudio

de simulación desarrollado y para el diseño electromagnético del GEL se consideró el nodo con mayor predicción de potencial energético obtenido, nodo Guerrero, Llano Real (latitud 17° N, longitud 110° 30' O), y el nodo con el menor valor de potencial, corresponde al nodo Champotón, Campeche (latitud 19° 30' N, longitud 91° 30' O). Para cada uno de los nodos analizados es necesario personalizar el diseño, por lo que en esta etapa preliminar de estimación y simulación resultaría inconveniente diseñar cada uno de los generadores; por tal motivo se consideró sólo el nodo más alto en potencia estimada y el más bajo. La Tabla 3 presenta el resumen con los valores de H_s y T_z para estos nodos. El perfil del movimiento obtenido para la emulación del desplazamiento del pistón en el sistema CEO en estos dos nodos se muestra en la Figura 5. Es posible notar que existe mayor número de olas en Champotón que en el nodo Llano Real, pero con menor altura significativa, lo que repercute de manera sobresaliente en el desplazamiento del pistón con imanes dentro del GEL, afectando la extracción de potencia.

Tabla 2. Valores obtenidos para la altura significativa H_s y periodicidad T_z .

Información geográfica			H_s (m) Promedio anual	T_z (s) Promedio anual
#	Zona	Municipio/rel. cercano		
1	Nayarit	San Blas	0.532	10.139
2		San Francisco	0.724	10.281
3	Colima	Peña Blanca	1.119	10.282
4		San Juan de Alima	1.273	10.313
5	Guerrero	Barra de Potosí	1.238	10.272
6		Llano Real	1.233	10.311
7		Copala	1.160	10.271
8	Oaxaca	Santa María Chicometepec	1.239	10.302
9		San Mateo del Mar	1.321	8.834
10		Aguachil	1.235	9.578
11	Chiapas	Tonalá	0.982	10.089
12		Pijijiapan	1.015	10.141
13		La Encrucijada	1.166	10.134
14		Tapachula	1.229	10.164
15	Campeche	Campeche	0.498	2.959

16		Champton	0.598	3.225
17			0.419	2.741
18		Carmen	0.483	3.288
19			0.696	3.644
20			0.723	3.568
21	Veracruz	San Andrés Tuxtla	0.724	4.234
22		Lechuguillas	0.797	4.43
23		Papantla	0.803	4.464
24		Tuxpan	0.917	4.445
25		Ensenada de Mangles	0.905	4.501

Tabla 3. Valores de altura significativa de la ola, periodicidad y potencia estimada en dos nodos de análisis.

Llano Real, Guerrero													
	En	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom año
Hs (m)	0.83	0.95	1.22	1.38	1.43	1.37	1.45	1.36	1.43	1.32	1.10	0.96	1.23
T_z (s)	9.49	10.05	10.69	10.76	10.61	10.18	10.74	9.94	10.40	10.59	10.11	10.18	10.31
Pm (kW)	408	537	919	1151	1230	1163	1284	1137	1175	1093	722	547	947
Champton													
	En	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom año
Hs (m)	0.40	0.41	0.43	0.47	0.46	0.42	0.46	0.44	0.37	0.40	0.39	0.39	0.42
T_z (s)	2.90	2.86	2.77	2.60	2.66	2.57	2.44	2.59	2.84	2.83	2.98	2.86	2.74
Pm (kW)	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1.25

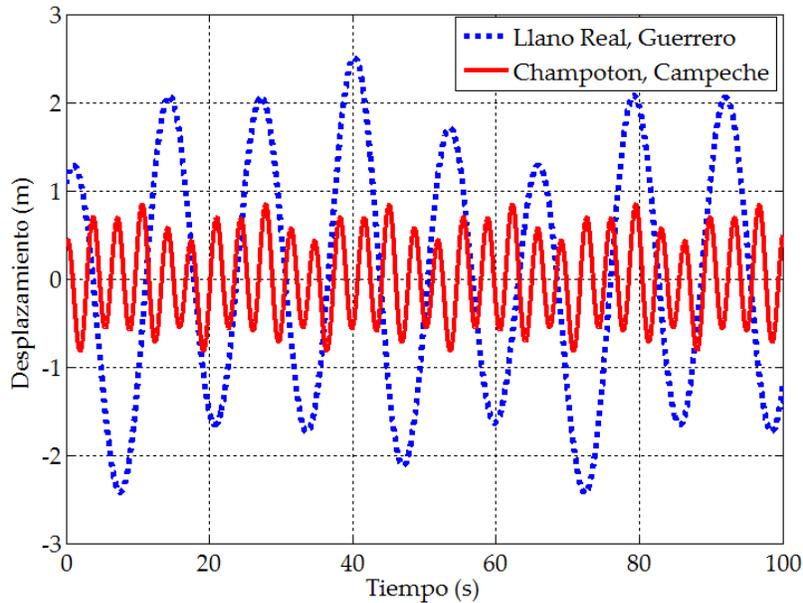


Figura 5. Espectros obtenidos para la emulación del desplazamiento en el CEO con el oleaje previsto para Champotón, Campeche, y para Llano Real, Guerrero.

Simulaciones con MEF y evaluación de resultados

Para extraer la potencia del GEL por medio de la simulación electromagnética, se desarrollaron diseños de GEL para utilizarlos en el sistema CEO en estos dos nodos en la costa mexicana; la Tabla 3 contiene los valores promedio de H_s y T_z necesarios para el diseño del GEL en los dos nodos seleccionados. El nodo Llano Real tiene una potencia promedio estimada de 947 kW; en cambio, el nodo Champotón es del orden de 1.25 kW. Existe una gran diferencia de potencia entre ambos y esto se debe a que el nodo Llano Real tiene una profundidad de 295 m y Champotón sólo 11 m; la capacidad de conversión de energía del cuerpo rígido (boya) depende de la profundidad; a mayor profundidad, más capacidad de absorber la energía por medio de la boya. Para el nodo Champotón se diseña entonces un GEL de 5 kW y para el nodo Llano Real de 100 kW, considerando la posibilidad de tener 10 unidades de la misma capacidad.

La simulación con MEF del GEL se hace en un módulo axisimétrico; debido a que el dispositivo es tubular, utilizar este módulo permite ahorrar tiempo y memoria computacional, además de proporcionar un panorama

3D de la densidad del flujo magnético dentro del dispositivo. La carrera o desplazamiento del pistón con los imanes está en función de altura significativa de la ola; el tiempo que tarda el pistón con imanes en recorrer un ciclo está dada por la periodicidad de la ola. La Figura 6a muestra las líneas del flujo magnético, vistas en un corte transversal del dispositivo. En la Figura 6b se puede revisar la densidad de flujo magnético 3D dentro del dispositivo. El voltaje generado que se busca con este diseño es de 240 Vrms (o valor eficaz). Si las olas fueran regulares, se esperaría un voltaje senoidal, pero debido a que las olas son de característica irregular y están dadas por el espectro de desplazamiento propuesto (10), se obtiene un voltaje distorsionado (armónicos) (Figura 7a).

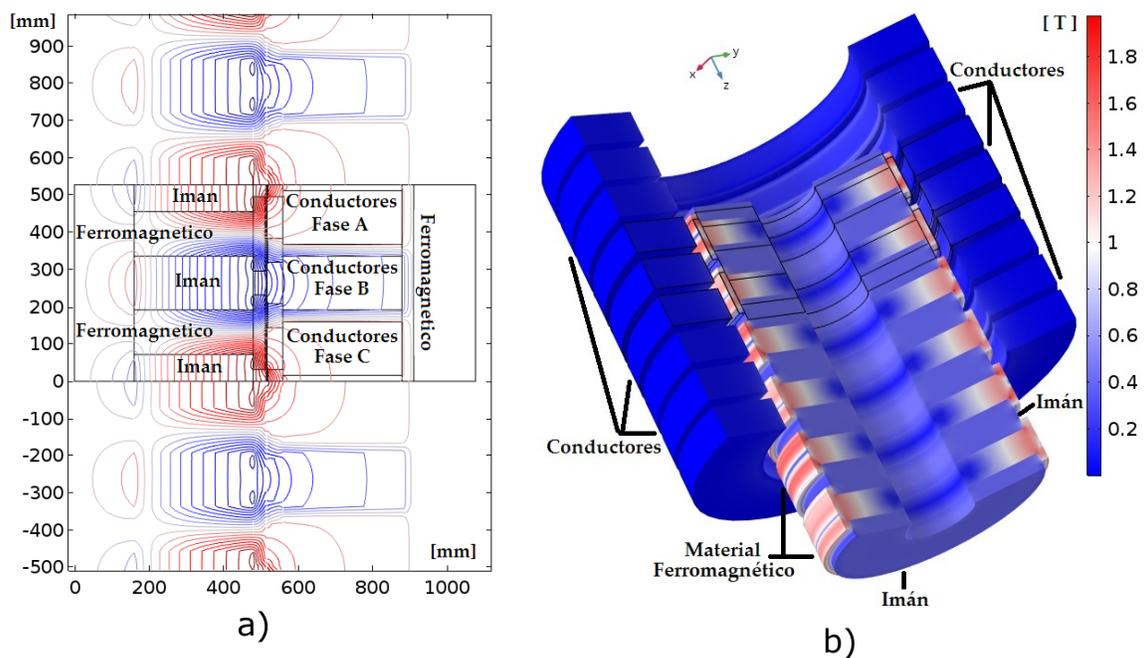


Figura 6. Esquema general de la simulación electromagnética del GEL: a) perspectiva de las líneas del flujo magnético; b) densidad del flujo magnético dentro del GEL.

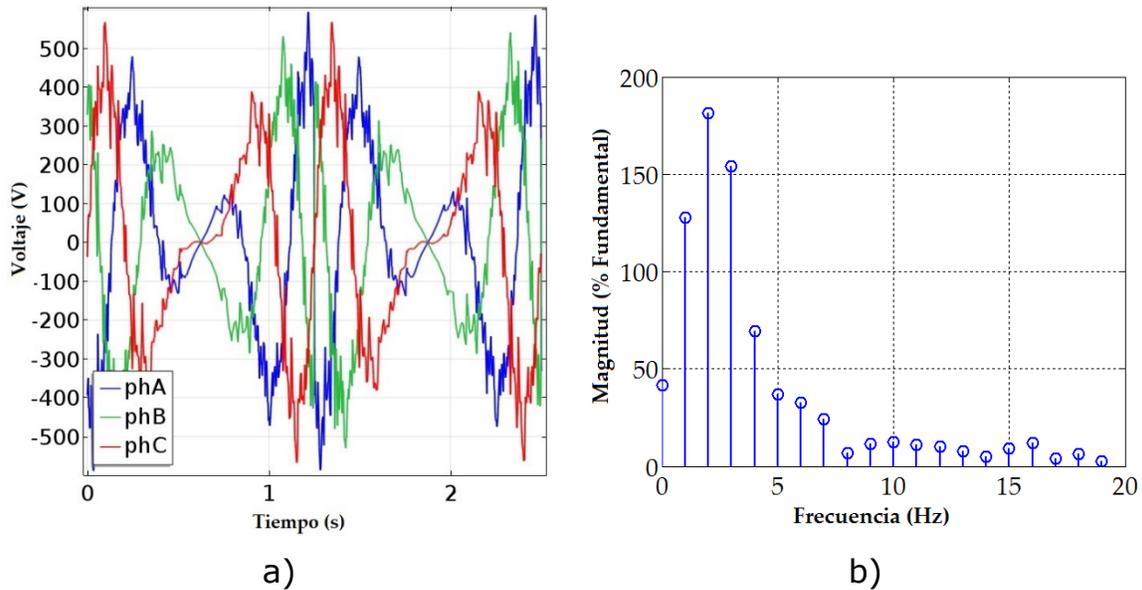


Figura 7. a) Voltaje generado de 240 Vrms en el GEL simulado para el nodo de Champotón; b) espectro de frecuencias en la obtención del THD de la señal del voltaje generado.

Resultados de calidad energética entregada por el GEL

Para analizar y evaluar la calidad de energía suministrada por el GEL se utiliza la señal del voltaje generado, al que se le calcula la distorsión armónica total DAT (conocido por lo común como THD, por sus siglas en inglés); este parámetro mide la cantidad de armónicos de la señal de salida y está dada por:

$$THD = \frac{\sum Potencias\ de\ los\ armónicos}{Potencia\ Fundamental} \quad (12)$$

Para calcular el THD se empleó la metodología de la transformada rápida de Fourier (FFT), que determina el espectro de frecuencias de los armónicos de la señal analizada (Figura 7b).

El THD del voltaje obtenido para el nodo de Champotón corresponde a 47.96%, esto quiere decir que casi 48% de la potencia estimada de salida para el GEL se desperdiciará en frecuencias no deseadas (distorsión); esto

es causado en parte por la irregularidad del movimiento de la ola y también puede ser atribuible al mismo diseño del GEL.

El THD del voltaje obtenido para el nodo de Llano Real corresponde a 55.39%; lo cual significa que la potencia de salida sólo se parecerá en un 44.61% a la potencia esperada. Esto puede implicar que a frecuencias más bajas o periodicidad de la ola más alta ($f = 1/T_z$), la señal de salida de energía esperada presentará más distorsión.

Conclusiones

Con la finalidad de desarrollar en un futuro un sistema de microgeneración (generación distribuida) aprovechando fuentes alternas de energía, se estudió, simuló y experimentó con un prototipo de pequeña escala para conocer el rendimiento y la calidad energética proporcionada por un sistema de conversión de energía de oleaje (CEO). En González *et al.* (2017) se instituyeron los nodos o localizaciones de boyas con datos oceanográficos, con ellos se determinó el potencial energético promedio, así como se establecieron los dos parámetros importantes (H_s y T_z) para desarrollar la simulación electromagnética de la unidad convertidor (generador eléctrico lineal, GEL) de un solo grado de libertad del oleaje; para desarrollar esta simulación fue necesario proponer un modelo del espectro de la ola irregular; con este modelo se logra completar la simulación electromagnética y, por lo tanto, obtener resultados de la eficiencia energética del sistema CEO. Los resultados de la simulación electromagnética permitieron identificar que debido a la irregularidad de la ola, la potencia útil es cercana a un 50% de la potencia deseada, esto implica que se tiene que redimensionar el GEL para obtener la potencia energética que se estima con métodos donde se considera una periodicidad y altura significativa de la ola constante durante todo un mes o año. El modelo propuesto para la ola irregular debe mejorarse, a fin de obtener estimaciones lo más apegadas a la realidad; sin embargo, este trabajo contribuye para el conocimiento en el diseño y desarrollo de dispositivos enfocados a microgeneración por undimotriz; también presenta un panorama de su potencial energético, para darle continuidad en su investigación y tener nuevas alternativas energéticas en el país.

Referencias

- Danielsson, O., Eriksson M., & Leijon M. (2006). Study of a longitudinal flux permanent magnet linear generator for wave energy converters. *International Journal of Energy Research*, 30, 1130-1145. DOI: 10.1002/er.1209
- De-la-Villa-Jaen, A., García-Santana, A., & Montoya-Andrade, D. E. (2014). Maximizing output power of linear generators for wave energy conversion. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 24, 875-890. DOI: 10.1002/etep.1747
- Ekstrom, R., Ekergard, B., & Leijon, M. (2015). Electrical damping of linear generators for wave energy converters-A review. *Elsevier Renewable and sustainable Energy Reviews*, 42, 116-128. DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.010. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008272>
- González, X., Hernández, I., & Barrios, H. (2017). Potencial energético undimotriz en nodos costeros de México. Parte 1: estimación energética. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(6), 5-22. DOI: 10.24850/j-tyca-2017-06-01
- López-González, J., Silva-Casarín, R., & Mendoza-Baldwin, E. G. (2011). Aprovechamiento de la energía de las corrientes con el hidrogenerador Impulsa. *Tecnología y Ciencia del Agua*, 2, 97-110.
- Magnetika Saiffe. (2017). *Imán de neodimio anillo*. Recuperado de <http://www.imanes.com.mx/jalisco/verProducto.php?mod=NR27MAGNA>
- Pierson, W. J., & Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research, J. Wiley & Sons Journals*, 69(24), 5181-5190. DOI: 10.1029/JZ069i024p05181
- Polinder, H., Damen, M. E. C., & Gardner, F. (2005). Design, modelling and test results of the AWS PM linear generator. *European Transactions on Electrical Power*, 15, 245-256. DOI: 10.1002/etep.56
- Rinderknecht, F., & Herzog, H. G. (2010). Calculation of a linear generator for hybrid vehicle concept. *International Conference on Electrical Machines*. ICEM 2010, 1-5. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5607780
- Shi, H., Cao, F., Liu, Z., & Qu, N. (2016). Theoretical study on the power take-off estimation of heaving buoy wave energy converter. *Elsevier Renewable Energy*, 86, 441-448. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.027>
- Vining, J., Lipo, T. A., & Venkataramanan, G. (2011). Experimental evaluation of a doubly-fed linear generator for ocean wave energy

- applications. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 4115-4122. DOI: 10.1109/ECCE.2011.6064329
- Viola, A., Trapanese, M., & Franzitta, V. (2014). Design considerations of transverse flux generator to sea wave energy. *IEEE Oceans Congress*, 34(2), 1-4. DOI:10.1109/OCEANS-TAIPEI.2014.6964432
- Wang, J., & Howe, D. (2005). A Linear permanent magnet generator for a free-piston energy converter. *IEEE Electric Machines and Drives*, 1521-1528. DOI: 10.1109/IEMDC.2005.195922
- Wang, J., West, M., Howe, D., Zelaya-de-la-Parra, H., & Arshad, W. M. (2007). Design and experimental verification of a linear permanent magnet generator for a free-piston energy converter. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 299-306. DOI: 10.1109/TEC.2006.875434