

# Educational Tool to Estimate and Analyze the Wave Energy Potential

Ivan A. Hernandez-Robles, Xiomara Gonzalez-Ramirez, Paulina L. Cuevas-Muñoz

**Abstract**— In order to search new alternatives for electric power generation, the study of the wave energy potential was considered in this work, it deals with the develop for academic and research purposes an executable tool capable of providing the wave energy potential in any point of interest in the coastal zone of Mexico. To develop this tool, the main parameters were used: the significant height of the wave and its period. These parameters were obtained from an easily accessible oceanographic from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) over a period of 6 years. The large database was statistically processed to obtain a reference base and applying numerical techniques for curve fitting, it was possible to obtain a characteristic equation to emulate the wave movement, this emulating model allows estimating the wave energy potential as a function of time and most attached to reality. This work contributes in the academic part in the estimation of wave energy potential, their visualization and understanding, to be a tool in the design of microgrids with renewables.

**Index Terms**—Bigdata, microgrid, ocean waves, renewable source, sustainability, wave energy potential.

## I. INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de buscar nuevos recursos para la generación de energía eléctrica se ha debido a un aumento en la demanda de energía eléctrica y a un inminente agotamiento de los recursos fósiles con los que actualmente se genera la energía eléctrica, sin mencionar las grandes cantidades de contaminantes que se generan debido a este proceso. Solo las reservas de petróleo se agotarán en 50 años, las reservas de gas solo serán suficientes para 70 años y las reservas de carbón se consumirán por completo en 200 años [1]. Esto es preocupante ya que el consumo de energía eléctrica va en aumento, se estima que en el 2040 la demanda de energía aumentará un 56% más que en la actualidad [2]-[3].

La necesidad de incursionar en las energías renovables surge luego de la llamada crisis energética de 1973 cuando estalló la guerra de Yom Kipur y el precio del petróleo estaba en alza, ya que este era la fuente de ingresos para solucionar la guerra [4]. Entre las energías renovables, las provenientes del océano son bastante atractivas ya que alrededor del 75% de la

superficie mundial está cubierta por mar y océano. Las energías oceánicas pueden generar electricidad a través de cinco formas de aprovechamiento: mareomotriz, undimotriz, corrientes oceánicas, mareotérmica y gradiente salino [5]. El presente trabajo se ha centrado en la energía undimotriz que consiste en la transformación de la energía ondulatoria mecánica en energía eléctrica. Impresionados por la fuerza de las olas del océano, durante más de dos siglos, los investigadores y expertos en energía han propuesto muchos dispositivos diferentes para utilizar la energía de las olas para uso humano [6]. En 1970, se implementaron los primeros dispositivos de energía de las olas [7], a pesar de los años de desarrollo tecnológico para aprovechar la energía de las olas, todavía está en desarrollo, ya que cada tecnología para energía undimotriz tiene una eficiencia diferente para cada lugar, zona costera u oceánica que se implemente [8]. Actualmente existen muchos dispositivos encargados de convertir la energía de las olas en energía eléctrica, estos se clasifican según su ubicación, su principio de funcionamiento y la dirección de la ola [9]. Estimar el Potencial de Energía de las Olas (WEP, por sus siglas en inglés *Wave Energy Potential*) utilizando una boya no es una tarea fácil [10]-[13], en términos generales, su estimación en cualquier punto de interés depende de dos parámetros: la altura significativa de la ola  $H_s$  y su período  $T_s$ , conociéndolos es posible obtener una aproximación de la energía potencial, sin embargo, con un solo valor de  $H_s$  y  $T_s$ , el valor WEP obtenido puede no representar la realidad porque significa que  $H_s$  y  $T_s$  es el mismo en cualquier punto geográfico del océano en cualquier momento.

Para tener una estimación del potencial de oleaje en cualquier lugar de interés es necesario considerar un historial o datos masivos (bigdata) de los  $H_s$  y  $T_s$ , este trabajo obtuvo los valores históricos de estos parámetros durante más de 6 años en 25 nodos ubicados en diferentes coordenadas de la zona costera, esto implica 7 estados costeros de México, el bigdata utilizado en este trabajo fue el disponible de la base de datos de la NOAA llamada ERDDAP (Environmental Research Division's Data Access Program), de igual forma se consideró que 6 años de información nos brinda información valiosa para tener modelos para la estimación por año, mes, día, analizar o encontrar patrones similares por año, por mes o por estación climática, aunado es información suficiente para realizar aprendizaje para pronósticos a futuro.

Este trabajo contribuye en lo siguiente: *a)* Proporcionar una herramienta de análisis y estimación del potencial undimotriz considerando hasta 3 grados de libertad del objeto captador undimotriz, proporcionando el par de valores  $H_s$  y  $T_s$  de cualquier punto de interés en alguna zona costera; *b)* La

Ivan A. Hernandez-Robles está en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato y con el Centro Interinstitucional de Energía de la Universidad de Guanajuato, 36787 Salamanca, Gto., México (e-mail: ia.hernandez@ugto.mx).

Xiomara González Ramírez está en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, 36787 Salamanca, Gto., México (e-mail: x.gonzalez@ugto.mx).

Paulina L. Cuevas-Muñoz es estudiante de Doctorado en el Departamento de Sistemas Eléctricos de Potencia, CINVESTAV Unidad GDL, 45017 Zapopan, Jal., México (e-mail: paulina.cuevas@cinvestav.mx).

herramienta puede ser utilizada con fines académicos, de investigación en el diseño de sistemas de generación distribuida y estimación de undimotriz con pronósticos a futuro; c) Contribuye a tener una herramienta para la planeación, gestión e inversión en nuevos sistemas de generación distribuida con renovables. La herramienta una vez autorizada, podrá tener acceso libre en la página web del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato.

## II. VISIÓN GENERAL Y MARCO TEÓRICO DEL SISTEMA WEP

Las olas del mar son el resultado del viento que se genera debido a la radiación solar que incide sobre la superficie terrestre, una fracción de esta radiación calienta de manera desigual la superficie, originando zonas de alta y baja presión en la atmósfera, generando desplazamientos de aire (viento) de mayor o menor intensidad. La ola es consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar [10], la intensidad de la ola depende de la intensidad del viento, su duración y la longitud en la que el viento transmite energía a la ola, Fig.1. El espectro  $S(f, \alpha)$  es una de las características de onda que describe cuantitativamente la energía de la onda en términos de frecuencia  $f$  y dirección. Secuencialmente, el espectro se condensa en parámetros de onda tales como: altura significativa  $H_s$  (m), frecuencia  $f$  (Hz) y dirección  $\alpha$  (rad). Para ondas irregulares, esto significa ondas reales, pueden verse como una superposición de muchas ondas armónicas [11]. Para una ola real, el nivel de densidad de potencia de la ola se define como el transporte de energía por unidad de longitud, se puede expresar en términos de espectro como [12]:

$$J = \rho g \int_0^{\infty} c_g(f) S(f) df = \frac{\rho g^2 T_e H_s^2}{64\pi} \quad (1)$$

Donde,  $\rho$  es la densidad del agua de mar ( $1025 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ),  $H_s$  (m) es la altura significativa de la ola,  $S(f)$  ( $\text{m}^2/\text{Hz}$ ) es el espectro de la ola sin considerar la dirección, y  $T_e$  (s) es el período de energía que corresponde a 0.857 veces el período pico  $T_p$ (s) [12].

### A. Potencia Máxima Absorbida por un Cuerpo Asimétrico.

El potencial de energía undimotriz obtenido se debe al movimiento mecánico de las olas, el cual es captado por un cuerpo rígido a modo de boya, se caracterizan por sus seis grados de libertad o modos de movimiento oscilatorio [11], que corresponden a tres traslacionales 1 a 3, y tres rotacionales de 4 a 6, Fig. 2. Es decir, si algún movimiento del cuerpo asimétrico no está limitado, tendrá seis grados de libertad: tres a través de los ejes y los restantes tres alrededor de esos ejes, pero cada restricción limita el movimiento de una manera específica. Si una ola incide con una densidad de potencia sobre un cuerpo rígido en el mar, según sus grados de libertad, éste puede absorber una potencia máxima  $P_{max}$  para un grado de libertad (2), para dos grados de libertad (3), y para tres grados de libertad (4), donde  $\lambda$ (m) es la longitud de onda, [11]-[12]:

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

$$P_{max} = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right) J \quad (3)$$

$$P_{max} = \left(\frac{3\lambda}{2\pi}\right) J \quad (4)$$

## III. GESTIÓN BIGDATA Y ESTIMACIÓN WEP

La energía proveniente de las olas del mar es bastante atractiva, por lo que es de gran importancia identificar las áreas de oportunidad para la producción de energía eléctrica a partir de este recurso, 25 puntos de estudio ubicados en la zona costera del territorio mexicano conforman la base de datos obtenida durante 6 años, esta gran base de datos contiene los parámetros relevantes de las olas del océano en el Golfo de México y el Pacífico Tropical, esta información se ha recopilado de la base de datos ERDDAP [13], más específicamente 11 puntos en el Golfo de México y 14 puntos en el tropical Pacífico fueron analizados, Fig. 3. Los datos de altura significativa  $H_s$  y periodo  $T_e$  de cada punto de estudio fueron tomados cada hora, durante 6 años de estudio. Esto implicó una gran cantidad de información por lo cual para su manejo fue necesario utilizar algunas metodologías estadísticas, específicamente, la técnica estadística descriptiva la cual se enfocó en la descripción, visualización y resumen de datos originados a partir de los fenómenos de estudio, en este caso el movimiento de las olas del mar, esto con el fin de facilitar el manejo de información como: promedio, máximo, mínimo y mediana.

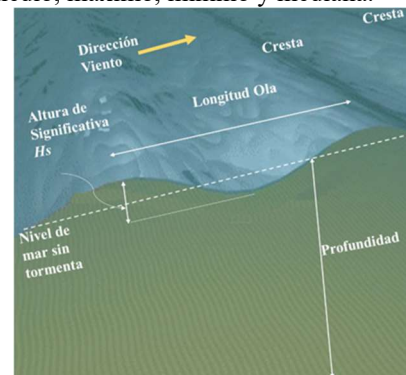


Fig. 1. Esquema general de los parámetros de la ola y cómo se origina.

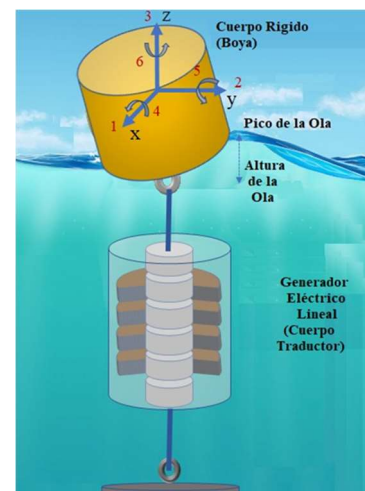


Fig. 2. Modos de movimiento para cuerpo asimétrico de 6 grados de libertad.

Según esta estadística descriptiva, la media representa el valor de  $H_s$  y  $T_e$  de posición central en un conjunto de datos

ordenados y el promedio consiste en la suma de los datos dividida por el número de datos.

### A. Tratamiento de los Datos

De acuerdo a esta estadística descriptiva, y a partir de los datos brutos  $H_s$  y  $T_p$  de la base de datos original, se evaluaron y se compararon con los 6 años de datos disponibles en ERDDAP, estos deberán tener un patrón de selección ( $H_s \neq 0$  y  $H_s < 10$  m) para ser seleccionados como datos base y sustituirse en la ecuación de la potencia, tanto para 1, 2 y 3 grados de libertad, en caso de que los datos obtenidos mediante un método estadístico no tengan similitud, o no alcancen el mínimo error  $(Dato_{Bruto} - Dato_{Base})/Dato_{Bruto}$  con el comportamiento de los 6 años de los datos brutos, o su característica de selección ( $H_s \neq 0$  y  $H_s < 10$  m), se prueba con otro hasta encontrarse el adecuado. Con el objeto de identificar el mejor método estadístico y ser tomados como datos de referencia en procedimientos posteriores, fueron comparados con los parámetros originales de cada año de estudio tanto de la  $H_s$  como del periodo pico  $T_p$  respectivamente, por simplicidad únicamente son mostrados los datos del mes de enero. En las Fig. 4 y Fig. 5 es mostrado el análisis en forma gráfica, en donde se puede observar el comportamiento de los parámetros brutos de la altura significativa y periodo pico de los 6 años de estudio en el mes de enero del punto de estudio CHI-Tonalá Z.I. Analizando estas gráficas, y con el objeto de identificar el método estadístico [14] - [15] con menor error se calculó el error relativo con respecto a cada año y se realizó un promedio del error a lo largo de los 6 años de estudio, ver Tabla I. Una vez observadas las gráficas de los parámetros de  $H_s$ , y periodo pico  $T_p$  del mes de enero y sus valores *promedio*, *máximos*, *mínimos*, y *mediana* de los 25 puntos de estudio, se seleccionó los datos *promedio* como datos base, ya que con el método usado para obtener estos valores se presenta mayor información de los 6 años de estudio; Además estos valores promedio se encuentran dentro del 85% de probabilidad de todos los valores del potencial undimotriz [15] que es una buena representación de la distribución real de todos los valores del potencial undimotriz que se pueden estimar en los 6 años de estudio, por lo cual al tomarse un valor promedio podría descartar también algún error en la medición. El

promedio aplicado a cada punto de estudio representa un comportamiento similar a su comportamiento real o el tomado por los datos “brutos” ( $\bar{H}_s = H_s$ ,  $\bar{T}_e = T_e$ ). Los datos promediados, es decir, *parámetros base* al ser sustituidos en la Ec. (1) de la densidad de potencia  $J(\bar{H}_s, \bar{T}_e)$ , y luego este en las Ecs. (2)-(4) del máximo potencial  $P_{max}(\bar{J})$ , se obtiene el comportamiento base del potencial a lo largo de 1 año.

### B. Modelos Matemáticos Considerados para Ajuste de Curvas

Para la obtención de la ecuación que represente el máximo potencial  $P_{max}$ , se requiere la obtención de una aproximación de curvas. Existen diversas metodologías para encontrar la mejor aproximación, se utilizó una herramienta de programación llamada “*cftool*” del software Matlab®, la cual se encarga de ajustar curvas y superficies a los datos ingresados, en la utilización de dicha herramienta es posible seleccionar la metodología y el número de términos [16].

TABLA I  
VALORES DE LOS PARÁMETROS DE LA OLA

	Promedio	Máximo	Mínimo	Mediana
$H_s$	0.306352786	0.68887279	0.344320238	0.53904659
$T_p$	0.391627406	0.61035244	0.496836946	0.479340288

Para este trabajo se analizaron las siguientes metodologías con el objetivo de encontrar el modelo que mejor describa el comportamiento del Potencial Undimotriz:

#### Modelo Gaussiano

Este se ajusta a los picos de la función, y está dado por:

$$y = \sum_{i=1}^n a_i e^{\left[-\frac{(x-b_i)^2}{c_i}\right]} \quad (5)$$

Donde  $a$  es la amplitud;  $b$  es el centroide, es decir, la posición del centro de la campana de gauss;  $c$  está relacionada con el ancho del pico, en otras palabras, es el que controla el ancho de la campana de Gauss;  $n$  es el número de picos para ajustar y este varía de  $1 \leq n \leq 8$  [17].

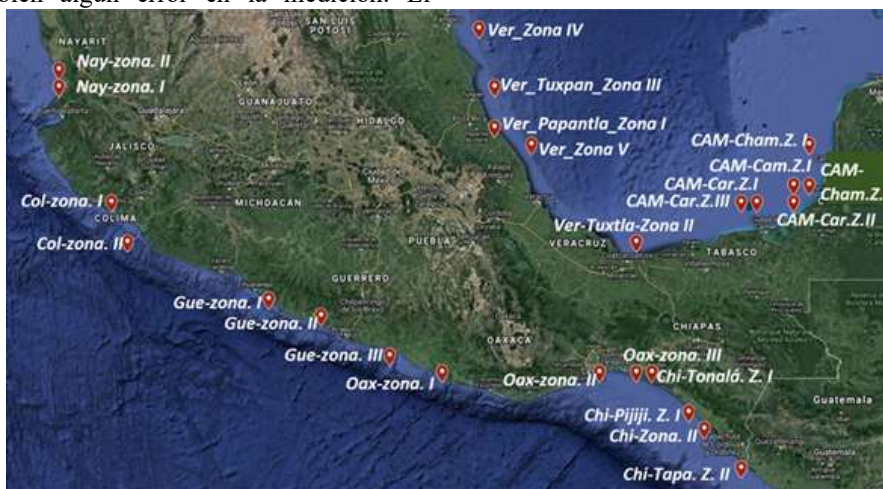
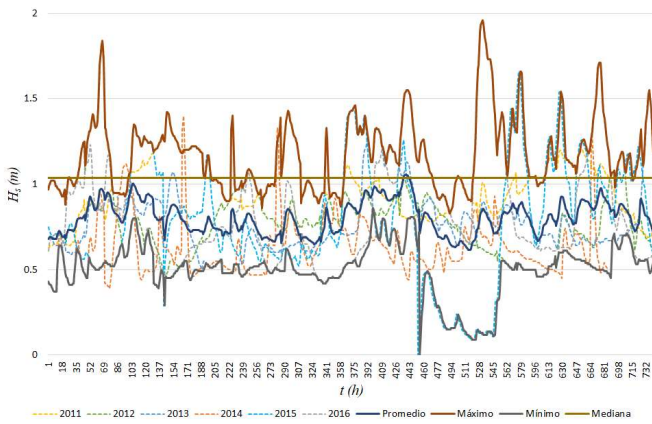
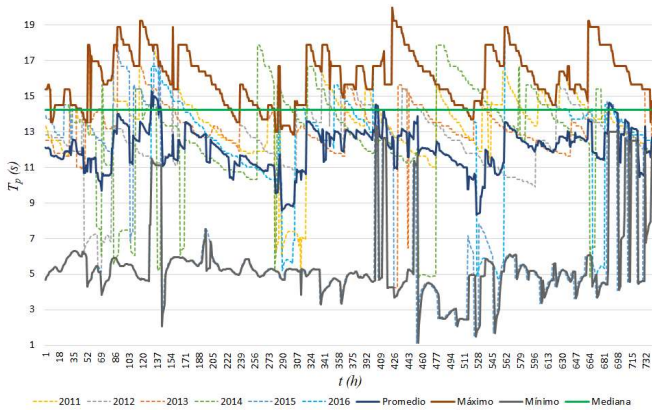


Fig. 3. Localización de los puntos costeros que conformaron los datos masivos (bigdata) oceánicos analizados y considerados para la herramienta de estimación del potencial energético de las olas. Se utilizó la plataforma de Google Maps [18].

Fig. 4. Altura significativa  $H_s$ : Datos brutos vs. Estadística descriptiva.Fig. 5. Periodo pico  $T_p$ : Datos brutos vs. Estadística descriptiva.

### Método de Interpolación

Es el método más común para estimar datos intermedios entre datos definidos por puntos. La interpolación polinomial consiste en determinar el polinomio único de  $n$ -ésimo grado que se ajuste a  $n+1$  puntos. Este polinomio, entonces, proporciona una fórmula para calcular valores intermedios. Aunque hay uno y sólo un polinomio de  $n$ -ésimo grado que se ajusta a  $n+1$  puntos, existe una gran variedad de formas matemáticas en las cuales puede expresarse este polinomio, entre las cuales se encuentran los polinomios de Newton y de Lagrange. La fórmula general para un polinomio de  $n$ -ésimo grado es la Ec. (6) [19]:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (6)$$

### Serie de Fourier

La serie de Fourier es una suma de funciones de seno y coseno que describe una señal periódica.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(iwx) + b_i \sin(iwx) \quad (7)$$

Donde  $a_0$  modela una constante cuando  $n = 0$  en el término coseno,  $w$  es la frecuencia fundamental de la señal, y  $n$  es el número de términos en la serie, varía de  $1 \leq n \leq 8$  [20].

### Modelo Exponencial

Los exponenciales a menudo se usan cuando la tasa de cambio de una cantidad es proporcional a la cantidad inicial de la cantidad.

$$y = ae^{bx} \quad (8)$$

$$y = ae^{bx} + ce^{dx} \quad (9)$$

Si los coeficientes asociados con  $b$  o  $d$  son negativos, representa el decaimiento exponencial, si el exponencial es positivo indica un crecimiento [21].

### Modelo de Suma de Senos

Es una función que se ajusta a funciones periódicas, y está dado por:

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \sin(b_i x + c_i) \quad (10)$$

Donde  $a_i$  es la amplitud;  $b_i$  es la frecuencia;  $c_i$  es la constante de fase para cada término de onda sinusoidal;  $n$  es el número de términos en la serie, y  $1 \leq n \leq 8$ . Esta ecuación está estrechamente relacionada con la *Serie de Fourier*, la principal diferencia es que la suma de la ecuación de los senos incluye la constante de fase y no incluye un término constante [22].

Para la obtención del modelo que mejor describa el comportamiento del Potencial Undimotriz de cada mes,  $P_{max}(\bar{J})$  para 1, 2 y 3 grados de libertad, es decir, la ecuación general que al ser graficada describa la mayoría de los puntos de estudio de potencia; Se encontró que la metodología que más se aproxima a los datos de la potencia es la aproximación de *Suma de Senos* [22] con 5 términos, y cuyo comportamiento se aproxima al obtenido de  $P_{max}(\bar{J})$  base, es decir, la Potencia Undimotriz obtenida a través de los datos base de estudio de  $H_s$  y  $T_e$ . Por medio de Matlab® se usó la función llamada "sin5" para la obtención de la ecuación característica, la cual cambian los coeficientes dependiendo de la zona de estudio, mes y grados de libertad:

$$P_{max}(t) = a_1 \sin(b_1 t + c_1) + a_2 \sin(b_2 t + c_2) + a_3 \sin(b_3 t + c_3) + a_4 \sin(b_4 t + c_4) + a_5 \sin(b_5 t + c_5) \quad (11)$$

Donde  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3, a_4, b_4, c_4, a_5, b_5, c_5$  son los coeficientes de este modelo característico.

Cabe destacar que por punto de estudio se cuenta con 36 ecuaciones, debido a que son 12 ecuaciones por cada grado de libertad, debido a que cada ecuación representa un mes de estudio. Fueron seleccionados 5 coeficientes debido a que al seleccionar menor número de coeficientes la caracterización era pobre, y al seleccionar más de 5 coeficientes el tiempo de cálculo aumentaba significativamente.

### C. Modelo Matemático Seleccionado

Se evaluaron diferentes estrategias para la obtención del modelo matemático que mejor represente el comportamiento del Potencial Undimotriz, de las cuales, con el objeto de identificar la mejor opción fue necesario evaluar el error porcentual relativo con respecto a los datos base de cada una de estas. Pese a la similitud del comportamiento de la potencia máxima obtenida de los modelos matemáticos con respecto a la potencia máxima base, los errores encontrados fueron considerables, estos fueron evaluados por mes, en cada uno de los puntos de estudio. Los errores totales promediados

obtenidos por punto de estudio de todos los meses, tomándose en cuenta cada una de las estrategias se muestran en el diagrama de la Fig. 6, donde se muestra en resumen las estrategias seguidas para la obtención de los diferentes modelos matemáticos, con el fin de identificar el método más certero y para determinar otros puntos coincidentes con algún punto en particular que se desea analizar. La aplicación creada además de arrojar el potencial undimotriz también arrojará una sugerencia de punto coincidente con los 25 puntos que se tienen en la base de datos, es decir, los valores medidos. Para arrojar esta sugerencia se obtienen los errores porcentuales de cada estrategia, las ecuaciones características fueron evaluadas a la misma hora y mes que el dato base con el que se comparó, el método seleccionará el ajuste con el menor error porcentual a partir de los parámetros base ( $\overline{H_s}, \overline{T_p}$ ) sustituidos en la ecuación de la potencia máxima  $P_{max}$  de cada mes, se obtiene el modelo característico con un 31.91% de error. El modelo con mayor error porcentual es el obtenido por estaciones del año con un 52.39%, cabe destacar, que esos errores no son de la estimación undimotriz, son indicadores o valores que la aplicación desarrollada utiliza para arrojar el mejor punto o zona coincidente del potencial undimotriz por mes, por ejemplo, si se quiere analizar el potencial undimotriz con 3 grados de libertad de un punto con oleaje de 0.8 m de altura y 13 s de periodo, la aplicación arrojará una estimación de 208 kW, también arrojará el punto coincidente 11 del Pacífico que corresponde al nodo Chiapas-Tonalá, punto en el que se tiene valores medidos.

#### IV. HERRAMIENTA DE DESARROLLO PARA EL CÁLCULO DE LA ESTIMACIÓN WEP

En [23] se aborda una herramienta para simular el comportamiento del oleaje marino y caracterización de sus parámetros, sin embargo, software o herramientas digitales comerciales y no comerciales (fines de investigación y académicos) para la estimación undimotriz son escasos, poco divulgados y limitados en su acceso, por esta razón surge la propuesta de desarrollar una herramienta denominada Estimador de Potencial de Energía de las olas, WEPE por sus siglas en inglés (*Wave Energy Potential Estimator*) permite ayudar al estudiante de energías renovables, diseño de microrredes y áreas afines, a tener una estimación del potencial de energía de las olas, considera un cuerpo asimétrico de 1, 2 y 3 grados de libertad, a 25 puntos de la zona costera de México, tanto en el Océano Pacífico como en el Golfo de México, la herramienta desarrollada contiene los modelos matemáticos que caracterizan el comportamiento del oleaje en cada uno de los 25 puntos estudiados, cada mes. La interfaz se realizó utilizando la herramienta de interfaz gráfica de usuario de Matlab GUI, la interfaz realizada contiene 3 ventanas:

**1. La Ventana Principal o Ventana de Inicio.** Esta ventana tiene 3 botones: *Calcular*, *Manual de Usuario* y *Salir*, como se muestra en la Fig. 7.

**2. Ventana del Botón *Calcular*.** Se mostrarán los cálculos de la estimación del potencial de energía de las olas obtenido.

**3. Ventana del Botón de *Manual del Usuario*.** Se mostrará el documento que contiene una referencia para usar la herramienta y, finalmente, el botón *Salir* le permite al usuario salir de la herramienta.

La segunda ventana, se desarrolla para estimar el potencial absorbido por el cuerpo asimétrico (boya), esta ventana contiene la adquisición o ingreso de los parámetros de los puntos de interés donde se requiere hacer la estimación del potencial undimotriz:

- **Altura Significativa ( $H_s$ ):** Se refiere al valor de entrada de la altura de ola en el punto de interés en unidades de metros, en un rango de 0 a 2 m.
- **Periodo Pico ( $T_p$ ):** Se refiere al valor de entrada del periodo pico de la onda en unidades de segundos, en un rango de 1 a 16 s indicado en la parte inferior del cuadro respectivamente.
- **Hora de Inicio:** Dato de la hora en que se inicia la evaluación del sistema WEP.
- **Hora de Finalización:** Dato de la hora en que finaliza la evaluación del sistema WEP.
- **Grados de Libertad (DF):** Se selecciona el número de grados de libertad del cuerpo asimétrico, cabe señalar que en esta herramienta es posible estimar el potencial de ola para un cuerpo asimétrico de 1, 2 y 3 grados de libertad.

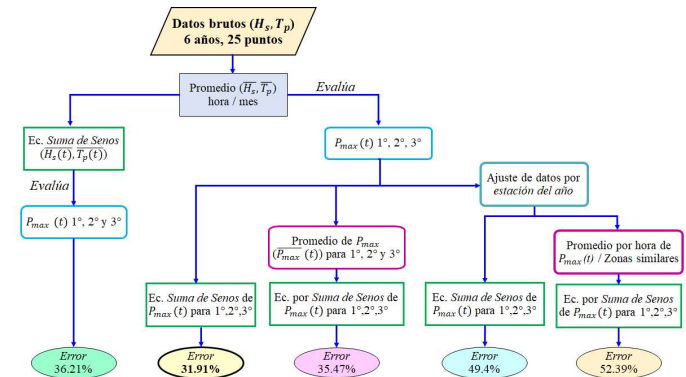


Fig. 6. Estrategias para la obtención del modelo matemático del potencial eléctrico undimotriz.



Fig. 7. Ventana inicial o principal de la herramienta WEPE.

El diagrama de bloques del funcionamiento de la herramienta propuesta se puede apreciar en la Fig. 8, donde a partir de los parámetros de entrada ingresados por el usuario, es posible obtener la ecuación característica a partir de la comparación con los datos base. Una vez obtenida su ecuación esto se evalúa y se grafica en el lapso ingresado por el usuario.

El principio de funcionamiento es iterativo y funciona de la misma manera al ingresar nuevos datos de entrada. Una vez ingresados los parámetros  $H_s$  y  $T_p$ , se presiona el botón *Estimar*, realizará los cálculos necesarios para brindar la aproximación al modelo matemático, este botón luego brindará la potencia eléctrica entregada en el período indicado. La herramienta WEPE permite evaluar la potencia eléctrica en un nuevo punto de interés, esta se grafica superpuesta a la anterior con el fin de apreciar la diferencia de potencia generada entre diferentes valores de  $H_s$  y  $T_p$ , es decir, identificar el comportamiento de potencia máxima entre diferentes características de los puntos de estudio y grados de libertad. La herramienta está limitada a seis cálculos, es decir, puede realizar seis curvas a la vez, pudiendo diferenciar una curva de otra gracias a la leyenda indicada en la parte superior. Después del sexto cálculo, se borrarán las gráficas de los 6 puntos anteriores para comenzar una nueva secuencia de gráficas. En la Fig. 9 se puede ver una comparación entre la potencia generada por un cuerpo asimétrico con 1 grado de libertad y la potencia generada por un cuerpo asimétrico con 2 grados de libertad, y 3 grados de libertad, respectivamente.

Una vez realizados estos cálculos, las ecuaciones características del comportamiento de dichas curvas se obtienen presionando el botón llamado *Ecuación*, también puede regresar a la ventana principal presionando el botón amarillo llamado *Regresar*. Los datos mostrados en la parte superior de la ventana 2 de WEPE (Fig.9), indican los parámetros ingresados, los cuales corresponden a: Altura significativa de la ola  $H_s$ , periodo pico  $T_p$ , hora de inicio, hora final, y grados de libertad del cuerpo asimétrico. Los datos mostrados en la parte inferior de la ventana 2 de WEPE (Fig.9), indican los parámetros estimados, los cuales corresponden a: Altura significativa de la ola ingresada  $H_s$ , periodo pico ingresado  $T_p$ , grados de libertad del cuerpo asimétrico ingresado, la potencia máxima promedio absorbida por el cuerpo asimétrico, la zona o punto de estudio similar a los parámetros ingresados, la vertiente correspondiente al punto de estudio similar, y el mes al cual se asemejan dichos parámetros.

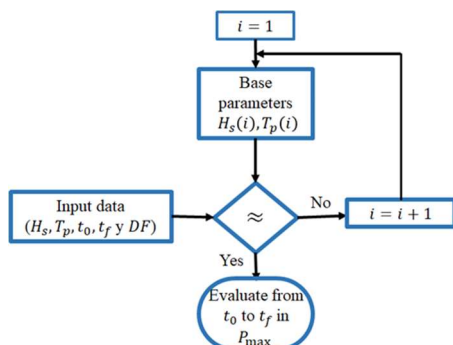


Fig. 8. Diagrama de bloques de la herramienta desarrollada.

La tercera ventana, Fig. 10, muestra lo que aparece al ser presionado el botón *Ecuación* de la ventana 2, esta tercera ventana contiene la ecuación general del potencial undimotriz adquirida mediante el modelo de aproximación, así como los parámetros correspondientes a la potencia calculada, estos pueden ser diferenciados gracias a que es mostrado el título del gráfico en la parte superior de cada lista de parámetros. Para salir de esta ventana sólo se debe oprimir el botón en rojo *Salir*.

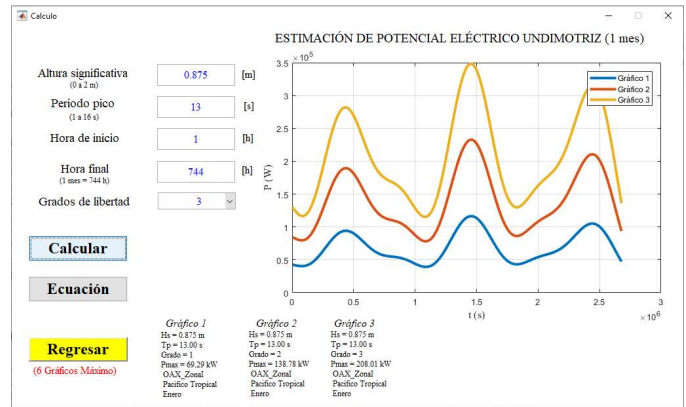


Fig. 9. Ventana 2 de la herramienta WEPE oprimiendo botón de *Calcular*. Comparación entre la potencia estimada con 1, 2 y 3 grados de libertad.

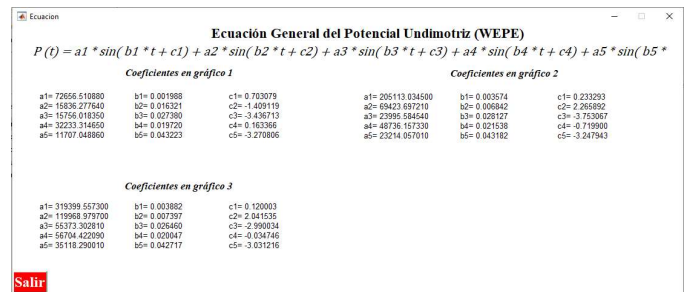


Fig. 10. Ventana 3 de la herramienta WEPE oprimiendo botón de *Ecuación*.

### V. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LA HERRAMIENTA WEPE Y METODOLOGÍAS CLÁSICAS

Del resultado de la potencia máxima promedio anual, resulta ser mayor la potencia máxima absorbida por un cuerpo asimétrico de 3 grados de libertad debido a que tiene un mayor aprovechamiento de la energía del oleaje. La potencia máxima absorbida por un cuerpo asimétrico en la vertiente del Pacífico Tropical es mayor que en la vertiente del Golfo de México, esto es debido a que geográficamente la vertiente del Golfo de México se comporta como un disipador natural de energía. En la Tabla II se muestran los valores puntuales del promedio de cada uno de los 25 puntos de estudio, para los 3 grados de libertad, y en comparación de los datos base calculados directamente en las ecuaciones de Falnes, con respecto a los datos obtenidos por el modelo propuesto en la interfaz. En la Fig. 11, se ilustra de manera grafica la comparación de los datos base calculados directamente en las ecuaciones de Falnes  $P_{max}(\bar{J})$ , con respecto a los datos obtenidos por el modelo propuesto en la interfaz  $P_{max}(t)$ , para un mes, 1 grado de libertad, en el punto de estudio # 8 (OAX\_ZONA I). Como se puede observar el modelo propuesto representa con gran aproximación el comportamiento del potencial undimotriz.

Del análisis de resultados es posible resaltar que el Golfo de México no es tan atractivo para el potencial undimotriz como es la Costa del Pacífico, en algunos casos es 10 veces mayor el potencial undimotriz. El modelo obtenido, y que fue implementado en la herramienta propuesta, concuerda con los resultados obtenidos por la formulación clásica. El enfoque de este trabajo se basa en dar a conocer la herramienta computacional desarrollada para fines académicos y de investigación en sistemas de energía undimotriz, y que sea una herramienta útil en el dimensionamiento de microrredes con estas tecnologías. Sin embargo, para corroborar de una mejor manera los resultados, se presenta en [24] un enfoque más detallado de la dinámica de la boya, para con ello diseñar el generador eléctrico lineal para energía undimotriz, hacer una simulación electromagnética, obtener el potencial undimotriz en base al voltaje y corriente extraíble y compararlo con los valores obtenidos a través de este modelo propuesto e implementado en esta herramienta.

TABLA II  
VALORES OBTENIDOS POR WEPE VS. METODOLOGÍA CLÁSICA

Zona	Modelo Propuesto			Falnes			
	1° (kW)	2° (kW)	3° (kW)	1° (kW)	2° (kW)	3° (kW)	
Pacífico Tropical	1	52.07	104.07	156.31	52.50	104.99	157.49
	2	173.35	346.68	520.38	174.42	348.83	523.25
	3	426.72	853.44	1279.51	430.45	860.91	1291.36
	4	278.68	556.53	835.66	280.42	560.83	694.91
	5	451.88	904.36	1357.56	457.31	914.62	1371.94
	6	510.32	1020.05	1530.68	518.22	1036.45	1554.67
	7	379.01	758.55	1137.52	382.34	764.69	1147.03
	8	414.60	828.90	1244.77	418.95	837.89	1256.84
	9	379.60	758.74	1135.51	383.12	766.23	1149.35
	10	275.28	550.07	825.14	277.12	554.24	831.36
	11	101.36	202.46	304.01	102.16	204.31	306.47
	12	230.68	461.31	692.03	232.51	465.02	697.54
	13	229.87	459.26	688.87	231.64	463.27	694.91
	14	271.09	541.34	812.39	273.17	546.34	819.50
Golfo de México	15	3.14	6.28	9.42	3.21	6.41	9.62
	16	6.32	12.61	18.93	6.47	12.93	19.40
	17	1.94	3.88	5.82	1.99	3.99	5.98
	18	4.89	9.78	14.66	4.98	9.96	14.94
	19	5.89	11.79	17.69	6.00	11.99	17.99
	20	10.76	21.44	32.24	10.89	21.79	32.68
	21	23.94	48.13	72.09	24.91	49.81	74.72
	22	23.03	46.02	69.00	23.69	47.38	71.07
	23	16.15	32.27	48.40	16.48	32.96	49.44
	24	28.62	57.15	85.60	29.21	58.42	87.63
	25	29.21	58.52	87.66	29.70	59.40	89.10

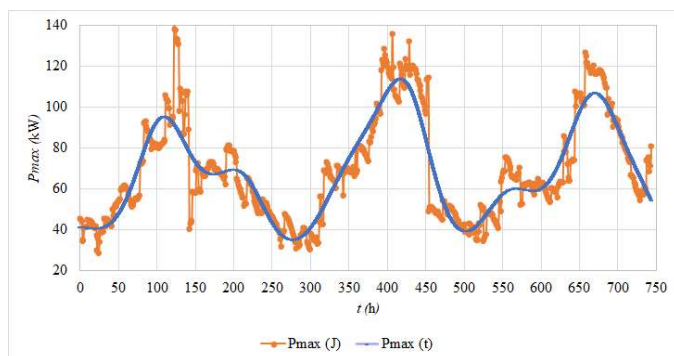


Fig. 11. Comparación de la potencia de Falnes  $P_{max}(\bar{J})$ , con respecto al modelo propuesto  $P_{max}(t)$ , para la Zona de estudio #8 OAX\_Zona I.

## VI. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una herramienta para determinar el Potencial de Energía de las Olas utilizando una boya como captador, la herramienta puede ayudar a tener una estimación del WEP en cualquier punto de interés ya que el modelo propuesto en este trabajo se basa en dos parámetros: la altura significativa de la ola  $H_s$  y su período  $T_s$ , para obtener este modelo fue necesario considerar un historial o datos masivos (bigdata) de los  $H_s$  y  $T_s$ , durante más de 6 años en 25 nodos ubicados en diferentes coordenadas de la zona costera de México, el bigdata fue extraído de la base de datos de la NOAA-ERDDAP. La obtención de esta herramienta capaz de aproximar el potencial undimotriz mediante los parámetros del oleaje permite de manera ágil flexible conocer el potencial obtenido en algún punto de interés y realizar estudios técnicos y económicos para que pueda implementarse un sistema undimotriz como fuente de generación distribuida. Así como también puede ayudar a realizar análisis técnico del comportamiento de una microrred utilizando el potencial undimotriz. Los resultados obtenidos con esta herramienta fueron comparados con técnicas tradicionales que han servido durante varias décadas como técnicas referentes para hacer estimaciones del WEP, la diferencia más grande en resultados resultó de 3.9% por lo que la herramienta puede considerarse que arroja resultados verídicos y con precisión. Este trabajo contribuye en el estudio y estimación del potencial undimotriz, así como al desarrollo de aplicaciones útiles en la toma de decisiones para el diseño de nuevas plantas de generación eléctrica distribuida. En términos generales una herramienta como esta propuesta se le puede sacar provecho para tener estimaciones del potencial undimotriz basado en datos y variables medidos y mejorar la curva de aprendizaje en el diseño de micro redes eléctricas con potencial del océano.

Considerando esta herramienta como una base inicial del conocimiento en esta área, se pretende más adelante realizar la integración de redes neuronales para la predicción del potencial energético undimotriz.

## REFERENCIAS

- [1] World Energy Council. (2017). "World Energy Trilemma Index 2017: Monitoring the Sustainability of National Energy Systems." London.
- [2] M. Zhou (25 de Julio de 2013). "World Energy Consumption to Increase 56% by 2040 Led by Asia." Bloomberg.
- [3] K. Altintas, T. Turk, O. Vayvay (2016), "Renewable Energy for a Sustainable Future," Turquía, Marmara Journal of Pure and Applied Sciences.
- [4] J. L. Oviedo-Salazar, M. H. Badii, A. Guillen, O. L. Serrato (2015). "History and Use of Renewable Energies." *Daena: International Journal of Good Conscience*.
- [5] R. S. Casarín (2017). "Annual report an overview of ocean energy activities in 2017." *Ocean Energy Systems (OES)*, 12, 19.
- [6] A. Stahl (1892). "The utilization of the power of ocean waves." *Trans Am Soc Mech Eng*, 13: 438 - 506.
- [7] J. Hayward, S. Behrens, S. McGarry, & P. Osman (2012). "Economic modelling of the potential of wave energy." *Renewable Energy*, 48.

- [8] A. Saket, & A. Etemad-Shahidi (2012). "Wave energy potential along the northern coasts of the Gulf of Oman, Iran." *Renewable Energy*, 40.
- [9] M. Fadaeenejad, R. Shamsipour, S. Rokni, & C. Gomes (2014). "New approaches in harnessing wave energy: With special attention to small islands." *ELSEVIER: Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [10] P. F. F. Díez, (2005). "*Energía de las olas*." Universidad de Cantabria: Departamento de Ingeniería eléctrica y energética. [Online]. Available: Energía del mar: <http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=5>
- [11] J. Falnes, "Ocean waves and oscillating systems". En ISBN 0-511-03093-2. Inglaterra: Cambridge University press, 2002.
- [12] J. Falnes, "A review of wave-energy extraction". *ELSEVIER: Marine Structures*, pp. 186 – 200, 2007.
- [13] X. González-Ramírez, I. A. Hernández-Robles y H. Barrios-Piña (2017). "Potencial energético undimotriz en nodos costeros de México, Parte 1: estimación energética, Tecnología y Ciencias del Agua," vol. VIII, 11,10.
- [14] J. F. M. Pessanh, A. C. G. Melo, R. P. Caldas and D. M. Falcão (2020) "An Approach for Data Treatment of Solar Photovoltaic Generation." *IEEE Trans.*, vol. 18, nO. 9, sept 2020.
- [15] X. Gonzalez, R. G. Cabrera, I. A. Hernandez, J. R. G. Sepulveda (2022) "Statistical technique to improve potential estimation for the design of wave generators." *Energy Conversion and Management X. ELSEVIER*, vol. 14, sept 2022.
- [16] MathWorks. (2006). *Curve Fitting*. [Online]. Available: MathWorks: <https://la.mathworks.com/help/curvefit/curvefitting-app.html>.
- [17] MathWorks. (2019). *Gaussian Models*. [Online]. Available: MathWorks: <https://la.mathworks.com/help/curvefit/gaussian.html>.
- [18] Google My Maps (2016). *Mapa de los mares mexicanos*. [Online]. Available: <https://www.google.com/maps/d/edit>.
- [19] S. C. Chapra, (2007). "Métodos numéricos para ingenieros". Quinta edición. ISBN-13: 978-970-10-6114-5: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES.
- [20] MathWorks. (2019). *Fourier Series*. [Online]. Available: MathWorks: <https://la.mathworks.com/help/curvefit/fourier.html>.
- [21] MathWorks. (2019). *Exponential Models*. [Online]. Available: MathWorks: <https://la.mathworks.com/help/curvefit/exponential.html>.
- [22] MathWorks. (2019). *Sum of Sines Models*. [Online]. Available: MathWorks: <https://la.mathworks.com/help/curvefit/sum-of-sine.html>.
- [23] A.O. Castellan, R.D. Lago, H. Bory (2022). "Programa para determinar los parámetros que caracterizan el oleaje marino y simular su comportamiento." *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. XLIII, No. 2, Abr-Jun 2022, p. 29-43.
- [24] I. A. Hernandez-Robles, X. Gonzalez-Ramirez, J. Gomez, J. M. Ramirez, (2021). "Wave power assessment for electricity generation with powerbouy system by wave motion emulation modelling." *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 43, 2021, p. 1-12



**Ivan A. Hernández Robles (M'10)** recibió grado de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato (México) en 2002, Maestría y Doctorado en Ingeniería Eléctrica por el CINVESTAV Campus Guadalajara (México) en 2005 y 2013 respectivamente.

Ha trabajado en el campo de la Ingeniería Eléctrica en proyectos de Construcción Eléctrica e Ingeniero de Diseño en EATON-

Cooper Power, Guadalajara, México, durante dos años con cátedras CONACYT, trabajando en diseño y optimización de generadores lineales y motores eléctricos. Actualmente es profesor en la Universidad de Guanajuato en el Departamento de Ingeniería Eléctrica. Sus líneas de investigación son el análisis numérico aplicado al diseño de máquinas eléctricas y las energías renovables.



**Xiomara González Ramírez** recibió el grado de Licenciatura en Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Valle (Cali, Colombia) en 2008; Maestría en Ciencias y Doctorado en Sistemas Eléctricos de Potencia del CINVESTAV Campus Guadalajara (México) en 2010 y 2015, respectivamente. Es

profesora en la Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca en el Departamento de Ingeniería Eléctrica. Es especialista en generación distribuida y optimización de flujos de energía eléctrica. Sus principales líneas de investigación son la operación y optimización de Sistemas Eléctricos de Potencia, y la Generación Distribuida por Energías Renovables.



**Paulina L. Cuevas Muñoz** Estudiante de posgrado, de nacionalidad mexicana, recibió el título de Licenciada en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato, en 2020; El título de Maestra en Ciencias en Ingeniería Eléctrica del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional

(CINVESTAV), Guadalajara, México en el año 2022, y actualmente se encuentra trabajando para obtener el grado de Doctora en Ciencias en Ingeniería Eléctrica.