

Programa para determinar los parámetros que caracterizan el oleaje marino y simular su comportamiento

Ángel Orlando Castellano Sánchez E-MAIL: angel.castellano@uo.edu.cu
Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente.

Raciel David Lago Solan E-MAIL: raciel.lago@uo.edu.cu
Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente.

Henry Bory Prevez E-MAIL: bory@uo.edu.cu
Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente.

RESUMEN

La undimotriz posibilita generar electricidad a partir de la energía cinética contenida en las olas del mar. Determinadas localidades de la zona costera de Santiago de Cuba brindan potencialidades para explotar este recurso. El objetivo es presentar un programa implementado en Matlab 2015, para determinar, en función de disimiles velocidades del viento y sus direcciones, los parámetros que caracterizan el comportamiento del oleaje, generar una simulación animada en 3D donde se reproduzca el comportamiento de este y determinar la densidad lineal de potencia, kW/m, tomando los de mayor incidencia en la zona de El Sardinero. Se diseñó el programa "Niord" y se comprobó su precisión por comparación con datos registrados, obteniéndose valores semejantes a los reportados en una estación meteorológica.

PALABRAS CLAVES: energía undimotriz, oleaje, parámetros, programa, zona costera de Santiago de Cuba

Program to determine the parameters that characterize the marine waves and simulate their behavior

ABSTRACT

The waves energy let get electricity from kinetic energy contained in the sea waves. Certain localities of the coastal zone of Santiago de Cuba offer potentialities to exploit this resource. The objective is to present a software implemented in Matlab 2015, to determine, based on dissimilar wind speeds and directions, the parameters that characterize wave behavior, generate a 3D animated simulation where the behavior of this is reproduced and determine the Linear power density, kW/m, taking those with the highest incidence in the El Sardinero area. The "Niord" software was designed and its accuracy was verified by comparison with recorded data, obtaining values similar to those reported in a meteorological station.

KEYWORDS: wave energy, waves, parameters, software, coastal zone of Santiago de Cuba.

01 INTRODUCCIÓN

La energía undimotriz surge como una alternativa basada en la energía que transportan las olas a lo largo de los océanos del mundo. Esta forma de energía puede presentar un gran potencial, como alternativa a las energías obtenidas de la quema de combustibles fósiles, para la generación de energía eléctrica en determinadas zonas según las características del clima y de la costa marítima (Zhenyu et al. 2018).

La disponibilidad de la energía undimotriz en regiones densamente pobladas de Europa y América del Norte la convierten en una fuente renovable de energía (FRE) innovadora y atractiva. Mientras la energía solar depende de los días despejados y la eólica tiende a disminuir durante la mañana, las olas producen energía durante todo el día, lo que le permite formar parte de las energías más continuas entre el grupo de FRE. En Cuba se han realizado estudios para evaluar las potencialidades de las energías del mar (Hernández et al. 2019) y (Pérez-Martínez et al. 2021) pero quizás la FRE menos explorada en Cuba es la undimotriz, los estudios relacionados con esta fuente parten de caracterizar el oleaje marino identificando la altura, período, celeridad y densidad lineal de energía que posee el oleaje en una región determinada.

El objetivo de este trabajo es presentar un programa, registrado en el Centro Nacional Derecho de Autor (CENDA) con número 0150-01-2022, que calcula los parámetros anteriores a partir de la magnitud de las velocidades de los vientos y sus direcciones en la región bajo análisis, además se muestra al usuario una animación en 3D del comportamiento del océano ante los valores del viento y direcciones que se le introduzcan al programa.

02 MANIFESTACIONES DE LAS ENERGÍAS DEL MAR

La energía del mar se manifiesta, según se reporta en (Hernández et al. 2019) y (Viloria 2020), bajo cinco formas: oleaje, mareas, corrientes marinas, gradiente térmico y gradiente salino. El autor (Narasimalu 2020) desglosa el potencial energético mundial mostrando que las reservas de energías provenientes del mar son: energía mareomotriz de 300 TWh/año; energía de las corrientes marinas de 800 TWh/año; energía undimotriz de 80 000 TWh/año, corroborado por (Zhenyu et al. 2018); energía de gradiente térmico 10 000 TWh/año; y energía debida al gradiente salino 2 000 TWh/año. Esto evidencia que la undimotriz es la de mayor potencial energético.

En el mundo se han realizado diversos estudios sobre la energía undimotriz, en los cuales se ha estimado que el potencial de energía de las olas es aproximadamente de 2 TW y de esta cantidad entre el 10 y el 25 % puede ser transformada en electricidad, no obstante, a pesar de las ventajas de esta FRE frente a otras no presenta tanto desarrollo, es por esto que su comercialización a gran escala es poca en todo el mundo. Pese a esto, la investigación en tecnologías y posibles sitios para su implementación se ha intensificado en los últimos años dando como resultado el estudio de potencial en países como Italia, España, México, Chile, entre otros. Además, de sitios específicos para probar nuevas tecnologías como por ejemplo España, que actualmente tiene tres sitios de prueba para la energía de las olas: Biscay Marine Energy Platform (Bimep), la planta de energía de las olas de Mutriku que ahora es usada como sitio de prueba y PLOCAN en las islas Canarias, que incluye un área marítima de 23 km² desde la costa hasta 600 m de profundidad. Durante el 2015 se instalaron y ensayaron dos aparatos de energía undimotriz en PLOCAN: el prototipo W1 desarrollado por la compañía española Wedge Global y el PENGUIN II prototipo desarrollado por la empresa WELLO instalado en septiembre de 2015. (González et al. 2019)

En comparación con el resto de las FRE más empleadas a nivel global, según (Haim et al. 2019) se tiene que: solar 100-200 W/m², eólica 400-600 W/m² y las olas 2-3 kW/m². La energía undimotriz o energía de las olas es un recurso renovable disponible en todo el mundo, con un potencial de energía estimado de 200 a 300 GW.

MANIFESTACIONES DE LAS ENERGÍAS DEL MAR EN CUBA

De las cinco formas de obtener energía de los mares, solo es posible la explotación de tres de ellas en los mares aledaños a Cuba, estas son: energía de las corrientes de marea, energía de las olas (Undimotriz) y el gradiente de energía térmica del océano (OTEC, del inglés). Para la costa norte de la región oriental de Cuba los meses de mayor aprovechamiento energético a partir del oleaje ocurren en el trimestre noviembre-enero con valores entre 5-8 kW/m (Hernández et al. 2019).

Algunos autores definen kW/m como energía expresada en kW por cada metro de frente de onda o potencia por metro de frente de onda de una onda sinusoidal, el autor (González et al. 2019) la denomina densidad media de energía o potencia de energía undimotriz, otros autores la designan como potencial energético de las olas, otra definición encontrada en la literatura, como en (Narasimalu 2020), es densidad de potencia de las olas. Los autores de este artículo definirán kW/m como densidad lineal de potencia, por ser la cantidad de potencia por unidad de longitud del frente de onda de la ola.

Es importante aclarar la diferencia entre las magnitudes medidas en kW/m o kW/m², la primera se refiere a la densidad lineal de potencia y el segundo según el Sistema Internacional de Unidades (SI) es la magnitud que caracteriza a la intensidad dígase potencia transferida por unidad de área.

Se pretende mostrar cómo las velocidades del viento en el litoral costero cubano pueden influir en el comportamiento del oleaje y a su vez en la capacidad de generación de una instalación undimotriz. Existen estudios que cuantifican el potencial en el Caribe entre 5 y 7 kW/m desde los meses de diciembre y abril, en el Pacífico entre 3 y 4 kW/m durante todos los meses del año, en países como España cuentan con una densidad lineal de potencia de 100 kW/m, en los de Suramérica como Chile puede llegar hasta 40 kW/m, Colombia al contar con los océanos Pacífico y Atlántico su densidad lineal de potencia oscila entre 3 y 15 kW/m según la época del año. Del mapa del oleaje que se muestra en la figura 1, actualmente empleado por (Pérez 2017) y (Haim et al. 2019), se obtiene que los valores límites son 8 kW/m y 100 kW/m.

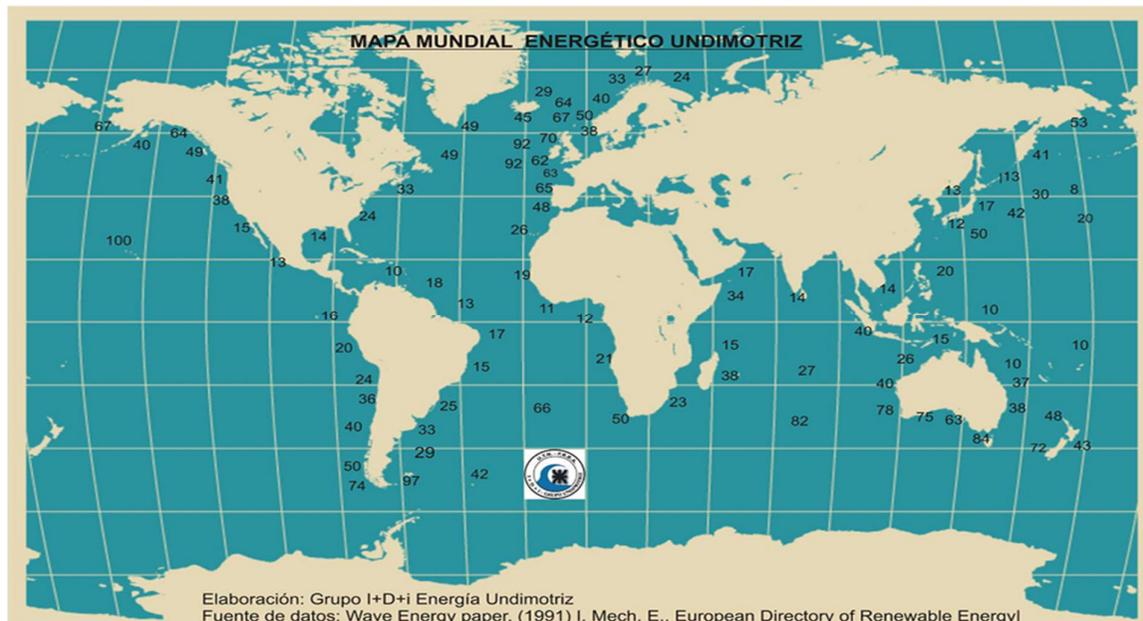


Figura 1. Mapa energético mundial undimotriz (Haim et al. 2019)

MODELO MATEMÁTICO ESTÁTICO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD LINEAL DE POTENCIA

Las dos componentes de energía de las olas son la potencial y la cinética. La energía potencial es asociada con la forma o elevación de la ola y la cinética está asociada al movimiento o velocidad de las partículas de agua que la constituyen. Para olas regulares se tiene la ecuación (1) según (Viloria 2020):

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2}{8} \quad (1)$$

Donde E es la energía total por unidad de área superficial de agua en kg/s^2 , ρ es la densidad del agua de mar en kg/m^3 , g es la aceleración de la gravedad, en m/s^2 y H es la altura de la ola, en m.

La relación entre el período de la ola (T), en s, y la longitud de la ola (L), en m, está dada por (2):

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \quad (2)$$

La transferencia de energía de las olas es conocida como flujo de energía, lo que los autores proponen llamar densidad lineal de potencia, P, en W/m. Los autores de (Pérez 2017) y (Viloria 2020) reportan que las olas de pequeña amplitud en aguas profundas tienen una energía por unidad de onda dada por (3):

$$P = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T}{32\pi} \quad (3)$$

Otros autores refieren que el flujo de energía en ondas irregulares se determina por la ecuación (4) como:

$$P = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T}{64\pi} \quad (4)$$

La relación correspondiente a la densidad lineal de potencia promedio que se encuentra en las olas irregulares expresada en kW/m está dada por la ecuación (5) según (González et al. 2019) y (Gavidia 2020):

$$P = 0,49 \cdot H_s^2 \cdot T_z \approx 0,5 \cdot H_s^2 \cdot T_z \quad (5)$$

Donde H_s es la altura significativa de la ola, en m, y T_z es el intervalo de tiempo promedio entre alturas máximas sucesivas, en s. Esta ecuación es utilizada para no sobrestimar la energía potencial de la ola ya que las olas son generalmente irregulares en el océano, sin embargo, en (Pérez 2017) se explica que la ecuación (5) se puede expresar como:

$$P = k \cdot H_s^2 \cdot T_z \quad (6)$$

Donde k es una constante, en $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^4)$, que viene dada por la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\rho \cdot g^2}{64\pi} \quad (7)$$

La altura significativa H_s , se define como la altura promedio del tercio de olas más altas dentro de un grupo de olas considerado, en m. Este valor se aproxima a la altura que un observador en una embarcación reporta de su inspección visual del estado del mar, ya que tal observador tiende a omitir las olas más pequeñas y menos evidentes (Pérez 2017). Los mares reales contienen olas que poseen alturas, períodos y direcciones aleatorios. En un corto período de tiempo, las características de los mares reales permanecen constantes, considerándose un estado del mar. Con el fin de describir los estados del mar y determinar sus características relevantes para los dispositivos de energía undimotriz, se utilizan los parámetros estáticos descritos anteriormente, desde las expresiones (1)-(7), los cuales se pueden obtener utilizando dispositivos de medición como las boyas oceanográficas, también conocidas como boyas de oleaje (Pérez 2017).

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

El programa implementado recibe el nombre de "Niord" por su relación con la mitología nórdica. En noruego Njörðr (Niord) es uno de los Vanir (dioses nórdicos), dios de la tierra fértil y de la costa marina, así como, el de náutica y la navegación. La razón principal por la que se seleccionó este nombre es como homenaje a las investigaciones realizadas por estos países respecto a las energías del mar, siendo los principales referentes en el mundo cuando de energías provenientes del mar se trata, además, de la navegación y construcción de embarcaciones.

Niord es un programa que, dados la dirección y velocidad del viento simula el comportamiento de la superficie marina mediante una animación en 3D de la misma y calcula la altura, el período, longitud, celeridad, la densidad lineal de potencia del frente de ola y otros datos referentes a las olas del mar. Estos datos son utilizados posteriormente para determinar la energía eléctrica generada por una instalación undimotriz emplazada en la costa. El Niord fue implementado en el entorno de programación MatLab 2015 y se realizó una aplicación ejecutable para independizarlo del MatLab.

Al ejecutar el programa se despliega la ventana del menú principal, ver figura 2, en dicha ventana el usuario podrá apreciar una imagen móvil del prototipo de central undimotriz de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) de Argentina (Haim et al. 2019), a continuación de la parte inferior de esta imagen le sigue el nombre del programa, Niord v1.0, y los botones Inicio, Matriz de potencia, Escenarios, Configuración, Ayuda y Salir.



Figura 2. Menú principal del programa

Para comenzar el estudio, el usuario accede mediante el botón de *Inicio* del menú principal presentado en la figura 2 a la ventana de simulación mostrada en la figura 3, la cual contiene los 5 paneles siguientes: Características del viento, en el cual se entra el valor numérico de la velocidad del viento en m/s o km/h y se selecciona su dirección; Características del oleaje, muestra la información de las olas obtenida de la simulación al dar clic en *Run* (correr o ejecutar); Energía del oleaje, se muestran los datos energéticos de las olas; Sistema undimotriz, se utiliza para establecer la eficiencia y potencia nominal del sistema undimotriz seleccionado; y Potencia eléctrica generada, en este se obtiene la energía eléctrica generada por el sistema undimotriz a partir de los metros de frente de ola.

Matriz de potencia permite comprobar la energía eléctrica que es capaz de generar el sistema undimotriz dado un rango de altura y período de las olas. Para crear la matriz, en la ventana emergente Rangos, ver figura 4, se selecciona la unidad de medida de la potencia (W o kW) y se establecen los rangos para la altura y el período. Cada rango es ajustado por usuario al entrar: valor mínimo, valor máximo y el incremento. A modo de ejemplo: si para la altura y el período se definen como valor mínimo 1 y máximo 10 con incremento de 1, la matriz se conformará con los valores de altura y período: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10. Al presionar el botón *Aceptar* se creará la matriz de potencia, que se muestra en la figura 5.

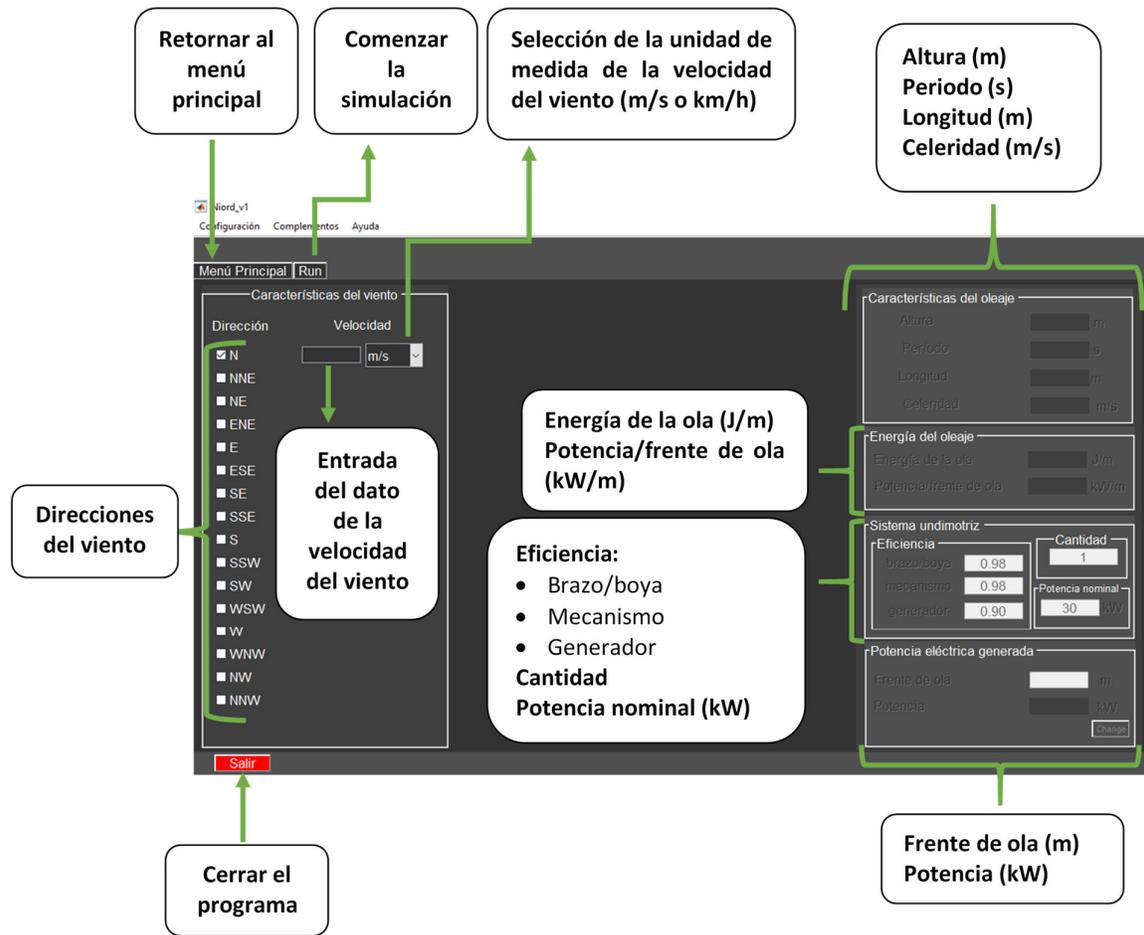


Figura 3. Ventana de simulación

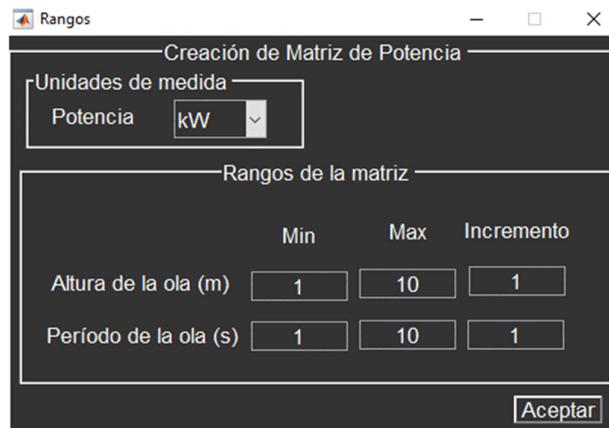


Figura 4 Ventana para crear la Matriz de potencia

		Período (s)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Altura (m)	1	0.82	1.64	2.46	3.28	4.10	4.92	5.74	6.56	7.39	8.21
	2	3.28	6.56	9.85	13.1	16.4	19.7	22.9	26.2	29.5	32.8
	3	7.39	14.7	22.1	29.5	36.9	44.3	51.7	59.1	66.5	73.9
	4	13.1	26.2	39.4	52.5	65.6	78.8	91.9	105	118	131
	5	20.5	41.0	61.5	82.1	102	123	143	164	184	205
	6	29.5	59.1	88.6	118	147	177	206	236	266	295
	7	40.2	80.4	120	160	201	241	281	321	362	402
	8	52.5	105	157	210	262	315	367	420	472	525
	9	66.5	133	199	266	332	399	465	532	598	665
	10	82.1	164	246	328	410	492	574	656	739	821

Figura 5 Ejemplo de Matriz de potencia

La opción *Escenarios*, ver figura 6, que se encuentra en fase de desarrollo por los autores, permitirá la creación de una base de datos personalizada para el usuario, facilitándole llevar el registro del comportamiento oceánico, ya sea en 24 horas, semanal o mensual, y así analizar cómo se comporta el océano con el cambio de las estaciones y en los meses del año.

Creación de escenario

Tipo de estudio: 24 horas

Escala: 1:

Creación de registros

hora: velocidad:

Duración: dirección: N

Registros

	1	2
1		
2		
3		
4		

Figura 6 Ventana para la creación de Escenarios

En relación con las opciones de *Configuración*, ver figura 7, en la ventana emergente se muestran dos paneles: Simulación y Métodos de cálculo. En Simulación el usuario tiene la posibilidad de ajustar el escenario de la simulación en función de: Tiempo de simulación, donde especifica el tiempo de duración de la animación en 3D de la superficie oceánica; Profundidad, selecciona la profundidad del sistema undimotriz; y Parámetros iniciales de simulación, permite configurar la vista de la animación del comportamiento oceánico.

En el panel Métodos de cálculo, el usuario puede configurar las opciones: Viento, al seleccionar la forma en que serán procesados los datos introducidos del viento siendo esta o un análisis vectorial o un análisis estadístico; y Oleaje, en este puede elegir el modelo matemático para el cálculo de los parámetros energéticos y de las características de las olas como se muestra en los paneles de la derecha de la figura 7. En la versión actual del Niord se encuentran disponibles el modelo matemático en régimen estático, definido en el epígrafe *Modelo matemático estático para determinar la densidad lineal de potencia* que se escoge activando la opción Datos de Geocuba como se observa en la figura 7; y el modelo *Beaufort-Douglas*, modelo estadístico que responde a las escalas de medida empírica para la intensidad del viento de Beaufort.

El modelo *Beaufort-Douglas* se basa principalmente en el estado del mar, de sus olas y la fuerza del viento, la escala Douglas es una escala que clasifica los diferentes estados del mar en 10 grados tomando como referencia el tamaño de las olas, esta escala tiene dos códigos, uno para estimar el estado del mar y otro para describir la altura de las olas.

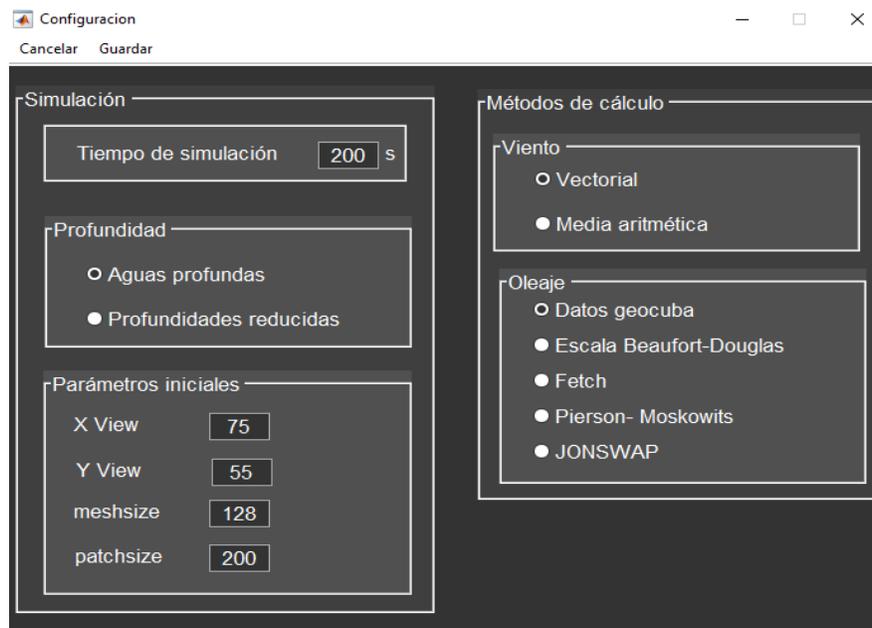


Figura 7 Ventana de Configuración

Por medio del botón de *Ayuda* el usuario puede acceder a la ventana mostrada en la figura 8 donde se describe el programa, se ilustran los elementos que integran la interfaz del Niord, así como, el procedimiento para su manejo.

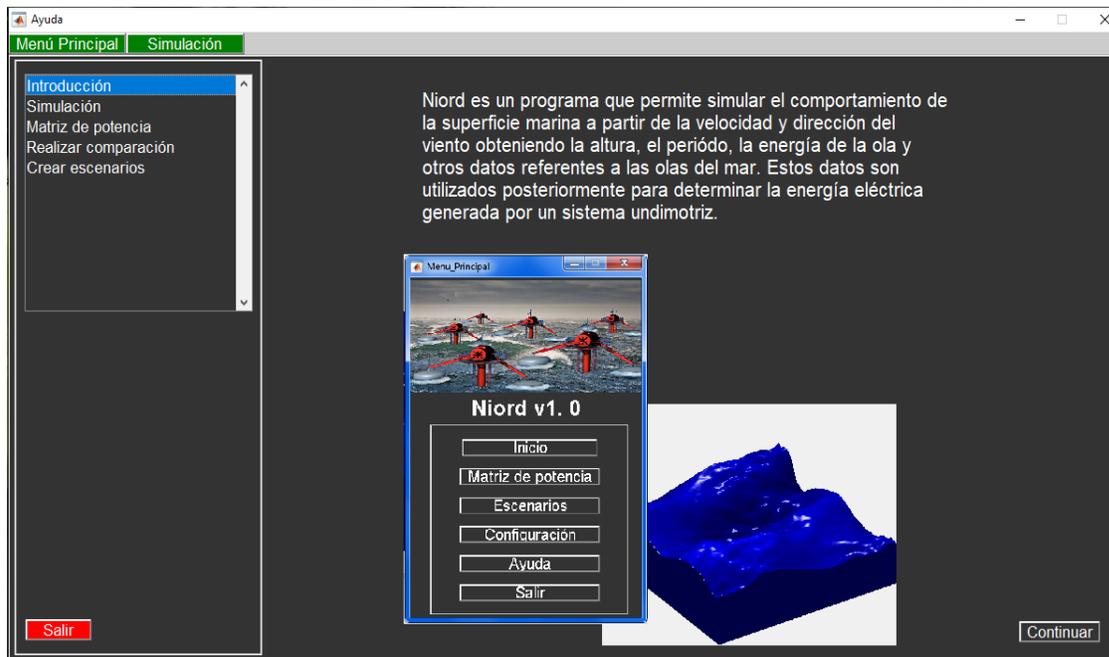


Figura 8 Ventana de Ayuda del Niord

Los estudios que se realizan en el mundo para predecir o recrear el comportamiento oceánico, así como, de las potencialidades energéticas asociadas al mismo necesitan del acceso por parte de los investigadores a sitios web de Centros de Meteorología, los cuales poseen bases de datos con un registro histórico de todas las variables climatológicas. En ocasiones, el acceso a estos datos se torna difícil por la carencia de los mismos, la disponibilidad de la conexión a internet o estar sujetos a pago. Para superar estas dificultades se implementó el programa Niord, el cual le permite al investigador con solo introducir datos de dirección y velocidad del viento obtener altura, período, longitud, celeridad y densidad lineal de potencia. Se emplean los datos de dirección y velocidad del viento ya que son de fácil acceso y están disponibles en páginas libres como www.insmet.cu, www.meteoblue.com y www.windfinder.com o de estaciones meteorológicas como la empleada en el presente análisis, Estación Meteorológica ubicada en el Faro del Morro de Santiago de Cuba (GEOCUBA 2017).

Se destaca que el Niord es un programa que realiza los cálculos para determinar los parámetros que caracterizan el oleaje dígase altura, período, longitud y celeridad del oleaje, lo muestra al usuario en conjunto con la animación en 3D del océano y además determina la densidad lineal de potencia del oleaje. Lo anterior diferencia al Niord de otros programas similares, como es el caso del DEPTHWAVE implementado en el Departamento de Automática y Sistemas Computacionales de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, ya que estos solamente muestran la animación en 3D del océano y requieren la entrada por parte del usuario de datos estadísticos, derivados de la oceanografía física o de páginas web con dichas bases de datos.

03 RESULTADOS DE LA EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

Para comprobar la precisión del programa se comparan sus resultados con los datos registrados en la Estación Meteorológica ubicada en el Faro del Morro de Santiago de Cuba en el año 2017. Los datos registrados se tabulan en la tabla 1, estos fueron tomados de (GEOCUBA 2017). Es importante

aclarar que los datos de densidad lineal de potencia en kW/m que aparecen en dicha tabla no son reportados por (GEOCUBA 2017), constituyen fuente propia de los autores del presente trabajo, obtenidos aplicando como modelo matemático las expresiones (1)-(7).

Tabla 1. Comportamiento promedio del viento incidente en la zona costera de Sardinero en la provincia de Santiago de Cuba en el año 2017

Velocidad del viento		Direcciones del Viento											
		Sur (S)				Sureste (SE)				Suroeste (SW, del inglés)			
m/s	km/h	H (m)	T (s)	L (m)	P (kW/m)	H (m)	T (s)	L (m)	P (kW/m)	H (M)	T (s)	L (m)	P (kW/m)
3	10,8	0,75	5,56	46,7	3,07	0,45	3,96	23,69	0,79	0,68	5,21	41,01	2,36
6	21,6	1,49	7,01	74,2	15,27	1,07	5,6	47,38	6,29	1,35	6,57	65,09	11,75
9	32,4	2,24	8,02	97,2	39,49	1,77	6,86	71,07	21,09	2,03	7,52	85,3	30,41
12	43,2	2,98	8,83	118	76,94	2,53	7,92	94,76	49,74	2,7	8,27	103,3	59,16
15	54	3,73	9,51	137	129,83	3,35	8,86	118,4	97,56	3,38	8,91	119,9	99,88

[fuente: (GEOCUBA 2017)]

De la tabla 1 solo se requieren los datos de velocidad del viento y su correspondiente dirección para ejecutar los cálculos en el Niord. La captura de pantalla de la ejecución de este se muestra en la figura 9 para un viento proveniente del sur con una velocidad de 3 m/s. En la tabla 2 se comparan los resultados obtenidos con el Niord con los valores de altura (H), período (T), longitud (L) y densidad lineal de potencia (P) reportados en la tabla 1, junto a los valores del error relativo.

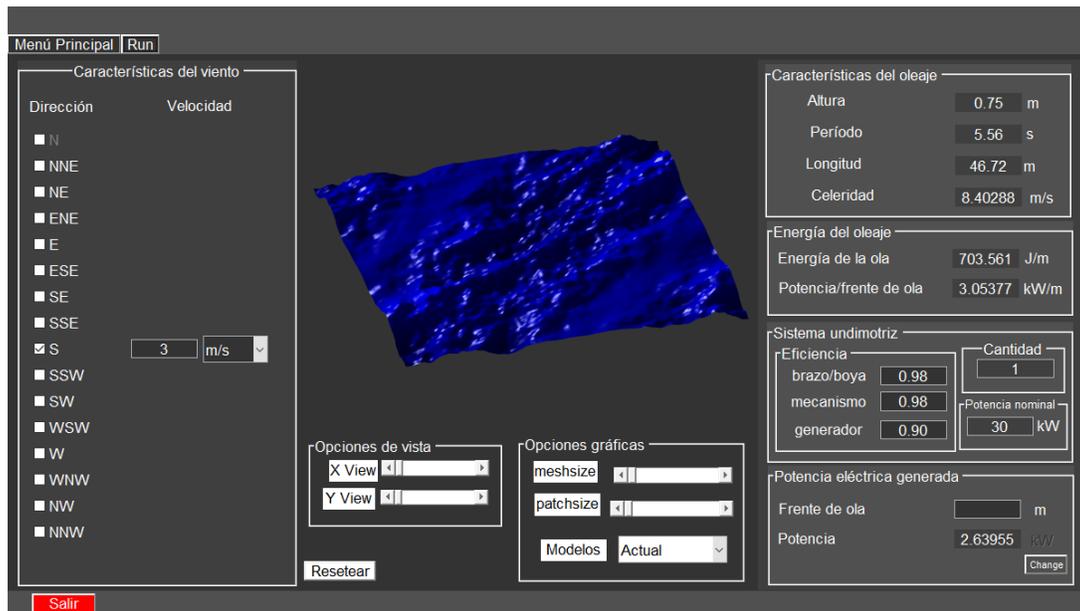


Figura 9. Simulación del Niord para un viento incidente proveniente del Sur con una velocidad de 3 m/s

Tabla 2. Comparación entre los datos reportados por (GEOCUBA 2017) vs los resultados del Niord para un viento de 3 m/s con dirección sur

Oleaje	GeoCuba	Niord	Error (%)
H (m)	0,75	0,75	0,00
T (s)	5,56	5,56	0,00
L (m)	46,7	46,72	0,04
P (kW/m)	3,07	3,05	0,65

De la tabla 2 se aprecia que para los parámetros de altura (H) y período (T) coinciden los resultados siendo nulo el error relativo, mientras que para la longitud (L) y densidad lineal de potencia (P) los errores relativos son de 0,04 y 0,65 % respectivamente, como estos no superan el 1 % del valor tabulado o calculado se considera, desde el punto de vista de ingeniería, que el programa tiene la exactitud adecuada.

Si se realiza otra corrida del Niord considerando un viento de 15 m/s con dirección sur-este se obtienen los resultados mostrados en la figura 10. En la tabla 3 se tabulan los resultados del Niord, los datos de la tabla 1 para las mismas condiciones y los respectivos errores relativos.

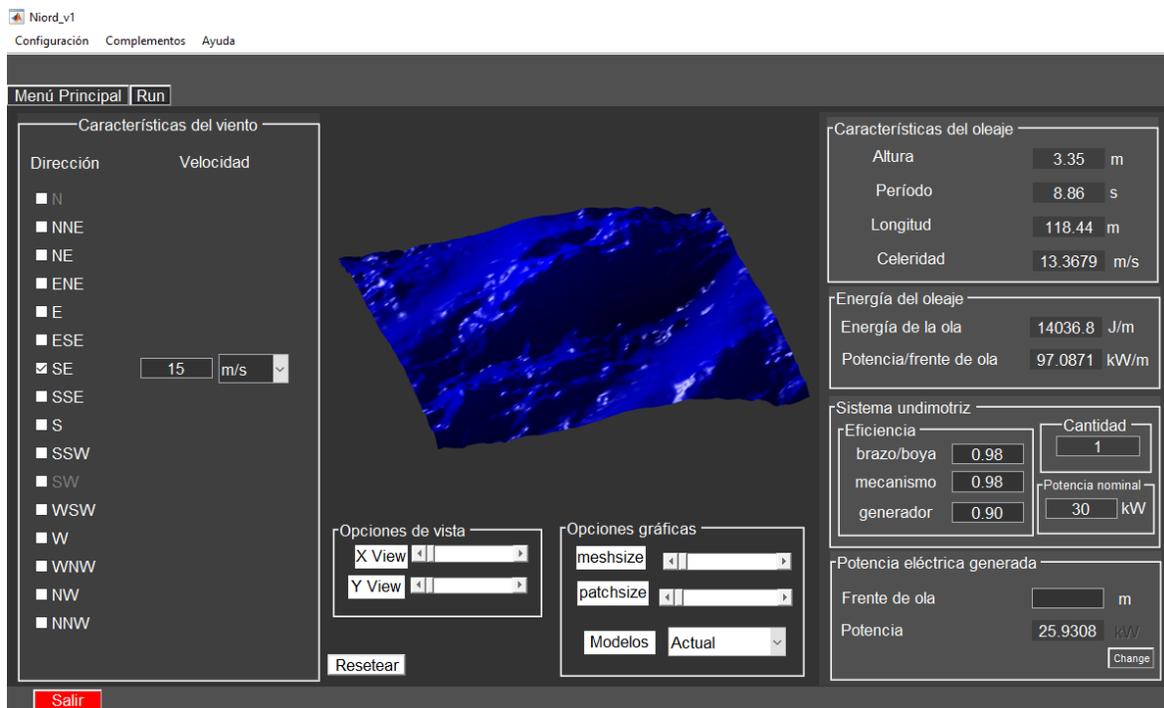


Figura 10. Simulación del Niord para un viento incidente proveniente del Sur-este con una velocidad de 15 m/s

Tabla 3. Comparación entre los datos reportados por (GEOCUBA 2017) vs los resultados del Niord para un viento de 15 m/s con dirección sur-este

Oleaje	GeoCuba	Niord	Error (%)
H (m)	3,35	3,35	0,00
T (s)	8,86	8,86	0,00
L (m)	118,4	118,44	0,03
P (kW/m)	97,56	97,08	0,49

La tabla 3 permite apreciar que para los parámetros de altura (H) y período (T) coinciden los resultados nuevamente, por lo que el error relativo es cero. Para la longitud (L) y densidad lineal de potencia (P) los errores relativos son de 0,03 % y 0,49 % respectivamente, como estos no superan el 1 %, se considera que el Niord presenta una adecuada exactitud para aplicaciones de ingeniería.

Si se comparan las imágenes de la animación del comportamiento oceánico figura 9 y figura 10, se puede notar cómo el oleaje se hace más irregular y de mayor tamaño con el incremento de la intensidad del viento.

El parámetro de mayor interés desde el punto de vista energético lo constituye la densidad lineal de potencia (kW/m), en la tabla 4 se presentan para comparación los valores de este parámetro obtenidos por el Niord, los valores calculados mostrados en la tabla 1 y los correspondientes errores relativos, para todas las direcciones y velocidades del viento reportadas en la tabla 1.

Tabla 4. Comparación entre los valores calculados vs los resultados del Niord para la densidad lineal de potencia (kW/m)

Viento	S			SE			SW		
	Calculado	Niord	Error	Calculado	Niord	Error	Calculado	Niord	Error
m/s	P (kW/m)	P (kW/m)	(%)	P (kW/m)	P (kW/m)	(%)	P (kW/m)	P (kW/m)	(%)
3	3,07	3,05	0,61	0,79	0,78	0,87	2,36	2,35	0,59
6	15,27	15,19	0,53	6,29	6,26	0,49	11,75	11,69	0,50
9	39,49	39,29	0,49	21,09	20,98	0,51	30,41	30,25	0,52
12	76,94	76,56	0,49	49,74	49,49	0,51	59,16	58,86	0,50
15	129,83	129,19	0,49	97,56	97,08	0,50	99,88	99,39	0,49

Los valores del error relativo para las diferentes direcciones y velocidades del viento tabulados en la tabla 4 son menores al 1 % del correspondiente valor calculado, lo que demuestra que el Niord tiene una exactitud adecuada para aplicaciones de ingeniería.

Se puede apreciar cómo el Niord calcula a partir de un único dato de dirección y velocidad del viento, la altura, período y longitud, obteniendo valores cercanos o aproximados a los datos de la estación meteorológica de El Faro del Morro en Santiago de Cuba, siendo la diferencia en el orden de las décimas y el error relativo reportado no supera el 1%. Lo cual demuestra la utilidad del Niord como herramienta para el análisis, evaluación y la toma de decisiones.

04 CONCLUSIONES

Se presentó el programa "Niord", implementado en Matlab 2015, para determinar en función de las velocidades del viento y sus direcciones, los parámetros que caracterizan el comportamiento del oleaje. Se comprobó su exactitud por comparación con datos registrados en la estación meteorológica de El Faro del Morro en Santiago de Cuba y calculados mediante expresiones reportadas en la literatura obteniéndose un error relativo inferior al 1 %, lo cual permite emplear el Niord como herramienta de análisis, evaluación y toma de decisiones.

05 REFERENCIAS

Gavidia-Medina F. J. (2020). "Campo extremo del oleaje frente a la costa de El Salvador", Realidad y Reflexión, no. 54, ISSN 1992-6510, e-ISSN 2520-9299, Universidad Francisco Gavidia, Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI).

GEOCUBA NC-ISO 9001-2001 (2017). "Estudio de Clima de Oleaje en el Sector Costero de Sardinero, Santiago de Cuba", Registro No. 013-2007, Grupo Empresarial GeoCuba, Oriente Sur: Agencia Estudios Marinos.

González-Dória Y., Herrera-Medina M. y Ávila-Díaz C. (2019). "Estudio del potencial energético undimotriz del departamento de Córdoba a través de un dispositivo absorbedor puntual tipo on-shore", INGE CUC, 16(1): 141-155. ISSN 2382-4700 (Electrónico), ISSN 0122-6517 (Impreso), Colombia, DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.16.1.2020.010>

Haim A., Pelissero M., Pozzo J., Gallo F., Jauregui M., Ceciaga N., de Vita G., Pitón L., Bufanio R., Muiño F., Carreras G., Gyssel P., Balbiani M., Maldonado N., Cirelli E., Montoneri M., Benitez N., Canepa E., Tula R., Bagnasco S. y Lifschitz A. (2019). "Energía Undimotriz - Tecnología Argentina Para la Generación de Energía Eléctrica", ASADES. Energías Renovables y Medio Ambiente, 44(): 39-47, ISSN en línea: 2684-0073 / ISSN impreso: 0328-932X.

Hernández J., Mitrani I., Cabrales J., Hidalgo A., Betancourt A., Morfa Y., Calzada A., García R., Delgado I., Reyes D., Carracedo D., Sánchez B., Rodríguez A., Israel M., Ledesma E. (2019). "Caracterización de Las Potencialidades Energéticas de Los Mares Circundantes a Cuba", CUBAENERGÍA, no.11, ISSN: 2219-6919, URL: www.cubaenergia.cu

Narasimalu S. (2020). "Floating Clean Multi-Energy Systems Towards Driving Blue Economic Growth". n: Wang, C., Lim, S., Tay, Z. (eds) WCFS2019. Lecture Notes in Civil Engineering, 41(). Springer, Singapore, Print ISBN: 978-981-13-8742-5, Online ISBN: 978-981-13-8743-2 https://doi.org/10.1007/978-981-13-8743-2_19

Pérez-Martínez J. A., Sánchez-Valdés E., Sánchez-Yañez P. y Santos-Fuentefría A. (2021). "Estimación de energía de un parque hidrocínético: caso de estudio Bahía de Banes", Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 42(1): 81-94, ISSN 1680-0338.

Pérez-Zapata J. (2017). "Identificación y cuantificación del potencial de energía undimotriz en la costa del departamento del Atlántico, Colombia", Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo, Institución Universitaria ITSA. Soledad-Atlántico, Colombia, julio, 17(2): 93-102, ISSN: 1900-771X, ISSN: 2422-4324 (En Línea)

Viloria-Durango G. (2020). “Análisis de alternativas de energías renovables undimotriz, aprovechando el oleaje de San Andrés Islas”, *Boletín Semillas Ambientales*, Bogotá, Colombia, 14(2): 80-90, ISSN: 2463-0691 (En línea).

Zhenyu L., Saddiqi A., Dias L., Narayanamurti V. (2018). “Towards sustainability in water-energy nexus: Ocean energy for seawater desalination”, *ELSEVIER*, 82(3): 3833-3847, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.087>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Angel Orlando Castellano Sanchez <https://orcid.org/0000-0001-7996-5611>
Participó en el diseño de la investigación. Contribuyó en la interpretación de los datos y la revisión del código del programa, en el análisis de los resultados y en la redacción del informe final. Participó en la búsqueda de información.

Raciél David Lago Solano <https://orcid.org/0000-0002-9723-9362>
Realizó la programación y el diseño de la interface gráfica de usuario del programa. Realizó búsqueda de información.

Henry Bory Prevez <https://orcid.org/0000-0001-5508-0501>
Trabajó en el diseño de la investigación, en la interpretación de los datos y en la búsqueda de información.
Participó en la redacción y revisión del informe final.