

## **ESTIMACIÓN DEL RECURSO EÓLICO MARINO EN LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, UTILIZANDO LA BASE DE DATOS ERA5**

Mayra ARREDONDO-GÁMEZ<sup>1</sup>, Héctor GARCÍA-NAVA<sup>1</sup>, Osvaldo RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ<sup>2</sup>, Alejandro LÁMBERT-ARISTA<sup>3</sup>

1 Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera Ensenada-Tijuana No. 3917, zona Playitas, 22860, Ensenada, B. C., México.

2 Instituto de Energías Renovables. Universidad Nacional Autónoma de México, A.P. 34, 62580 Temixco, Mor. México, México.

3 Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Calle de la Normal s/n, Col. Insurgentes Este, C.P. 21280, Mexicali, B. C., México.

[arredondom@uabc.edu.mx](mailto:arredondom@uabc.edu.mx), [hector.gnava@uabc.edu.mx](mailto:hector.gnava@uabc.edu.mx), [osroh@ier.unam.mx](mailto:osroh@ier.unam.mx),  
[alambert@uabc.edu.mx](mailto:alambert@uabc.edu.mx)

### **RESUMEN**

Actualmente, las metas nacionales e internacionales buscan, además de diversificar la matriz energética, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero generadas al producir energía eléctrica. Aunado a esta problemática, en México existen regiones aisladas de la red eléctrica nacional en las que las redes locales de distribución utilizan la generación de electricidad a partir de la quema de combustibles fósiles, contribuyendo con estas emisiones al cambio climático. Este es el caso de los estados de Baja California y Baja California Sur que se encuentran en la Península de Baja California. La Península de Baja California tiene 2.500 km de costa, repartida entre el Océano Pacífico y Golfo de California, por lo que se explora el uso de energías marinas para sustituir la generación por quema de hidrocarburos en la región. En particular, la energía eólica marina posee varias ventajas sobre la energía eólica en tierra. Una de ellas es que los vientos suelen ser más fuertes que los vientos en tierra, por lo tanto, existe la posibilidad de tener mayor potencial eólico. En la zona costera de esta región existen velocidades de viento promedio alrededor de los  $6 \text{ ms}^{-1}$ , las cuales son apropiadas para el funcionamiento de un aerogenerador. En este trabajo se presenta una climatología tanto de la energía eólica disponible como de la energía extraíble con diferentes aerogeneradores, seleccionados de acuerdo con las velocidades de viento y las características climáticas del sitio. Para ello se utilizaron datos del reanálisis ERA5 de los últimos 20 años. Los resultados indican que la energía eólica marina es una alternativa viable para generar energía eléctrica en la región.

**Palabras clave:** energía eólica, energía renovable, reanálisis.

## **ABSTRACT**

Currently, national and international goals seek, in addition to diversifying the energy matrix, to reduce greenhouse gas emissions when producing electricity. In Mexico there are regions isolated from the national electricity grid in which local distribution networks use the generation of electricity from the burning of fossil fuels, contributing to climate change with these emissions. This is the case of the states of Baja California and Baja California Sur that are located on the Baja California Peninsula, which has 2.500 km of coastline, divided between the Pacific Ocean and the Gulf of California, for which the use of marine energy is being explored to replace generation by burning hydrocarbons in the region. In particular, offshore wind power has several advantages over onshore wind power. One of them is that the winds are usually stronger than the winds on land, therefore, there is the possibility of having greater wind potential. In the coastal zone of this region, average wind speeds of around  $6 \text{ ms}^{-1}$  at 10 m height were found, which is an appropriate speed for the operation of a wind turbine. In this work, a climatology of both the available wind energy and the extractable energy with different wind turbines, selected according to the wind speeds and the climatic characteristics of the site, is presented. For this, data from the ERA5 reanalysis of the last 20 years were used. The results found indicate that offshore wind energy is a viable alternative in the region to generate electricity.

**Key words:** wind energy, renewable energy, reanalysis.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Algunos de los problemas actuales que enfrentan todos los países es el cambio climático, el aumento de la población, con ello mayor demanda de recursos naturales y la sobreexplotación de estos. La creciente demanda de energía eléctrica y la generación de esta sin emisiones de gases de efecto invernadero son un gran desafío global.

La energía eólica marina es una de las fuentes de energía renovable con un alto potencial de desarrollo, presenta algunas ventajas en comparación con la utilización de la energía eólica en tierra. Por lo general, en mar abierto se encuentra mayor recurso eólico, velocidades de viento menos variables y la disponibilidad de áreas grandes para explorar e instalar parques eólicos (Costoya, 2020). La capacidad instalada en parques eólicos marinos es de 35,3 GW a nivel global. Actualmente, el interés en la energía eólica marina está aumentando debido a la generación de energía que puede obtenerse, a los perfiles uniformes en el mar y al decaimiento de los costos (REN21, 2021). Existe un especial interés en su implementación debido a que cada vez hay menor disposición de terreno para la instalación de parques eólicos en tierra.

Li et al. (2018) demostraron mediante un análisis estadístico del potencial eólico cerca de la costa y en alta mar, mostró como resultado que en alta mar se produciría al menos 1,7 veces más energía que en tierra o cerca de la costa. Además, hay una reducción de costos en la fabricación de aerogeneradores e instalación de los parques eólicos, así como avances en la construcción de estos, lo que permitirá instalar aerogeneradores en aguas más profundas donde se tiene un recurso más estable (Costoya, 2019).

La implementación de parques eólicos marinos permitirá reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y generará una aportación importante para cumplir los objetivos de la Agenda 2030 propuestos por la Organización de las Naciones Unidas (Beiter, 2016). En México, predomina el uso de combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica primaria, las energías renovables representan solo el 10,46%; energía solar, eólica, biomasa, geoenergía e hidroenergía componen este porcentaje. En cuanto a la generación de energía (GWh), transcurrido el primer semestre del 2018 la generación con energías renovables alcanzó el 24,12% una cantidad cercana al 25% meta que se estableció en este país en la Ley de Transición Energética en la que la que el 5,74% corresponde a energía eólica (SENER, 2019).

Para el aprovechamiento del recurso eólico la primera etapa es identificar sitios que tengan velocidades de viento suficientes para el funcionamiento de aerogeneradores a gran escala. Dado que comúnmente no se cuenta con información suficiente de estaciones meteorológicas se ha optado utilizar datos de reanálisis tanto en el ámbito académico como en el industrial para modelar el viento (Olauson, 2018). Existen diversos productos de reanálisis globales, como el MERRA, JRA55 o ERA5, este último se seleccionó para este trabajo ya que posee mayor resolución espacial y temporal, así como distintas alturas en las que se ha medido la velocidad de viento (10 y 100 metros). ERA5 es uno de los reanálisis más utilizados en la industria para caracterizar el recurso eólico. La utilización de los datos de ERA5 ha sido útil para el estudio del viento, presenta errores menores, mejores correlaciones y estimaciones más precisas que con otros reanálisis (Olauson, 2018) (Floors, 2019) y actualmente, se considera una fuente confiable para estudios de energía eólica (Gualteri, 2021).

En este trabajo, se evaluó el recurso eólico marino en la costa del Pacífico de la Península de Baja California, México, con el fin de cuantificar el recurso y determinar si existen zonas en las que sea posible la instalación de parques eólicos marinos para la generación de energía eléctrica.

## **2. MÉTODOS**

### **2.1. Sitio de estudio**

La costa Pacífica de la península de Baja California, se encuentra en la región noroeste de México. Los estados de Baja California y Baja California Sur se encuentran rodeadas por el Golfo de California y el Océano Pacífico. Para el análisis del recurso eólico, no se consideraron áreas naturales protegidas ni rutas marítimas.

### **2.2. Datos**

Para la evaluación del potencial eólico del sitio se utilizó información de la velocidad de viento a 100 m proveniente del reanálisis ERA5. ERA5 proporciona mediciones horarias de variables atmosféricas terrestres y oceánicas con una resolución de 31 km. En este trabajo se analizaron 20 años de años del año 2000 al 2019 y se extrajeron la velocidad y dirección del viento para su análisis.

Dado que la velocidad del viento aumenta con la altura, se utilizó una ley de potencia para calcular el viento a la altura requerida por los aerogeneradores (Shu et al., 2015):

$$\left(\frac{U}{U_R}\right)\left(\frac{Z}{Z_R}\right)^\alpha \dots\dots\dots(1)$$

donde  $U$  es la velocidad de viento a la altura  $Z$ ,  $U_R$  es la velocidad de viento de los datos disponibles a la altura  $Z_R$  y  $\alpha=0,14$  es el coeficiente de rugosidad para el océano.

**2.3. Procedimiento de análisis/Análisis**

Para aspectos de aprovechamiento de la energía eólica. Se recomienda analizar su velocidad y la dirección de viento durante un periodo de más de cinco años y estudiar su variabilidad, ya que el viento tiene variaciones en diferentes escalas de tiempo que son importantes para las proyecciones de generación de un parque eólico (Burton, 2001) (Chandel, 2014). Las velocidades medias del viento son útiles para identificar los periodos de tiempo en los que los aerogeneradores podrían estar en funcionamiento e identificar meses con mayor o menor producción de energía. Los parámetros estadísticos como la desviación estándar e índices de turbulencia indican la variabilidad del viento en determinada región y con esta información puede determinarse si es conveniente la instalación de un parque eólico.

Tener un recurso estable con la menor variabilidad es un aspecto indispensable para la producción de energía eléctrica.

La densidad de potencia  $P$  a las diferentes alturas se calculo como,

$$P(v) = \frac{1}{2}\rho v^3 / A \dots\dots\dots(2)$$

$$P(v) = \frac{1}{2}C_p\rho Av^3 \dots\dots\dots(3)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire. La potencia extraíble con diferentes aerogeneradores se calculó utilizando el área de barrido  $A$  y el coeficiente de potencia  $C_p$  de los aerogeneradores seleccionados. En esta evaluación de seleccionaron aerogeneradores que se muestran en la Tabla 1, cuyos coeficientes de potencia se encuentran entre 0,44 y 0,45 (es decir, con eficiencias del 44% y 45%). Se consideró la densidad del aire estándar  $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ .

Aerogenerador	Altura (m)	Diámetro (m)	Coficiente de potencia	Área de barrido (m <sup>2</sup> )
NREL 8 MW	102	159	0,44	19.855,65
NREL 10 MW	125	205	0,45	30.006,35
IEA 15 MW	150	240	0,48	45.238,93

Tabla 1: Aerogeneradores offshore Tomado de: [turbine-models/NREL\\_5MW\\_126\\_RWT.csv at master · NREL/turbine-models · GitHub](https://github.com/NREL/turbine-models/blob/master/5MW_126_RWT.csv)

Para dar certidumbre a las estimaciones realizadas, se realizó una comparación de las velocidades del ERA5 con los datos de los satélites de ERS2, METOP A, METOP B, OCEANSAT-2, QUICKCAT y RAPIDSCAT.

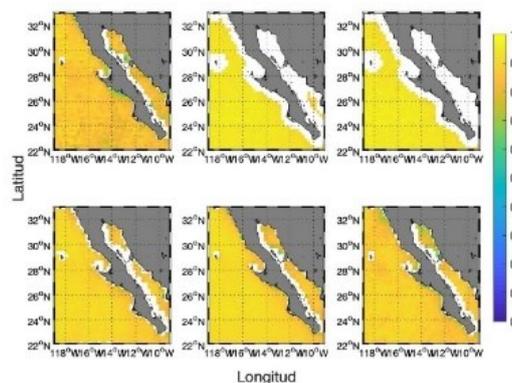
### 3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de la validación y la evaluación del recurso eólico en la costa de la Península de Baja California.

#### 3.1. Validación

Se utilizó el coeficiente de correlación para medir el grado de correlación entre los datos de ERA5 y ERS2, METOP A, METOP B, OCEANSAT-2, QUICKCAT y RAPIDSCAT.

El coeficiente de correlación (figura 1) muestra que existe una mejor correlación entre ERA5 y los datos satelitales de METOP A y METOP B, esto se debe a que los datos fueron asimilados con ERA5. En gran parte de la región de estudio se obtuvo un coeficiente de correlación cercano entre 0,8 y 1 por lo que se consideró una correlación aceptable entre el conjunto de datos.



*Fig. 1: Coeficientes de correlación entre las velocidades de viento de ERA5 y las velocidades estimadas por los satélites a) ERS2, b) METOP A, c) METOP B, d) OCEANSAT-2, e) QUICKCAT y f) RAPIDSCAT. Fuente: Elaboración propia.*

En la figura 2, se muestra el diagrama de dispersión de ERA5 frente a los datos de los diferentes satélites. Los datos del reanálisis y satelitales siguen el mismo patrón en cuanto a la densidad de los datos, sin embargo, se aprecia que con los datos satelitales METOP A y METOP B hay una mayor concentración de los datos cerca de la línea de ajuste perfecto, es decir, una menor dispersión.

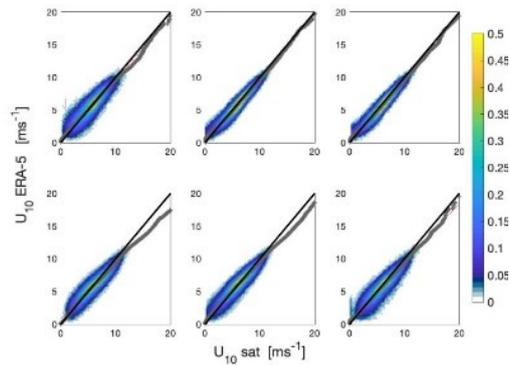


Fig. 2: Diagramas de dispersión entre las velocidades de viento de ERA5 y las velocidades estimadas por los satélites a) ERS2, b) METOP A, c) METOP B, d) OCEANSAT-2, e) QUICKCAT y f) RAPIDSCAT. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. Evaluación del recurso eólico

Para cuantificar la potencia del viento en la región de estudio, se promediaron las velocidades de viento de toda la base de datos, encontrando velocidades a 100 metros de altura que rebasan los 7 m/s (figura 3). Al extrapolar las velocidades de viento a 120 m se encuentran velocidades un poco más altas entre 7 y 8 m/s, en tierra las velocidades de viento son más bajas.

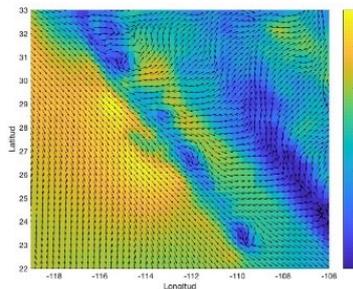


Fig. 3: Climatología península de Baja California a 100 m de altura.

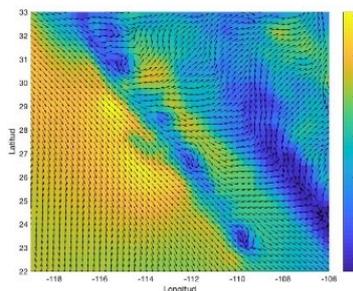


Fig. 4: Climatología de la península de Baja California a 120 m de altura.

Se calculó la potencia por unidad de área según las ecuaciones 2. Se obtuvo un rango de densidad de potencia de 200 a 450 Watts y con las velocidades de viento a 120 metros de altura, se estima la densidad de potencia entre 300 y más de 450 Watts.

Aerogenerador	Coefficiente de potencia	Área de barrido (m <sup>2</sup> )	Densidad de potencia a 100 m (W/m <sup>2</sup> )	Potencia extraíble (MW)	Densidad de potencia a 120 m (W/m <sup>2</sup> )	Potencia extraíble (MW)
NREL Reference 8 MW	0,44	19.855,65	250	2,18	300	2,6
NREL Reference 10 MW	0,45	30.006,35	250	3,37	300	4,05
IEA 15 MW	0,48	45.238,93	250	5,42	300	6,5

Tabla 2: Estimación de potencia extraíble

Se seleccionaron los aerogeneradores NREL Reference 8 MW, NREL Reference 10 MW e IEA 15 MW (Tabla 2) por ser aerogeneradores apropiados para instalaciones en alta mar, con mayores áreas de barrido y mejores coeficientes de potencia ( $C_p$ ).

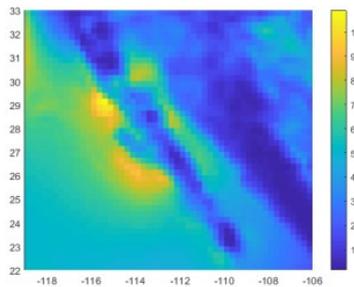


Fig. 5: Potencia extraíble en MW del aerogenerador IEA-15 MW.

#### 4. DISCUSIÓN

Utilizando el reanálisis ERA5 se ha podido evaluar el recurso eólico en la Península de Baja California. Las velocidades que existen en la región costera de la Península de Baja California, superan las velocidades de arranque de la mayoría de los aerogeneradores, por lo tanto, este recurso se considera aceptable para identificar sitios donde sea posible utilizar la energía disponible. Es importante considerar el cambio en la velocidad de viento conforme aumentamos la altura y seleccionar los aerogeneradores adecuados con el más alto  $C_p$  para conocer cuál es la potencia extraíble en el sitio. A lo largo de la península existen localidades sin energía eléctrica, donde los habitantes utilizan diésel para obtener electricidad. En la figura 5 se observa que la potencia extraíble con el aerogenerador IEA-15 MW se encuentra entre 5 y 10 MW potencia similar que tiene el parque eólico *La Rumorosa*, en Baja California que se compone de 5 aerogeneradores, sumando una capacidad instalada de 10 MW. Se ha identificado que existe un buen recurso eólico la Península de Baja California, sin embargo, es preciso añadir estudios de prefactibilidad, impactos social y ambiental para determinar la viabilidad de un proyecto eólico marino en esta región.

## REFERENCIAS

- Costoya, X., deCastro, M., Carvalho, D., & Gómez-Gesteira, M. (2020). On the suitability of offshore wind energy resource in the United States of America for the 21st century. *Applied Energy*, 262(October 2019), 114537. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114537>
- REN21, 2021. Renewables 2021 Global Status Report. Tech. rep. REN21 Secretariat, Paris.
- Li, J., & Yu, X. B. (2018). Onshore and offshore wind energy potential assessment near Lake Erie shoreline : a spatial and temporal analysis, 1–41.
- Costoya, X., deCastro, M., Carvalho, D., & Gómez-Gesteira, M. (2020). On the suitability of offshore wind energy resource in the United States of America for the 21st century. *Applied Energy*, 262(October 2019), 114537. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114537>
- Beiter P, Musial W, Smith A, Kilcher L, Damiani R, Maness M, et al. A spatial economic cost reduction pathway analysis for U.S. Offshore wind energy development from 2015–2030 (technical report). Golden, CO (US): NREL/TP-6A20-66579 National Renewable Energy Laboratory (NREL); 2016 <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66579.pdf>
- Secretaría de Energía (2019). *Reporte de Avance de Energías Limpias. Primer semestre 2018*. México.
- Olauson, J. (2018). ERA5: The new champion of wind power modelling? *Renewable Energy*, 126, 322–331. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.056>
- R. Floors, M. Nielsen, Estimating air density using observations and re-analysis outputs for wind energy purposes, *Energies* 12 (11) (2019), <https://doi.org/10.3390/en12112038>
- Gualtieri, G. (2021). Reliability of era5 reanalysis data for wind resource assessment: A comparison against tall towers. *Energies*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/en14144169>
- Shu, Z. R., Li, Q. S., & Chan, P. W. (2015). Statistical analysis of wind characteristics and wind energy potential in Hong Kong. *Energy Conversion and Management*, 101, 644–657. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.070>
- Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E. Wind energy handbook. John Wiley & Sons; 2001.
- Chandel, S. S., Ramasamy, P., & Murthy, K. S. R. (2014). Wind power potential assessment of 12 locations in western Himalayan region of India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 530–545. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.050>