

## EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO EN UNIÓN HIDALGO, OAXACA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA

### EVALUATION OF THE WIND POTENTIAL IN UNIÓN HIDALGO, OAXACA FOR THE SIZING OF LOW POWER WIND TURBINES

Santiago-Silva Lidia<sup>1</sup>, Cruz-Martínez Heriberto<sup>2</sup>, Hernández-Sánchez Laura<sup>3</sup>, Franco-Lujan Víctor Alberto<sup>4</sup>

<https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v7i2.305>

<sup>1</sup> Ingeniero en Energías Renovables, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Etlá, [lidia.ss@itvalletla.edu.mx](mailto:lidia.ss@itvalletla.edu.mx), Abasolo S/N, Barrio del Agua Buena, Santiago Suchilquitongo, Oaxaca 68230, México, <https://orcid.org/0009-0005-6980-3543>

<sup>2</sup> Doctor en Ciencias en Nanociencias y Nanotecnología, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Etlá, [heriberto.cm@itvalletla.edu.mx](mailto:heriberto.cm@itvalletla.edu.mx), Abasolo S/N, Barrio del Agua Buena, Santiago Suchilquitongo, Oaxaca 68230, México, <https://orcid.org/0000-0001-8967-1481>

<sup>3</sup> Maestría en Ciencias en Productividad Forestal, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Etlá, [laura.hernandez@itvalletla.edu.mx](mailto:laura.hernandez@itvalletla.edu.mx), Abasolo S/N, Barrio del Agua Buena, Santiago Suchilquitongo, Oaxaca 68230, México, <https://orcid.org/0009-0006-0533-1564>

<sup>4</sup> Doctor en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle de Etlá, [victor.fl@itvalletla.edu.mx](mailto:victor.fl@itvalletla.edu.mx), Abasolo S/N, Barrio del Agua Buena, Santiago Suchilquitongo, Oaxaca 68230, México, <https://orcid.org/0000-0002-9929-1770>

**Resumen** -- En la región del Istmo de Tehuantepec del estado Oaxaca se dispone de gran recurso eólico. Sin embargo, existen diversas localidades donde este recurso no ha sido caracterizado de forma detallada, lo que lleva a no poder generalizarlo para la implementación de aerogeneradores. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es evaluar el potencial eólico en el municipio de Unión Hidalgo, Oaxaca y con ello dimensionar diferentes modelos de aerogeneradores que puedan abastecer la demanda de energía eléctrica de una vivienda del municipio, basándose principalmente en la potencia disponible, la potencia aprovechable y el consumo energético bimestral. En primer lugar, se analizaron las velocidades de los vientos mensuales y anuales a 10 m y 50 m de altura, encontrando que las mayores velocidades se presentan en los meses de noviembre, diciembre y enero, con vientos que superan los 7.82 m/s (10 m de altura) y 9.81 m/s (50 m de altura). En segundo lugar, se determinó los valores promedios anuales de la densidad de potencia a 10 m y 50 m, esto mediante dos métodos de análisis, el Método Empírico de Justus (EMJ) y el Método de Densidad (MDP). Posteriormente, se realizó una muestra de 130 hogares para determinar el consumo eléctrico bimestral promedio en el municipio de Unión Hidalgo que fue de aproximadamente 282.13 kWh. Con base a los resultados se propuso tres aerogeneradores, de los cuales se determinó que el AIR 19/100 es el mejor candidato para su implementación, obteniendo que la potencia anual por hora es igual a 11 269.75 kWh (ocupando los valores de 50m de altura). Lo anterior es favorable tanto para el aprovechamiento del potencial eólico y el abastecimiento de hogares en la región.

**Palabras Clave:** Distribución de probabilidad de Weibull, Factor de forma y escala, Densidad potencia, Energía Eólica

**Abstract** -- The Istmo of Tehuantepec region of the state of Oaxaca has a large wind resource. However, there are several localities where this resource has not been characterized in detail, which leads to not being able to generalize if the wind resource of the municipalities that comprise it, if it is of interest for the implementation of wind turbines. Therefore, the objective of this study is to characterize the wind resource in the municipality of Unión Hidalgo, Oaxaca, in order to analyze different models of wind turbines that can supply the electricity demand of a house in the municipality, based mainly on the available power, the usable power and the bimonthly energy consumption. First, the monthly and annual wind speeds at 10 m and 50 m height were studied, finding higher wind speeds in the months of November, December and January, with winds exceeding 7.82 m/s (10 m height) and 9.81 m/s (50 m height). As a second point, the annual average values of power density at 10 m and 50 m were determined using two methods of analysis, the Empirical Justus Method (EMJ) and the Density Method (MDP). Finally, a sample of 130 households was taken to determine the average residential consumption in the municipality of Unión Hidalgo, which was 282.13 kWh (bimonthly), and based on the results, three wind turbines were proposed, of which AIR 19/100 was determined to be the best candidate for implementation, obtaining that the annual power per hour is equal to 11 269.75 kWh (occupying the values of 50m height), which is favorable for both the use of the wind potential and the supply of homes in the region..

**Key words** – Weibull Probability, Distribution, Shape and scale, Potential density, Wind power.

## INTRODUCCIÓN

La demanda energética mundial aumenta cada día más debido al incremento de la población y a la industrialización. Lo preocupante es que la mayor parte de la energía se obtiene de los combustibles fósiles, los cuales son recursos no renovables y además son considerados los causantes de problemas ambientales, tal como el calentamiento global [1]. Para contribuir a la solución de esta problemática, en las últimas décadas las energías renovables han tenido gran importancia como alternativas eficientes y congruentes con el medio ambiente para la producción de energía [2].

Entre los diferentes tipos de energías renovables, la energía eólica se ha popularizado en los últimos años a nivel mundial [3]. En 2022, de la energía renovable producida de México, el 2.4% era obtenida de energía eólica [4] destacando que el estado de Oaxaca produce más del 55.8% de energía eólica nacional [5]. En especial, en la región del Istmo de Tehuantepec del estado Oaxaca, que por sus particularidades geográficas presenta rachas de vientos por arriba de 10 m/s [6]. En el mundo se aprovechan vientos de 6.5 m/s para la generación de energía [7], por lo que el aprovechamiento de este recurso eólico podría generar condiciones suficientes para combatir las necesidades energéticas y problemas ambientales de la actualidad [8].

A la fecha existen diversos estudios sobre la caracterización del recurso eólico de la región del Istmo de Tehuantepec, destacando la investigación de Jaramillo & Borja en 2004 [9] quienes realizaron un análisis de la velocidad del viento en la región de La Ventosa. En otro estudio, Barrera [10] presentó el estudio de la energía eólica en el Istmo de Tehuantepec con dos áreas de estudio: La Ventosa y San Dionisio del Mar. Así mismo, Cadenas y Rivera [11] presentaron el Pronóstico de la velocidad del viento en la Costa Sur de Oaxaca, México, enfocándose en los municipios mencionados anteriormente.

A pesar de los estudios realizados, existen municipios de la región del Istmo de Tehuantepec que no cuentan con evaluaciones eólicas detalladas, tal como Unión Hidalgo, que actualmente solo cuenta con un estudio preliminar realizado por Dorrego y colaboradores [12]. Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar el recurso eólico en el municipio de Unión Hidalgo y de acuerdo con el recurso eólico disponible y aprovechable, analizar diferentes modelos de aerogeneradores que puedan abastecer la demanda de energía eléctrica de una vivienda del municipio.

## DESARROLLO

### Sitio de estudio

Unión Hidalgo, es un municipio del estado de Oaxaca localizado en la región del Istmo de Tehuantepec, en las coordenadas 94° 50' longitud oeste y 16° 29' latitud norte, a una altura de 20 m sobre el nivel del mar. Unión

Hidalgo limita con los municipios de Juchitán de Zaragoza, Santo Domingo Ingenio, Laguna Superior, Niltontepec y San Dionisio del Mar [13].

### Obtención de los datos

Para la evaluación del recurso eólico de Unión Hidalgo se utilizaron datos de la NASA [14], a una latitud y longitud de 16.449256°, -94.850121° respectivamente. Los datos obtenidos fueron a una altura de 10, 50, 100 y 200 m, con una recopilación de datos en el periodo de 2010-2021.

Para este caso solo se estudiaron datos a dos alturas a 10 m y a 50 m, debido a que la altura del buje no supera estas medidas en su estimación; aunque para diversos estudios se pueden tomar los datos a 100 m y 200 m, que se obtienen de la misma base de datos.

### Análisis estadístico de los datos

La velocidad promedio ( $v_{prom}$ ), desviación estándar ( $\sigma$ ) e intensidad de turbulencia ( $I_t$ ) fueron obtenidos mediante las siguientes ecuaciones, respectivamente:

$$v_{prom} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad \text{Ec. (1)}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - v_{promedio})^2} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$I_t = \frac{\sigma}{v_{prom}} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde  $v_i$  representa la suma de los datos agrupados.

### Función de distribución de Weibull

Para este estudio se utilizó la función de probabilidad de Weibull que es una función de distribución, caracterizada por el factor de forma y escala. El primero define la dispersión de la distribución y el segundo la forma de la distribución [15].

La densidad de Weibull es representada de la siguiente ecuación:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad \text{Ec. (4)}$$

y la función de distribución acumulada es:

$$F(v) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde la  $v$  representa la velocidad del viento en (m/s),  $c$  es el factor de escala con unidades de (m/s) y  $k$  es el factor de forma, este mismo adimensional. La estimación de  $c$  y  $k$  se realizó mediante los siguientes métodos:

### Método 1. Método empírico de Justus (EMJ)

Los parámetros de  $c$  y  $k$  se pueden calcular mediante las Ec. (6) y (7), respectivamente [16].

$$k = \left( \frac{\sigma}{v_{prom}} \right)^{-1.086} \quad \text{Ec. (6)}$$

$$c = \frac{v_{prom}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde  $\Gamma$  representa la función gamma.

### Método 2. Método de densidad de potencia (MDP)

Los parámetros  $k$  y  $c$  se pueden calcular mediante las Ec. (8), (9) y (10), respectivamente [17][18].

$$k = 1 + \left( \frac{3.69}{Fe^2} \right) \quad \text{Ec. (8)}$$

$$Fe = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3}{v_{prom}^3} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$c = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:  $Fe$  factor de patrón de energía,  $V_i$  es la velocidad del viento en el momento  $i$ .

Para estimar la frecuencia acumulada de las velocidades que son mayores o iguales a un cierto valor  $V$ , se usó la distribución acumulada  $F'$  [19].

$$F'(v \geq V) = 1 - F(v \leq V) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} = Pr \quad \text{Ec. (11)}$$

### Extrapolación de la velocidad del viento y parámetros de Weibull a diferentes alturas

La mayoría de las veces, las distribuciones de la velocidad del viento medidas se realizan a una altura diferente a la altura de la góndola de la turbina eólica. En esta situación, las velocidades del viento y los parámetros de Weibull generalmente se extrapolan a la altura del buje de la turbina eólica, esta extrapolación se realiza mediante la expresión de la ley de potencia [20] [21].

$$v = v_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^{\alpha} \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde  $v$  es la velocidad del viento a la altura deseada  $z$ ,  $v_0$  es la velocidad del viento a la altura de referencia  $z_0$  y  $\alpha$  es el exponente de la ley de potencia (coeficiente) está definido por la siguiente ecuación.

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(v_0)}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{z_0}{10}\right)} \quad \text{Ec. (13)}$$

Los parámetros de Weibull  $k_z$  y  $c_z$  a la altura deseada  $z$  están relacionadas con  $k_0$  y  $c_0$  medidos a una altura de 50 m y se dan mediante las siguientes ecuaciones:

$$k_z = \frac{k_0(1 - 0.088 \ln\left(\frac{z_0}{10}\right))}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{z}{10}\right)} \quad \text{Ec. (14)}$$

$$C_z = C_0 \left( \frac{z}{z_0} \right)^{\alpha} \quad \text{Ec. (15)}$$

### Estimación de la dirección del viento

Para este estudio se utilizó las direcciones anuales y mensuales del viento, obtenidas en la base de datos de la NASA [22], de la cual se extrajo datos de 12 años (2010-2021) y se interpretó por medio de una rosa de los vientos.

### Estimación de la potencia eólica de salida

La potencia del viento ( $p(v)$ ) se calculó directamente a partir de la velocidad del viento mediante la siguiente ecuación [23].

$$p(v) = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \text{Ec. (16)}$$

Y la energía eólica por unidad de área está dada por:

$$P = \frac{p(v)}{A} f(v) = \frac{1}{2} \rho v^3 \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \text{Ec. (17)}$$

Al integrar la Ec. (18) durante un periodo de tiempo la densidad de potencia eólica promedio viene dada por la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad \text{Ec. (18)}$$

$k$  y  $c$  que fueron determinados por las funciones de regresión, se introdujeron en la expresión de potencia, para calcular la densidad de energía eólica, (Ec. (18)), que es un indicador de productividad para predecir la energía eólica.

La densidad de energía eólica se expresa como:

$$E = \frac{1}{2} \rho c^3 \left(1 + \frac{3}{k}\right) \Delta_t \quad \text{Ec. (19)}$$

Donde  $\Delta_t$  es el periodo de tiempo.

### Evaluación de productividad del aerogenerador

La evaluación de productividad de la turbina eólica se mide utilizando el factor de capacidad  $C_f$  y se expresa mediante la Ecuación 20. Lo anterior cuando el aerogenerador opera al 100% de su potencia nominal [24].

$$C_f = \frac{P_{OUT}}{P_r} \quad \text{Ec. (20)}$$

$P_{OUT}$ , se define por la curva de potencia de la turbina y varía según las condiciones de viento [25] y  $P_r$  la potencia nominal.

La energía extraída del aerogenerador,  $E_{OUT}$  se calcula con base a la potencia de salida que varía según las velocidades del viento  $v_i$  y se calcula mediante la siguiente ecuación [26]:

$$E_{OUT} = \sum_{i=1}^n P_{OUT} (v_i) \Delta_t \quad \text{Ec. (21)}$$

### Cálculo del consumo energético de una casa habitación

El cálculo de la muestra para determinar el requerimiento energético de una casa-habitación en la población de Unión Hidalgo, fue a través de los datos del INEGI en el último censo de población y vivienda del 2020 [13]. Dicho censo menciona que el municipio de Unión Hidalgo cuenta con 4,266 viviendas. Conociendo estos datos, se realizó el cálculo de la muestra, utilizando las siguientes ecuaciones [27].

$$n = \frac{N * Z^2 * S}{e^2 (N-1) + Z^2 * S} \quad \text{Ec. (22)}$$

$$S^2 = \sum \frac{(X-X)^2}{N} \quad \text{Ec. (23)}$$

Donde:

$n$  es el tamaño de la muestra,  $N$  el tamaño de la población,  $Z$  el valor de  $Z$  crítico,  $S$  la varianza de la población en estudio,  $e$  el nivel de precisión absoluta o margen de error referido a la amplitud del intervalo de confianza deseado en la determinación del valor promedio de la variable en estudio.

## DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Análisis de las velocidades de viento

#### *V<sub>prom</sub> anuales a alturas de 10 m y 50 m*

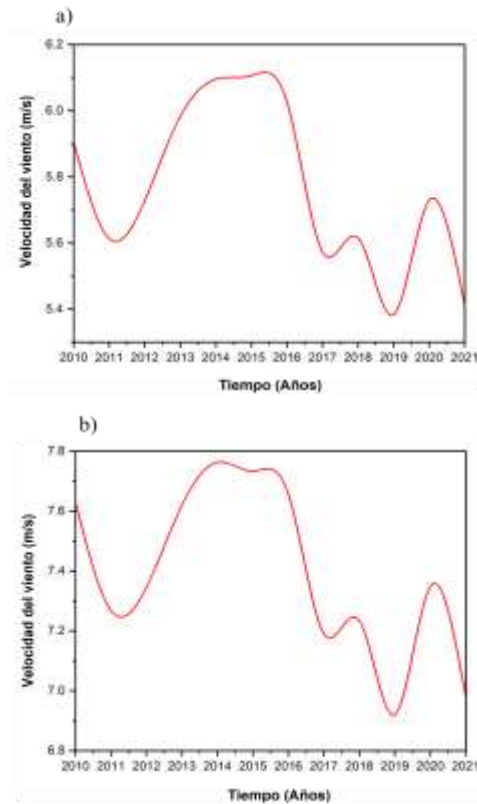
Las distribuciones anuales de la velocidad del viento en Unión Hidalgo son representadas en la **Figura 1**. Dichos datos corresponden a las alturas de 10 m y 50 m con un análisis por año.

Se estima que la  $V_{prom}$  anual en Unión Hidalgo a 10 m de altura es de 5.76 m/s, observando que existe una variación importante en los años 2014, 2015 y 2016 (**Figura 1a**), ya que la  $V_{prom}$  supero los 6 m/s y en el año siguiente (2017), la velocidad descendió a los 5.57 m/s, manteniéndose en ese margen en los años restantes.

Para el caso particular de una altura de 50 m, la velocidad aumentó considerablemente con respecto a alturas menores, obteniendo el comportamiento que se muestra en la **Figura 1b**. Se observa similitud en las variaciones anuales con respecto a la altura de análisis de 10 m. Estimando que la  $V_{prom}$  anual en Unión Hidalgo es de 7.39 m/s a una altura de 50 m.

Estos resultados son semejantes a investigaciones realizadas en otros estados del país, donde Hernández-Escobedo et al [28] reportaron velocidades del viento de 5.45 m/s a una altura de 50 m; no obstante, en Unión

Hidalgo velocidades parecidas fueron registradas a 10 m, es decir una altura menor.



**Figura 1.**  $V_{prom}$  anuales a alturas de a) 10 m y b) 50 m.

#### *V<sub>prom</sub> mensuales a alturas 10 m y 50 m.*

Las distribuciones mensuales de la velocidad del viento son representadas en la **Figura 2**.

Se observa que para alturas de 10 m las velocidades mayores en cada año se encuentran en los meses de enero, noviembre y diciembre con valores de 7.82 m/s, 7.54 m/s y 7.19 m/s, respectivamente. También se observa que los menores valores de velocidad del viento se presentan en los meses de junio, septiembre y agosto con rachas de viento de 3.89 m/s, 3.90 m/s y 4.16 m/s, respectivamente (**Figura 2a**).

En el caso de la altura de 50 m, las distribuciones de velocidades mensuales mayores y menores se concentran en los mismos meses que la altura de 10 m (**Figura 2b**) en donde se identifica que las mayores velocidades promedios son de 9.81 m/s, 9.69 m/s y 9.19 m/s, respectivamente y en el caso contrario, las velocidades de viento menores son de 5.16 m/s, 5.31 m/s y 5.64 m/s, respectivamente.

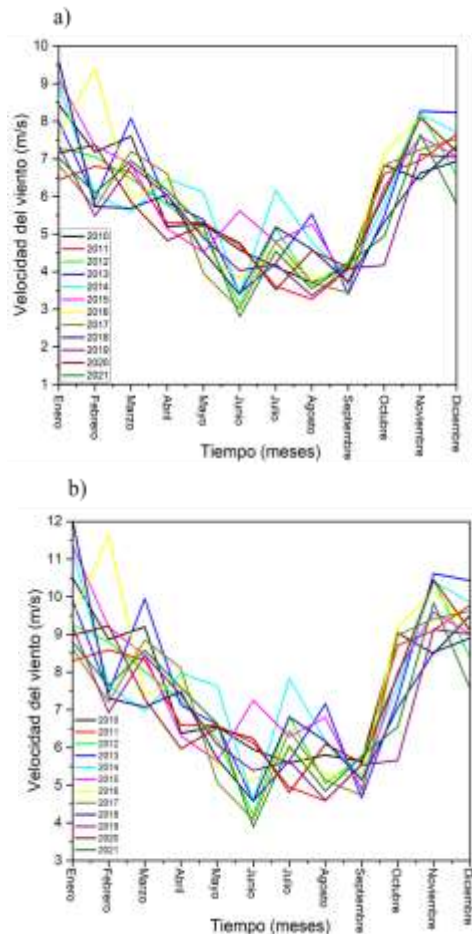


Figura 2.  $V_{prom}$  mensual para cada año de estudio. a) altura de 10 m y b) altura de 50 m.

### Ajustes de datos del viento

Los ajustes de  $k$  y  $c$  se muestran en la **Tabla 1**, donde se observa que para cada método los factores no varían considerablemente, ya que, para  $k$  a 10 m y 50 m, el porcentaje de variación solo es de 11.72% y 4.05%, respecto al método MDP y EMJ.

Para el caso concreto de  $c$  a 10 m y 50 m, el porcentaje de variación solo es de 0.78% y 0.24% este respecto al método EMJ y MDP. Lo anterior muestra que no hay una variación significativa en cada método de análisis y se predice el mismo comportamiento al integrar el ajuste de cálculo para las densidades de potencia.

Tabla 1. Cálculos  $k$  y  $c$  mediante el método empírico de Justus (EMJ) y método de densidad de potencia (MDP).

Sitio	Método	$k$	$c$
Unión Hidalgo (10 m)	EMJ	4.14	6.35
	MDP	4.69	6.30
Unión Hidalgo (50 m)	EMJ	4.50	8.09
	MDP	4.69	8.07

### Densidad de potencia eólica

La densidad de potencia eólica a 10 m y 50 m se presentan en la **Tabla 2**, donde las densidades de potencia no varían significativamente, encontrando que, a una altura de 10 m, el método (EMJ) varía solo  $5.31 \text{ W/m}^2$  respecto al método (MDP) y en el caso del estudio a 50 m de altura, el comportamiento es el mismo con una variación de  $3.41 \text{ W/m}^2$ .

Estos resultados confirman el potencial eólico del municipio de Unión Hidalgo, ya que la densidad de potencia a las alturas estudiadas es relativamente mayor a lo reportado por Fajardo-Díaz et al. [29], quienes realizaron un estudio semejante al de esta investigación en estado de Zacatecas obteniendo una densidad de potencia de  $49.35 \text{ W/m}^2$  para una velocidad promedio anual de viento de  $4.6 \text{ m/s}$ .

Tabla 2. Densidad de potencia obtenida de los métodos determinados para su evaluación.

Sitio	Método	Densidad de potencia ( $\text{W/m}^2$ )
Unión Hidalgo (10 m)	EMJ	142.94
	MDP	137.63
Unión Hidalgo (50 m)	EMJ	293.13
	MDP	289.72

### Tendencia de probabilidad

#### Distribución de Weibull

La frecuencia del viento en un rango de velocidades determinado se muestra en la **Figura 3**.

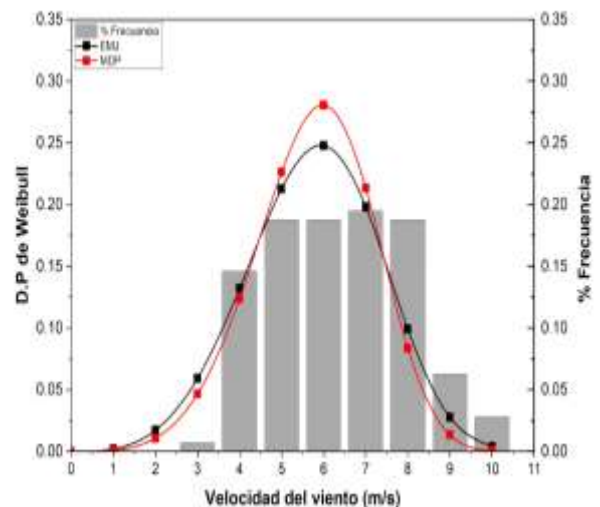


Figura 3. Distribución de probabilidad de Weibull, para diferentes rangos de velocidades, en comparación con el porcentaje de frecuencia obtenido (análisis a 10 m de altura).

Se observa que la frecuencia probabilística a 10 metros de altura se concentra en un 25% en el rango de velocidades de  $6.0$  a  $6.9 \text{ m/s}$  para el caso del método

(EMJ); y para el método (MDP) la concentración se mantiene en un 28% en el mismo rango de velocidades, siendo el valor más alto en la distribución.

En el caso de la segunda altura de estudio (50 m) (Figura 4) la concentración primordial se encuentra en el rango de 8.0 a 8.9 m/s, con un 21% de concentración para el método (EMJ) y en un 22% para el método (MDP).

Como los resultados mostraron, las concentraciones máximas obtenidas se encuentran entre un 20 y 30%, los cuales son mayores a los reportados en otras investigaciones realizadas en México, donde se hallaron concentraciones máximas de 14% para velocidades de 5 m/s [30]. Lo anterior vuelve a demostrar que el potencial eólico que presenta el municipio de Unión Hidalgo y en general la región del Istmo de Tehuantepec.

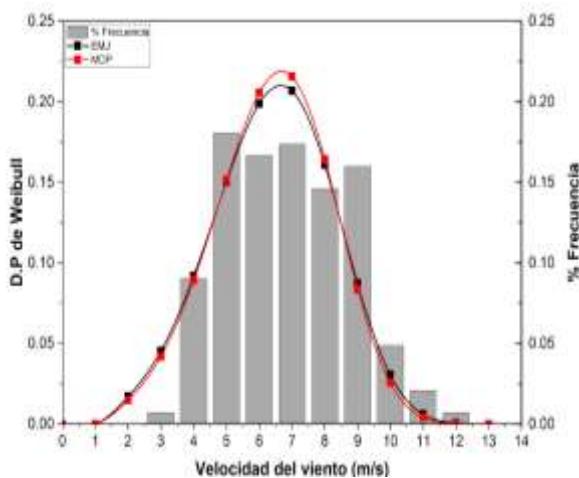


Figura 4. Distribución de probabilidad de Weibull, para diferentes rangos de velocidades, en comparación con el porcentaje de frecuencia obtenido (análisis a 50 m de altura).

**Densidad de potencia de Weibull**

En este estudio el primer análisis se llevó a 10 m de altura, obteniendo que a velocidades entre 7.0 y 7.9 la densidad de potencia es de 41.60 W/m<sup>2</sup> (EMJ) y 44.80 W/m<sup>2</sup> (MDP), siendo los valores más altos en la tendencia (Figura 5).

Estas densidades mayores se pueden obtener en los meses de noviembre, diciembre y enero, ya que las velocidades de viento se encuentran dentro del rango establecido.

Con base en estos resultados, se sabe que la densidad de potencia promedio es de 143.23 W/m<sup>2</sup> y para el caso particular de los métodos de análisis (EMJ Y MDP) se obtuvo los resultados mostrados en la Tabla 1. Para el método empírico de Justus (EMJ) se obtiene una mayor densidad de potencia y se asemeja mucho más a la densidad de potencia promedio.

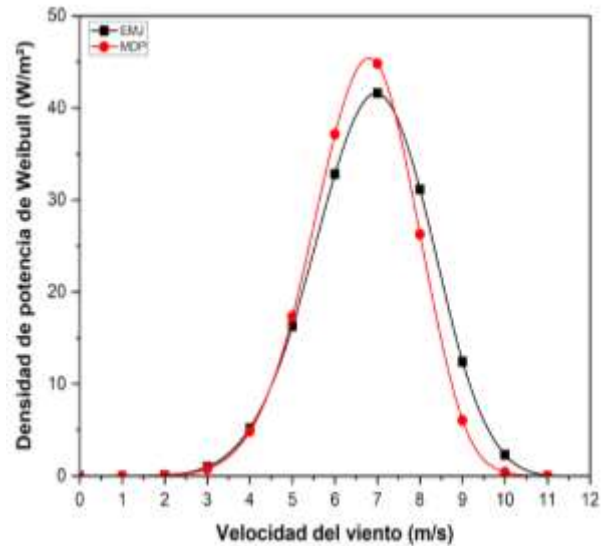


Figura 5. Densidad de potencia de Weibull, para diferentes rangos de velocidades, (análisis a 10 m de altura).

Para el segundo análisis (Figura 6) a 50 m de altura se obtuvo que a velocidades entre 9.0 y 9.9 m/s se puede obtener la mayor densidad de potencia con valores de 71.80 W/m<sup>2</sup> y 73.33 W/m<sup>2</sup> para el método empírico de Justus (EMJ) y para el método de densidad de potencia (MDP), respectivamente. Estas densidades mayores se pueden presentar en noviembre, diciembre y enero ya que solo en estos meses las velocidades del viento se encuentran en este rango.

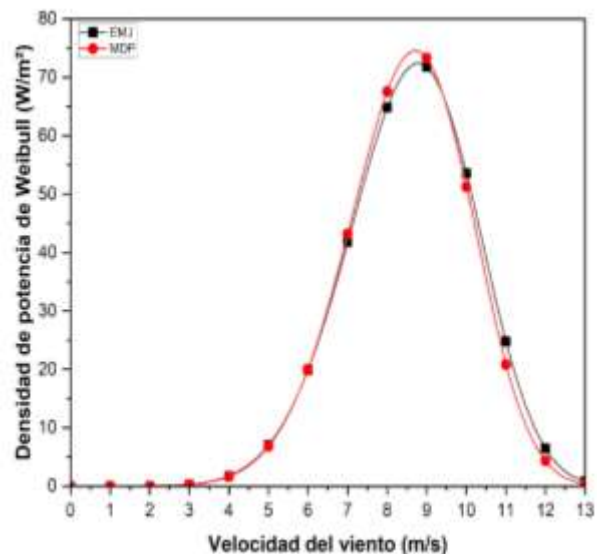


Figura 6. Densidad de potencia de Weibull, para diferentes rangos de velocidades, (análisis a 50 m de altura).

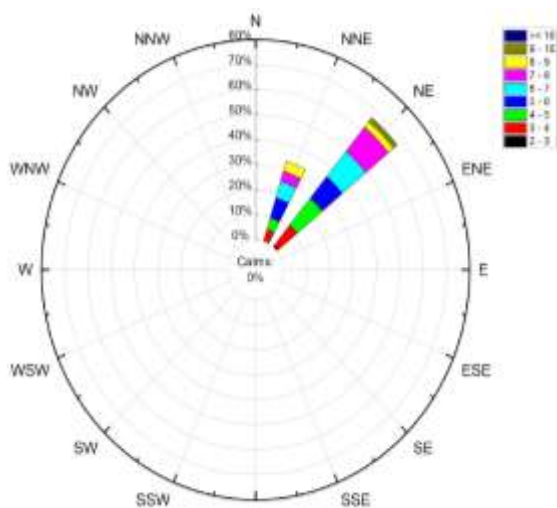
Con base en el análisis realizado también se obtuvo que la densidad promedio es de 294.01 W/m<sup>2</sup> y para el caso

particular de los métodos de análisis de obtuvo los siguientes resultados **Tabla 2**.

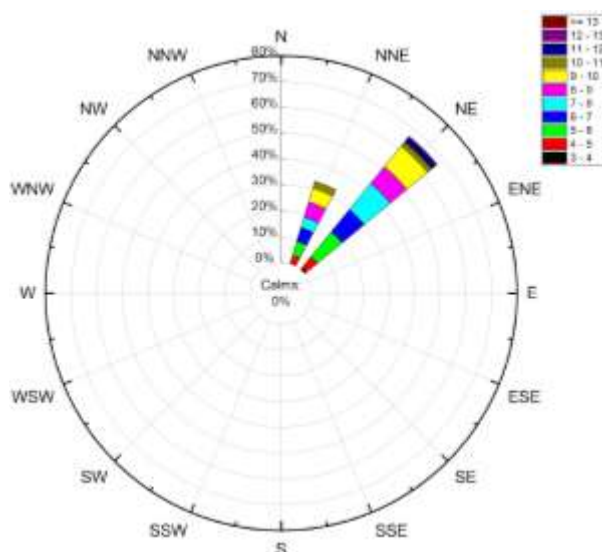
Observando que para el método empírico de Justus (EMJ) se obtiene una mayor densidad de potencia y se asemeja mucho más a la densidad de potencia promedio.

### Diagramas de las rosas de los vientos

Los gráficos representados en las **Figuras 7 y 8** corresponden a las direcciones del viento a dos diferentes alturas de análisis a 10 m y 50 m, respectivamente. Los vientos se comportan de manera unidireccional al noreste, sin importar la variación de velocidades a diferentes alturas, al igual que la representación de las direcciones mensuales se mantienen en este mismo comportamiento, indicando que su dirección es concentrada en el noreste.



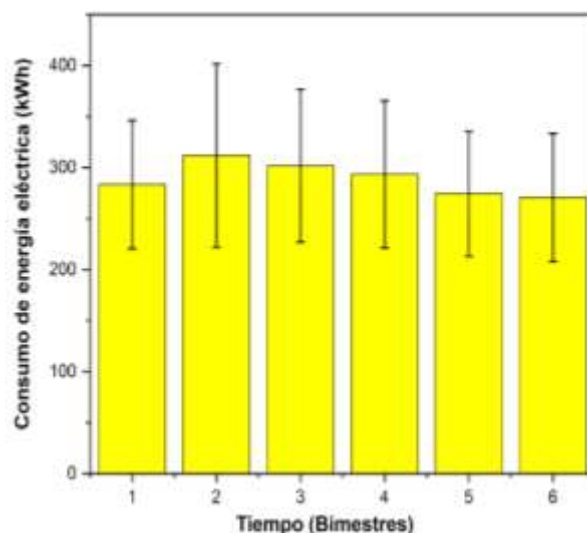
**Figura 7.** Rosa de los vientos, bajo el análisis a 10 m de altura.



**Figura 8.** Rosa de los vientos, bajo el análisis a 50 m de altura.

### Consumo energético promedio en la zona de estudio

En este caso para el estudio del consumo energético promedio en la zona, se tomó una muestra de 130 hogares en el municipio de Unión Hidalgo, Oaxaca, en el cual se registró un año de consumo en los períodos, septiembre-noviembre 2020 y julio-septiembre 2021, esto de manera bimestral, encontrando el comportamiento que se ilustra en la **Figura 9**. Se observa que el promedio de consumo de energía eléctrica por bimestre no supera los 300.81 kWh, siendo este el promedio más alto de consumo anual. Con base en esta estimación, se obtuvo que el consumo promedio bimestral en hogares de esta localidad es de 282.13 kWh y en cuanto a los consumos anuales un hogar consume 1692.78 kWh/año.



**Figura 9.** Consumo de energía eléctrica (kWh) por bimestre en el municipio de Unión Hidalgo.

### Características de potencia de aerogeneradores seleccionados.

Para la selección de aerogeneradores, se comparó con diferentes fichas técnicas, verificando la potencia de salida con la potencia de consumo, al igual que se comparó la velocidad de arranque y la velocidad de corte, para así poder seleccionar una turbina eólica que satisficiera el consumo energético de una casa habitación en la región de Unión Hidalgo.

En la **Tabla 3** se indica las características de tres modelos de aerogeneradores seleccionados [27,31,32], dichos aerogeneradores son de baja potencia con potencias nominales de 100 kW y con alturas de 10 m a 50 m del buje. Considerando principalmente las características eólicas de Unión Hidalgo, para la selección, como la  $V_{prom}$  que es por arriba de 5.76 m/s y que es de gran importancia para saber las velocidades de arranque a considerar. Estos aerogeneradores fueron propuestos debido a su velocidad de arranque que rondan entre los 3.5 m/s y 4.5 m/s, al igual que por su potencia nominal que es de 100 kW.

La estimación de la potencia de salida para cada modelo de turbina eólica se da en la **Figura 10** obteniendo que la

potencia en cada uno de los aerogeneradores es: ADES ADES 100  $P_{out}= 1325$  kWh, ACSA 120/100  $P_{out}= 1525$  kWh, y para la turbina AIR 19/100  $P_{out}= 1525$  kWh.

**Tabla 3.** Aerogeneradores seleccionados con sus especificaciones técnicas a alturas de buje entre 10 y 50 m.

Turbina eólica	ACSA A20/100	AIR 19/100	ADES ADES 100
Altura del buje (m)	24	25/45	27.5
Potencia nominal (kW)	100	100	100
Diámetro del rotor (m)	20	19	29
Velocidad nominal (m/s)	13	14	10
Velocidad de arranque (m/s)	4.5	3.5	3.5
Velocidad de corte (m/s)	24	24	20

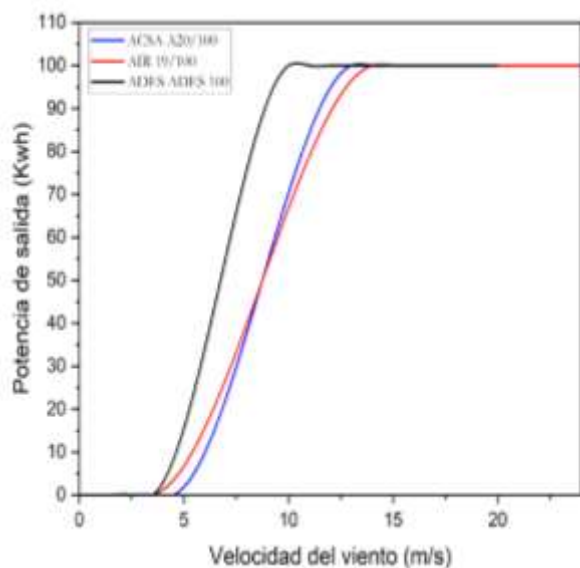


Figura 10. Potencia de salida de cada turbina estudiada.

Como se presenta en la Tabla 4, en términos de factor de capacidad, la turbina eólica ACSA 120/100 y AIR 19/100 tienen una eficiencia mayor, teniendo un enfoque con mayor rentabilidad a diferencia de la turbina ADES ADES 100.

**Tabla 4.** Potencias disponibles y aprovechables proporcionadas por cada aerogenerador.

	ADES ADES 100	ACSA 120/100	AIR 19/100
$C_f$	13.25	15.25	15.25
Salida E (kWh)	9791.7	11269.75	11269.75

Con base a las potencias aprovechables de salida se decidió hacer el estudio de las potencias de salidas anuales de la turbina eólica AIR 19/100 debido a que la potencia teórica del aerogenerador es más alta, para esto se ocupó solo los datos a 50 m de altura, obteniendo que la potencia anual por hora es igual a 11 269.75 kWh.

### CONCLUSIONES

En este estudio se valoró las características eólicas de en Unión Hidalgo Oaxaca, al igual que la determinación de una turbina eólica con base a las potencias aprovechables de la zona y los consumos energéticos promedios, concluyendo lo siguiente:

- La velocidad promedio en la región a 10 m y 50 m de altura fueron de 5.76 m/s y 7.39 m/s, respectivamente concentrando las mayores velocidades en los meses de enero, noviembre y diciembre.
- El caso de los ajustes de los parámetros de factor de forma y escala, en la distribución de Weibull, los métodos MDP Y EMJ no varían considerablemente, ya que, para  $k$  a 10 m y 50 m, el porcentaje de variación solo es de 11.72% y 4.05%, respecto al método MDP y EMJ.
- Las densidades de potencia para 10 m con el método MDP y EMJ fueron de 142.94 W/m<sup>2</sup> y 137.63 W/m<sup>2</sup> respectivamente. A 50 m con los métodos MDP y EMJ las densidades de potencia fueron de 293.13 W/m<sup>2</sup> y 289.72 W/m<sup>2</sup>, respectivamente.
- El comportamiento de los vientos con base a su dirección se comporta de manera unidireccional al noreste, sin importar la variabilidad en la altura.
- El consumo energético anual de un hogar con base a la muestra es de 1692.78 kWh.
- Con base a lo comparación de las tres turbinas la AIR 19/100 es la que demostró mejor adaptabilidad a la potencia eólica de salida y con base a los consumos anuales de los hogares en la región, obteniendo que la potencia anual por hora es igual es de 11 269.75 kWh.
- Futuras investigaciones deben de estar encaminadas al desarrollo de turbinas de baja potencia que sean capaces de aprovechar la energía eólica generada a alturas menores de 50 m.

- Se necesitan mayores investigaciones para el desarrollo de pilas con una mayor capacidad y eficiencia de almacenamiento de energía eléctrica generada por medio de aerogeneradores de baja potencia.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Laguna, I. (2002). Generación de energía eléctrica y medio ambiente. *Gaceta Ecológica*, (65), 53-62.
- [2] Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy strategy reviews*, 24, 38-50.
- [3] Haidi, T., & Cheddadi, B. (2022). State of wind energy in the world: evolution, impacts and perspectives. *Int. J. Tech. Phys. Probl. Eng*, 41, 347-352.
- [4] Secretaría de Energía (SENER). (2022). Cuarto informe de labores. <https://www.gob.mx/sener/articulos/cuarto-informe-de-labores>
- [5] Torres, L. R. C., & Cruz, L. A. R. (2020). El impacto social de las energías limpias en comunidades vulnerables. La energía eólica en la comunidad zapoteca de Juchitán de Zaragoza, Oaxaca. *Ambiente y Desarrollo*, 24(46), 1-18.
- [6] Juárez-Hernández, S., & León, G. (2014). Energía eólica en el istmo de Tehuantepec: desarrollo, actores y oposición social. *Problemas del desarrollo*, 45(178), 139-162.
- [7] Borja, M., Jaramillo, Ó., & Mimeaga, F. (2005). Primer documento del proyecto eoloelectrico del corredor eólico del Istmo de Tehuantepec. México: IIEPNUD-Gobierno del estado de Oaxaca.
- [8] Carpintero, Ó., & Frechoso, F. A. (2023). Energía, sostenibilidad y transición: nuevos desafíos y problemas pendientes. *Arbor*, 199(807), a687-a687.
- [9] Jaramillo, OA y Borja, MA (2004). Análisis de la velocidad del viento en La Ventosa, México: un caso de distribución de probabilidad bimodal. *Energía Renovable*, 29 (10), 1613-1630.
- [10] Barrera. P. Edith (2013) Wind Energy in the Isthmus of Tehuantepec, two study cases, La Ventosa and San Dionisio del Mar, 189.
- [11] Cadenas, E. y Rivera, W. (2007). Pronóstico de la velocidad del viento en la costa sur de Oaxaca, México. *Energía renovable*, 32 (12), 2116-2128.
- [12] Dorrego, J. R., Lastres, O., Núñez, A., Hernandez, G., Miranda, U., & Saldaña, R. (2011). Wind Energy Generation Potential in Union Hidalgo, Mexico: A Preliminary Study. *Journal of Energy and Power Engineering*, 5(2).
- [13] INEGI. (14 de abril 2023) Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Unión Hidalgo, Oaxaca. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/20/20557](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/20/20557)
- [14] NASA. (2023). <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [15] Sriti, M. (2021). Performance evaluation of wind turbines for energy production in Morocco's coastal regions. *Results in Engineering*, 10, 100215.
- [16] Justus, C. G., & Mikhail, A. (1976). Height variation of wind speed and wind distributions statistics. *Geophysical research letters*, 3(5), 261-264.
- [17] Shoaib, M., Siddiqui, I., Rehman, S., Khan, S., & Alhems, L. M. (2019). Assessment of wind energy potential using wind energy conversion system. *Journal of cleaner production*, 216, 346-360.
- [18] Akdağ, S. A., & Dinler, A. (2009). A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy conversion and management*, 50(7), 1761-1766.
- [19] Akdağ, S. A., & Dinler, A. (2009). A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1761-1766. 10.1016/j.enconman.2009.03.020
- [20] Mikhail, A. S. (1985). Height Extrapolation of Wind Data. *Journal of Solar Energy Engineering*, 107(1), 10.
- [21] Kalmikov, A. (2017). Wind Power Fundamentals. *Wind Energy Engineering*, 17–24. doi:10.1016/b978-0-12-809451-8.00002-3
- [22] NASA. (March 3, 2023). Prediction Of Worldwide Energy Resource. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [23] Taylor, J. W., McSharry, P. E., & Buizza, R. (2009). Wind Power Density Forecasting Using Ensemble Predictions and Time Series Models. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(3), 775–782. doi:10.1109/tec.2009.2025431
- [24] Wang, J., Hu, J., & Ma, K. (2016). Wind speed probability distribution estimation and wind energy assessment. *Renewable and sustainable energy Reviews*, 60, 881-899.
- [25] Belabes, B., Youcefi, A., Guerri, O., Djamai, M., & Kaabeche, A. (2015). Evaluation of wind energy potential and estimation of cost using wind energy turbines for electricity generation in north of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1245-1255.
- [26] Huleihil, M., & Mazor, G. (2012). Wind turbine power: The Betz limit and beyond. In *Advances in wind power*. IntechOpen.
- [27] Wind Turbin Models. (March 3, 2023). ACSA A20/100. <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/2374-acsa-a20-100>.
- [28] Hernández-Escobedo, Q., Espinosa-Arenal, F., Saldaña-Flores, R., & Rivera-Blanco, C. (2012). Evaluación del potencial eólico para la generación de energía eléctrica en el estado de Veracruz, México. *Dyna*, 79(171), 215-221.
- [29] Fajardo-Díaz, J. L., García-González, J. M., & García-Saldívar, V. M. (2010). Evaluación del potencial eólico de una zona del estado de Zacatecas, México. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 25(2), 95-98.

[30] Jaramillo Martínez, R., Reta Hernández, M., & de la Torre y Ramos, J. (2014). Estudio estadístico del potencial eólico del Cerro de la Virgen en Zacatecas, México.

[31] Wind Turbin Models. (March 3, 2023). AIR 19/100. <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/956-air-19-100>

[32] Wind Turbin Models. (March 3, 2023). ADES ADES 100. <https://es.wind-turbine-models.com/turbines/813-ades-ades-100>.

Rol	Autor (es)
Conceptualización	Lidia Santiago-Silva
Metodología	Heriberto Cruz-Martínez
Curación de datos	Laura Hernández-Sánchez
Administración del Proyecto	Víctor Alberto Franco Luján



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.