

Valoración del viento como fuente de energía eólica en el estado de Guerrero

Indalecio Mendoza Uribe*

Subcoordinación de Hidrometeorología, Coordinación de Hidrología, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, C.P. 62550, Jiutepec, Morelos México.

Fecha de recepción: 1 de agosto de 2018 — Fecha de aceptación: 17 de septiembre de 2018

Resumen

A nivel global, dentro de las energías renovables, la energía eólica es la de mayor crecimiento, pero en México su aprovechamiento es relativamente reciente, no obstante, con la reforma energética se espera una rápida evolución del mercado. De acuerdo al reporte de la Asociación Mexicana de Energía Eléctrica, al cierre de 2017, la energía eólica solo representa el 5.92% de la capacidad total de generación en el país. En este estudio, se presentan los resultados de la estimación del potencial de energía eólica en el estado de Guerrero, utilizando los parámetros de viento horarios simulados con el modelo WRF para los años 2016 y 2017. Se destaca la localidad de Olivares, en el municipio de Coahuayutla de José María, ubicado al noroeste del estado, con una capacidad de generación de 70.65 kWh diarios, suficiente para proveer electricidad a 16 viviendas típicas por aerogenerador.

Palabras clave: Distribución de Weibull, Energía eólica, estado de Guerrero, viento, modelo WRF.

Valuation of the wind as a source of wind energy in the state of Guerrero

Abstract

Globally, within renewable energies, wind energy is the fastest growing, but in México its use is relatively recent, however, with the energy reform, a rapid evolution of the market is expected. According to the report of the Mexican Electric Power Association, the closing of 2017, the wind energy only represents 5.92% of the total generation capacity in the country. In this study, the results of the wind energy potential estimation in the state of Guerrero are presented, using the hourly wind parameters simulated with the WRF model for the years 2016 and 2017. The town of Olivares stands out, in the municipality of Coahuayutla de José María, located in the northwest of the state, with a generation capacity of 70.65 kWh per day, enough to provide electricity to 16 typical houses per wind turbine.

Keywords: Weibull distribution, Wind energy, state of Guerrero, wind, WRF model.

*indalecio_mendoza@tlaloc.imta.mx

Nota: Este artículo de Investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 22, No. 3, 2018, ISSN: 2448-8364

Introducción

El viento se define como el movimiento del aire ocasionado por las diferencias de presión atmosférica entre dos puntos, así como por la rotación de la Tierra (Cavallo et al. 1993). La diferencia de presiones se debe a variaciones en la temperatura en esos dos puntos, lo que ocasiona a su vez una diferencia en la densidad del aire, por lo que el aire se mueve para compensar esas diferencias y dar origen al viento. Dentro de las energías renovables, la eólica, que se obtiene a través del viento, es la de mayor crecimiento a nivel mundial y dispone de una tecnología consolidada (Lecuona 2002). Para finales del año 2017 se cuenta con una capacidad instalada de generación de energía eólica a nivel mundial de 539,123 MW, ubicándose en los diez primeros lugares los países de China (188,392 MW), Estados Unidos (89,077 MW), Alemania (56,132 MW), India (32,848 MW), España (23,170 MW), Inglaterra (18,872 MW), Francia (13,759 MW), Brasil (12,763 MW), Canadá (12,239 MW) e Italia (9,479 MW). Mientras que en México, aunque a paso lento, la energía eólica continúa creciendo y las nuevas políticas y el marco legal resultante de la reforma energética, aprobada por el Senado el 11 de diciembre de 2013, fomenta la rápida evolución del mercado, de tal manera que para el cierre de 2017, la capacidad de generación de energía eólica instalada del país llegó a 4,005 MW, correspondiente al 5.29% de la capacidad total y con una tasa de crecimiento anual del 12%, distribuidos en 10 estados y 45 parques eólicos. El mercado mayorista de electricidad en México comenzó a operar en 2016 y las dos primeras subastas celebradas durante el mismo año se produjeron a precios históricamente bajos, con tecnologías mixtas de energía eólica y solar. Esto demuestra la naturaleza altamente competitiva de la energía eólica en el país, aunque reconoce que todavía existen algunos retos importantes por delante en la transición hacia el uso de una mezcla de fuentes diversas de generación de energías

limpias. Los parques eólicos en México se localizan en los estados de Baja California (166 MW), Chiapas (29 MW), Coahuila (200 MW), Jalisco (179 MW), Nuevo León (274 MW), Oaxaca (2,360 MW), Puebla (66 MW), San Luis Potosí (200 MW), Tamaulipas (301 MW) y Zacatecas (230 MW), sin embargo, existe capacidad de aprovechamiento de energía eólica en otros estados, como es el caso de Guerrero (AMDEE 2018; GWEC 2018; SENER 2018).

Metodología

En todo estudio de valoración del potencial eólico, se requiere de conocer la disponibilidad del viento en el sitio de interés. Como primer requisito, deben existir registros históricos horarios por lo menos de un año, tiempo suficiente para determinar la variabilidad diurna y nocturna, estacional y la dirección prevalente del viento, pero, un mayor número de observaciones permitirá realizar un estimado del potencial eólico más representativo y confiable. Las distribuciones de las velocidades del viento por lo regular no son simétricas, en ocasiones se tendrá velocidades muy altas, pero son muy raras, mientras que los vientos moderados a bajos son bastante comunes (AWS Scientific 1997; Burton et al. 2011). Ante la falta de datos o mala calidad de los mismos, la caracterización y análisis del viento se puede determinar mediante un modelo de mesoescala con una red regular de puntos con espaciamiento de 2 a 5 kilómetros (Jaramillo-Salgado y Borja-Díaz 2010). En México, la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (CGSMN) es el organismo encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo meteorológico a escala nacional y local, que para el caso particular del estado de Guerrero, cuenta con seis Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), de las cuales dos están fuera de servicio y las otras cuatro no se han calibrado en los últimos años, por lo que se cuenta con incertidumbre sobre la calidad de

los datos. Derivado de la poca cobertura estatal de observaciones meteorológicas y que existen problemas asociados a la operación y falta de calibración, para este estudio se utilizó el modelo regional WRF (por sus siglas en inglés, Weather Research and Forecast System) para generar los parámetros necesarios en el cálculo del potencial eólico. Este modelo numérico de la atmósfera es ampliamente utilizado tanto para estudios de investigación como para pronóstico operativo a nivel mundial. Esta basados en la solución de un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen los procesos físicos del movimiento y conservación de la energía que rigen la dinámica de la atmósfera (Janjic 2003; Skamarock et al. 2005). Estas ecuaciones son una aproximación de la realidad por lo que el modelo no es perfecto, pero permite subsanar la escasas de datos. Se definieron dos dominios anidados para el estado de Guerrero, con 12 y 4 km de resolución espacial respectivamente (figura 1), siendo el dominio de 4 kilómetros el utilizado para valorar el potencial eólico disponible en la entidad federativa por su alta resolución espacial. En la tabla 1 se mencionan los parámetros principales de configuración del

modelo WRF utilizados en el proceso de simulación.

Para operar el modelo WRF, necesita conocer el estado actual de la atmósfera en el tiempo de inicialización, llamadas condiciones iniciales o primera aproximación. Además, por ser un modelo regional o de área limitada, requiere de la misma información en los límites de sus dominios, conocido como condiciones de frontera, en intervalos de tiempo constantes. Para dicho propósito, se utilizaron los datos del modelo global GFS (por sus siglas en inglés, Global Forecast System) de NCEP (por sus siglas en inglés, National Centers for Environmental Prediction) a un cuarto de grado de resolución horizontal (27 km) y con intervalos de tiempo cada 6 horas. Se descargaron los archivos desde el sitio web <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>. El periodo simulado con el modelo WRF corresponde a los años 2016 y 2017 (731 días), con frecuencia de resultados horarios (17,544 datos por punto de malla). Del conjunto de variables meteorológicas que genera el modelo WRF, solo se utilizó la velocidad del viento a 10 metros (WS10), dirección del viento a 10 metros (WD10), temperatura del aire (T) y presión atmosférica (P+PB).

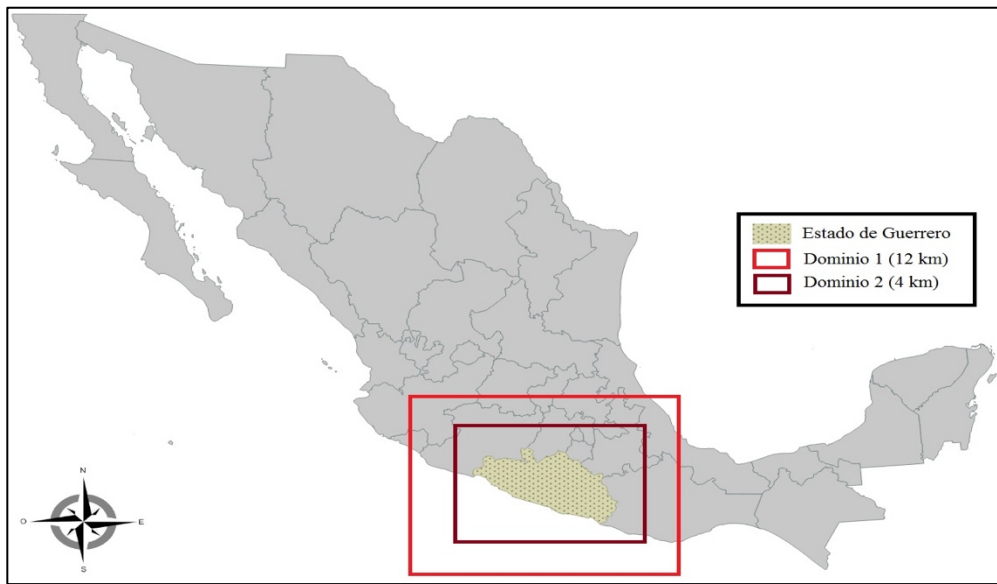


Figura 1. Ubicación geográfica de los dominios configurados en el modelo WRF

Tabla 1. Parámetros principales de configuración del modelo WRF

Parámetro	Dominio 1	Dominio 2
ref_lat	17.6153	No aplica
ref_lon	-100.1043	No aplica
time_step	60	60
i_parent_start	1	12
j_parent_start	1	11
e_we	67	142
e_sn	56	106
dx	12,000	4,000
dy	12,000	4,000
mp_physics	6	6
cu_physics	16	16
ra_lw_physics	4	4
ra_sw_physics	4	4
bl_pbl_physics	1	1
sf_sfclay_physics	91	91
sf_surface_physics	2	2

De acuerdo con la Ley Exponencial de Hellmann, la velocidad del viento varía exponencialmente en relación a la altura sobre el suelo. Por lo que conociendo la velocidad del viento a determinada altura, es posible calcular

la velocidad correspondiente en otras alturas. La ecuación 1 permite obtener la velocidad del viento a la altura h partiendo del conocimiento de la velocidad a 10 m sobre el suelo.

$$V_h = V_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (1)$$

Donde:

V_h : Velocidad del viento a la altura h (m/s)

h : Altura (m)

V_{10} : Velocidad del viento a 10 metros de altura (m/s)

α : Exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno y cuyos valores están indicados en la tabla 2

Tabla 2. Valores del exponente de Hellmann en función de la rigurosidad del terreno
(Fuente: Fernández-Diez 1993)

Tipo de Terreno	Valor del exponente de Hellmann
Lugares llanos con hielo o hierva	$\alpha = 0.08 \div 0.12$
Lugares llanos (mar, costa)	$\alpha = 0.14$
Terrenos poco accidentados	$\alpha = 0.13 \div 0.16$
Zonas turísticas	$\alpha = 0.2$
Terrenos accidentados o bosques	$\alpha = 0.02 \div 0.26$
Terrenos muy accidentados y ciudades	$\alpha = 0.25 \div 0.4$

Con los datos de la velocidad del viento a 10 m de altura, obtenidos con las simulaciones del modelo WRF, se calculó su valor correspondiente a 30 m de altura. Se generalizó para toda la malla el exponente de Hellman correspondiente a “Terrenos poco accidentados” (0.16).

La velocidad el viento es el indicador más importante para determinar su energía disponible, pero también se requiere del conocimiento de su variación en el tiempo, y en menor grado, la densidad del aire. La velocidad promedio del viento para un periodo se puede calcular por medio de la ecuación 2.

$$V_m = \frac{\sum_1^N V_i}{N} \quad (2)$$

Donde:

- V_m : Velocidad media del viento
- V_i : Velocidad del viento en el tiempo i
- N : Número de tiempos

La velocidad media del viento no es suficiente para evaluar el potencial eólico disponible en el área de estudio, pero es un primer indicador de su posible aprovechamiento. En la tabla 3 se presenta la relación entre viabilidad y

velocidad del viento promedio para su uso como fuente de energía definida en “La Guía de Energía: un catálogo internacional de equipos de energía a pequeña escala”.

Tabla 3. Relaciones generales entre viabilidad y velocidad del viento para su uso como fuente de energía (Fuente: Clancy et al. 1994)

Promedio anual de velocidad del viento a 10 m de altura	Posibilidad de uso de la energía eólica
Menos de 3 m/s	Usualmente no es viable, a menos que existan circunstancias especiales para evaluar mejor el recurso.
Entre 3 y 4 m/s	Puede ser una buena opción para equipos eólicos de bombeo de agua (Aerobombeo), poco viable para generación eléctrica con equipos eólicos (aerogeneración)
Entre 4 y 5 m/s	Aerobombas son competitivamente económicamente a los equipos Diesel, aerogeneración con sistemas autónomos es viable
Entre 5 y 6 m/s	Viable para aerobombeo y aerogeneración con sistemas autónomos
Más de 6 m/s	Viable para aerobombeo, aerogeneración con sistemas autónomos y para sistemas conectados a la red eléctrica.

Por otra parte, la determinación de la densidad del aire implica, básicamente, conocer la temperatura y presión atmosférica suponiendo que el aire se comporta como un gas perfecto.

La densidad del aire se obtiene con la ecuación 3. La densidad del aire se calculó para cada punto de malla utilizando como constante de aire seco 287.05 J/kgK.

$$p = \frac{P_a}{R T} \quad (3)$$

Donde:

- p : Densidad del aire (Kg/m³)
- P_a : Presión atmosférica (Pa)
- R : Constante de aire seco (J/kgK)
- T : Temperatura (°K)

La energía cinética de una masa de aire en movimiento se calcula con la ecuación 4.

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (4)$$

Donde:

- E : Energía cinética (W)
- m : Masa de aire (Kg/m³)
- V : Velocidad del viento (m/s)

La energía cinética por unidad de volumen se calcula con la ecuación 5.

$$e = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (5)$$

Donde:

e : Energía cinética por unidad de volumen (W)
 p : Densidad del aire (Kg/m³)
 V : Velocidad del viento (m/s)

La potencia contenida en el viento, también conocida como potencia disponible, soplando a una velocidad V y pasando a través de un área A perpendicular a V , se calcula con la ecuación 6.

$$P_d = \frac{1}{2} p V^2 V A = \frac{1}{2} p A V^3 \quad (6)$$

Donde:

P_d : Potencia disponible (Wh)
 p : Densidad del aire (Kg/m³)
 A : Área del rotor (m²)
 V : Velocidad del viento (m/s)

Por tanto, la potencia disponible en las masas de aire en movimiento es directamente proporcional a la densidad, al área perpendicular enfrentada al rotor y al cubo de la velocidad. Es importante señalar que la velocidad del viento hace referencia a la velocidad media, siendo esta la magnitud más relevante en la caracterización del recurso eólico en un sitio. La potencia eólica disponible es proporcional al cubo de la velocidad del viento, por lo que un incremento de velocidad en una unidad, por ejemplo de 5 a 6 m/s, representa un aumento sustancial en potencia de 125 contra 216 (73% de incremento). Así mismo, si la velocidad del viento se duplica, la potencia disponible se incrementa en ocho veces. Es por esto, que lugares con altos niveles de velocidad del viento son preferidos para la evaluación sistemática del recurso (Avellanea-Cusaria, 2012).

La velocidad media del viento solo aporta un indicador de conveniencia en el sitio de medición, ya que un lugar específico con vientos irregulares altos y bajos puede tener el mismo promedio de velocidad que en otro lugar con una velocidad promedio constante durante todo un año.

Por otra parte, las leyes de la física impiden que se pueda extraer toda la potencia disponible en el viento a su paso por el rotor de un aerogenerador. El viento a su paso se frena, saliendo del mismo con una velocidad menor que con la que ha entrado. El límite de Betz establece que no se puede superar un rendimiento de 16/27 (59%) en la transformación de energía eólica en mecánica (Betz, 1920), pero este porcentaje depende de la eficiencia y características de la máquina. En la ecuación 7 se incluye el coeficiente del límite aprovechable para calcular la potencia extraíble.

$$P_e = \frac{1}{2} p A V^3 C_p \quad (7)$$

Donde:

P_e : Potencia extraíble (Wh)
 p : Densidad del aire (Kg/m³)
 V : Velocidad del viento (m/s)
 A : Área del rotor (m²)
 C_p : Coeficiente de límite aprovechable (% expresado en decimal)

Un análisis de frecuencias del viento nos permite conocer la forma de distribución de los datos y obtener su porcentaje de probabilidad de ocurrencia. La distribución de Weibull (Weibull, 1951) es una distribución

típicamente utilizada en meteorología, específicamente en el análisis de velocidad del viento. Su expresión matemática se muestra en la ecuación 8.

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (8)$$

Donde:

$f(v)$: Función de densidad de probabilidad de Weibull

k: Factor de forma (adimensional)

c: Factor de escala (m/s)

v: Velocidad del viento (m/s)

El parámetro de forma “k”, se trata de un parámetro adimensional de la distribución de Weibull y el parámetro de escala “c”, cuyas dimensiones dependerán de las variables consideradas en cada caso. Para nuestro estudio la variable en cuestión es el viento, por lo que los valores que toma $f(v)$ indican la probabilidad de observar cada velocidad del viento. El parámetro k representa el rango de variación de la velocidad del viento durante un periodo de tiempo, mientras que el parámetro c tiene unidades de m/s y está relacionado con la media de la velocidad del viento.

Estos dos parámetros son ajustables y pueden adoptar formas muy variadas, lo que le confiere

gran versatilidad y capacidad de adaptarse a las diferentes formas de los datos con gran facilidad. Tiene por tanto una mayor flexibilidad frente a otras distribuciones como pueden ser la exponencial, la normal (Gaussiana), o la Gamma que pueden ser consideradas casos especiales de la distribución de Weibull para valores concretos de los parámetros de esta.

Existen diferentes métodos para calcular los parámetros k y c, en este estudio se utilizó el método de los momentos, que requiere del cálculo de la velocidad media del viento y su desviación estándar. El parámetro k se puede obtener con la ecuación 9.

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_m}\right)^{-1.086} \quad (9)$$

Donde:

σ : Desviación estándar (m/s)

V_m : Velocidad media del viento (m/s)

El parámetro c se puede obtener con la ecuación 10.

$$c = \frac{V_m}{\gamma \left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (10)$$

Donde:

V_m : Velocidad media del viento (m/s)

γ : Función gamma

Resultados

Los parámetros de presión atmosférica, temperatura, velocidad y dirección del viento a 10 metros de altura, fueron simulados con el modelo WRF, para una malla regular de 142 puntos en la longitud y 106 puntos en la latitud, con una resolución horizontal de 4 km y valores horarios para los 731 días de experimento. Se extrapolaron las velocidades del viento a 10 m de altura para obtener la correspondiente a 30 metros por medio de la Ecuación de Hellmann. Se calculó el viento promedio para el periodo de estudio (figura 2), así como el potencial eólico disponible y extraíble (figura 3). Para valorar el potencial se utilizó como referencia un aerogenerador tipo ENAIR E200, con un área de barrido de 75.4 m², un rango de operación de 2 a 25 m/s, un coeficiente de límite aprovechable del 48% y

una potencia nominal de 20 kW (ENAIR 2018).

El análisis espacial de la velocidad del viento promedio y potencia eólica aprovechable, permite obtener de manera general una primera aproximación del potencial eólico en el estado de Guerrero. En la tabla 4 se presenta la relación entre la viabilidad y velocidad del viento promedio para la estimación del potencial eólico en los nueve municipios con mayor potencial eólico observado. De los cuales, sobresalen los municipios de Acapulco de Juárez (Las Playas), Coahuayutla de José María Izazaga (Olivares), Lázaro Cárdenas (Ziguatanejo) y Tecpán de Galeana, donde se obtuvo un potencial eólico aprovechable superior a los 1000 Wh (1 kWh). Por lo que solo en estas localidades se realiza un desglose a detalle de la capacidad de generación de energía eólica.

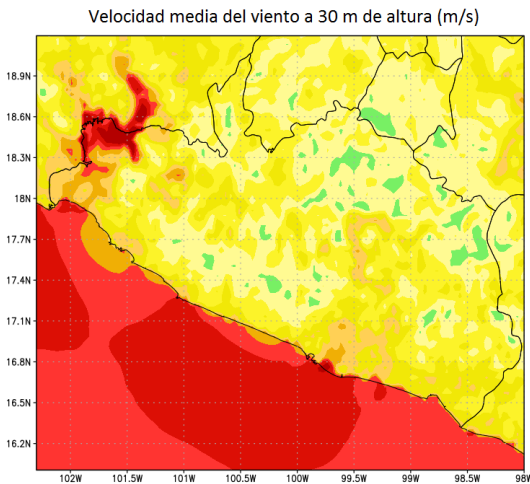


Figura 2. Velocidad media del viento a 30 m de altura

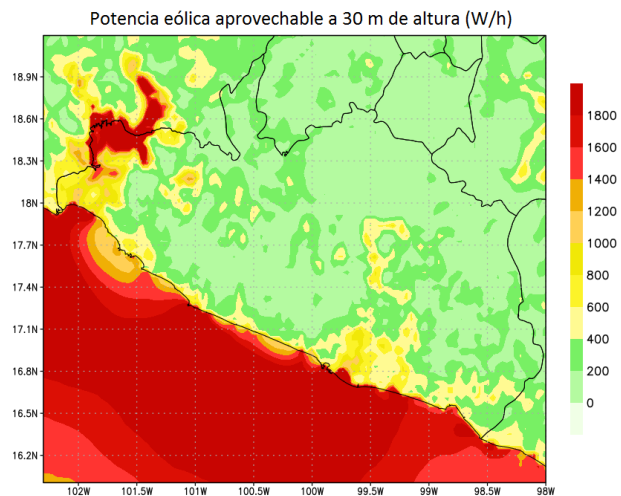


Figura 3. Potencia eólica aprovechable a 30 m de altura

La potencia requerida por los electrodomésticos de una vivienda típica es de 4.35 kW por día. En la tabla 5 se presenta la potencia nominal de los aparatos

electrodomésticos básicos utilizados en una vivienda típica. Por otra parte, en las tablas 6, 7, 8 y 9 se resume la capacidad de generación

de energía eléctrica en los municipios con mayor potencial eólico obtenido.

Tabla 4. Características del viento en nueve localidades seleccionadas del estado de Guerrero

Municipio	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Altura (msnmm)	Velocidad del viento (m/s)		Potencia eólica (Wh)	
				Media	Máxima	Disponible	Extraíble
Acapulco de Juárez	16.832	99.916	2	4.39	13.57	3,707.61	1,779.65
Chilpancingo de los bravo	17.494	99.452	1661	2.03	7.86	315.183	151.29
Coahuayutla de José María Izazaga	18.502	101.709	452	5.25	16.24	5,981.78	2,871.25
Lázaro Cárdenas	17.633	101.568	22	4.01	14.54	2,820.52	1,353.85
La Unión de Isidoro Montes de Oca	18.079	101.847	590	3.23	15.90	1,375.07	660.03
Omotepec	16.612	98.490	61	3.04	11.61	1,230.32	590.55
Teconapa	16.995	99.379	633	3.45	14.65	1,695.75	813.96
Tecpán de Galeana	17.275	101.063	25	4.38	15.69	3,666.47	1,759.91
Zirandaro	18.479	101.370	796	2.37	11.36	559.22	268.43

Tabla 5. Potencia requerida por electrodomésticos de una vivienda típica

Aparato	Potencia nominal (Watts)	Horas diarias de funcionamiento	Consumo diario (Watts)
Computadora	250	3.0	750.0
Estéreo	75	2.0	150.0
Foco fluorescente	13	3 (6 focos)	234
Horno de microondas	1,300	0.05	65.0
Lavadora	550	0.30	165.0
Licuada	350	0.06	21.0
Pantalla LED 32"	75	3.0	225.0
Plancha	1,150	0.30	345.0
Refrigerador (11-12 ft ³)	300	8.0	2,400.0
		Acumulado diario	4,355.0

Tabla 6. Capacidad de generación de energía eólica en el municipio de Acapulco de Juárez

Intervalo (m/s)	Horas 731 días (17,544)	X	Potencia instantánea (W)	=	Energía Producida (Wh)
0 - 1	650		0		0
1 - 2	1,715		0		0
2 - 3	2,372		80		189,760
3 - 4	2,737		500		1,368,500
4 - 5	2,574		1,350		3,474,900
5 - 6	1,926		2,800		5,392,800
6 - 7	1,381		4,700		6,490,700
7 - 8	940		7,000		6,580,000
8 - 9	668		9,600		6,412,800
9 - 10	317		12,300		3,899,100
> 10	181		15,500		2,805,500
Energía total producida en 17,544 horas:					36,614,060
Promedio diario:					50,088

Tabla 7. Capacidad de generación de energía eólica en el municipio de Coahuayutla de José María Izazaga

Intervalo (m/s)	Horas 731 días (17,544)	X	Potencia instantánea (W)	=	Energía Producida (Wh)
0 - 1	704		0		0
1 - 2	1,250		0		0
2 - 3	1,898		80		151,840
3 - 4	2,871		500		1,435,500
4 - 5	1,470		1,350		1,984,500
5 - 6	1,147		2,800		3,211,600
6 - 7	1,214		4,700		5,705,800
7 - 8	1,136		7,000		7,952,000
8 - 9	1,125		9,600		10,800,000
9 - 10	850		12,300		10,455,000
> 10	642		15,500		9,951,000
Energía total producida en 17,520 horas:					51,647,240
Promedio diario:					70,653

Tabla 8. Capacidad de generación de energía eólica en el municipio de Lázaro Cárdenas

Intervalo (m/s)	Horas 731 días (17,544)	X	Potencia instantánea (W)	=	Energía Producida (Wh)
0 - 1	269		0		0
1 - 2	1,127		0		0
2 - 3	2,600		80		208,000
3 - 4	3,912		500		1,956,000
4 - 5	3,707		1,350		5,004,450
5 - 6	2,282		2,800		6,389,600
6 - 7	964		4,700		4,530,800
7 - 8	367		7,000		2,569,000
8 - 9	153		9,600		1,468,800
9 - 10	86		12,300		1,057,800
> 10	34		15,500		527,000
Energía total producida en 17,520 horas:					23,711,450
Promedio diario:					32,437

Tabla 9. Capacidad de generación de energía eólica en el municipio de Tecpán de Galeana

Intervalo (m/s)	Horas 731 días (17,544)	X	Potencia instantánea (W)	=	Energía Producida (Wh)
0 - 1	317		0		0
1 - 2	1,432		0		0
2 - 3	2,238		80		179,040
3 - 4	3,192		500		1,596,000
4 - 5	2,637		1,350		3,559,950
5 - 6	1,902		2,800		5,325,600
6 - 7	1,440		4,700		6,768,000
7 - 8	1,117		7,000		7,819,000
8 - 9	716		9,600		6,873,600
9 - 10	340		12,300		4,182,000
> 10	113		15,500		1,751,500
Energía total producida en 17,520 horas:					38,054,690
Promedio diario:					52,058

Se describe la variación de la velocidad del viento mediante la distribución de Weibull, a través de la cual se describe la forma de distribución de los datos y obtener su porcentaje de probabilidad de ocurrencia, solo

para los municipios de Acapulco de Juárez (figura 4), Coahuayutla de José María Izazaga (figura 5), Lázaro Cárdenas (figura 6) y Tecpán de Galeana que presentan mayor potencial eólico (figura 7).

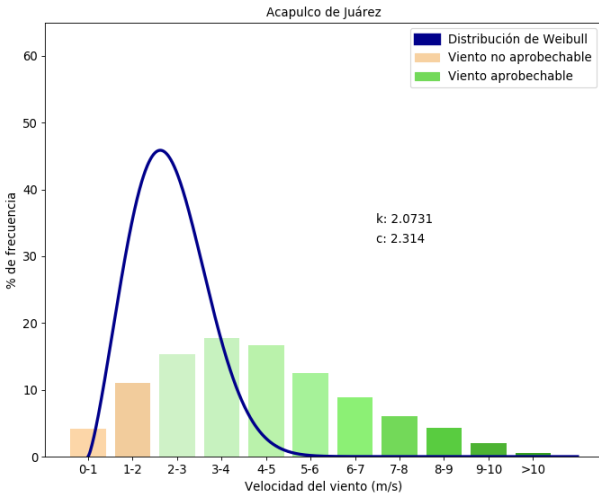


Figura 4. Distribución de Weibull en el municipio de Acapulco de Juárez

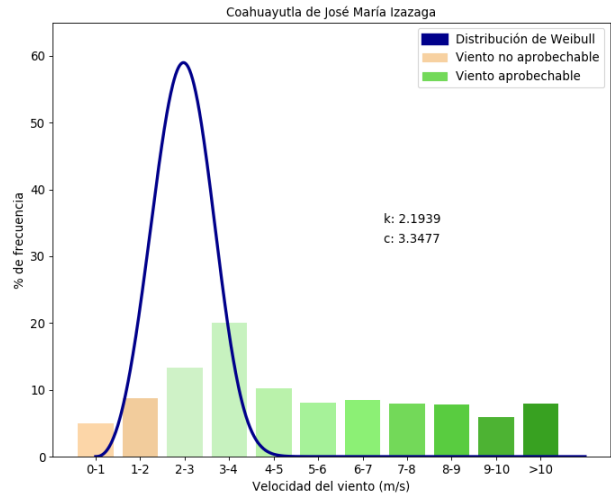


Figura 5. Distribución de Weibull en el municipio de Coahuayutla de José María Izazaga

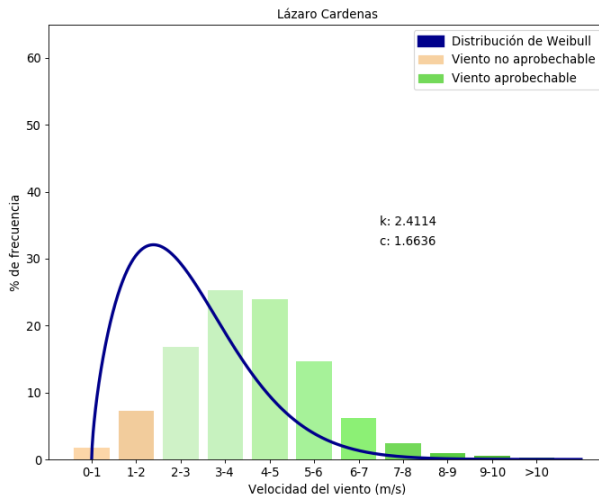


Figura 6. Distribución de Weibull en el municipio de Lázaro Cárdenas

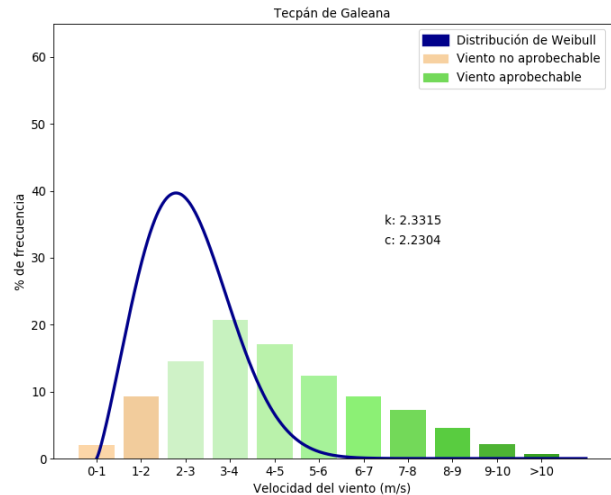


Figura 7. Distribución de Weibull en el municipio de Tecpán de Galeana

La “rosa de vientos” es un instrumento gráfico que permite valorar la frecuencia de la dirección del viento a través del tiempo, factor

importante para identificar la orientación y optimizar la distribución de las turbinas eólicas dentro de un parque eólico. Se elaboraron las

rosas de vientos para los cuatro municipios con mayor potencial eólico estimado. En el municipio de Acapulco de Juárez, prevalecen los vientos del oeste y en menor escala del noroeste y noreste (figura 10). Para el poblado de Coahuayutla de José María Izazaga, existe un claro dominio de los vientos del sur y en menor escala del norte (figura 11). En Lázaro Cárdenas, los vientos provienen principalmente del norte y suroeste (figura 12). Para el poblado de Tecpán de Galeana los vientos dominantes provienen principalmente

del oeste y noroeste-norte (figura 13). De las cuatro localidades de muestreo, solo en Coahuayutla los vientos dominantes provienen del sur, lo cual se correlaciona con la mayor altura del punto de muestreo, 452 msnmm, en comparación de las otras localidades con una altura entre 2 y 25 msnmm, lo que indica la ascensión de los vientos oceánicos canalizados por la sierra madre del sur hacia la parte noroeste del estado.

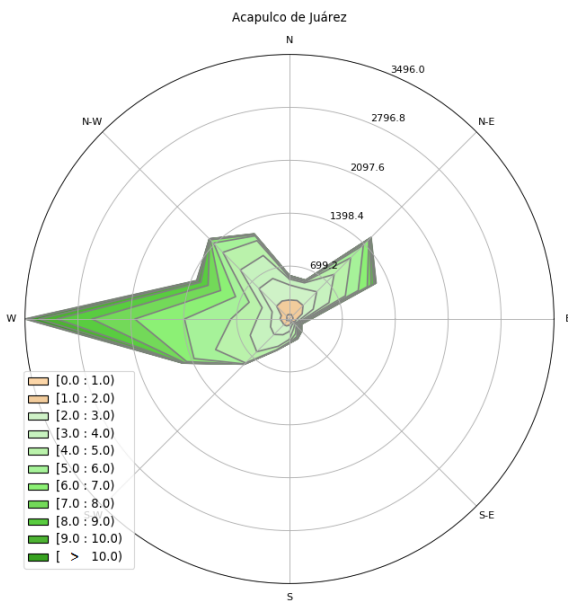


Figura 10. Rosa de vientos en el municipio de Acapulco de Juárez

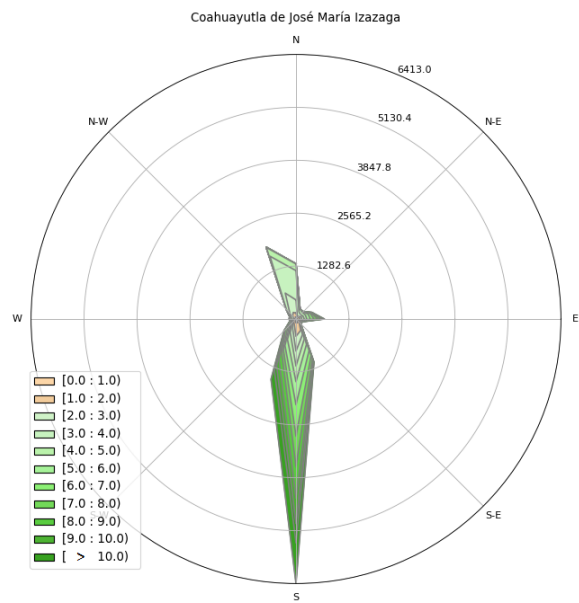


Figura 11. Rosa de vientos en el municipio de Coahuayutla de José María Izazaga

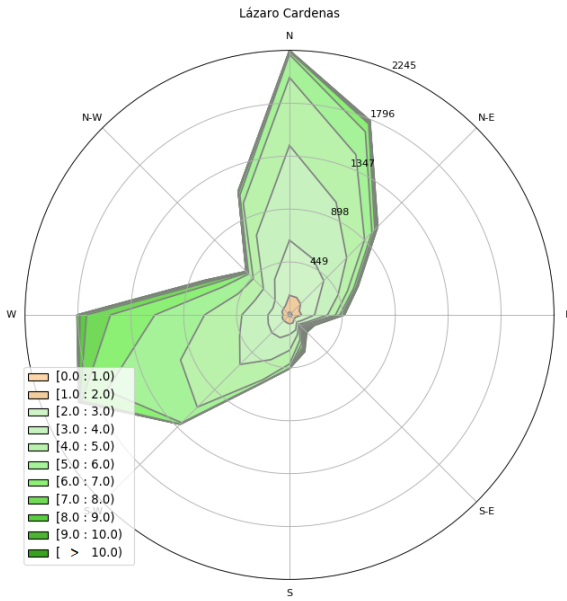


Figura 12. Rosa de vientos en el municipio de Lázaro Cárdenas

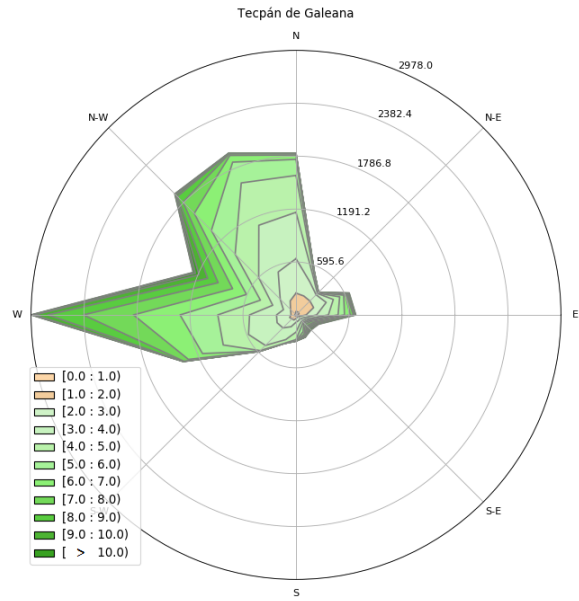


Figura 13. Rosa de vientos en el municipio de Tecpán de Galeana

Conclusiones

Derivado del análisis de la distribución de la velocidad del viento promedio y el cálculo del potencial eólico extraíble, para los años 2016 y 2017, se determinó que el estado de Guerrero tiene una alta posibilidad de aprovechamiento del viento como generador de energía eléctrica en los municipios de Acapulco de Juárez (Las Playas), Coahuayutla de José María Izazaga (Olivares), Lázaro Cárdenas (Ziguananejo) y Tecpán de Galeana, con un potencial eólico extraíble promedio de 1779.65, 2871.25, 1353.85 y 1759.91 Wh respectivamente, además, se cuenta con un alto rango de operación entre 79 y 91% del año. Se destaca la localidad de Olivares, en el municipio de Coahuayutla de José María, ubicado al noroeste del estado, con una capacidad de generación de 70.65 kWh diarios, suficiente para proveer electricidad a 16 viviendas típicas por aerogenerador. No obstante, se debe

considerar que estos resultados están basados en la simulación numérica de los parámetros meteorológicos con el modelo WRF, por lo que, para un proyecto formal de aprovechamiento de la energía eólica en el estado de Guerrero, se recomienda instrumentar los sitios de interés y recolectar los parámetros horarios de presión, temperatura, velocidad y dirección del viento por lo menos durante un año para corroborar la información.

La metodología aplicada en este estudio de investigación puede ser utilizada en diferentes escalas y áreas de interés. Siempre será recomendable emplear observaciones locales en el área de estudio o al menos de sitios homólogos cercanos, pero a falta de datos o deficiente calidad de los mismos, es viable la utilización de un modelo numérico regional para obtener una primera aproximación del potencial eólico disponible.

Referencias

- AMDEE, (2018). Capacidad instalada de Energía Eólica en México. México: Asociación Mexicana de Energía Eólica.
- AWS Scientific, Inc. (1997). Wind Resource Assessment Handbook: Fundamentals for conducting a successful monitoring program. USA: National Renewable Energy Laboratory.
- Avellanea-Cusaría, J. A. (2012). Estudio del potencial de generación de energía eólica en la zona del Páramo de Chontales, municipios de Paipa y Sotaquirá. Tesis de maestría. Colombia: Universidad Libre.
- Betz, A. (1920). Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren. Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen, 26, 307-309.
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., Bossanyi, E. (2011). Wind Energy Handbook. USA: Wiley.
- Cavallo, A.J., Hock, S.M., Smith, D.R. (1993). Wind Energy: technology and economics. Washington D.C.: Island Press.
- Clancy, J. S., Hulscher, W. (Ed.), Hulscher, W. S., Hulscher, W. S., & Fraenkel, P. (Ed.) (1994). The Power Guide: An international catalogue of small-scale energy equipment. London: IT Publications.
- ENAIR, (2018). Ficha técnica E200. España: ENAIR.
- Fernández-Diez, P. (1993). Energía Eólica. España: Servicios Publicitarios E.T.S.I. Industriales y Tecnológicos.
- GWEC, (2018). Global Wind 2016 Report. Global Wind Energy Council (GWEC).
- Hunter, J., Dale, D., Firing, E., Droettboom, M. (2018). Matplotlib handbook. USA: Matplotlib development team.
- Jaramillo-Salgado, O. A., Borja-Díaz, O. A. (2010). Energía del viento. Revista Ciencia, 61(2), 18-29.
- Janjic, Z. I. (2003). A nonhydrostatic model based on a new approach. Meteorology and Atmospheric Physics, 82(1), 271-285.
- Lecuona-Neumann, A. (2002). La energía eólica: principios básicos y tecnología. España: Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería, Universidad Carlos III de Madrid.
- Mur-Amada, J. (2001). Curso de energía eólica. España: Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza.

SENER, (2018). 6to Informe de Labores de la Secretaría de Energía. México: Secretaría de Energía.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W. & Powers, J. G. (2005). A Description of the Advanced Research WRF Version 2. (Tech Note, NCAR/TN-468+STR). USA: National Center Atmospheric Research.

Weibull, W. (1951) A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 18, 293-297.