

# Corrientes de aire en diferentes municipios de Querétaro

Raúl García García<sup>1\*</sup>, Marisela Cruz Ramírez<sup>2</sup>, Esmeralda Reséndiz Rojas<sup>3</sup>, Gustavo González Yáñez<sup>4</sup>, German Orozco Gamboa<sup>5</sup>, y Saturnino García García<sup>6</sup>.

<sup>1, 2, 3 y 4</sup>. Universidad Tecnológica de San Juan del Río.<sup>5</sup> Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, Querétaro, México.

<sup>6</sup> Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Huichapan Hidalgo. México

\*E-mail: [rgarciag@utsjr.edu.mx](mailto:rgarciag@utsjr.edu.mx)

## Resumen

En Querétaro, aproximadamente 12% de la matriz energética corresponde a energías limpias; el resto proviene de combustibles fósiles ante el crecimiento sostenido anual de la demanda de energía eléctrica en el Estado. Las energías renovables son una alternativa de uso, entre ellas la energía eólica que ha crecido en los últimos años gracias al interés del sector privado, así como de la estrategia nacional de energía, en la que se encuentra dicho Estado. Por lo anterior, se realiza un estudio de viabilidad del potencial de energía eólica en 13 municipios de Querétaro. La densidad de energía eólica calculada se basa en datos meteorológicos, que pueden ser alimentados posteriormente a una turbina dependiendo de la deseada en kW. La producción de energía anual esperada puede ser calculada directamente con la densidad de energía presentada, la cual podría triplicarse si se consideran alturas mayores.

**Palabras Clave:** Velocidad, ráfaga de viento y densidad de energía.

## Abstract

*In Querétaro, approximately 12% of the energy matrix corresponds to clean energy, the rest comes from fossil fuels, given the sustained annual growth in the demand for electricity in the state. Renewable energies are an alternative for use, including wind energy that has grown in recent years thanks to the interest of the private sector shown, as well as the national energy strategy in which this state is located. Therefore, a feasibility study of the wind energy potential is carried out in 13 municipalities of Querétaro. The calculated wind energy density is based on meteorological data, which can then be fed to a turbine depending on the desired one in kW. The expected annual energy production can be calculated directly with the energy density presented which could triple if higher heights are considered.*

**Keywords:** Speed, Gust of Wind and Energy Density

Artículo arbitrado	
Recibido:	Aceptado:
15 de agosto de 2020	17 de septiembre de 2020

## Introducción

Las energías limpias y renovables, como la eólica, se pueden lograr promoviendo la energía de manera amplia y efectiva (Elnaggar et al., 2017; Huda Albisher, 2019; Jianbo Yang, Qunyi Liu, 2017). Esta es la segunda fuente de electricidad renovable más importante después de la hidroeléctrica. La mayoría de las turbinas eólicas modernas se encuentran en tierra, pero un número cada vez mayor se construye en alta mar, generalmente en parques eólicos. Como la energía eólica es intermitente, debe ser apoyada por otras fuentes de electricidad (Atul Kumar, Muhammad Zafar Ullah Khan, 2018; Breeze & Breeze, 2016). Además es una de las fuentes de energía renovables abundantes, baratas y de rápido crecimiento (Rehman et al., 2020).

En 2010, México tenía una capacidad instalada en operación de 519 megawatts (MW) de energía eólica; se prevé que, para 2011, se duplique y en 2015 se multiplique al menos por cinco. Esta tendencia representa el reto de lograr un crecimiento sostenido para consolidar a la industria (López López & Pacheco Guzmán, 2018). Por su alta competitividad con la que cuenta en el país, se espera que la energía eólica incremente su generación de la eléctrica en 387.5% entre 2017 y 2031 (Alexandri & Villanueva, 2017). Esta última, derivada en gran medida por la reducción de sus costos y el alto potencial con el que se sabe que la energía de entrada de una turbina eólica es proporcional a la velocidad del viento, aunque esta no es constante (Wagner, 2017). Es decir, la energía (potencia) del viento cuando pasa a través de un área  $A$  perpendicular a la dirección del viento es:

$$P = A \frac{1}{2} \rho V^3 \quad \text{Ecuación uno}$$

Donde:

$P$  = Potencia del viento

$A = \pi R^2$  es el área barrida por las palas del aerogenerador de longitud  $R$ .

$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  es la densidad del aire a nivel del mar.

$V$  = Velocidad del viento.

La densidad de energía producida en  $\text{W/m}^2$  se calcula a través de la expresión:

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad \text{Ecuación dos}$$

Esta investigación se realizó para conocer las velocidades de viento promedio de 13 municipios del Estado de Querétaro. Con base en estos resultados, se tiene el propósito de ayudar a México a alcanzar su meta puesta en la estrategia Nacional de Energía 2012-2026, enviada al H. Congreso de la Unión el 29 de febrero de 2012; en esta, se establece que la generación eléctrica a partir de energías limpias debe alcanzar una participación de 35% de la generación total en 2026 (Valle, 2012). Esto contribuirá a mantener el calentamiento global por debajo de los  $2^\circ\text{C}$ ; también, para que los inversionistas en energías renovables en el área eólica inviertan en este Estado impulsando la economía, el desarrollo y el conocimiento de estas mismas en los distintos municipios y comunidades aledañas.

## Metodología

Se consideró la utilización de la herramienta *Weather Underground*, la cual es una página en internet donde se concentran la mayor parte de las estaciones meteorológicas capaz de proporcionar en tiempo real y de manera eficiente información importante para nuestro estudio. De esto se obtienen los datos de velocidad de viento (se promedia y posteriormente se utilizan en la ecuación dos para obtener la densidad de energía) y ráfaga de viento correspondientes a los municipios del Estado de Querétaro. Cabe destacar que se adquieren solo los datos de las trece estaciones meteorológicas de la Tabla (1).

ESTACIÓN METEREOLÓGICA
CEA-PEDRO ESCOBEDO-IQUERETA10
CEA-UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA-IQUERETA29
CEA-AREA CENTRAL-IQUERETA06
CEA-CONCYTEQ-IQUERETA15
CEA-AMEALCO-IAMEALCO2
CEA-HUIMILPAN-IQUERETA19
CEA-TEQUISQUIAPAN-IQUERETA11
CEA-PEÑAMILLER-IQTSANT14
CEA-JALPAN-IQUERETA12
CEA-COLÓN-IQUERETA16
CEA-TOLIMAN-IQUERETA46
IPINAL2
CEA-EZEQUIEL MONTES-IQUERETA30.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas de Qro. (Elaboración propia)

De los trece municipios expuestos en la Tabla (1), se revisaron los datos de velocidad y ráfaga de viento de los años 2016, 2017 y 2018, años que fueron analizados. En esta búsqueda, se promedian todos los datos por cada día (en total 144 datos de velocidad y 144 datos de ráfagas de viento) proporcionados por la estación meteorológica cada diez minutos durante las 24 horas mediante la expresión:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde

$\bar{x}$  = Promedio aritmético

n = número total de datos

$x_i = i=1,2,\dots,n$

Con la Ecuación 3, se calcula el promedio por día para obtener los promedios diarios de cada mes y, posteriormente, los que corresponden a cada año de velocidad y ráfaga de viento, con un total de 52,560 datos promediados por año por parámetro. La velocidad promedio de viento es empleada en la Ecuación 2 para determinar la densidad de energía en W/m<sup>2</sup>. Se determina para los tres municipios del año 2018 con mayor densidad de energía la velocidad de viento promedio en m/s durante ocho horas (14:00-22:00 horas).

## Resultados

En la Tabla (2), se presentan los valores de mayor a menor en función de la densidad de energía, así como el promedio diario del año 2018 de velocidad y ráfagas de viento obtenidos promediando los datos de las 24 horas del día durante los 365 días del año 2016 en trece municipios de Querétaro. El municipio de Pedro Escobedo es el que cuenta con los valores más altos en velocidad 3.59 m/s, 8.35 m/s en ráfagas de viento y densidad de energía de 26.1 w/m<sup>2</sup>; seguido de Amealco, con un valor promedio en viento de 2.046 m/s y densidad de energía 4.82 W/m<sup>2</sup>. En tercer lugar, se encuentra el municipio de San Juan del Río con valores de 1.918 m/s en velocidad de viento y 3.97 W/m<sup>2</sup> en densidad de energía

Municipio	Velocidad m/s	Ráfagas m/s	Densidad de energía W/m <sup>2</sup>
Pedro Escobedo	3.594	8.356	26.1041315
Amealco	2.046	2.614	4.82060581
San Juan del Río	1.918	3.979	3.97015499
Huimilpan	1.736	0.973	2.9416856
Ezequiel Montes	1.378	1.636	1.47106642
Querétaro	1.305	2.379	1.25055614
Tequisquiapan	1.283	3.039	1.18899087
Pinal de Amoles	1.139	1.397	0.83021219
Cadereyta	1.018	1.273	0.59280495
Colón	0.927	2.514	0.44759946
Peñamiller	0.587	2.057	0.11405699
Jalpan de Serra	0.552	0.575	0.0944798
Tolimán	0.398	1.016	0.03541671

Tabla 2. Datos eólicos correspondiente a 2016 en trece de los municipios de Querétaro. (Elaboración propia)

Por otra parte, durante 2017 el comportamiento fue similar, ya que Pedro Escobedo fue el municipio con la velocidad de viento y densidad de energía mas altos. Los valores promedios encontrados fueron 1.97 m/s y 4.36 W/m<sup>2</sup> repectivamente; en segundo lugar, comparativamente, se encuentra San Juan del Río con 1.76 m/s y 3.08W/m<sup>2</sup>; en tercer lugar, se

posicionan Tequisquiapan, Huimilpan y Amealco, debido a que registran valores muy similares.

Municipio	Velocidad m/s	Ráfagas m/s	Densidad de energía W/m <sup>2</sup>
Pedro Escobedo	1.979	6.020	4.36005135
San Juan del Río	1.764	2.259	3.08724751
Tequisquiapan	1.286	3.058	1.19746083
Huimilpan	1.282	1.875	1.18403888
Amealco	1.281	2.118	1.18211568
Ezequiel Montes	1.260	1.348	1.12526822
Pinal de Amoles	1.252	1.556	1.10363303
Cadereyta	0.979	1.218	0.52752462
Colón	0.972	2.580	0.51718564
Peñamiller	0.550	2.011	0.09364019
Querétaro	0.539	0.889	0.08813859
Jalpan de Serra	0.539	0.656	0.08791581
Tolimán	0.287	0.384	0.0133291

Tabla 3. Datos eólicos correspondiente al año 2017 en 13 de los municipios del estado de Querétaro. (Elaboración propia)

En la Tabla (4), se puede observar, en las comparaciones entre los distintos municipios durante 2018, que Amealco registra los valores más altos en densidad de energía del viento con valores de 2.47 W/m<sup>2</sup>; seguido de Querétaro con 1.69 W/m<sup>2</sup>, y en tercer lugar se encuentra el municipio de San Juan del Río con 1.56 w/m<sup>2</sup>. Ya que el Municipio de Pedro Escobedo no ocupa el primer lugar en comparación con 2016 y 2017.

Municipio	Velocidad m/s	Ráfaga m/s	Densidad de Energía W/m <sup>2</sup>
Amealco	1.640	1.978	2.479460381
Querétaro	1.443	1.854	1.691561323
San Juan del Río	1.407	1.841	1.567418769
Tequisquiapan	1.283	2.755	1.188589617
Pinal de Amoles	1.177	1.523	0.918014369
Colón	1.108	2.897	0.764181203
Pedro Escobedo	1.091	2.400	0.731450725
Ezequiel Montes	1.038	1.555	0.628908254
Huimilpan	0.908	1.305	0.42158833
Cadereyta	0.895	1.218	0.403208127

Jalpan de Serra	0.613	0.766	0.129730504
Peñamiller	0.495	1.649	0.068113986
Tolimán	0.395	0.522	0.034620918

Tabla 4. Datos eólicos correspondiente al año 2018 en 13 de los municipios de Querétaro. (Elaboración propia)

Una observación importante es que la densidad de energía promedio por mes refleja información valiosa para la operación de un sistema eólico como se observa en la Tabla (5) y (6).

Mes	Ene.	Feb.	Mzo.	Abr.	May.	Jun.
Municipio	<b>Pedro Escobedo</b>					
Velocidad m/s	1.11	1.19	1.59	1.86	1.35	0.99
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.76	0.94	2.27	3.60	1.38	0.54
Municipio	<b>San Juan del Río</b>					
Velocidad m/s	1.77	1.74	1.94	2.07	1.95	1.57
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	3.13	2.95	4.08	4.95	4.18	2.18
Municipio	<b>Querétaro</b>					
Velocidad m/s		1.31	1.79	2.02	1.50	1.21
Densidad E. W/m <sup>2</sup>		1.27	3.22	4.64	1.88	0.99
Municipio	<b>Cadereyta</b>					
Velocidad m/s	0.90	0.99	1.31	1.30	1.16	1.04
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.40	0.55	1.25	1.24	0.88	0.63
Municipio	<b>Amealco</b>					
Velocidad m/s	1.75	1.70	1.69	2.10	1.93	1.79
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	3.04	2.74	2.73	5.23	4.05	3.24
Municipio	<b>Huimilpan</b>					
Velocidad m/s	1.11	1.19	1.59	1.86	1.35	0.99
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.76	0.94	2.27	3.60	1.38	0.54
Municipio	<b>Tequisquiapan</b>					
Velocidad m/s	1.44	1.22	1.57	1.55	1.58	1.28
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	1.69	1.02	2.16	2.09	2.21	1.18
Municipio	<b>Peñamiller</b>					
Velocidad m/s	0.60	0.53	0.75	0.72	0.42	0.29
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.12	0.08	0.23	0.21	0.04	0.01
Municipio	<b>Jalpan de Serra</b>					
Velocidad m/s	0.49	0.51	0.77	0.84	0.80	0.73
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.07	0.07	0.25	0.34	0.28	0.22

Municipio	Colón					
Velocidad m/s	1.05	0.96	1.17	1.09	1.20	1.12
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.65	0.49	0.90	0.73	0.98	0.80
Municipio	Tolimán					
Velocidad m/s	0.24	0.29	0.43	0.46	0.27	0.27
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.01	0.01	0.05	0.05	0.01	0.01
Municipio	Pinal de Amoles					
Velocidad m/s	1.06	1.07	1.47	1.49	1.22	1.14
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.67	0.69	1.78	1.85	1.02	0.83
Municipio	Ezequiel Montes					
Velocidad m/s	1.22	1.13	1.41	1.34	1.33	0.94
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	1.01	0.81	1.58	1.34	1.33	0.47

Tabla 5. Velocidad y densidad de energía del aire correspondiente al primer semestre de 2018 en 13 de los municipios de Querétaro. (Elaboración propia)

En la tabla anterior, en general, se expone que los valores más altos se presentan en los meses de marzo y abril, como en Amealco, San Juan del Río y Querétaro principalmente. La Tabla (6) muestra los resultados obtenidos durante el segundo semestre del 2018: los meses de julio, agosto, septiembre y octubre son los más altos en valores de velocidad y densidad energética del viento en Amealco, Tequisquiapan y San Juan del Río.

De acuerdo con las ecuaciones 1 y 2, la potencia del aerogenerador se incrementa con el cubo de la velocidad. El diseño de un sistema eólico depende en gran medida de la velocidad y ráfagas de viento que se generen en el lugar, ya que de no ser considerados puede causar un problema desde el diseño aerodinámico. Esto último resulta en que el perfil aerodinámico de cada una de las aspas no pueda generar las fuerzas (levantamiento y arrastre) para hacer girar al rotor al número de revoluciones al que fue diseñado; de lo anterior, dependerá la producción de energía. Basado en esta información, se realiza un análisis de velocidad de viento y densidad de energía de 2018.

Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.22	0.58	0.24	0.37	0.14	0.61
Municipio	San Juan del Río					
Velocidad m/s	1.80	1.59	0.65	0.10	0.16	1.55
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	3.27	2.27	0.16	0.00	0.00	2.08
Municipio	Querétaro					
Velocidad m/s	1.55	1.48	1.29	1.50	1.08	1.16
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	2.10	1.81	1.21	1.91	0.70	0.87
Municipio	Cadereyta					
Velocidad m/s	1.15	0.86	0.51	0.69	0.39	0.45
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.86	0.36	0.07	0.19	0.03	0.05
Municipio	Amealco					
Velocidad m/s	1.82	1.69	1.50	1.74	1.22	0.74
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	3.37	2.72	1.89	2.96	1.01	0.23
Municipio	Huimilpan					
Velocidad m/s	0.74	1.01	0.75	0.87	0.63	1.03
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.22	0.58	0.24	0.37	0.14	0.61
Municipio	Tequisquiapan					
Velocidad m/s	1.47	1.57	1.16	1.10	0.61	0.87
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	1.77	2.16	0.88	0.74	0.13	0.37
Municipio	Peñamiller					
Velocidad m/s	0.25	0.29	0.40	0.65	0.32	0.73
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.01	0.01	0.04	0.15	0.02	0.22
Municipio	Jalpan de Serra					
Velocidad m/s	0.67	0.71	0.51	0.45	0.46	0.42
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.17	0.20	0.07	0.05	0.05	0.04
Municipio	Colón					
Velocidad m/s	1.12	1.55	1.08	1.20	0.76	0.99
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.80	2.08	0.71	0.97	0.25	0.55
Municipio	Tolimán					
Velocidad m/s	0.26	0.22	0.14	0.35	0.73	1.10
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.01	0.01	0.00	0.02	0.22	0.74
Municipio	Pinal de Amoles					
Velocidad m/s	1.20	1.15	1.01	1.00	0.96	1.37
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.96	0.86	0.57	0.57	0.50	1.43
Municipio	Ezequiel Montes					
Velocidad m/s	0.75	0.43	1.13	1.15	0.60	1.04
Densidad E. W/m <sup>2</sup>	0.23	0.04	0.81	0.86	0.12	0.62

Tabla 6. Velocidad y densidad de energía del aire correspondiente al segundo semestre de 2018 en 13 de los municipios de Querétaro. (Elaboración propia)

En los municipios de Amealco, San Juan del Río y Querétaro, durante ocho horas entre las 14:00 y 22:00 hrs., se observa que la velocidad promedio de viento se duplica (Tabla 7), lo que indica que posiblemente el rango de operación del sistema eólico sea durante el lapso de este horario.

Mes	Jul.	Ags.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Municipio	Pedro Escobedo					
Velocidad m/s	0.74	1.01	0.75	0.87	0.63	1.03

Municipio	Velocidad m/s	Ráfaga m/s	Densidad de Energía W/m <sup>2</sup>
Amealco	3.525	3.987	24.64180707
Querétaro	3.175	4.179	18.01174497
San Juan del Río	2.955	3.876	14.51586522

Tabla 7. Datos eólicos de ocho horas correspondientes al 2018. En tres municipios del estado de Querétaro.

## Conclusiones

Entre las 14:00 y 22:00 horas, la velocidad del viento promedio anual al menos duplica su valor con respecto al resto del día a excepción de algunos datos del año, ya que durante la madrugada, solo en una o dos horas muestran velocidades significativas, como los datos presentados en la Tabla (7). Es muy probable que los municipios de Amealco, Querétaro y San Juan Del Río cuenten con aerogeneradores de mediana potencia; si consideramos que la velocidad incrementa con la altura, existe la posibilidad de colocar aerogeneradores de mediana potencia en otros municipios como Pedro Escobedo, Huimilpan, Tequisquiapan, Ezequiel Montes, Pinal de Amoles. Para el resto de los municipios, al menos, pueden contar con aerogeneradores de baja potencia.

Por otro lado, teniendo en cuenta la velocidad y ráfagas de viento, permitirá el diseño estructural adecuado para el aspa y evitar algunos modos de vibración, los cuales se producen debido a la fuerza del viento. Además, con estos datos se impedirá que las aspas se flexionen más y más en la dirección del viento, ya que estas podrían ocasionar que colisionen

con la torre o se desprendan debido a las fuerzas centrifugas

## Referencias

- Kumar, A., Muhammad Zafar, U. y Bishwajeet, P. (2018). Wind Energy: A Review Paper. *Gyancity Journal of Engineering and Technology*, 4(2), 29–37. <https://doi.org/Gyancity> No DOI: 10.21058/gjet.2018.42004
- Breeze, P. y Breeze, P. (2016). An Introduction to Wind Power. *Wind Power Generation*, 1–8. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804038-6.00001-3>
- Elnaggar, M., Edwan, E., & Ritter, M. (2017). Wind Energy Potential of Gaza Using Small Wind Turbines: A Feasibility Study. *Energies*, 10(8), 1229. <https://doi.org/10.3390/en10081229>
- Wagner, H. (2017). *Introduction to wind energy systems*. EPJ Web of Conferences 148, 00011 (2017). <https://doi.org/10.1051/epjconf/2017148011>
- Huda, H. (2019). *An Overview of Wind Energy Potentials in Palestine*. 8(3), 98–108. <https://doi.org/10.11648/j.jenr.20190803.11>
- Jianbo, Y., Qunyi, L., Xin, L. y Xiandan, C. (2017). Overview of Wind Power in China: Status and Future. *MDPI*, 9, 1454. <https://doi.org/doi:10.3390/su9081454>
- Herrera Flores, J., Valle Pereña, J. y Esclante Lona, H. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026* (p. 15). Secretaría de Energía. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva\\_de\\_Energ\\_as\\_Renovables\\_2012-2026.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2012-2026.pdf)
- López, M. y Pacheco, M. (2018). *Estudio para la interconexión de generadores eólicos a la red eléctrica de distribución*. <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/25771>
- Coldwell, P., Rionda, R. y Villanueva Arcos, E. (2017). *Prospectiva de Energías Renovables 2017-2031* (p. 43). Secretaría de Energía. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/284342/Prospectiva\\_de\\_Energ\\_as\\_Renovables\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/284342/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2017.pdf)
- Rehman, S., Natarajan, N., Vasudevan, M. y Alhems, L. (2020). Assessment of wind energy potential across varying topographical features of Tamil Nadu, India. *Energy Exploration & Exploitation*, 38(1), 175–200. <https://doi.org/10.1177/0144598719875276>