



Ciencia Nicolaita 89

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Selección de una turbina eólica de pequeña capacidad destinada al uso doméstico

Selection of a small capacity wind turbine for domestic use

Neiffe Valencia Calderón*, Erasmo Cadenas Calderón y Josué Jordi Zavala Morales

Para citar este artículo: Valencia Calderón Neiffe, Cadenas Calderón Erasmo y Zavala Morales Josué Jordi, 2023. Selección de una turbina eólica de pequeña capacidad destinada al uso doméstico. Ciencia Nicolaita no. 89, 208-220. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi89.720>



Historial del artículo:

Recibido: 17 de mayo de 2023

Aceptado: 12 de julio de 2023

Publicado en línea: diciembre de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: neiffe.valencia@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Selección de una turbina eólica de pequeña capacidad destinada al uso doméstico

Selection of a small capacity wind turbine for domestic use

Neiffe Valencia Calderón^{1*}, Erasmo Cadenas Calderón² y Josué Jordi Zavala Morales³

¹Facultad Popular de Bellas Artes, UMSNH

²Facultad de Ingeniería Mecánica, UMSNH

³Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica, UMSNH

Resumen

Se presenta el proceso de selección de una turbina eólica de pequeña capacidad, que puede ser utilizada para uso doméstico. Lo anterior se plantea, debido a que la mayoría de los arquitectos y constructores que pretenden colocar pequeñas turbinas, cuentan con poca información para tomar las decisiones adecuadas en su elección, descargando la mayor parte de la responsabilidad en el vendedor. Como ejemplo práctico se realizó un ejercicio de selección en un sitio ubicado en Tepuxtepec, Michoacán, en donde existe potencial eólico. El proceso comienza con el cálculo de la necesidad energética por parte del usuario y se asume que no se cuenta con la información necesaria para realizar una prospección eólica, es decir, no hay mediciones anemométricas. Se muestra la manera en que se pueden obtener dichas mediciones de velocidad y dirección de viento, con la finalidad de calcular las dimensiones necesarias de la turbina, para poder elegir una en el mercado o fabricarla. La elección de la turbina, se realizó generando un análisis costo-beneficio, el cual consistió en el cálculo de la energía disponible en el sitio y en la simulación de turbinas de viento a diferentes capacidades, con la finalidad de cubrir la demanda de energía propuesta de 281 kWh por mes, que es el consumo promedio de un hogar en México según el Fideicomiso para el ahorro de energía en el año 2021. La capacidad de la turbina elegida fue de 2.0 kW. De la misma manera se calcula la dirección del viento dominante utilizando el software libre WRPLOT. El artículo aporta información importante de dimensionamiento de una turbina eólica de pequeña capacidad, y muestra la manera en que se pueden obtener datos de mediciones de velocidad y dirección del viento de cualquier lugar del mundo, así como un software libre para generar la rosa de los vientos del lugar elegido, enlazándose con Google Earth. Finalmente se hace la selección de la turbina con todas sus características y su curva de potencia.

Palabras clave: Energía eólica, selección de turbina eólica, datos anemométricos.

Abstract

The selection process of a small capacity wind turbine, which can be used for domestic use, is presented. The above is proposed because most architects and builders who intend to place small turbines have little information to make the right decisions in their choice, attributing most of the responsibility to the seller. As a practical example, a selection exercise was carried out at a site located in Tepuxtepec, Michoacán, where there is wind potential. The process begins with the calculation of the user's energy needs and it is assumed that the necessary information to perform a wind prospecting is not available, i.e., there are no anemometric measurements. The way in which these wind speed and direction measurements can be obtained is shown, with the purpose of calculating the necessary dimensions of the turbine, in order to be able to choose one in the market or manufacture it. The choice of the turbine was made by generating a cost-benefit analysis, which consisted of calculating the energy available at the site and simulating wind turbines at different capacities, in order to cover the proposed energy demand of 281 kWh per month, which is the average consumption of a home in Mexico according to the FIDE in the year 2021. The chosen turbine capacity was 2.0 kW. In the same way, the dominant wind direction is calculated using the free software WRPLOT. The article provides important sizing information for a small capacity wind turbine, and also shows the way in which wind speed and direction measurement data can be obtained from any place in the world as well as a free software to generate the wind rose of the chosen place, linking with Google Earth. Finally, the selection of the turbine with all its characteristics and its power curve is made.

Keywords: Wind energy, wind turbine selection, anemometric data.

Introducción

Según las Naciones Unidas a través del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), la quema de combustibles fósiles, las modificaciones en el uso del suelo y la silvicultura, así como los procesos industriales, han provocado un aumento drástico de los niveles de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera (IPCC, 2023).

Las actividades anteriores ocurren principalmente en el medio urbano, el cual ha crecido debido a la migración ocurrida en el medio rural, principalmente por la búsqueda de oportunidades y de una mejor calidad de vida de las personas. México, sigue la tendencia mundial; según el INEGI, en el año 2020, solo el 21% de la población vivía en zonas rurales (INEGI, 2020), lo anterior representa un crecimiento importante que promueve el calentamiento global, pues además de la emisión de gases de efecto invernadero, hay pérdida de ecosistemas y transformación y contaminación de causas acuáticas.

El crecimiento urbano, necesariamente va acompañado con necesidades de energía, principalmente electrificación. Esta energía normalmente se hace lle-

gar a las ciudades a través del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) es decir, la energía es importada, por lo que el problema de calentamiento global es más drástico cada día.

Contra el deterioro ambiental, las energías renovables siguen siendo una oportunidad para ayudar al planeta a través de la disminución del consumo de energía tradicional. En este contexto, se deben explorar los sistemas aislados de energía (Olivia *et al.*, 2021), ya sean solares, eólicos o híbridos (Javed *et al.*, 2020), que permitan el autoconsumo de los usuarios (Bautista *et al.*, 2020).

La energía eólica se ha convertido en una opción atractiva en el medio urbano, ya que no es necesario vientos intensos (las pequeñas turbinas arrancan entre 2.5 y 3 m/s) para poder extraer su energía, pues las turbinas eólicas se utilizan para cargar bancos de baterías. La configuración urbana toma un papel importante debido a que provoca turbulencias y perturba la velocidad del viento, aunado a aspectos como la seguridad, las vibraciones o el impacto visual que limitan su integración arquitectónica en los edificios (Barraán *et al.* 2019). Lo anterior ha sido superado debido

al avance tecnológico y las turbinas modernas funcionan de manera confiable y segura.

El presente artículo, aborda la selección de una turbina de pequeña capacidad, destinada al complemento de energía en el medio urbano. Se indican las actividades iniciales que se deben realizar en cuanto al ahorro de energía en un hogar común, para posteriormente exponer la forma en que se realiza la proyección eólica. Se muestra la manera en que se debe elegir el sitio a través de las coordenadas geográficas, las cuales son necesarias para la obtención en línea de datos anemométricos cuando no se cuenta con ellos y para el cálculo de los vientos dominantes a través del software libre WRPLOT (Lakes, 2023). Se calcula la densidad de potencia del viento (WPD, por sus siglas en inglés) del lugar, se describen las componentes de una turbina de eje horizontal, y finalmente se propone una turbina. Para ejemplificar el proceso, se eligió la ciudad de Tepuxtepec en el estado de Michoacán, ya que es uno de los pocos lugares en donde existen vientos que se pueden aprovechar para generar energía. Finalmente se hace la selección de la turbina realizando un análisis de costo-beneficio.

1. Reducción del consumo energético de una casa habitación

No es necesario instalar equipos que generen electricidad con energías renovables para reducir el consumo energético en una casa habitación. En la actualidad es una obligación combatir el calentamiento global. En este contexto, proyectar la instalación de un

equipo de estas características, es una buena oportunidad para concientizar a los usuarios y modificar su entorno.

Para hacer una casa más eficiente energéticamente, es necesario conocer el consumo que se tiene y tratar de mitigarlo con las siguientes medidas:

1. Orientar apropiadamente los espacios del proyecto de casa-habitación.
2. Considerar el aislamiento de las paredes.
3. Cambiar la iluminación con lámparas más eficientes (utilizar leds).
4. Aprovechar la luz natural lo más posible, es decir, abrir cortinas y persianas durante el día y limitar el uso de la luz artificial.
5. Apagar dispositivos electrónicos y desconectarlos cuando no se utilicen.
6. Usar electrodomésticos eficientes, con etiqueta de eficiencia energética.
7. Ahorrar agua caliente o instalar calentador solar.
8. En caso de tener calefacción, sellar puertas y ventanas para evitar que el aire caliente o frío escape de casa-habitación.

Algunas de las acciones mencionadas se pueden ver reflejadas en una casa energéticamente eficiente como la de la **Figura 1**.

Con lo anterior se puede reducir el consumo energético entre un 10 y 20%, en una casa habitación cuyo consumo depende del tamaño de ésta, las personas que la habitan, el tipo de electrodomésticos y electrónicos que se usan y los hábitos cotidianos, y hasta un 50% con la mejora de la eficiencia térmica. De acuerdo con el fideicomiso para el ahorro de energía eléctrica

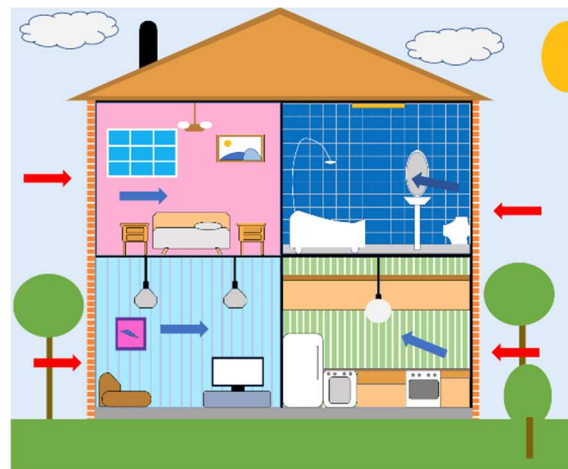


Figura 1. La casa energéticamente eficiente.

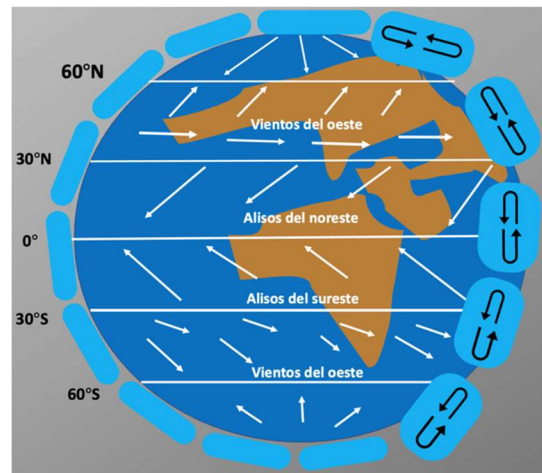


Figura 2. Circulación atmosférica.

(FIDE, 2023), el consumo promedio en hogares de México en 2021 fue de 281 kWh al mes (Zambak, 2021).

2. Recurso eólico

La energía eólica se obtiene a través del movimiento de las masas de aire que conforman la atmósfera. Las corrientes de aire son debido al calentamiento desigual que sufre nuestro planeta y por ende la atmósfera que lo rodea. Así el aire caliente asciende y el aire con menor temperatura llena ese espacio, ocasionando su circulación como en la **Figura 2**.

Para establecer si podemos utilizar la energía eólica para cubrir nuestras necesidades energéticas, es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Que el lugar cuente con un buen recurso eólico.
- Que exista el espacio necesario para colocar los equipos.

- Que los reglamentos de la comunidad lo permitan. Es importante que se tome en cuenta, si en la comunidad en donde se desea instalar un aerogenerador, no se restringen la altura de las estructuras.

Si se cumple lo anterior, sería conveniente estudiar la posibilidad de incorporar un sistema eólico en el lugar.

2.1. Selección del sitio

Para ilustrar la forma en que se realiza la prospección eólica, vamos a proponer la instalación de una pequeña turbina en la Presa de Tepuxtepec, Michoacán, cerca del pueblo denominado San Antonio Molinos, en dónde debido a las condiciones del lugar existen vientos que se pueden aprovechar para generar energía. En la **Figura 3** se muestra el lugar con el indicador rojo de localización.



Figura 3. Ubicación del sitio seleccionado (Cortesía Google Maps).

La Presa de Tepuxtepec, se encuentra a 25 km al norte de Tlalpujahua, en la parte baja del municipio de Contepec, al sur de su cabecera municipal, en la región noreste del estado de Michoacán. Las coordenadas geográficas del lugar en decimales son: 20.061289, -100.244488. Es necesario contar con las mediciones de la velocidad y dirección del viento para generar una estimación de la cantidad de energía que podemos extraerle. En caso de que no fuera posible una estimación de éstas, las podemos obtener de la página: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, es un servidor manejado por la NASA que permite el acceso a mediciones de diversos datos meteorológicos al registrarse.

La **Figura 4**, muestra la serie de tiempo horaria de la velocidad del viento del sitio seleccionado durante un año, 8, 760 horas aproximadamente, medidas a 50 metros sobre el nivel del terreno.

La estadística descriptiva se muestra en la **Tabla 1**.

En la tabla siguiente se refleja el cálculo de la media, la desviación estándar, la moda, la velocidad mínima, la velocidad máxima y el rango. El promedio de la velocidad no es alto, sin embargo, las velocidades máximas que se presentan son aceptables.

Para apreciar de mejor manera la frecuencia con la que soplan las diferentes velocidades de viento, se debe generar un histograma y observar la cantidad de velocidades que se pueden aprovechar para extraer energía con un aerogenerador, como en la **Figura 5**.

Las turbinas eólicas de baja capacidad pueden arrancar hasta 2.5 m/s, por lo que se puede apreciar del histograma de la **Figura 5**, la mayoría de las velocidades que se presentan en el lugar están por arriba de esta velocidad, lo que garantiza el funcionamiento del equipo la mayor parte del año. Otra característica importante que se aprecia en el histograma es su cola larga, la mayoría de los lugares en donde se caracteriza la energía eólica, tienen esta particularidad, por lo que se pueden representar por un modelo de probabilidad de Weibull (Villarubia, 2013).

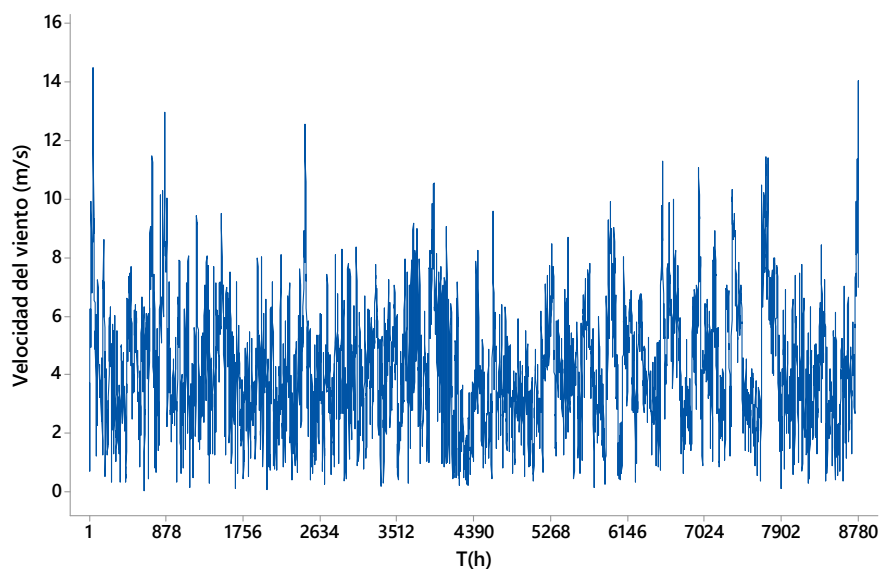


Figura 4. Series de Tiempo de la velocidad del viento de Tepuxtepec (cortesía de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

Tabla 1

Estadística Descriptiva de las mediciones de la velocidad del viento en Tepuxtepec, Michoacán.

Lugar/Medida	Datos	\bar{x} (m/s)	σ (m/s)	Moda (m/s)	Vmín.	Vmáx.	Rango
Tepuxtepec	8760	4.27	2.06	3.47	0.05	14.51	14.46

Es posible proyectar las velocidades de viento a una altura mayor. Para realizar lo anterior, es necesario utilizar la siguiente expresión:

$$Ve(z) = Ve(z_r) \left[\frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_r}{z_0}} \right] \quad (1)$$

dónde:

$Ve(z)$ = Velocidad estacionaria media, a la altura z (altura de referencia).

$Ve(z_r)$ = Velocidad estacionaria estimada a la altura z_r .

z_0 = Factor de rugosidad del terreno.

z_0 = Rugosidad superficial.

La rugosidad superficial se puede obtener de la **Tabla 2**.

2.2. El recurso eólico

La estimación del recurso eólico requiere el cálculo del concepto denominado Densidad de Potencia Eólica, en inglés Wind Power Density (WPD), que parte de la expresión de la energía cinética:

$$Ec = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

dónde:

Ec = Energía cinética contenida en el viento.

m = Masa de aire contenida en un volumen de control (kg).

v = Velocidad del viento (m/s).

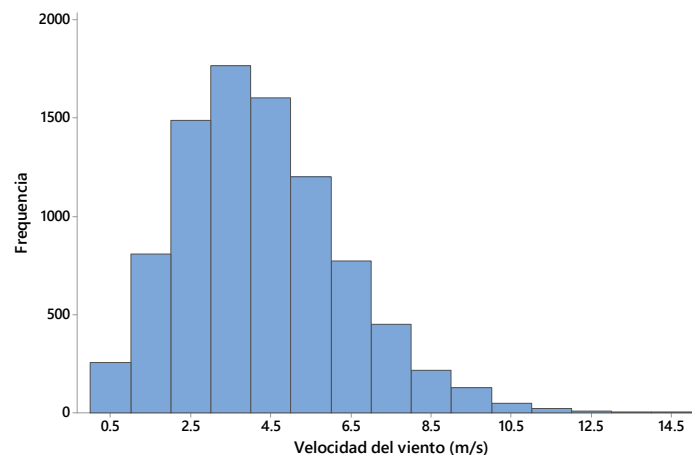


Figura 5. Histograma de velocidades del sitio seleccionado.

Tabla 2

Valores de rugosidad para diferentes tipos de terreno.

Valores de rugosidad (Z_0) para diversos tipos de terreno	
Tipo de terreno	Z_0 (mm)
Muy suave, hielo o lodo	0.01
Muy abierto en calma	0.20
Muy picado	0.50
Superficie de nieve	3.00
Césped	8.00
Pasto quebrado	10.00
Campo preparado para cultivo	30.00
Cultivo	50.00
Pocos árboles	100.00
Varios árboles, hileras de árboles, pocas construcciones	250.00
Bosques, tierras cubiertas de árboles	500.00
Suburbios	1500.00
Centros de ciudades con edificios altos	3000.00

El caudal másico (m) de densidad (ρ) que fluye con velocidad (v) a través de una superficie de área (A) perpendicular a la dirección del flujo es:

$$m = \rho Av \quad (3)$$

La potencia disponible (P_d) del caudal de aire que atraviesa dicha sección es:

$$P_d = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4)$$

Finalmente, WPD disponible o potencia disponible por unidad de área es [11]:

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (5)$$

Las unidades resultantes de la expresión anterior son de: w/m^2 (watts por metro cuadrado), por lo que proporcionan una estimación de la cantidad de energía que se puede obtener en el sitio seleccionado por metro cuadrado. La densidad del aire es un parámetro que depende del lugar y de las condiciones del sitio, sobre todo la elevación a nivel del mar, sin embargo, para fines de cálculo es posible tomar el valor de la densidad estándar que es: 1.225 kg/m^3 .

Para las mediciones del Salto de Tepuxtepec, representadas en la **Figura 4**, que representan las mediciones del año 2020 en el lugar, aplicando la expresión 5, obtenemos $WPD = 72.9 \text{ w/m}^2$. Para establecer un campo eólico que sea rentable, se estima que la WPD debe de ser de al menos 200 w/m^2 (Departamento de

Energía, EE.UU., 2007), sin embargo, para nuestro caso es solamente la propuesta de una turbina eólica para uso doméstico o bombeo de agua, destinada a cargar baterías especiales o conectarse a la red eléctrica.

2.3. Turbinas de baja capacidad

El rango de turbinas pequeñas se encuentra entre los 20 watts y los 100 kilowatts (kW). Las más pequeñas o “micro” (de 20 a 500 watts) se emplean en aplicaciones como carga de baterías para vehículos recreacionales y de veleros. Las turbinas de 1 a 10 kilowatts pueden ser usadas para bombear agua. Las turbinas para aplicaciones residenciales pueden estar en el rango de los 400 watts y hasta los 100 kW (para cargas muy grandes) (Departamento de Energía, EE.UU., 2007).

3. El viento dominante

Cuando existen vientos persistentes o aprovechables, algunos suelen provenir de una dirección determinada y con más fuerza. Para tener un diagnóstico completo que nos ayude a orientar nuestra turbina, es necesario generar una rosa de los vientos que nos indique la dirección de los vientos dominantes.

En la **Figura 6**, se aprecia el sitio seleccionado en una fotografía de Google Earth, la cual tiene superpuesta la rosa de los vientos generada con el software WRPLOT.

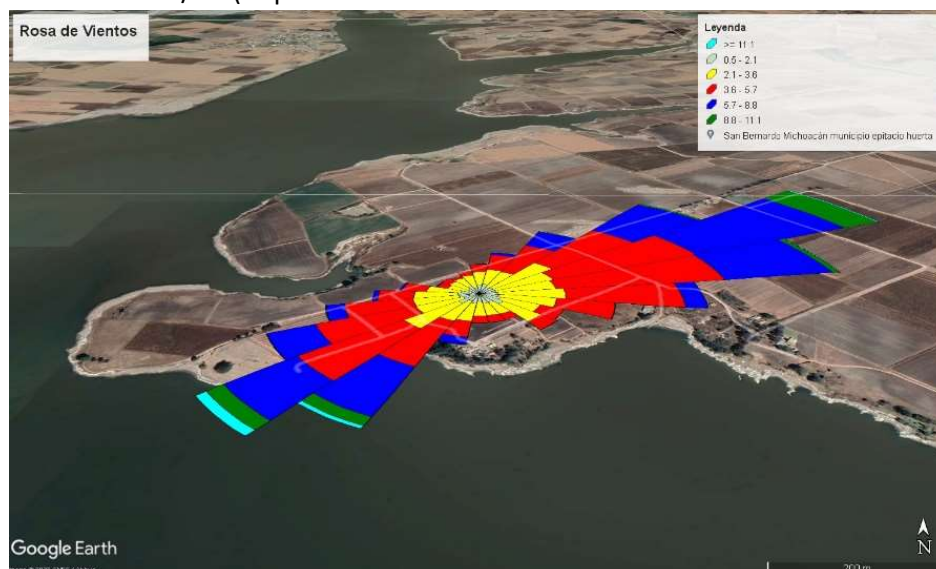


Figura 6. Rosa de los vientos del lugar (generada con el software libre WRPLOT).

En la figura se aprecia que los vientos dominantes, así como la mayoría de las velocidades más altas (color verde), provienen del Noreste. Es importante resaltar que, en el contacto entre la tierra y el agua de la presa, es decir, en la dirección Noreste (color cyan), se presentaron las velocidades más altas y debido a que fueron pocas, no se puede considerar esta orientación como la dominante. Por lo anterior, si fuera necesario elegir la orientación de un aerogenerador, debería ser en este lugar la dirección Noreste.

De la misma manera el software WRPLOT, nos permite generar un gráfico de distribución de frecuencias, el cual se presenta en la **Figura 7**. Se puede apreciar que la mayoría de las velocidades son aprovechables, si tomamos en cuenta que un aerogenerador de pequeña capacidad, comienza a generar entre 2 y 3 m/s.

4. Elección de la turbina

La elección de una turbina de viento, se hace en función del uso que tendrá, bombeo de agua, mollienda de granos, aplicaciones residenciales, etc.

4.1. Partes básicas de una turbina de viento

La parte más importante de un aerogenerador es su rotor, es la parte que permite la captura de la energía del viento, entre más completo el diseño aerodinámico, más energía generará. Actualmente la mayoría de los aerogeneradores son de eje horizontal, como el que se muestra en la **Figura 8**. Es importante mencionar que el diseño estructural, así como la elección del material puede ser un tema especializado, comúnmente se usan materiales compuestos, fibra de vidrio o incluso madera.

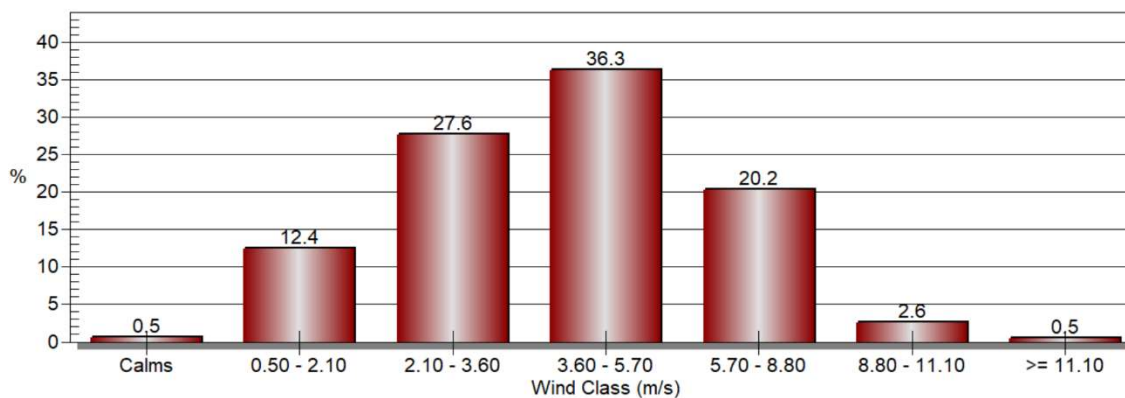


Figura 7. Gráfico de distribución de frecuencias (Realizado con el software WRPLOT).

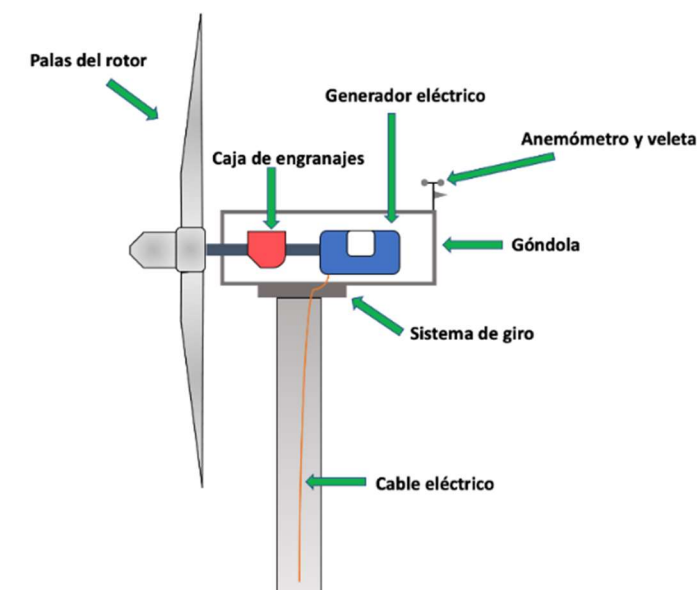


Figura 8. Partes básicas de una turbina de viento.

Debido a que la velocidad del viento es más fuerte a niveles más altos del suelo, las turbinas eólicas se montan en una torre. Al estar la turbina en un lugar alto, se evitan las turbulencias, debido a los obstáculos existentes (árboles, edificios). Inversiones en torres altas, reditúa en una ganancia de energía.

El aerogenerador cuenta con un sistema mecánico que es depositado en un contenedor llamado Góndola. La Góndola contiene una caja de engranajes que permite multiplicar la velocidad de giro de los ejes conectados. De la misma manera, la Góndola contiene un Generador que produce la electricidad. Finalmente, la electricidad es conducida por un cable eléctrico.

Las turbinas pequeñas, generalmente se montan en un mástil y cuentan con una cola en forma de veleta, la cual les permite orientarse en la dirección del viento, como la que se muestra en la **Figura 9**.

4.2. Otros componentes

Además de los componentes descritos en esta sección, existen otros que dependen del sistema, es decir, si se conectará a la red o estará aislado. Por lo anterior, es posible que se necesite un controlador, baterías de almacenamiento, un inversor y el cableado.

4.3. Curva de potencia de un aerogenerador

Cada aerogenerador cuenta con una curva de potencia, como la que se muestra en la **Figura 10**.

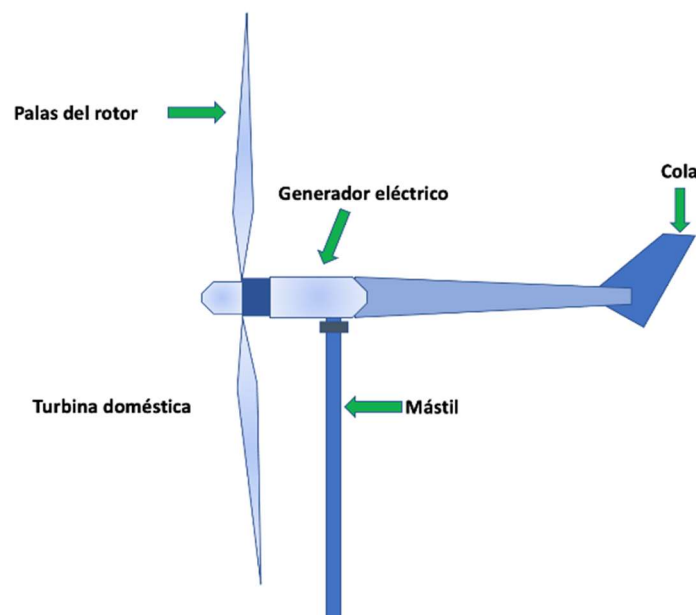


Figura 9. Turbina doméstica.

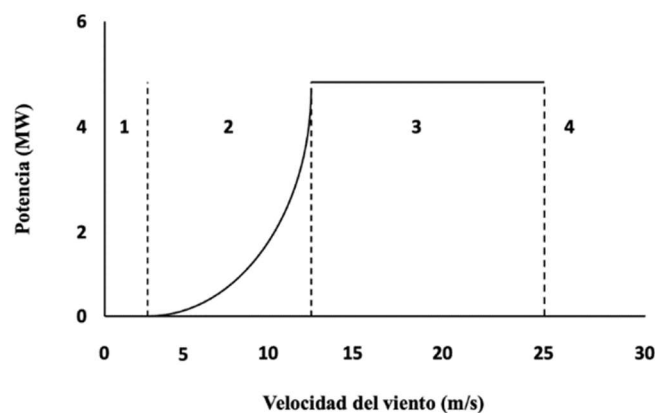


Figura 10. Curva de potencia de una turbina de 5 kW.

La curva de la **Figura 10**, muestra la generación de la potencia de una turbina en función de la velocidad. En la curva se aprecia que el arranque de la generación es aproximadamente a 3 m/s, otro punto destacado se encuentra aproximadamente a 12 m/s, que es la velocidad nominal, es decir, la velocidad a la que la turbina alcanza la máxima potencia (5 kW). Una vez que la velocidad se incrementa después de este punto, la potencia se mantiene hasta el valor de 25 m/s, si la velocidad es más grande la turbina saldrá de funcionamiento por protección.

La curva de potencia, es un elemento importante que deben proporcionar el fabricante y el vendedor, para que el usuario pueda tener una estimación de la energía que la turbina puede producir. Finalmente es importante comentar que existen diversas opciones cuyos detalles se pueden encontrar en línea.

5. Análisis costo-beneficio

Con la finalidad mostrar un ejercicio que involucre la cantidad de energía que se puede obtener en el sitio seleccionado, utilizando Turbinas eólicas con diferentes potencias y poder seleccionar una, se generó un simulador en Excel. El simulador utiliza las curvas de potencia de turbinas con capacidad de: 1kW, 1.5kW, 2 kW, 2.5kW y 3 kW, suponiendo una velocidad de arranque de los aerogeneradores de 2.5 m/s, una velocidad nominal de 12 m/s y una entrada en paro de 25 m/s. Combinando las curvas de potencia de las turbinas y contabilizando el número de horas aprovechables de viento, se obtuvo la **Figura 11**.

En esta figura se muestra la cantidad de energía que cada turbina puede generar en el sitio seleccionado en periodos mensuales. Se aprecia que con una turbina de 1 kW (azul claro), el déficit de energía es alto, cualitativamente se aprecia que no alcanza la demanda en ningún mes del año (verde), mientras que con una turbina de 3 kW (azul fuerte), hay un excedente de energía, los detalles de los cálculos se aprecian en la **Tabla 3**.

En la **Tabla 3**, la turbina de 3 kW, genera un excedente de energía de 529 kWh, sin embargo, el costo de inversión, que se refiere al costo de equipo, es más elevado. Una turbina de 2.5 kW, tiene un déficit de energía anual de 122 kWh, lo que parece razonable. Si consideramos el costo del kWh, de acuerdo con un recibo reciente de Comisión Federal de Electricidad (CFE), para el servicio intermedio, tenemos: 1.160 pesos por kWh.

Podemos resumir el déficit de energía, su costo y el costo de inversión de una turbina eólica, en la **Tabla 4**.

En la segunda columna se enlista el déficit de energía que cada turbina tiene en el sitio seleccionado, al multiplicar el déficit por el costo del servicio intermedio de CFE, obtenemos la columna tres. La columna cuatro es el costo de inversión de una turbina eólica (los precios varían de acuerdo con el fabricante) de acuerdo con su capacidad (solo se toma en cuenta el costo del equipo). Finalmente, la suma de los costos, nos da el gasto que se tendría que generar para cada turbina.

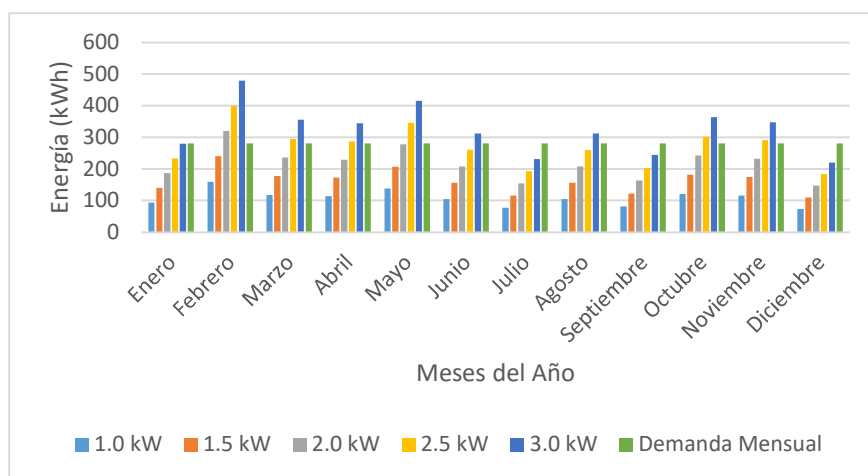


Figura 11. Energía generada por turbinas eólicas de capacidades diferentes, en el sitio seleccionado.



Tabla 3
Energía generada por turbinas eólicas de capacidades diferentes, en el sitio seleccionado.

Turbina/Mes	1.0 kW	1.5 kW	2.0 kW	2.5 kW	3.0 kW	Demanda Mensual
Enero	93	140	186	233	279	281
Febrero	159	240	320	399	479	281
Marzo	118	177	236	295	355	281
Abril	114	172	229	287	344	281
Mayo	138	207	277	345	415	281
Junio	104	156	208	260	312	281
Julio	77	116	154	193	231	281
Agosto	104	156	208	259	312	281
Septiembre	81	122	163	203	244	281
Octubre	121	181	242	302	363	281
Noviembre	116	174	232	291	347	281
Diciembre	73	110	147	183	220	281
Total (kWh)	1298	1951	2602	3250	3901	3372
Déficit (kWh)	2074	1421	770	122	-529	0

Tabla 4
Resumen de los costos de inversión.

Turbina (kW)	Déficit (kWh)	Costo déficit (\$)	Inversión (\$)	Total (\$)
1.00	2074.00	2405.84	3580.00	5985.84
1.50	1421.00	1648.36	4668.48	6316.84
2.00	770.00	893.20	5283.00	6176.20
2.50	122.00	141.52	7289.50	7431.02
3.00	0.00	0.00	9296.00	9296.00

De la misma manera, se aprecia de la **Tabla 4**, que, aunque la turbina de 3 kW abate el déficit por completo, debido al elevado costo de inversión, no es conveniente elegirla, algo similar ocurre con la turbina de 2.5 kW. Por otra parte, una turbina pequeña (1 o 1.5 kW), debido al alto déficit de energía, también genera un costo elevado, la turbina que garantiza un costo menor en este caso es la de 2.0 kW.

El gasto que se hace con una demanda de energía anual de la casa habitación, es de \$3, 911.52. Con una turbina de 2.0 kW, se reduce a \$893.20 anuales, el costo de inversión es de \$5, 283.00. Generalmente los equipos de este tipo tienen una vida útil de 20 años, por lo que se garantiza el retorno de la inversión. El análisis anterior, es un ejemplo sencillo de cómo puede generarse un análisis de costo, el cual debe estar más completo y con mayor detalle.

Conclusiones

Con este trabajo, se puede concluir que es importante el conocimiento de las diversas herramientas que están disponibles para la realización de la prospección eólica, como la obtención de datos anemométricos y el cálculo de la dirección del viento dominante de un sitio. Se destaca la importancia del ahorro de energía y se muestra la forma en que se debe calcular la densidad de potencia eólica de un sitio seleccionado. Finalmente, a través de un análisis costo-beneficio, en donde se calcula la potencia generada por diferentes turbinas, el costo de la energía producida y el costo de inversión de una turbina, se concluye que, para este caso específico, una turbina de 2.0 kW es adecuada para cubrir la demanda planteada de 281 kWh por mes.

Referencias

- Integrated Pollution Prevention and Control (IPCC), “Climate science 2023”, <https://climatescience2030.com>, [consultado el 12 de febrero de 2023].
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Historia (INEGI), Cuéntame de México, “Población rural y urbana”, https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P, [consultado el 20 de febrero de 2023].
- Oliva, R., Salvador, J., González, J. F., Cortez, N., Lescano, J., Triñanes, P., ... Luna, F. (2021). La normativa IEC para sistemas eólicos e híbridos aislados, y la utilización de tecnologías de medición remota: aplicación en contexto patagónico. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 25, 234-245.
- Javed, M. S., Ma, T., Jurasz, J., Amin, M. Y. (2020). Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: Review and future perspectives. *Renewable Energy*, 148, 176-192.
- Bautista Blasco, J. A., García Cascales, M. S., Molina García, A. (2020). Análisis de viabilidad técnico-económica de proyectos de generación eléctrica eólica y solar para autoconsumo aplicado a la industria pesada, *24th International Congress on Project Management and Engineering Alcoi*, 1436-1450.
- Barragán-Escandón, E. A., et al. (2019). *Las energías renovables a escala urbana. Aspectos determinantes y selección tecnológica*. Bitácora Urbano Territorial, 29 (2): 39-48. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v29n2.65720>
- Lakes software, “WRPLOT VIEW”, <https://www.weblakes.com/software/freeware/wrplot-view/>, [consultado el 5 de abril de 2023].
- FIDE, “Fideicomiso para el ahorro de energía eléctrica”, <https://www.fide.org.mx/>, [consultado el 14 de abril de 2023].
- Zambak, M. F. (2021). The probability density function for wind speed using Modified Weibull Distribution. *International Journal of Energy Economics and Policy*.
- Miguel Villarubia López, Ingeniería de la Energía Eólica, 2013, Ed. Marcombo, S.A., 282 P. ISBN: 978-84-265-1580-7.
- Departamento de energía, EE.UU., *Sistemas eólicos pequeños para generación de electricidad, una guía para consumidores en Nuevo México*, <https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/42070.pdf>, [consultado el 26 de abril de 2023].