

ARTÍCULO

ESTUDIO DEL POTENCIAL EÓLICO PARA LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA A PARTIR DE TURBINAS VERTICALES EN SANTA CRUZ, BOLIVIA.

Study of the Wind Potential for Distributed Generation from Vertical Turbines in Santa Cruz, Bolivia

Por:

Gregori José Mireles Monagas

Centro de Investigación Científica UTEPSA

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1598-2710>

mirelesmgj@gmail.com

Rogelio Gómez Castillo

Centro de Investigación Científica UTEPSA

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0322-7813>

rogelio-gc@hotmail.com

Jhisel Romero Villca

Centro de Investigación Científica UTEPSA

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7313-1903>

jhiselrv@gmail.com

RESUMEN

Bolivia está planteándose el desarrollo de aerogeneradores de baja potencia para proyectos de generación distribuida en el área urbana. Por tal motivo esta investigación propone evaluar el aprovechamiento del potencial eólico para producir energía eléctrica a partir de los generadores eólicos tipo vertical.

Para tal fin se ha tomado un modelo de turbina tipo Savonius modificada, la cual es una propuesta actual del mercado que proyecta suministrar hasta 3kWh de energía. Este modelo de generador aprovecha las bajas velocidades del viento sin importar la dirección. En el área de Santa Cruz se presentan continuamente vientos con ráfagas de velocidades de unos 30 km/h en algunos meses del año y mantiene una velocidad del viento promedio mes

de 4,5 a 7,5 m/s en gran parte del año. Luego, en base a estas condiciones se ha valorado el diseño propuesto. Para la caracterización eólica se tomaron los datos de la estación climática de la UTEPSA, se compararon con los datos del Atlas Eólico y de las aplicaciones como WindoGrapher y con ellos se estimaron las condiciones mínimas de trabajo, cómo son velocidad promedio del viento, humedad relativa y presión. Para el estudio se modeló la turbina en el simulador SOLIDWORKS y con los datos climáticos se realizó el análisis eólico, se usó como base un viento promedio de 5 m/s, el torque resultante es de 2,822 Nm con dos álabes activos con los cuales se obtiene la potencia mecánica disponible de 55,9W y 185 rpm.

PALABRAS CLAVE: *Viento, Turbina, máquina, energía, electricidad*

ABSTRACT

Bolivia is considering the development of low-power wind turbines for distributed generation projects in urban areas. For this reason, this research proposes to evaluate the use of wind potential to produce electricity from vertical wind generators. For this purpose, a modified Savonius type turbine model has been taken, which is a current market proposal that plans to supply up to 3kWh of energy. This generator model takes advantage of low wind speeds regardless of wind direction. In the Santa

Cruz area, winds with gusts of speeds of about 30 km/h are continuously present in some months of the year and maintains an average monthly wind speed of 4.5 to 7.5 m/s for most of the year. Then, based on these conditions, the proposed design has been assessed. For the wind characterization, data from the UTEPSA climate station were taken, compared with data from the Wind Atlas and applications such as WindoGrapher and with them the minimum working conditions were estimated, such as average wind speed, relative humidity and pressure. For the study, the turbine was modelled in the SOLIDWORKS simulator and with the climatic data the wind analysis was performed, an average wind of 5 m/s was used as a base, the resulting torque is 2822 Nm with two active blades with which the available mechanical power of 33.7W and 117 rpm is obtained.

Keywords: *Wind, Turbine, Machine, Power, Electricity*

1. INTRODUCCIÓN

El motor del desarrollo es la energía y se considera como un punto central para el crecimiento de cualquier sociedad, de acuerdo con la International Energy Agency (IEA) más de 1000 millones de personas (equivalente al 14% de la población mundial) no tienen acceso a la electricidad y cerca de 2800 millones (38% de la población mundial) no tienen acceso a servicios modernos de energía. Tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1.Comparación de la población sin acceso a electricidad

	Población sin acceso a la Electricidad				Población sin acceso a Energía Moderna para Cocinar			
Año	2000		2016		2000		2015	
Región/ Indicador	Millones	%	Millones	%	Millones	%	Millones	%
África	532	66	598	48	619	76	848	71
Asía en desarrollo	1059	33	439	11	2083	65	1874	49
América Central y del Sur	56	13	17	3	78	19	59	12
Medio Oriente	15	9	1714	7	14	9	12	5
Mundo	1672	27	1060	14	2794	46	2793	38

Nota: datos contruidos con base en los datos de IEA, 2017, WEO-2017, Special Report: Energy Access Outlook, from Poverty to Prosperity Elaboración propia.

Adicional a esto, se considera una forma de pobreza al no contar con acceso a servicios modernos de energía, debido a que cuando no se cuenta con esta facilidad para satisfacer las necesidades humana básicas o el poder adquisitivo para cubrirlas, las personas o comunidades en esta situación se conoce que tienen pobreza energética. (Gueydan, 2020)

De esta manera las energías renovables pueden ayudar y contribuir a obtener energía limpia, segura y asequible, ayudando así a contrarrestar los efectos del cambio climático, pobreza energética y creando una red de energía competitiva en costos (Vista General de La Energía: Noticias de Desarrollo, Investigación, Datos. Banco Mundial, n.d.).

Situación energética en Bolivia

De acuerdo con la IEA, un cuarto de la energía generada en Bolivia proviene de energías renovables; no obstante, aproximadamente 12% de la población aún no cuenta con energía eléctrica. Sin embargo, se prevé que con el plan eléctrico 2020-2025 se logró una expansión de la red eléctrica con un énfasis en las renovables, esperando tener un 70% de participación de éstas (Bolivia - Countries & Regions - IEA, n.d.).

El sistema eléctrico boliviano está conformado por el Sector Interconectado Nacional (SIN) y los Sistemas Aislados (SA), el SIN, conecta a las capitales y a los principales municipios de los departamentos de La Paz, Oruro, Potosí, Cochabamba, Chuquisaca, Santa Cruz, Beni y Tarija. Mientras que los SA se encargan de abastecer a los pequeños municipios y áreas rurales de cada departamento, incluido Pando.

Según Arbeloa Sola Jesús Zurita Gabasa Pamplona (n.d.) para conseguir salir de la pobreza y poder

generar ingresos con la energía, se debería poder cubrir las necesidades humanas básicas, es decir, tener electricidad para iluminación, comunicación y servicios comunitarios (50-100 kWh/año). En este aspecto, y como ya se ha comentado, las energías renovables van a tener un papel muy importante, tal como concuerda López et al. (2021)

Finalmente, la adopción de las renovables en el mix energético de Bolivia se muestra necesario como lo recalca Fernández Vázquez et al. (2024) en su investigación con tres escenarios diferentes para la transición energética; resaltando el hecho de que en cualquier escenario la transición reduce los costos si es a través de fuentes renovables, pudiendo reducir hasta 95% de emisiones de carbono para 2050.

En este marco energético se plantea realizar el siguiente estudio.

Objetivos

- Definir la potencia eólica disponible en el área donde se pretende colocar el aerogenerador.
- Evaluar el dimensionamiento y las características del diseño propuesto del rotor.
- Comparar los resultados de la simulación con datos reales.

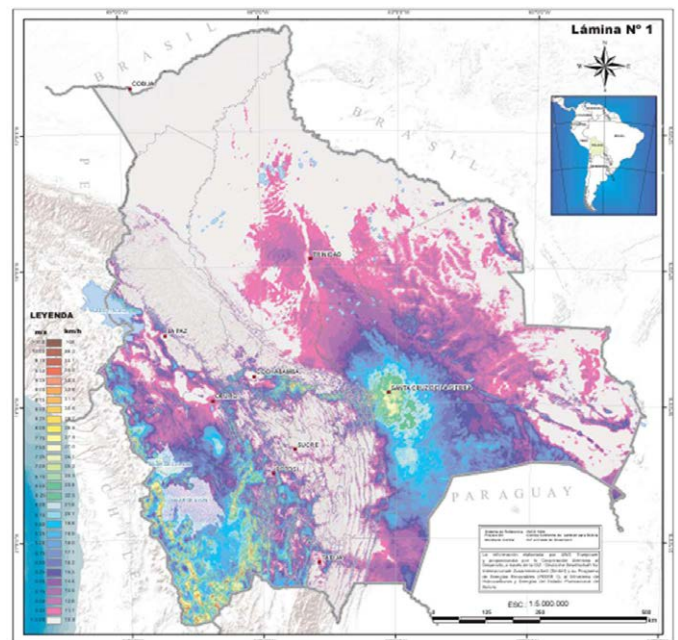
Energía Eólica como alternativa

Situación Bolivia

Bolivia, en los últimos años, ha dado pasos muy importantes en el desarrollo de la generación de electricidad a partir de fuentes alternativas, lo cual se plasma en los proyectos de aprovechamiento eólico concluidos; Qollpana I y II (27 MW) en Cochabamba, a los que se suma los que se encuentran en etapa de ejecución en San Julián, Warnes y El Dorado (108 MW), todos en el Departamento de Santa Cruz (Ministerio de Hidrocarburos, 2021). El recurso eólico más robusto está alrededor de Santa Cruz de

la Sierra, en su mayoría al sur y al oeste del centro urbano, en la frontera suroeste de Bolivia con Chile y Argentina en el Departamento de Potosí, en un 'corredor' que va más o menos de este a oeste entre las ciudades de Santa Cruz y La Paz que corre al sur de la línea de transmisión de 230 kV entre Santa Cruz y Cochabamba, ligeramente al norte de la misma entre Cochabamba y La Paz, en otro 'corredor' más o menos norte-sur entre el área justo al este de la ciudad de Oruro y al oeste de la ciudad de Potosí (ver Figura 1).

Figura 1. Velocidad promedio del viento a 40 m de altura.



Fuente: Ministerio de hidrocarburos, 2021.

El recurso eólico

La principal fuente para la generación eólica es el viento, el cual es generado de manera natural por la variación de calentamiento de la superficie de la Tierra, debido a la radiación solar, provocando movimientos convectivos de la masa atmosférica, es

decir, el aire caliente existente asciende, arrastrando aire más frío ubicada en otra zona cercana. Al subir, tiende a perder este calor, que, por propiedades físicas, resulta en un aumento de su densidad, haciéndolo descender para que se complete el ciclo y se repita Arbeloa Sola Jesús Zurita Gabasa Pamplona (n.d.). Por lo que se puede definir al viento como una masa de aire en movimiento, teniendo así energía cinética Roth & Otero-Piñeiro (2003).

Medición del viento

La correcta medición de parámetros como la velocidad del viento y dirección determina la viabilidad de un proyecto eólico, por eso su determinación es vital. Para determinarlos normalmente se utilizan anemómetros y/o una veleta, colocados a una determinada altura. Además, hay que tener en cuenta que datos obtenidos durante una campaña de medición de un año son poco representativos, dada la variabilidad del viento.

Es importante mencionar que para que los datos sean representativos, la información eólica debe ser de periodos entre 25 y 30 años, aunque si esto no es posible los datos recogidos entre 5 y 10 años ya comienzan a ser bastante representativos Arbeloa Sola Jesús Zurita Gabasa Pamplona (n.d.).

Caracterización energética del viento

Los datos arrojados por los anemómetros son extrapolados para la altura del rotor requerida y determinar si tienen potencial, para esto existen dos métodos usados para caracterizar al viento: histogramas y análisis estadístico Castro (2022).

Para el método de los histogramas, se separan las velocidades de viento por intervalos o clases con una separación de 1 m/s, entre cada una, llamado a esto frecuencias. Esto reduce y facilita la observación y el análisis de las velocidades de viento de una base de datos. Basado en la distribución de clases, se crea el histograma, contando el número de ocurrencias

de cada clase Castro (2022).

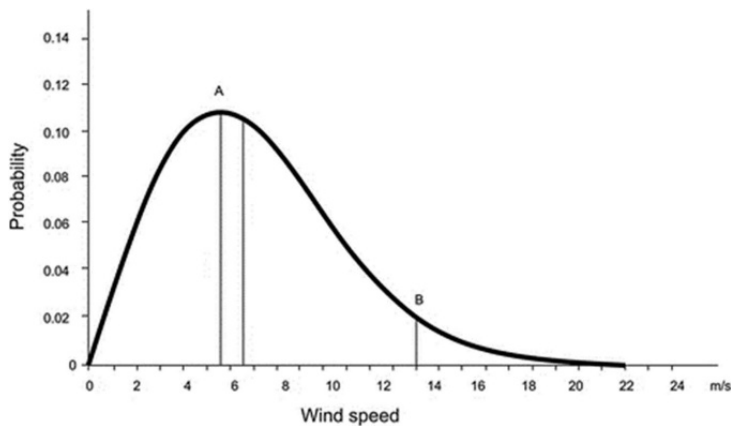
Por otro lado, el método estadístico utiliza funciones analíticas para obtener aproximaciones de tipo de densidad de probabilidad, permitiendo ampliar el marco de los estudios, proyecciones o pronósticos que se pueden realizar. La distribución de Weibull es la distribución de probabilidad que se utiliza normalmente para describir los perfiles de velocidad del viento Castro (2022).

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

La función de densidad de probabilidad de Weibull (PDF), $f(v)$, viene dada por

Donde v es la velocidad del viento, $c > 0$ (m/s) es un parámetro de escala, y $k > 0$ es un parámetro de forma.

La importancia de la Distribución de Weibull es relevante porque muestra la variación de las velocidades de viento promedio medidas en un determinado sitio y en fechas específicas, mientras mayor sea este periodo de tiempo mejores serán las predicciones, el impacto de la variación de la velocidad tiene impacto directo en la energía de salida, un ejemplo de la distribución de Weibull se muestra en la Figura 2, en donde la velocidad media es de 7 m/s y con un parámetro de forma de 2 (k) (H.-J. Wagner & Mathur (2018)).

Figura 2. Distribución de Weibull

Nota: la Imagen muestra la curva de probabilidad de ocurrencia vs la velocidad del viento, distribuido según la frecuencia de ocurrencia. Fuente: Wagner & Mathur, 2018.

El área debajo de la curva siempre será 1, debido a que la probabilidad de que el viento sople a alguna velocidad debe ser del 100%. Como se ve en la Figura, la mitad del área se encuentra dividida por la línea negra a 6.6 m/s, siendo este punto la velocidad media del viento, para este caso, significa que la mitad del tiempo el viento estará soplando por debajo de este valor, mientras que la otra mitad de tiempo estará por encima de esta velocidad. Sin embargo, la distribución estadística de la velocidad del viento variará siempre de un lugar a otro, dependiendo de las condiciones climáticas, el terreno y orografía H. J. Wagner & Mathur (2018).

Existen dos parámetros que controlan la forma de la curva, el factor de escala y el factor de forma, un valor alto del factor de escala significa que el valor promedio se extiende sobre un rango más amplio y que la velocidad promedio pirobalística del viento tiene un valor más alto. Mientras que un valor más alto de forma (entre 2 y 3) significa que la distribución está más sesgada hacia velocidades de viento más altas; si el parámetro de forma está entre 1 y 2, significa que la distribución está sesgada hacia

velocidades más bajas. Ambos parámetros influyen en la curva de distribución máxima, pero uno tiene una influencia importante en el valor promedio y el otro influye principalmente en la asimetría de la curva H. J. Wagner & Mathur (2018).

Potencia eólica disponible

El término energía eólica describe el proceso por el cual el viento es usado para generar electricidad; los aerogeneradores convierten la energía cinética del viento en energía mecánica, que después produce energía eléctrica. Desde el punto de vista de la energía de conversión, las propiedades más importantes a tomar en cuenta son la velocidad del viento y la densidad del aire. Esta densidad varía con la altitud y con las condiciones atmosféricas, tales como temperatura, presión y humedad Zhang (2021).

Considerando un volumen de aire, m (kg), cruzando un disco con un área, A (m^2) a una velocidad constante, v (m/s), el espesor del volumen de aire x (m). De esta manera la energía cinética es representada de la siguiente manera:

$$\mathcal{E}_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(\rho Ax)v^2$$

Tomando en cuenta la relación entre energía y potencia, el potencial disponible del viento es:

$$P_D = \frac{d\mathcal{E}_{cin}}{dt} = \frac{1}{2}(\rho Av^2)\frac{dx}{dt} [W]$$

La cual puede ser escrita de la siguiente manera, es la que más conocida y usada con más frecuencia:

$$P_D = \frac{1}{2}(\rho Av^3) [W]$$

Esto resulta en que la velocidad de viento se vuelve determinante para la potencia disponible, es decir, si la velocidad de viento se duplica, la potencia se multiplicará por ocho, y lo mismo sucede con el área, sin embargo, si la velocidad de viento disminuye, la potencia se verá fuertemente afectada Castro (2022).

Límite de Betz

La ley de Betz establece cuánta energía cinética del viento puede ser aprovechada y transferida a energía mecánica, esta ley dice que el límite máximo de energía cinética aprovechable por una turbina eólica es del 59.29%. Debido a que el viento en la parte trasera del rotor debe ser lo suficientemente veloz para moverse y permitir que más viento se mueva por la parte plana del rotor H. J. Wagner & Mathur (2018).

De esta ley aparece un factor relevante en la evaluación eólica, como es la relación entre la potencia mecánica de la pala del rotor P_r y la potencia del viento P en el área del rotor, esto se denomina coeficiente de potencia (C_p):

$$C_p = \frac{P_r}{P}$$

El coeficiente de potencia C_p se puede interpretar como la eficiencia entre la pala del rotor y el viento. El coeficiente de potencia máxima, el número de Betz mencionado anteriormente, se determina mediante la relación $v_1/v_2 = 1/3$. Por lo tanto, una turbina ideal reducirá la velocidad del viento en $2/3$ de su velocidad original. Asimismo, para un cálculo más real de la potencia realmente aprovechable del viento con determinado aerogenerador, se utiliza este factor. Por ejemplo, para los aerogeneradores Savonius, del cual se realiza el análisis, este valor varía desde 0.8 al 1.4 H. J. Wagner & Mathur (2018). La fórmula de la potencia quedaría de la siguiente manera:

$$P_D = C_p \times \frac{1}{2} (\rho A v^3) [W]$$

Otro factor importante es el Tip Speed Ratio (TSR) denotado por λ , el cual es la relación adimensional de la velocidad circunferencial del rotor en el extremo de la pala (velocidad máxima v_e) y la velocidad del viento delante de la pala del rotor v_0 :

$$\lambda_s = \frac{v_s}{v_0}$$

La relación de velocidad de punta tiene una fuerte influencia en la eficiencia de un convertidor de energía eólica, cuando λ_s es pequeña, la velocidad circunferencial también es pequeña, lo que resulta en un aumento en el ángulo de ataque, cuando el ángulo de ataque aumenta más allá de un ángulo crítico, el flujo se sale del perfil y se vuelve turbulento, reduciendo así drásticamente la fuerza de sustentación H.-J. Wagner & Mathur (2018).

Clasificación de las máquinas eólicas

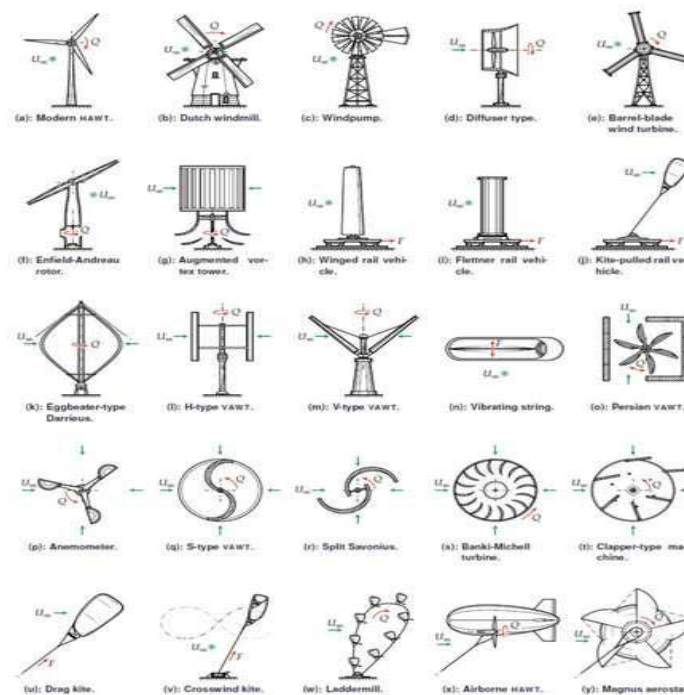
Dentro de la energía eólica existen diferentes tecnologías para aprovechar la fuerza del viento, una posible clasificación son las turbinas eólicas pequeñas (SWTs, por sus siglas en inglés), las cuales surgen como dispositivos que destacan por su facilidad de coexistir y ser compatibles con otro tipo de energías, comparado con las turbinas convencionales. Este tipo de turbinas manejan capacidades menores a 50 kW y son instaladas en lugares cuyas velocidades de viento son bajas, por lo que el reto que enfrentan estas turbinas son mejorar la eficiencia de captura de energía, debido a que comparadas con las turbinas convencionales su aprovechamiento de energía es mucho menor, en la Figura 3, se puede observar la diversidad de tipos de turbina que existen Advanced Wind Turbines - Teik-Cheng Lim, Palanisamy Mohan Kumar, Sivalingam Krishnamoorthi - Google Libros (n.d.).

Por otro lado, existe la clasificación dada por la forma en que aprovechan la energía proveniente del viento, como lo son las turbinas eólicas de eje horizontal (HAWTs, por sus siglas en inglés) y las turbinas de eje vertical (VAWTs), siendo los HAWTs los de mayor uso hoy en día a gran escala, por su alta eficiencia y gran salida de potencia, trabajando mediante la fuerza de sustentación. Mientras que los VAWTs tienen la ventaja de utilizar cualquier dirección de viento, alta confiabilidad, ruido bajo, poco mantenimiento, fuerza de arrastre y destacan por su amplia aplicación de baja potencia Advanced

Wind Turbines - Teik-Cheng Lim, Palanisamy Mohan Kumar, Sivalingam Krishnamoorthi - Google Libros (n.d.).

Las fuerzas del viento que se utilizan en todas las turbinas son las fuerzas de arrastre y la de sustentación, esta última es creada por el flujo de viento en un perfil aerodinámico o por el efecto Magnus, donde un cilindro girando crea una circulación de viento que se vuelve y genera en sustentación Advanced Wind Turbines - Teik-Cheng Lim, Palanisamy Mohan Kumar, Sivalingam Krishnamoorthi - Google Libros (n.d.).

Figura 3. Tipos de turbinas eólicas

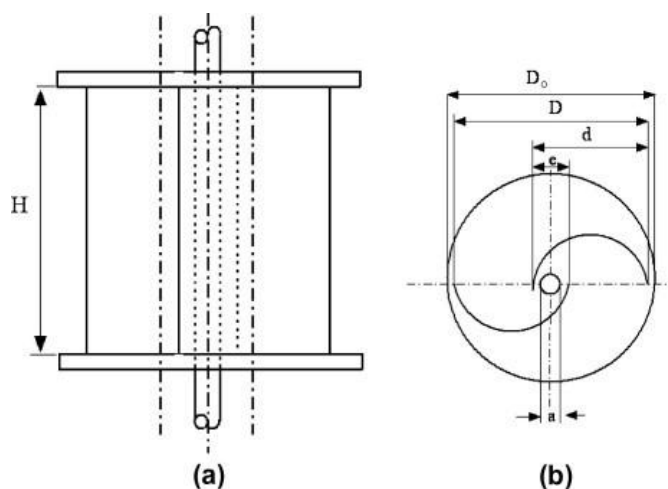


Nota: se muestran los diferentes modelos de las turbinas eólicas y su progresión para el manejo del viento
Fuente: Advanced Wind Turbines - Teik-Cheng Lim, Palanisamy Mohan Kumar, Sivalingam Krishnamoorthi - Google Libros (n.d.)

Aerogeneradores Savonious

Los aerogeneradores Savonious se caracterizan por tener su rotor con diferentes configuraciones, dependiendo en la aplicación a la cual se destine, ya sea bombeo o generación eléctrica. Estos rotores son los más simples dentro de los VAWTs, su funcionamiento se basa en la fuerza de arrastre con el poder de auto arranque y la capacidad de capturar el viento en cualquier dirección, sin embargo, su baja eficiencia aerodinámica los hace menos atractivos. Un ejemplo de estos se puede observar en la Figura 4 Wilberforce et al. (2023).

Figura 4. Diseño de un rotor Savonious de una fase. A) vista elevada; B) vista de planta



Nota: Modelo a escala, donde H representa la altura de la turbina y la D , los diámetros de turbina. Fuente: Mahmoud et al. (2012).

Dentro de la literatura Mahmoud et al. (2012) determinó la configuración más eficiente para la operación de este tipo de turbinas, encontrando que usando 2 palas se vuelve más eficiente comparado con las de 3 o 4 palas. También encontró que el C_p se incrementa, aumentando la relación entre la altura y el diámetro de la turbina. Asimismo, el mejor C_p registrado fue de 0.31 por una turbina de 2 fases y 2 palas torcidas, pero la diferencia a las palas semi circulares ($C_p = 0.29$) fue pequeña. Otra aportación encontrada fue que, si se le añaden compuertas al diseño, el C_p puede llegar a 0.32 con 3 palas en 2 fases Wilberforce et al. (2023).

Materiales y método.

Metodología

El trabajo realizado, partió como una propuesta de análisis de la disponibilidad del potencial eólico en Santa Cruz, visto desde la zona urbana, tomando en cuenta aerogeneradores de eje vertical.

Para esto, se planteó el estudio de las condiciones climáticas del área tomando los datos de diferentes fuentes, cómo son la información del clima de las páginas web como la Nasa, esta información se recabó a partir del software WINDOGRAPHER, el cual se conecta con dichas bases de datos y se puede realizar

un análisis de técnico de la información a través del mismo software, además la UTEPSA cuenta con una estación climática la cual recaba y almacena información por un año y con esos datos se realizó una comparación. Una vez obtenidos los datos del perfil climático, como son, el viento promedio, la humedad relativa, la presión del aire, la altura de estudio, se procedió a revisar los atlas eólicos para verificar el potencial eólico en el área y finalmente usando un modelo de aerogenerador tipo vertical del mercado se procedió a determinar la potencia mecánica disponible, según la caracterización del viento y el modelo descrito.

Análisis del sitio

Como sitio para el análisis se tomó la Universidad Tecnológica Privada de Santa Cruz de la Sierra (UTEPSA) en la ciudad de Santa de la Sierra, en el departamento de Santa Cruz, Bolivia, con coordenadas -17.7675, -63.201, como se muestra en la Figura 5.

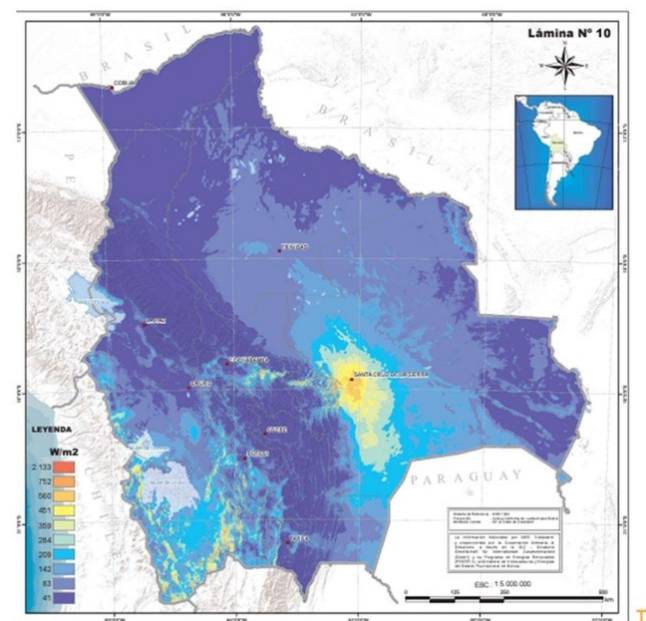
Figura 5. Vista geográfica de la UTEPSA, zona de estudio



Fuente: Elaboración propia. Google Earth Pro (2024).

Tiene una altitud media sobre el nivel del mar de 416 m. La ciudad está en una divisoria de aguas. Hacia el oeste sus aguas van al río Piráí, y al este van al río Grande. La topografía de la ciudad es generalmente plana, lo que le da un potencial eólico mayor como ya se ha mencionado con anterioridad. El área ocupada por la ciudad es de 567 km², y tiene un perímetro de 110,2 kilómetros Población y Hechos Vitales - INE (n.d.). La densidad de potencia por área de Bolivia se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Mapa promedio anual a largo plazo de la densidad de potencia a 80m de altura



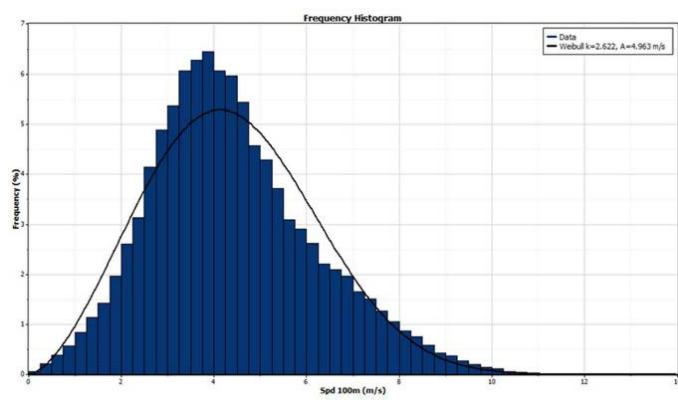
Fuente: CPERv - Atlas (n.d.) Ministerio de hidrocarburos, 2021.

Análisis de datos del viento

Se realizaron dos análisis de viento, el primero, con datos de viento obtenidos de MERRA-2 con la estación de datos más cercana al punto de estudio, con 44 años de datos y procesados a través del software Windographer para la obtención de la distribución de Weibull, y parámetros como el factor

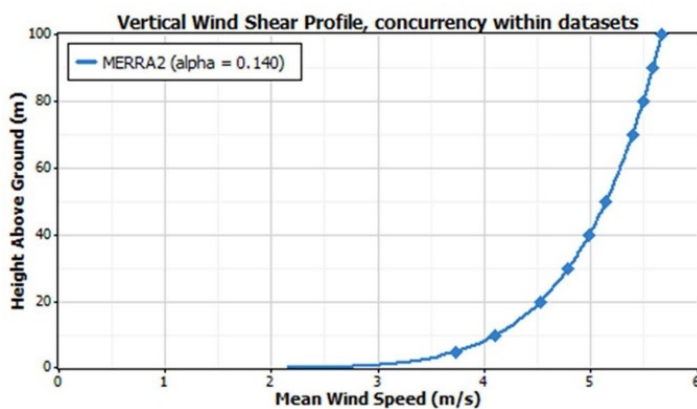
de forma y la velocidad media del viento, tal y como se observa en la Figura 7. Después se extrapoló el viento a diferentes alturas, desde los 5m hasta los 100 m, tomando en cuenta la rugosidad de viento. Es importante mencionar que esta rugosidad fue tomada en cuenta con base a la clasificación de la Denmark Technical University (DTU). Esta distribución se muestra en la Figura 8.

Figura 7. Histograma de frecuencia para el primer análisis de datos.



Nota: Datos tomados de la estación climática UTEPSA. Fuente: Elaboración propia.

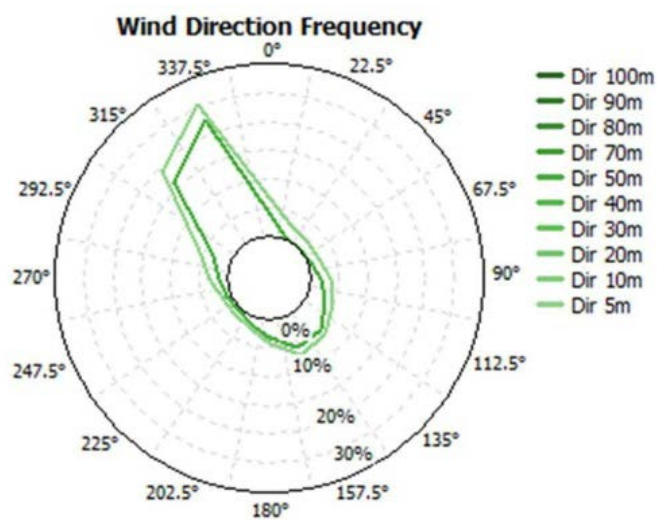
Figura 8. Extrapolación del viento



Nota: Datos tomados de la estación climática UTEPSA. Fuente: Elaboración propia.

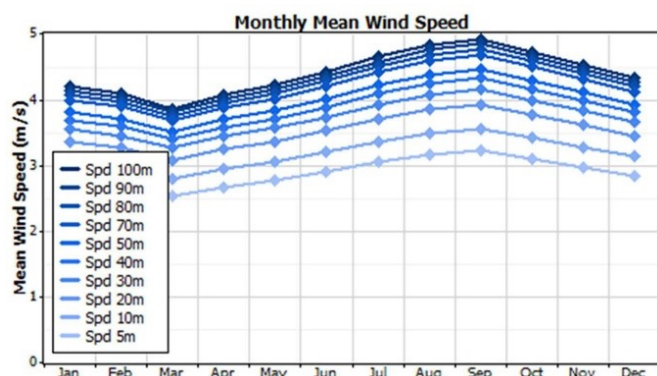
Asimismo, se obtuvo la rosa de los vientos para las mismas alturas y la velocidad promedio por meses a las diferentes alturas, como se observa en las Figuras 9 y 10.

Figura 9. Rosa de los vientos.



Nota: Datos tomados de la estación climática UTEPSA. Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Promedio de velocidades por meses



Nota: Datos tomados de la estación climática UTEPSA. Fuente: Elaboración propia.

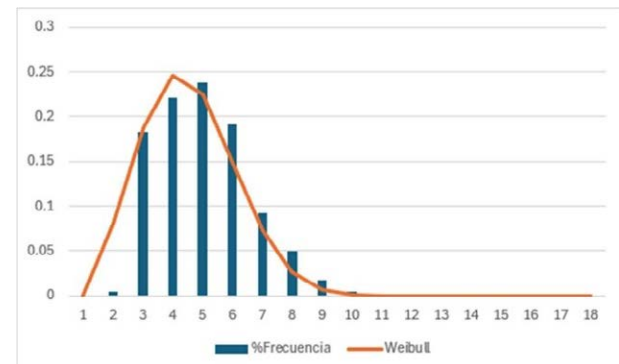
Para el segundo análisis se utilizaron datos de la estación meteorológica de la UTEPSA, los cuales tienen 1 año de datos comprendidos desde el 1° de enero de 2023 hasta el 31 de diciembre de 2023. Esta vez, no pudieron ser modificados en WindoGrapher, debido a la poca información almacenada.

Sin embargo, se utilizó el programa Excel para obtener los parámetros más relevantes y así poder compararlos con los datos previamente mostrados.

Como primer paso, se ordenaron los datos, es decir, se colocaron las velocidades de viento en m/s para obtener la densidad de potencia (WPD, por sus siglas en inglés) de cada uno de los datos.

Posteriormente se obtuvo el máximo, mínimo y promedio tanto de velocidades como de esta densidad de potencia del viento, que es una función para cuantificar o aproximar la potencia total disponible, la cual se registra en W/m². Una vez obtenido esto, se procedió a obtener el histograma, para lo cual se colocaron grupos desde el 1 hasta el 10 y utilizando la función de frecuencia de Excel se registraron la cantidad de veces con la que estas velocidades figuraban en los datos. Posteriormente, se utilizó la función de distribución de Weibull, propiamente del programa y utilizando este factor se realiza el cálculo de la WPD ajustada. Una vez obtenido esto se pudo crear el histograma, tal como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Histograma en función de la distribución de Weibull y frecuencia.

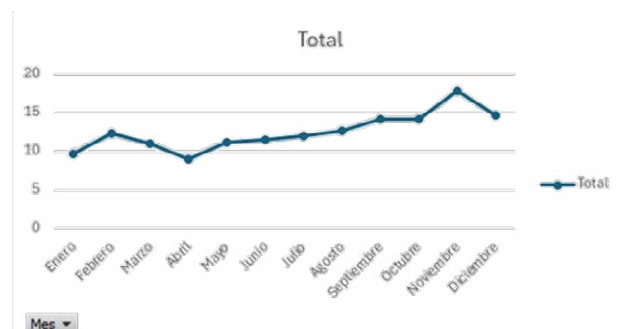


Nota: Datos tomados de la estación climática UTEPSA. Fuente: Elaboración propia.

Para la obtención del parámetro de factor de forma se utilizó la herramienta Solver, la cual arroja un valor modificando valores establecidos, de esta manera se encontró que el factor de forma (k) fue de 2.43, esto quiere decir que la velocidad de viento estará por debajo del promedio más frecuentemente. Mientras que para el cálculo del factor de escala (c) se utilizó la función gamma, la velocidad media y k .

Posteriormente, se creó la gráfica de velocidades promedio por meses del año, permitiendo analizar en qué meses se tiene un mayor potencial eólico. Esta gráfica se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Velocidades de viento en km/h por mes.



Nota: Datos tomados de la estación climática UTEPSA. Fuente: Elaboración propia.

Este análisis de datos sirvió para determinar la velocidad de diseño del aerogenerador, esto corresponde a la velocidad o grupo del histograma el cual arroja una mayor WPD, en este caso este valor fue el grupo 5, por lo que la velocidad de diseño fue de 5 m/s.

Modelado en SolidWorks

Se partió de un modelo, gracias al cual se pudo usar medidas aproximadas y apegarse a la realidad, como se muestra en la Figura 13.

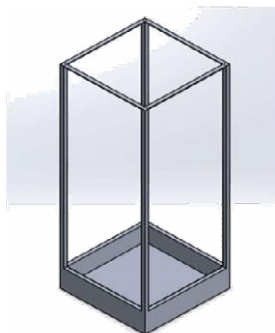
Figura 13. Aerogenerador tipo Savonius



Nota: Modelo usado para el análisis.

El modelo se realizó en el Software SolidWorks, realizando primero la parte exterior o carcaza, como se muestra en la Figura 14.

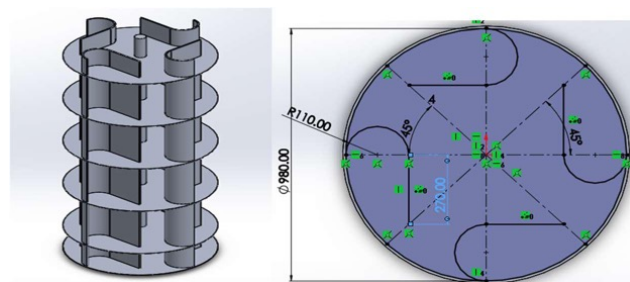
Figura 14. Carcaza del aerogenerador.



Nota: Imagen tomada del diseño en SOLIDWORKS
Fuente: Elaboración propia

Las medidas fueron tomadas de la hoja de datos del fabricante, teniendo una altura de 3.10 m por 1.20 m, un diámetro de hélices de 1.002 m y un peso total de 280 kg. Posteriormente, se realizó el modelado de las 4 hélices repartidas en 6 fases, con un eje de 3 in de diámetro, tal como se muestra en la Figura 15.

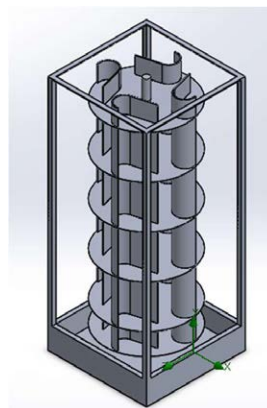
Figura 15. Vista isométrica del rotor y medidas de álabes.



Nota: Imagen tomada del diseño en SOLIDWORKS
Fuente: Elaboración propia

Después se realizó el ensamblaje de ambas piezas, tal como se muestra en la Figura 16.

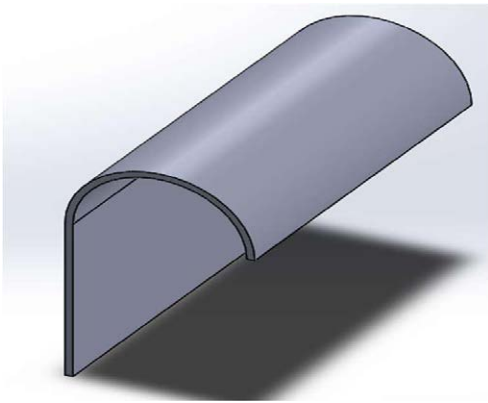
Figura 16. Ensamblaje de ambas piezas.



Nota: Imagen tomada del diseño en SOLIDWORKS
Fuente: Elaboración propia

Es importante destacar que la parte central de los aerogeneradores viene dada por la forma en la que aprovechan, ya sea la sustentación o arrastre, del viento. En este caso, la forma de una pala se puede observar en la Figura 17. El aerogenerador cuenta con 6 secciones de 4 palas cada sección. Siendo la sección superior e inferior más pequeñas a comparación de las secciones centrales.

Figura 17. Ejemplo de las palas utilizadas.

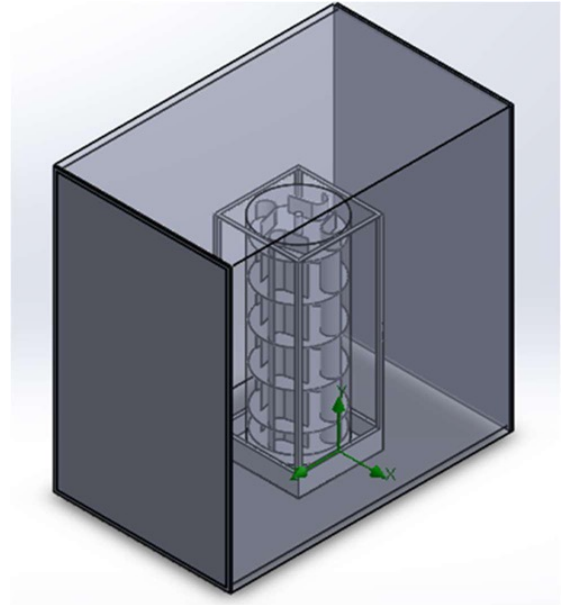


Nota: Imagen tomada del diseño en SOLIDWORKS
Fuente: Elaboración propia

Análisis en CFD

Para el análisis computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés) y simular el flujo de viento para hallar parámetros como el Torque, velocidades y presiones en los álabes fue necesario realizar un túnel de viento en donde se delimito la entrada y salida del fluido, en este caso, aire. Asimismo, se añadió un sólido que envuelve la parte pieza giratoria, es decir, el rotor y los álabes. Tal como se observa en la Figura 18.

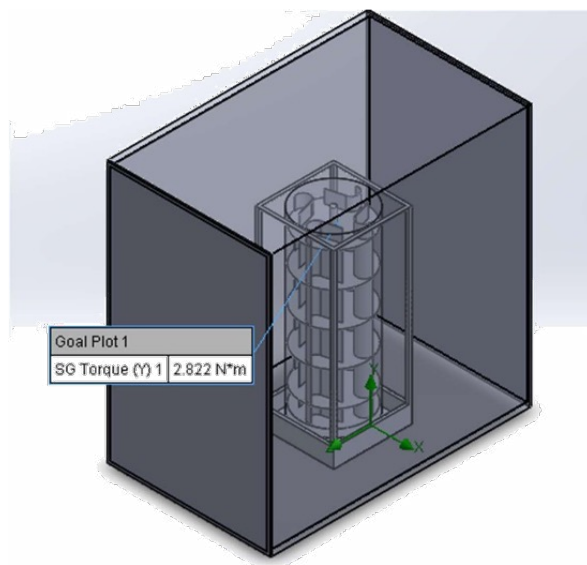
Figura 18. Ensamblaje completo para el análisis CFD.



Nota: Imagen tomada del diseño en SOLIDWORKS
Fuente: Elaboración propia

Una vez ensambladas todas las piezas en el simulador, se procedió a realizar el análisis con el complemento de Flow Simulation del software SOLIDWORKS, allí se seleccionan los parámetros pertinentes, es decir, se selecciona la velocidad y dirección a la cual el viento ingresará al túnel de viento, en este caso de 5 m/s en el eje Z como se observa en las figuras, así como la zona que debe girar, se delimita la zona de análisis, un mallado local y global, el cual se realizó de 25x25x25, en los ejes x, y y z, respectivamente, al igual que se creó un mallado local en la zona de los álabes y los objetivos de interés, como las velocidades, fuerzas, esfuerzos, presiones y torques. Después, se corre la simulación y el factor más relevante que se buscó fue el torque, el cual fue de 2,822 N*m, tal como se ve en la Figura 19.

Figura 19. Torque de la simulación.



Nota: Imagen tomada del diseño en SOLIDWORKS

Fuente: Elaboración propia

Resultados.

Cálculos

Área

Para el cálculo del área, se tomó en cuenta que la superficie que golpearía el viento en cualquier momento determinado siempre sería dos (2) de los cuatro (4) álabes. Por esta razón no se calculó en base al área de todas las palas. Esta área está determinada por un semicírculo y un rectángulo, los cuales conforman la pala, la dimensión de las partes superior e inferior difieren del resto de las secciones. Estos cálculos se hicieron utilizando la siguiente fórmula:

$$A = 2 \times [\pi \times r(r + h) + b \times h]$$

Es importante mencionar que el área calculada corresponde a un álabe, con lo cual debe ser multiplicada por la cantidad de secciones con la que cuenta el aerogenerador y ser modificada con

respecto a las diferentes alturas que tienen las palas. De esta manera, se tiene en cuenta que el radio del semicírculo es de 0.110m, la base 0.270m y las alturas 0.260m y 0.520m de las secciones base y centrales, respectivamente. Se obtuvo que el área que será encargada de moverse con el viento será de 3.6571m².

Determinación de la velocidad de rotación

De acuerdo con Medina (2023) la velocidad de rotación viene dada por la relación:

$$\lambda = \frac{2\pi \times n \times R}{60 \times v}$$

Sin embargo, este valor del TSR varía con el tipo de aerogenerador y en este caso se tomó un valor de 1.9. Aunado a esto, la fórmula despejada para obtener las revoluciones por minuto (RPM) fue de la siguiente manera:

$$n = \frac{\lambda \times 60 \times v}{2\pi \times R}$$

Donde:

$$v = 5 \text{ m/s} \quad R = 0.49 \text{ m}$$

Este radio viene dado por el área de barrido de todas las palas. Por lo que, sustituyendo valores las RPM óptimas serían:

$$n = \frac{1.9 \times 60 \times 5 \text{ m/s}}{2\pi \times 0.49 \text{ m}}$$

$$n = 185.139 \text{ rpm}$$

Potencia

En este apartado se utilizan las ecuaciones vistas anteriormente, en donde se toma el parámetro de la densidad del aire, en este caso de 1.225 kg/m³.

$$P_D = \frac{1}{2} \times 1.225 \text{ kg/m}^3 \times 3.6571 \text{ m}^2 \times \left(5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3$$

$$P_D = 279.996 \text{ W}$$

Sin embargo, cuando agregamos el C_p común de los aerogeneradores tipo Savonious, en este caso de 0.20, la potencia queda de la siguiente forma:

$$P_D = 55.999 \text{ W}$$

Esta potencia se corrobora en el siguiente apartado a partir de la simulación.

Torque

Para la comprobación de los cálculos realizados y tener una relación con la simulación, y tomando en cuenta lo que plantea Medina (2023) esta fórmula se da de la siguiente manera:

$$P = \text{torque (kgm)} \times \text{velocidad (rpm)}$$

Donde:

$$0.102 \text{ kgm} = 1 \text{ Nm} \quad \text{velocidad} = 185.139 \text{ rpm}$$

Reemplazando valores se tiene que:

$$P_m = 2.822 \times 0.102 \text{ (kgm)} \times 185.139 \text{ (rpm)}$$

$$P_m = 53.291 \text{ W}$$

Se observa en esta simulación que existe una aproximación a la potencia calculada anteriormente. Esto se debe a que el torque generado está en función a sólo 2 álabes activos.

Energía

En este apartado se calculará la cantidad de energía que el aerogenerador puede producir en diferentes lapsos de tiempo, tomando en cuenta un viento promedio de 5 m/s. De esta manera, la energía disponible en un día sería:

$$E = P_D \times t \left[\frac{W}{h} \right]$$

$$E = 53.291 \text{ W} \times 24 \text{ h} = 1278.99 \frac{W}{h}$$

por mes, tomando en cuenta un mes de 30 días:

$$E = 1278.99 \frac{W}{h} \times \frac{30 \text{ dias}}{1000}$$

$$E = 38.37 \frac{W}{h}$$

Por año:

$$E = 38.37 \frac{W}{h} \times 12 \text{ meses}$$

$$E = 460.435 \frac{W}{h}$$

Resultados

A partir de los cálculos realizados y las simulaciones empleando las fórmulas correspondientes, se logró establecer una relación analítica entre el potencial eólico disponible y la potencia generada por un rotor de eje vertical. En el análisis, se consideró un viento constante con una velocidad constante de entrada de 5 m/s.

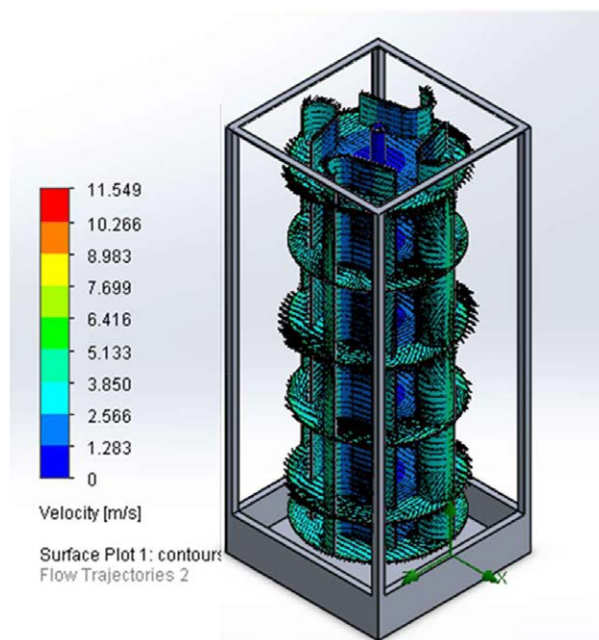
El potencial eólico calculado en estas condiciones fue de aproximadamente 280 W. No obstante, al aplicar un coeficiente de potencia (C) de 0.2, que es el valor promedio conservador con el cual las turbinas tipo Savonious trabajan y en la cual se respalda esta investigación, una vez aplicado el valor de la potencia utilizable disminuyó significativamente, alcanzando 55.9 W. Esto se traduce en una producción mensual de energía estimada en 38.37 kWh. Es importante resaltar que las condiciones del viento en la realidad no son constantes. Por lo tanto, este valor de energía debe interpretarse como una aproximación bajo las condiciones específicas simuladas.

En la Figura 20 se observa el perfil de velocidades del rotor en una perspectiva isométrica, en donde se destaca que los valores vectoriales que se muestran son relativamente inferiores, llegando a un máximo de 5 m/s aproximadamente, esto nos indica las partes del álabes donde más recibe la fuerza proveniente del viento y por lo cual tendrá una mayor fuerza de arrastre, lo que se traduce en movimiento.

Por otro lado, en la Figura 21 se observa el perfil de velocidades desde una perspectiva superior en donde se nota un máximo en los bordes del aerogenerador, siendo esto normal teniendo en cuenta que la velocidad en los bordes de los álabes es mayor a diferencia del resto del cuerpo de estas piezas, debido a que la velocidad tangencial y angular en la punta de cualquier álabes será mayor por su relación con la distancia que se tiene del centro de rotación, en este caso la distancia está dada por el semicírculo de la pala. Por esta razón, la potencia entregada en los aerogeneradores de eje horizontal es exponencialmente mayor a comparación de las de eje vertical.

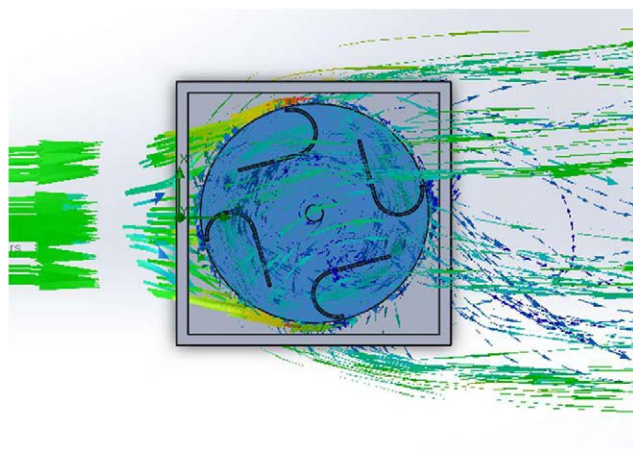
En la figura 22 se observa el perfil de presiones que se ejerce en el aerogenerador, en donde se aprecia que su cambio no es grande. Esto quiere decir que no hay cambios significativos cuando el viento viaja a través de la turbina, solo en las zonas donde el fluido se vuelve turbulento se aprecia un aumento en la presión, estas zonas se muestran en los álabes, asimismo, es importante destacar que en estas donde existe una mayor presión se debe a que la velocidad del viento disminuye, debido al principio de Bernoulli.

Figura 20. Resultado de simulación perfil de velocidades con vectores.



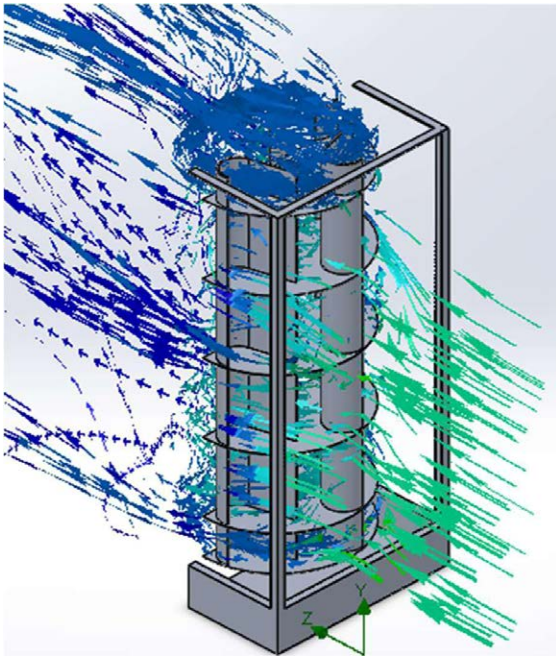
Nota: Imagen tomada del diseño en SOLIDWORKS
Fuente: Elaboración propia

Figura 21. Perfil de velocidad del viento respecto al aerogenerador.



Nota: Imagen tomada del diseño en SOLIDWORKS
Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Perfil de presiones sobre el aerogenerador.



Nota: Imagen tomada del diseño en SOLIDWORKS
Fuente: Elaboración propia

Discusión y conclusiones.

El estudio realizado permitió identificar las condiciones climáticas en el área de estudio y a partir de allí evaluando el modelo del aerogenerador de eje vertical propuesto se obtuvo el aprovechamiento para la conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica y posteriormente poder aprovecharla en energía eléctrica, este aprovechamiento se traduce en aproximadamente 38.37kWh/mes, esto con sólo una unidad y a una velocidad promedio de 5 m/s.

Ahora sería interesante poder valorar el cambio de la ubicación a un sitio donde se pueda manejar valores de viento mayores, ya que cómo indica la literatura la potencia disponible es proporcional al cubo de la velocidad del viento.

Con esto se podría tener una mayor disponibilidad de potencia mecánica y finalmente una mayor disponibilidad de energía eléctrica, un análisis más detallado sobre el aerogenerador y con pruebas en campo serían óptimas antes de plantear una aplicación para la generación distribuida.

Como recomendación de este trabajo se plantea realizar un análisis dentro de la UTEPSA en el área de ingreso al edificio Este donde continuamente se observan fuertes de vientos y grandes velocidades.

La importancia de realizar estudios en campo sería para la obtención de parámetros y factores que determinen el rendimiento de la turbina, debido a que, este fue un importante limitante en la relación de la modelación y en los cálculos realizados. Sin embargo, la generación eólica vertical aún tiene mucho campo y desarrollo que puede ser explotado, sobre todo, en sitios urbanizados donde el espacio es poco y la altura relevante para el aprovechamiento de esta tecnología.

Las simulaciones y cálculos realizados con éxito establecieron una relación entre el potencial eólico en Santa Cruz de la Sierra en bases a los datos y a la potencia generada por un modelo de turbina de eje vertical, bajo las condiciones de un viento constante a 5 m/s. A partir de estas relaciones se pudo calcular que el potencial disponible bajo velocidades de viento constantes fue de 280 W; sin embargo, al introducir a la ecuación el coeficiente de potencia (0.2), esta se ve afectada, disminuyendo hasta 55.9 W, demostrando que las turbinas verticales tipo Savonius son de bajo rendimiento.

Por otro lado, se obtuvo que la energía que puede brindar el aerogenerador en estas condiciones es de aproximadamente 38.37 kWh al mes, no obstante, es crucial tener en cuenta que este valor puede fluctuar, debido a que las condiciones climáticas no son constantes todo el año y esto podría afectar la

cantidad de energía que suministraría cada turbina. Aunado a esto, se recomienda realizar análisis más detalladas sobre las condiciones del viento y climáticas del sitio, con el fin de obtener resultados analíticos más precisos.

Debido a los objetivos del estudio, existieron limitaciones, por lo que es importante considerar fluctuaciones de patrones de viento y ambientales. Una de estas limitaciones es la eficiencia de las turbinas tipo Savonious, ya que, aunque son utilizadas para escalas pequeñas y velocidades de viento bajas, su aplicación a gran escala se complica, otra posible sugerencia sería el revisar otros modelos de turbinas verticales que ofrezcan mayor rendimiento.

Agradecimientos.

Este trabajo se fundamentó en el trabajo en equipo, la colaboración principal del estudiante de intercambio Rogelio Gómez Castillo de la Universidad Nacional Autónoma de México, de la UTEPSA por brindarnos los recursos para elaborar el trabajo, con la Jefatura de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, los estudiantes auxiliares del laboratorio de Eléctrica y en especial de Dios nuestro Padre celestial quien nos guía en cada paso que damos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Advanced Wind Turbines - Teik-cheng Lim, Palanisamy Mohan Kumar, Sivalingam Krishnamoorthi - Google Libros. (n.d.). Retrieved September 9, 2024, from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=2VjcEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=MohanKumar,+P.+Advanced+Wind+Turbines:+State+of+the+Art+Technologies+for+Low+Wind+Speed+Operation.+Wor+Id+Scientific.+EBook&ots=xTgdFM7G0N&sig=HULQK05Fhhjm3TerTuocVv0gzRw#v=onepage&q&f=false>

Alave-Vargas, E. M., Orellana Lafuente, R., Sempértegui-Tapia, D. F., Alave-Vargas, E. M., Orellana Lafuente, R., & Sempértegui-Tapia, D. F. (2022). ESTADO DEL ARTE SOBRE AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL. Investigación & Desarrollo, 22(1), 161–172. <https://doi.org/10.23881/IDUPBO.022.1-13/>

Arbeloa Sola Jesús Zurita Gabasa Pamplona, L. (n.d.). ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS

INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL TIPO

SAVONIUS PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL MEMORIA.

Barthelmie, R. J., Pryor, S. C., & Baležentis, T. (2021). Climate Change Mitigation Potential of Wind Energy. <https://doi.org/10.3390/cli9090136>

Bolivia - Countries & Regions - IEA. (n.d.). Retrieved September 9, 2024, from <https://www.iea.org/countries/bolivia>

Castro, R. (2022). Electricity Production from Renewables. Electricity Production from Renewables, 1–388. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82416-7/COVER>

Chen, X., Liu, Y., Wang, Q., Lv, J., Wen, J., Chen, X., Kang, C., Cheng, S., & McElroy, M. B. (2021). Pathway toward carbon-neutral electrical systems in China by mid-century with negative CO₂ abatement costs informed by high-resolution modeling. *Joule*, 5(10), 2715–2741. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.10.006>

CPERv - Atlas. (n.d.). Retrieved September 9, 2024, from <http://www.pronostico-erv.org.bo/atlas>

Fernandez Vázquez, C. A. A., Vansighen, T., Fernandez Fuentes, M. H., & Quoilin, S. (2024). Energy transition implications for Bolivia. Long-term modelling with short-term assessment of future scenarios.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 189, 113946. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.113946>

Gelman, L., Mamani, R., & Hendrick, P. (2022). Wind Power Potential in Highlands of the Bolivian Andes: A Numerical Approach. <https://doi.org/10.3390/en15124305>

Gueydan, M. (2020). El acceso a la energía.

Keshavamurty, R. N. (2021). Basics of Atmospheric Dynamics. Basics of Atmospheric Dynamics, 1–136. <https://doi.org/10.1201/9781003246114/BASICS-ATMOSPHERIC-DYNAMICS->

KESHAVAMURTY/ACCESSIBILITY-INFORMATION

Long, Y., Chen, Y., Xu, C., Li, Z., Liu, Y., & Wang, H. (2023). The role of global installed wind energy in mitigating CO₂ emission and temperature rising. *Journal of Cleaner Production*, 423, 138778. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.138778>

Lopez, G., Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Mensah, T. N. O., Ghorbani, N., Caldera, U., Prada Rivero, A., Kissel, J., & Breyer, C. (2021). Pathway to a fully sustainable energy system for Bolivia across power, heat, and transport sectors by 2050. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126195. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126195>

Mahmoud, N. H., El-Haroun, A. A., Wahba, E., & Nasef, M. H. (2012). An experimental study on improvement of Savonius rotor performance. *Alexandria Engineering Journal*, 51(1), 19–25. <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2012.07.003>

Milborrow, D. (2020). Wind Energy Development. 3–22. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26446-8_2

Población y Hechos Vitales - INE. (n.d.). Retrieved September 9, 2024, from <https://www.ine.gob.bo/index.php/censos-y-proyecciones-de-poblacion-sociales/>

Roth, G., & Otero-Piñeiro, D. (2003). Meteorología. Formaciones nubosas y otros fenómenos meteorológicos. Situaciones meteorológicas generales. Pronósticos del tiempo. Ediciones Omega.

Vista general de la energía: Noticias de desarrollo, investigación, datos. Banco Mundial. (n.d.). Retrieved September 9, 2024, from <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/overview>

Wagner, H. J., & Mathur, J. (2018). Physics of Wind Energy. Green Energy and Technology, 0(9783319688039), 17–29. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68804-6_3

Wagner, H.-J., & Mathur, J. (2018). Wind Energy Today (Date accessed 08.12.2019). Introduction to Wind Energy Systems: Basics, Technology and Operation, 1–6. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68804-6_1

Wilberforce, T., Olabi, A. G., Sayed, E. T., Alalmi, A. H., & Abdelkareem, M. A. (2023). Wind turbine concepts for domestic wind power generation at low wind quality sites. Journal of Cleaner Production, 394, 136137. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.136137>

Zhang, L. (2021). Electricity generation by wind energy. Wind, Water and Fire: The Other Renewable Energy Resources, 7–61. https://doi.org/10.1142/9789811225925_0002