

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v4i3.1125>

Diseño de una turbina eólica espiral de Arquímedes mediante software cad - cae

Design of an archimedean spiral wind turbine using cad - cae software

Jefferson Porras

Jefferson.porras0449@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0005-9333-0934>
Universidad Técnica de Cotopaxi
Latacunga – Ecuador

Luis Navarrete

luis.navarrete7284@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-7784-9374>
Universidad Técnica de Cotopaxi
Latacunga – Ecuador

Jorge Ramírez

Jorge.ramirez9918@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0002-5665-8058>
Universidad Técnica de Cotopaxi
Latacunga – Ecuador

Sebastián Paredes

smpg@icloud.com
<https://orcid.org/0009-0000-0397-5629>
Ambato – Ecuador

Artículo recibido: 31 de agosto de 2023. Aceptado para publicación: 16 de septiembre de 2023.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen

Para modelar y simular una turbina eólica con éxito, hay que seguir un proceso de diseño detallado esto incluye determinar el tamaño y la forma de las palas del rotor, calcular el par requerido por el generador, seleccionar los materiales adecuados para la construcción el funcionamiento de un aerogenerador de espiral de Arquímedes que ha sido expuesto a fenómenos meteorológicos existentes en el casco urbano. en el cantón Latacunga provincia de Cotopaxi. Utilizando la estación meteorológica se logró determinar la velocidad media del viento en la zona, que es de 3,89 m/s, y la velocidad máxima medida, que es de 9,6 metros por segundo. Se planteó en una primera hipótesis de generar 1 kW de potencia eléctrica con los recursos en el sitio, sin embargo, debido a que la velocidad del viento en el lugar de recolección de datos fue insuficiente para alcanzar dicha potencia. Otra opción era aumentar el diámetro del rotor, pero esto no resultó práctico porque el proyecto estaba enfocado al área urbana. En cambio, se especificaron parámetros de diseño mediante cálculos de generación de energía que permitan aprovechar al máximo la energía cinética. Con la ayuda de estas mediciones, se puede generar una potencia de 33,25 W y 485,73 W, respectivamente, a las velocidades media y máxima medidas, respectivamente. Se requiere una velocidad del viento de al menos 15 m/s para generar la potencia máxima de 1 kW bajo las mismas restricciones de diseño.

Palabras clave: modelación, simulación, turbina espiral

Abstract

To successfully model and simulate a wind turbine, a detailed design process must be followed, which includes determining the size and shape of the rotor blades, calculating the torque required by the generator, selecting the appropriate materials for the construction and operation of an Archimedes spiral wind turbine that has been exposed to existing meteorological phenomena in the urban area of Latacunga, Cotopaxi province. Using the meteorological station, it was possible to determine the average wind speed in the area, which is 3.89 m/s, and the maximum measured speed, which is 9.6 meters per second. A first hypothesis was to generate 1 kW of electric power with the resources on site, however, because the wind speed at the data collection site was insufficient to achieve such power. Another option was to increase the rotor diameter, but this was not practical because the project was focused on the urban area. Instead, design parameters were specified using power generation calculations that would allow maximum use of the kinetic energy. With the help of these measurements, a power output of 33.25 W and 485.73 W, respectively, can be generated at the measured average and maximum speeds, respectively. A wind speed of at least 15 m/s is required to generate the maximum power of 1 kW under the same design constraints.

Keywords: modeling, simulation, spiral turbine

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons . 

Como citar: Porras, J., Navarrete, L., Ramírez, J., & Paredes, S. (2023). Diseño de una turbina eólica espiral de Arquímedes mediante software cad – cae. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 4(3), 954–977. <https://doi.org/10.56712/latam.v4i3.1125>

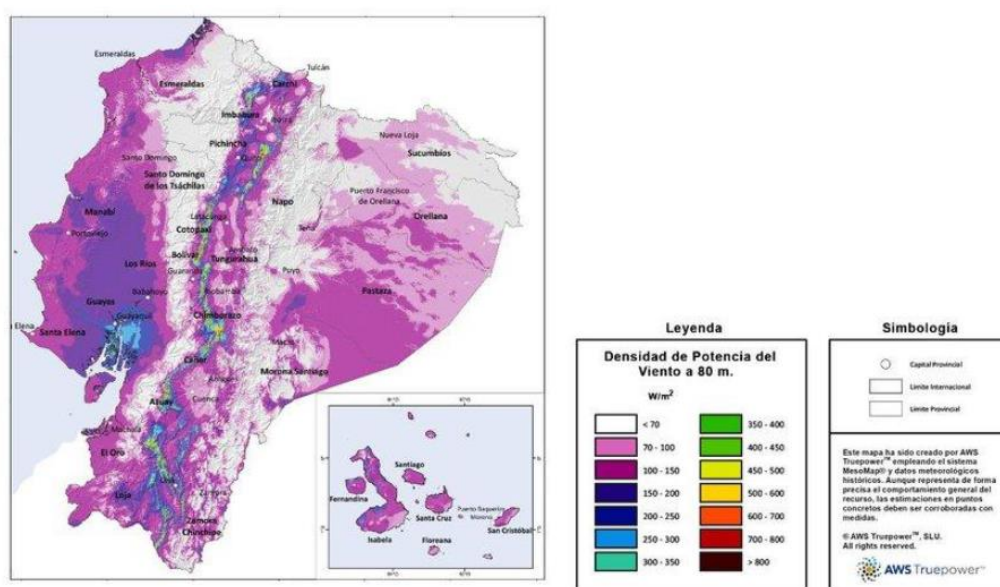
INTRODUCCIÓN

Actualmente Ecuador cuenta con parques eólicos que se han ubicado estratégicamente en zonas donde el fluido es apto para que se aproveche al máximo el rendimiento de máquinas eléctricas, es el caso parques eólicos como Villonaco y Minas de Huascachaca ambas ubicadas en Loja cuyas partes cuentan con palas de 35 metros aproximadamente, dimensiones que resultan demasiado grandes para ser utilizadas en zonas urbanas (Renewable Energy Agency International, 2018). Al ser prácticamente imposible implementar una turbina de esa dimensión, se busca una alternativa adecuada para la zona urbana, que se adapte al tipo de fluido que existe en esta zona estableciendo dimensiones que puedan ser instaladas con facilidad y se pueda aprovechar al máximo el rendimiento de la máquina (Rubio et al., 2014). Entre todos los recursos renovables, se ha demostrado que la energía eólica es una tecnología relativamente madura y tiene un enorme potencial de comercialización y producción en masa. En el presente proyecto de investigación se plantea aportar a futuros proyectos de generación distribuida con pequeñas turbinas eólicas en el país (Freire et al., 2021). En la zona urbana del cantón Latacunga no existe datos de generación de energía mecánica de la turbina espiral de Arquímedes, es por tal motivo que se plantea este proyecto de investigación con el fin de obtener datos de generación de energía mecánica de dicha turbina con el comportamiento y velocidad del viento que existe en el lugar.

El presente proyecto de investigación realiza un aporte científico y experimental a los proyectos sucesores que se lleven a cabo a partir de este, ya sea en la implementación o mejoras que puedan existir en el futuro, al igual beneficia al ambiente al ser la energía eólica su fuente principal de energía para el funcionamiento.

Figura 1

Atlas eólico del Ecuador



En la figura 1, se observa el atlas eólico del Ecuador donde se comprueba que en efecto la zona que tiene más potencial eólico está en la región sierra y en las zonas cercanas al mar. La provincia de Cotopaxi según el atlas eólico en la web contribuye un papel fundamental para la estimación de potencial energético de acuerdo con el mapeo satelital, en la provincia de

Cotopaxi, presenta condiciones propicias para implementar sistemas eólicos por las características favorables de velocidad del viento (Cepeda Paredes & Cepeda Travéz, 2015).

Se toma como referencia la terraza del bloque B de la Universidad Técnica de Cotopaxi que tiene una altura estimada de 20 metros y está ubicada en las coordenadas (Latitud -0.91789° , Longitud -78.632856°), las mediciones de la velocidad del viento en dicho lugar se tomaron mediante la estación meteorológica modelo Watchdog 900ET. Los datos evidencian que la velocidad del viento en periodos cortos de tiempo puede llegar e incluso sobrepasar los 9 m/s. Para lograr una curva óptima se debe trabajar con datos obtenidos de al menos 5 años, pero si se cuenta con información que permita establecer correlaciones se puede prescindir de la toma de datos extensa que demora mucho tiempo para su elaboración (González-Longatt, 2008).

Este aerogenerador está basado en el diseño del matemático del griego Arquímedes. Algunas de las características principales de este diseño son alta eficiencia, baja velocidad de arranque para un alto rendimiento, funcionamiento silencioso, insensibilidad a las turbulencias, bajo mantenimiento y apariencia orgánica. Hace algunos años se lanzó el Arquímedes, que una compañía holandesa especializada en el desarrollo de energías renovables mostró al mercado en Europa. LIAM F1 UWT es una nueva generación de turbinas eólicas para uso doméstico más eficiente (JIMÉNEZ-RAMÍREZ et al., 2016.).

La turbina espiral de Arquímedes se ha diseñado para implementarse en los techos de los edificios, casas, entre otros, con un diámetro de rotor de 1,5 metros y un peso menor a los 100 kilos. Genera una media de 1500 kWh de energía al año con una velocidad de viento de 5 m/s (JIMÉNEZ-RAMÍREZ et al., 2016).

La instalación de un Aerogenerador en ubicaciones altas se tiene que hacer respetando una serie de normas. Como el diseño del prototipo se realiza en base a datos tomados en la terraza del bloque B de la Universidad Técnica de Cotopaxi, algunas leyes son las propias de la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-IEC 61400-25-2 (Marín Téllez, 2020). El órgano responsable de esta norma técnica ecuatoriana es el Comité interno del INEN.

El diseño de aerogeneradores de baja potencia debe seguir la primera norma UNE-EN61400-2006 que se usa tanto para la parte eléctrica como la mecánica, sistemas de seguridad, mantenimiento y condiciones a las que debe someterse cualquier aerogenerador como se menciona en (MARIN TELLEZ et al., 2020).

Los datos de potencia que se obtuvieron fueron de 500 watts a velocidades de 2,3 m/s, se debe tener presente que son aerogeneradores con dimensiones de 1,3 m de largo y 1m de diámetro. A medida que se incrementa el área de captación de la turbina se podrá generar con menor velocidad de viento, esto hace posible que se pueda generar desde 2 m/s (Chavesta Rivera, 2021).

La formación y evolución del vórtice de la punta con respecto a la posición de las palas se revela mediante una serie de los campos instantáneos de velocidad obtenidos en diferentes ángulos de fase del aerogenerador para el rango de ángulo de fase de 0° a 120° . La distancia espacial entre los vórtices de punta generados por cada álabe es bastante uniforme en casos de pequeños ángulos de ataque (Gallo et al., 2022).

METODOLOGÍA

Se utiliza los datos recogidos por la estación meteorológica WatchDog Weather Station, esta estación se encuentra ubicada en la terraza del bloque B de la Universidad Técnica de Cotopaxi y comparará con los datos medidos por un anemómetro digital en el mismo lugar, esto da como resultado que en ambos casos los datos son similares, para esta investigación se trabajó con

datos de la estación meteorológicas, puesto que, tiene una gran variedad de materiales en sus librerías, cada uno con sus características y propiedades.

El software CAE que se utilizó para el análisis y simulación de la turbina es ANSYS, permite someter la pieza realizada con anterioridad a fenómenos y esfuerzos físicos que en este caso son el viento con el cual se realizará el análisis dinámico y la gravedad para el análisis estático, posteriormente se obtendrá los resultados buscados con dichos análisis. Dentro del ANSYS se tiene la herramienta Autodyn la cual se utilizará para obtener la respuesta que tienen los materiales al estar sometidos a las diferentes fuerzas, la herramienta Mechanical es un análisis de elementos finitos que permite realizar el análisis estructural, incluyendo lineal, no lineal y estudios dinámicos.

Método inductivo

Se usó el método inductivo ya que en este caso se partió de una hipótesis que se pretende comprobar, en el caso de la presente hipótesis se buscó demostrar que la turbina eólica espiral de Arquímedes puede generar hasta 1 kW de potencia mecánica. Se escogió este método de acuerdo con (Pita Fernández & Pértegas Díaz, 2002) que en su publicación menciona que el método inductivo permite llegar a una conclusión general o una teoría a partir de la hipótesis planteada o antecedentes sobre el tema de estudio, también se puede decir que representa el proceso de la mente para alcanzar el conocimiento.

Método cuantitativo

Se utilizará este método debido a que se desarrollan cálculos en función a los objetivos de la investigación y se utilizan métodos estadísticos para el procesamiento de datos. Según (Sánchez Flores, 2019) define el método cuantitativo como aquel que "utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico".

Método científico

Mediante este tipo de método se busca resolver el problema planteado en el proyecto, se utilizará conceptos científicos ya existentes sobre el objeto de estudio, con el uso de herramientas tecnológicas y softwares de CAD, así como la ayuda de ANSYS que pretende modelar una turbina eólica espiral de Arquímedes que sea eficiente y permita conocer el comportamiento reactivo bajo las condiciones ambientales que existe en la zona urbana del cantón Latacunga (Igartua & Humanes, 2004).

Método experimental

Según (Merolla et al., 2007) menciona que empleando este método dentro de la investigación se puede utilizar más de una variable de estudio para controlar su aumento o disminución, esto permite observar las conductas que genera esta manipulación de las variables, en el caso de la presente investigación la variable manipulada será la velocidad media del viento para la obtención distintos resultados.

Tabla 1

Declaración de variables

La operacionalización de variables se observa:	
Variable Independiente:	Velocidad del viento, altura
Variable dependiente:	Potencia generada

Orientación del eje de la turbina

Se utilizará el método documental para analizar y determinar la orientación del eje que tenga mejores características, que se adapte y sea más eficiente para las condiciones meteorológicas que existe en la zona donde se pretende realizar el proyecto, se tomarán en cuenta las ventajas y desventajas que tiene cada una.

Selección de la turbina de eje horizontal

Se evaluará un grupo de turbinas conocidas y utilizadas en el ámbito de aerogeneradores eólicos. Se tomarán algunas características generales que poseen las turbinas de eje horizontal y mediante una pequeña evaluación se obtiene la valoración que indica cual es la turbina que tiene mejores resultados para su funcionamiento, en la tabla 2 y tabla 3, se muestra la valoración de las turbinas según algunas características.

Tabla 2

Valoración de las turbinas según sus características

Características de las turbinas de eje horizontal	Bipala	Tripala	Tornillo de Arquímedes	Molinos de viento
Es más estable al estar en operación	4	5	5	4
Necesita menor par de arranque para empezar a funcionar	3	4	5	3
Cubre mayor superficie de barrido	3	3	5	5
Mayor eficiencia	3	3	5	3
Utiliza Menor cantidad de material para su fabricación	5	4	4	3
Menos afectación ante las turbulencias	4	4	5	4
Es más silenciosa al estar en funcionamiento	4	4	4	3
Posee mejor sistema de direccionamiento hacia el viento	3	3	5	3
el mantenimiento es mucho más fácil	5	5	5	4
Total	34	35	43	32

Tabla 3

Rubrica de evaluación

Escala	Descripción
1	Cumple 0 % con la funcionalidad de la característica planteada
2	Cumple 25% con la funcionalidad de la característica planteada
3	Cumple 50 % con la funcionalidad de la característica planteada
4	Cumple 75 % con la funcionalidad de la característica planteada
5	Cumple 100 % con la funcionalidad de la característica planteada

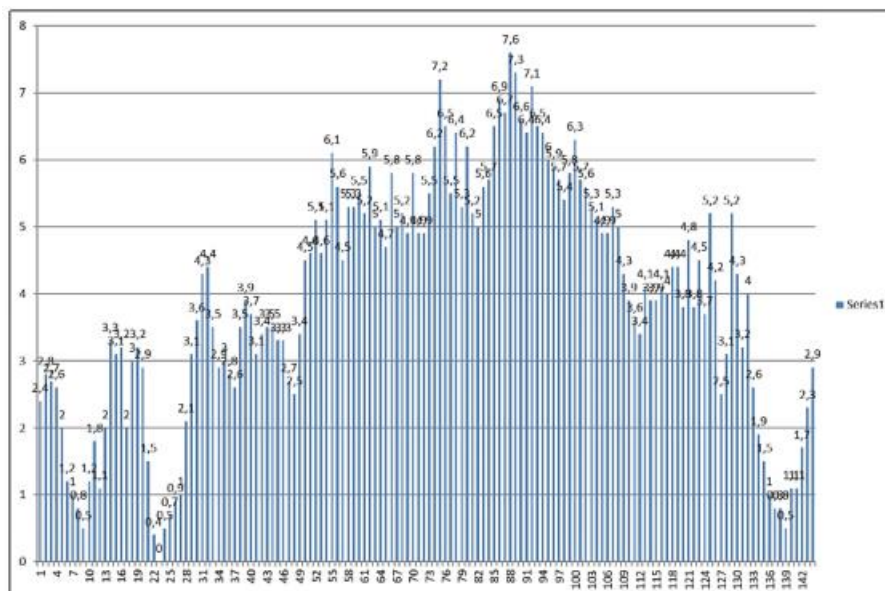
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Procesamiento de datos del recurso eólico

En la figura 2 se indica la variación de la velocidad del viento tomada en distintos momentos de un día aleatorio. Es decir, en el lapso de 24 horas se toman 142 muestras las cuales están graficadas en función de la velocidad que se mide en cada una de las muestras.

Gráfico 1

Anemograma de la velocidad del viento



Al realizar el procesamiento estadístico de los datos de velocidad del viento se obtienen los valores que se indican en la Tabla 4. para posteriormente con dichos resultados calcular las constantes a, b, c y k como se observa en la Tabla 5

Tabla 4

Resultados del proceso estadístico de datos

Ni	xi	LN(xi)	F(xi)	yi	LN(xi)^2	(yi)^2	LN(xi) * yi
	Σ.	368.050	142.5	-164.20	513.82	558.146	-87.18

Tabla 5

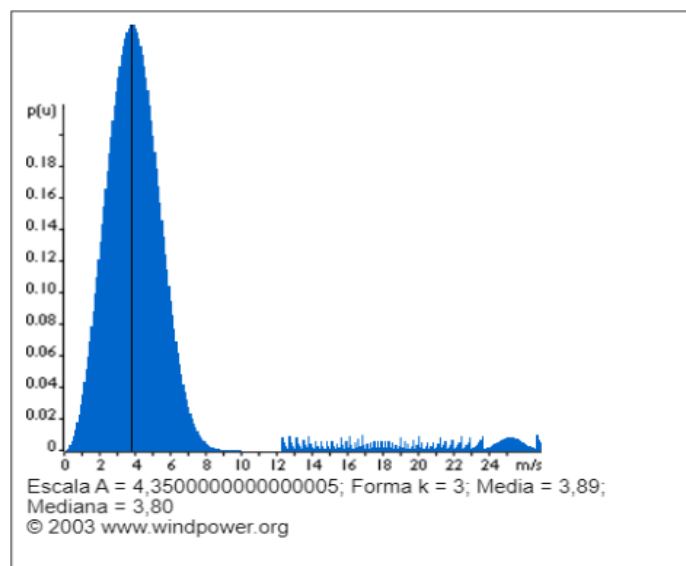
Valores de las constantes de Weibull

Constante	Resultado
b	3.2414274
a	-4.7621574
c	4.3455590
k	3.2414274

El resultado que proporciona el programa trazador de la distribución de Weibull que se encuentra disponible en el sitio web de la Asociación Danesa de la Industria Eólica (Rico, 2013) indica la velocidad media que existe en el lugar donde se recolectaron los datos.

Gráfico 2

Velocidad media del viento



En el gráfico 2, se observa que el proceso estadístico da como resultado una velocidad media de 3,89 m/s. Se utilizó la ley exponencial de Hellmann para calcular la velocidad del viento y la potencia que puede generar la turbina ubicada a 2 metros sobre el nivel del suelo.

Tabla 6

Velocidad a 2 metros sobre el suelo

DATOS		Resultados	
Vo	3.89	v	1.548
h	2		
ho	20		
∞	0.4		

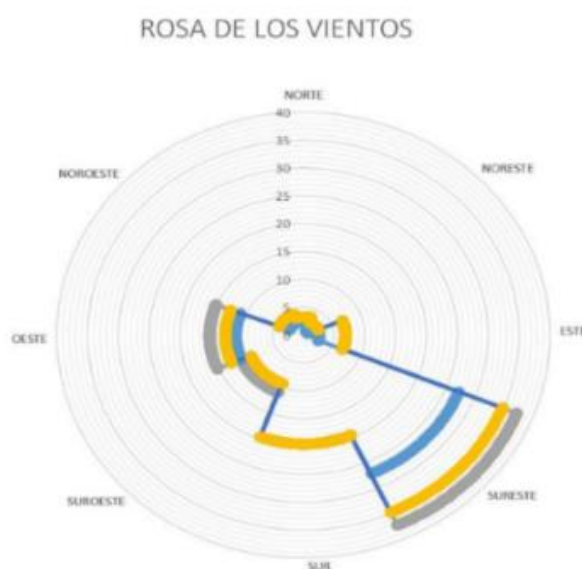
La rosa de los vientos en el proyecto es una parte fundamental para la distribución de la velocidad y dirección del mismo en esta parte de la investigación se tomará un enfoque exclusivamente en la comparación de las direcciones que se han obtenido mediante la estación meteorológica, con los datos adquiridos se logró obtener un límite superior e inferior el cual nos indica el tiempo aproximado de la dirección, velocidad y el porcentaje de adquisición de viento para la generación de energía mecánica, se logró obtener datos del cálculo de la rosa de los vientos para lograr comparar los diferentes datos en el cual se hizo una referencia inicial en su altura de 20 metros. Se puede definir que los valores entre 4 y 6 donde se encontrará aproximadamente un porcentaje de datos del 27 % de puntos de referencia, demostrando que a pesar de tener una variedad de datos su velocidad es muy baja, en la cual nuestra turbina espiral de Arquímedes funcionará a una equivalencia del 19.49% de su capacidad por día aproximadamente, lo que no es bueno en la generación de potencia mecánica. Los valores obtenidos entre las velocidades entre 3 y 4, donde se encontrará aproximadamente un porcentaje de datos del 40 % de puntos de referencia datos los cuales se puede obtener una velocidad promedio de 3,89 Esta es la media de la velocidad en la cual la turbina espiral de Arquímedes funcionará a un porcentaje del 37.29% de su capacidad diaria.

Finalmente se tiene las velocidades entre 6 y 8, donde se encontrará aproximadamente un porcentaje de datos del 20 % de puntos de referencia datos los cuales se puede obtener una velocidad más viable para la generación de energía eólica el mismo que tendrá un porcentaje de 11.02% con respecto a su capacidad y funcionamiento diario.

Por tanto, la dirección del viento está hacia el SURESTE ya que según datos obtenidos la mayor fuerza está pasando en esa dirección lo que faculta la ubicación para una posible instalación posterior.

Figura 2

Dirección de los vientos



Diseño conceptual del prototipo

Para el modelamiento de la turbina se tomó en cuenta los parámetros ya mencionados en el apartado de metodología, a partir de la ecuación 2 obtenemos el diámetro de rotor

$$P = Cp \frac{\rho}{2} + \frac{\pi D^2}{4} V^3 \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

P : Potencia

Cp : Coeficiente de potencia

ρ : Densidad del aire ($\frac{kg}{m^3}$)

D : Diametro de rotor

V : Velocidad del viento ($\frac{m}{s}$)

Tabla 7

Diámetro del rotor para generar 1 kW

Datos		Resultados	
P(W)	1000	Diámetro para generar	8.5
Cp	0.49		
φ(kg/m^3)	1.225		
V(m/s)	3.89		

Como se observa en la tabla 7, el diámetro necesario para generar potencia eléctrica de 1 kW es de 8,5 m, esto nos indica que es un diámetro demasiado grande para que pueda ser implementado en zonas urbanas, por tal motivo bajo criterios de diseño y basados en investigaciones previas se planteó el diámetro de 1,5 m.

Potencia de la turbina

Al aplicar la ecuación 1 con los datos atmosféricos de la zona y los parámetros de diseño se obtiene la potencia teórica generada a diferentes velocidades de viento incluida la velocidad media calculada, la velocidad máxima medida y la velocidad calculada a 2 metros sobre el suelo.

Tabla 8

Potencia generada

Potencia teórica de la turbina	Velocidad del viento (m/s)	0	1.5	3.89	9.6	12.4
	Potencia (W)	0	1.79	31.22	469.23	1011

Dimensionamiento de los elementos de la turbina

El cálculo de la torsión se realizó con la ecuación 2, y se obtuvo el siguiente resultado:

$$T = \frac{P}{\omega} \quad \text{Ec. 2}$$

$$T = 64.81 \text{ Nm}$$

Donde

P =Potencia (Watt)

ω = velocidad angular (rad/s)

Para el cálculo de la fuerza centrífuga se utilizó la ecuación 3, dando como resultado el siguiente valor:

$$F_c = \frac{mv^2}{2r} \quad \text{Ec. 3}$$

$$F_c = 1828.5 \text{ N}$$

Donde

m : Masa del cuerpo (kg)

v : Velocidad del cuerpo (m/s)

r : Radio (m)

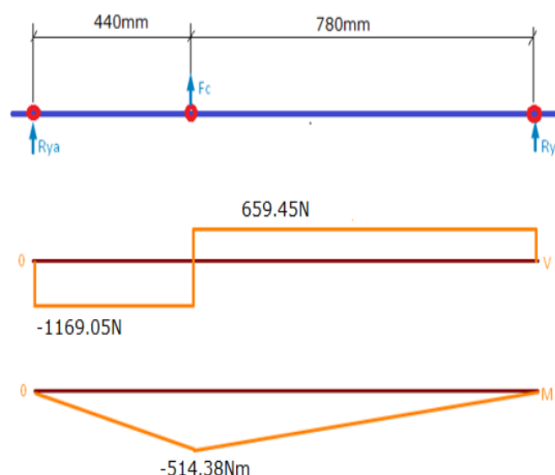
El resultado del cálculo de momentos y reacciones ejercidas en el eje de la turbina son los siguientes:

$$R_{ya} + F_c + R_{yb} = 0 \quad \text{Ec. 4}$$

$$R_{ya} = -1169.05 \text{ N}$$

Figura 3

Diagrama de momentos y fuerzas que actúan sobre el eje XY



El cálculo del límite de resistencia a la fatiga se realizó con la ecuación 5, dando como resultado:

$$S'_e = 0.5 S_{ut} \quad \text{Ec. 5}$$

$$S'_e = 327.5 \text{ MPa}$$

Donde

S_{ut} : Resistencia a la tensión mínima (MPa).

El factor de confiabilidad se calculó mediante la ecuación 6, tomando en cuenta todas las consideraciones de diseño que se especifican en el apartado de metodología, obteniendo el siguiente resultado:

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * S'_e \quad \text{Ec. 6}$$

$$S_e = 317.68 \text{ MPa}$$

k_a : Factor de modificación de la condición superficial.

k_b : Factor de modificación del tamaño.

k_c : Factor de modificación de la carga.

k_d : Factor de modificación de la temperatura.

k_e : Factor de confiabilidad.

S'_e : Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria.

Utilizando la ecuación 7 se obtiene el resultado del factor de superficie Ka:

$$k_a = a(S_{ut})^b \quad \text{Ec. 7}$$

$$k_a = 0.97$$

Donde:

a : Factor de acabado superficial.

b ; Exponente de acabado superficial.

Para el cálculo de flexión y torsión necesarios para determinar el diámetro del eje se utilizó las ecuaciones 8 y 9 dando como resultado:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad \text{Ec. 8}$$

$$K_{fs} = 1 + q(K_t - 1) \quad \text{Ec. 9}$$

$$K_f = 2.24$$

$$K_{fs} = 1.84$$

El diámetro del eje de la turbina se calculó mediante la ecuación 9.

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{16n}{\pi} \left(\frac{1}{S_e}\right) \sqrt{4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2}} \quad \text{Ec. 10}$$

$$d_1 = 33.35 \text{ mm}$$

Donde

S_e : Límite de resistencia a la fatiga.

K_f : Factor de concentración de esfuerzo en flexión.

M_a : Momento resultante (N m)

K_{fs} : Factor de concentración de esfuerzo en torsión.

T_a : Torque de la turbina (N).

Resultado del diámetro del eje 1 de la torre

Utilizando la ecuación 3, se obtiene como resultado de la fuerza centrífuga:

$$F_c = 23247.35 \text{ N}$$

Para el cálculo de momentos y reacciones se utiliza las ecuaciones 10 y 11 obteniendo:

$$(R_{zb} d_{x1}) + (F_c d_{x2}) = 0 \quad \text{Ec. 11}$$

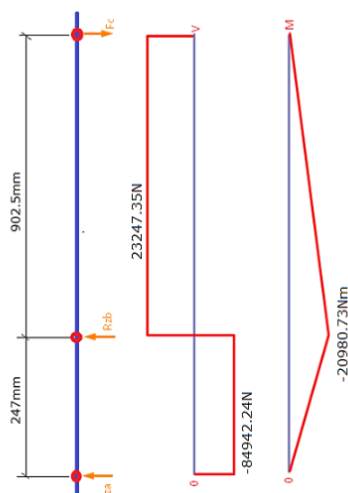
$$R_{za} + R_{zb} - F_c = 0 \quad \text{Ec. 12}$$

$$R_{zb} = 108189.59 \text{ N}$$

$$R_{za} = -84942.24 \text{ N}$$

Figura 4

Resultado de momentos y fuerzas que actúan sobre el eje YZ



El límite de resistencia se calculó con la ecuación 5 obteniendo como resultado:

$$S'_e = 327.5 \text{ MPa}$$

Utilizando la ecuación 6, se calculó el límite de resistencia a la fatiga cuyo valor se muestra continuación.

$$S_e = 317.68 \text{ MPa}$$

El factor de superficie K_a se calculó utilizando la ecuación 7

$$K_a = 0.97$$

Para el cálculo de flexión y torsión necesarios para determinar el diámetro del eje se utilizó las ecuaciones 8 y 9 dando como resultado:

$$K_f = 2.24$$

$$K_{fs} = 1.84$$

El diámetro del eje 1 de la torre se calculó con la ecuación 10, y el resultado se presenta a continuación:

$$d_1 = 53.21 \text{ mm}$$

Resultado del diámetro del eje 2 de la torre

El cálculo de las cargas axiales que ejercen sobre el eje se realizó con la ecuación 13, y se utilizó para calcular el diámetro del eje. El cálculo de las fuerzas que actúan en el eje Y se calculó con la ecuación 14, y el resultado negativo indica que está actuando en compresión.

$$\delta = \frac{FL}{AE} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde

δ : Deformación (mm).

F : Fuerza (N).

L : Largo (mm).

A : Área (mm)

E : Módulo de elasticidad del material (GPa).

$$\sum F_y = -F = 0 \quad \text{Ec. 14}$$

$$F_y = -2298.49 \text{ N}$$

El diámetro se calculó mediante la ecuación 15, y se obtiene como resultado:

$$r = \sqrt{\frac{F L}{\delta E \pi}} \quad \text{Ec.15}$$

$$\phi = 93.76 \text{ mm}$$

Resultados del factor de seguridad del tubo de la torre

Para calcular el factor de seguridad se utilizó la ecuación 16, tomado en cuenta el área la cual va a soportar la carga, para calcular el área de un círculo πr^2 .

$$\frac{P}{A} = \frac{\sigma_y}{FS} \quad \text{Ec. 16}$$

$$A_1 = 8107.32 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 68880.84 \text{ mm}^2$$

$$A_t = 1226.48 \text{ mm}^2$$

Resultados del factor de seguridad de la estructura

Mediante cálculos matemáticos, se determinó que el área en la parte más crítica en la estructura es de $175,46 \text{ mm}^2$. Mediante la ecuación 17, se calcula el factor de seguridad obteniendo el siguiente resultado:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{FS} \quad \text{Ec. 17}$$

$$FS = 2.85$$

Resultados y selección de rodamientos para el eje de la turbina

Se calculó la carga estática equivalente que va a soportar el eje con la ecuación 18, se obtiene como resultado y se selecciona del catálogo de FAG.

$$P_o = X * F_r + Y * F_a \quad \text{Ec. 18}$$

$$P_o = 2.19 \text{ kN}$$

La vida nominal se calculó con las ecuaciones 19 y 20, obteniendo como resultado:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad \text{Ec.19}$$

$$L_{10} = 389.96$$

$$L_{10h} = \left(\frac{10^6}{60n}\right) L_{10} \quad \text{Ec. 20}$$

$$L_{10h} = 44111.12 \text{ horas}$$

Donde:

L_{10} : Vida nominal básica

C: Capacidad de carga dinámica básica (kN).

P: Carga dinámica equivalente del rodamiento (kN).

p: Exponente de la ecuación de la vida útil, rodamientos con bola, $p=3$, de rodillos $p=10/3$.
Mediante el resultado obtenido, se observa que el rodamiento 6007 tendrá una vida útil de 44111,12 horas de trabajo continuo.

Resultados y selección de chumacera para la base de la turbina

Para el cálculo de las chumaceras según la carga que va a soportar se utiliza la ecuación 18, la chumacera se eligió del catálogo de FAG [100].

$$P_o = 13.94 \text{ kN}$$

La vida nominal se calculó con las ecuaciones 19 y 20, obteniendo como resultado:

$$L_{10} = 21.23$$

$$L_{10h} = 2401.48 \text{ horas}$$

Mediante el resultado obtenido, se observa que el rodamiento 16211 tendrá una vida útil de 2401,48 horas de trabajo continuo.

Resultados y selección de rodamiento axial

Se utilizó la ecuación 21 para calcular la carga mínima axial.

$$F_{amin} = M \left(\frac{n_{max}}{1000} \right)^2 \quad \text{Ec. 21}$$

$$F_{amin} = 1.56 \text{ kN}$$

Donde:

F_{amin} : Carga mínima axial, (KN)

M: Coeficiente de carga mínima

n_{max} : Número máximo de revoluciones en servicio (RPM).

Para el cálculo de la carga estática equivalente se utilizó la ecuación 22

$$P_o = 0.6 F_r Y F_a \quad \text{Ec. 22}$$

$$P_o = 126.26 \text{ kN}$$

Se selecciona el rodamiento axial del catálogo de FAG de acuerdo con las cargas que va a soportar las características se pueden observar en el catálogo FAG, posteriormente se calcula la vida nominal utilizando las ecuaciones 19 y 20 obteniendo los siguientes resultados:

$$L_{10} = 2.49$$

$$L_{10h} = 48166.66 \text{ horas}$$

Mediante el resultado obtenido, se observa que el rodamiento 51111 tendrá una vida útil de 48166.66 horas de trabajo continuo.

Resultados del cálculo de la placa base

Para calcular la fuerza centrífuga que actúa sobre la placa base se utilizó la ecuación 3

$$F_c = 46494.71 \text{ N}$$

$$P_a = 46801.06 \text{ N}$$

$$A_{1 \text{ requerida}} = 4033.7 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{tubo}} = 8107.32 \text{ mm}^2$$

$$A_t = 12141.02 \text{ mm}^2$$

Se calculó el diámetro de la placa utilizando la ecuación 23, y se obtiene el siguiente resultado.

$$e_{\min} = l \sqrt{\frac{2 P_u}{\phi F_y B N}} \quad \text{Ec. 23}$$

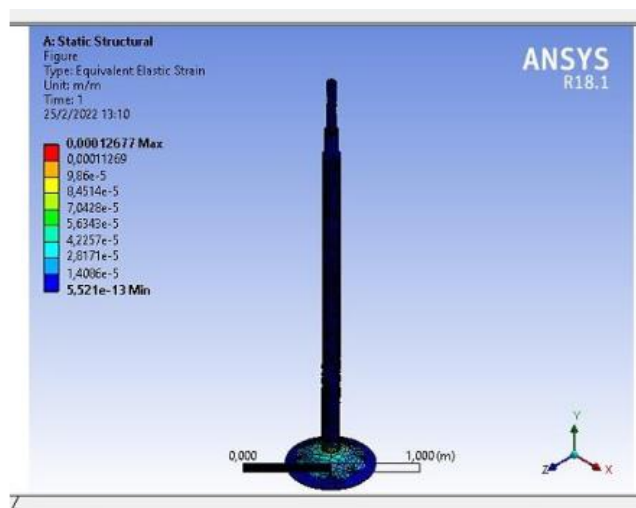
$$e_{\min} = 24 \text{ mm}$$

Análisis de la torre de la estructura

El análisis de la torre se realizó de forma separada utilizando la fuerza que genera el peso de la turbina y la estructura que sostiene a la misma.

Figura 5

Análisis estático de la torre



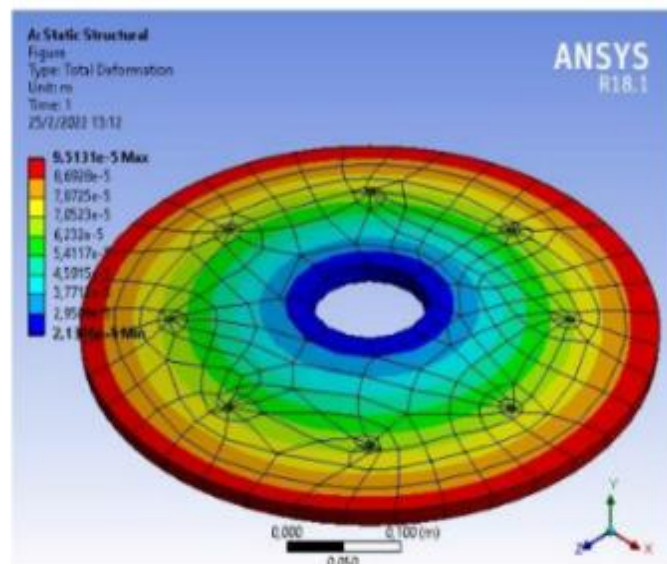
En la figura 5, se observa que su deformación es mínima lo que da a entender que la estructura no sufrirá deformaciones.

Análisis de la base de la estructura

Como se puede observar a continuación la deformación es mínima esto quiere decir que los materiales y las dimensiones de estas son confiables y en el futuro se puede construir.

Figura 6

Análisis de la base de la estructura



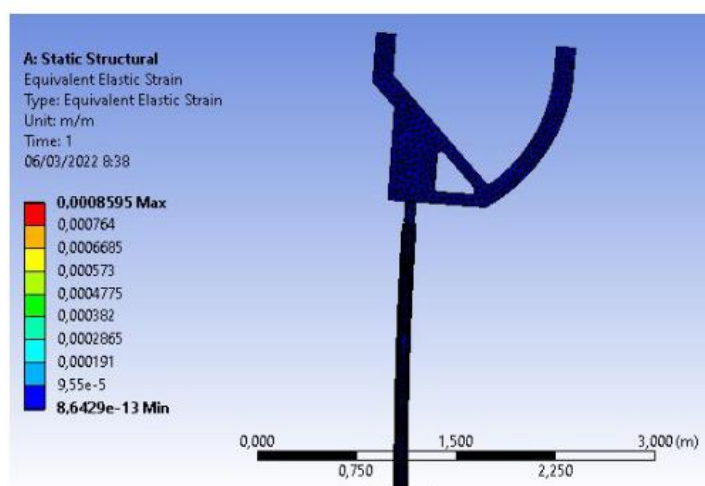
En la figura 6, se observa la deformación que tiene al estar sometida a la carga que genera todo el peso de la estructura.

Análisis de la estructura del prototipo

En la figura 9, se observa la deformación que existe en la estructura que sostiene a la turbina, esto demuestra que las dimensiones y la selección de materiales es correcta y existe un mínimo valor de deformación.

Figura 7

Análisis estático de la estructura

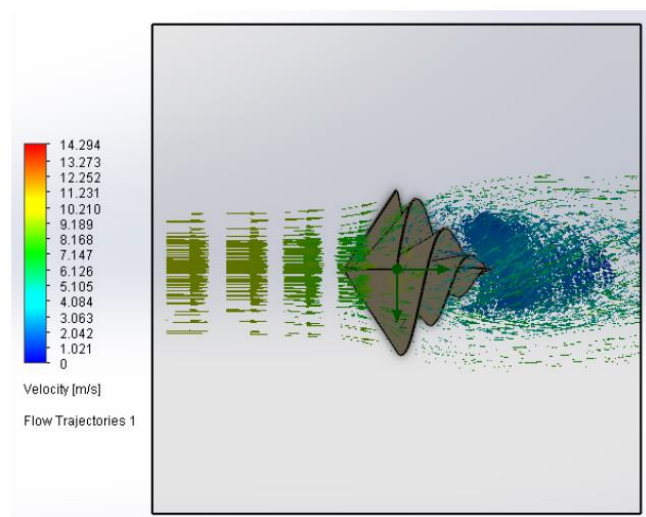


Simulaciones del prototipo

En la figura 7 se observa la trayectoria que tiene el viento al entrar en contacto con los álabes de la turbina en función de la velocidad.

Figura 8

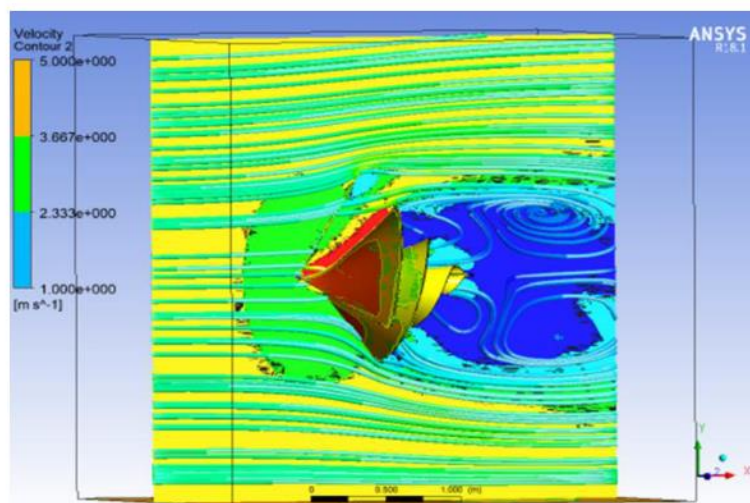
Trayectoria del fluido



Análisis con velocidad de 3.89m/s en el álabes de turbina espiral de Arquímedes

Figura 9

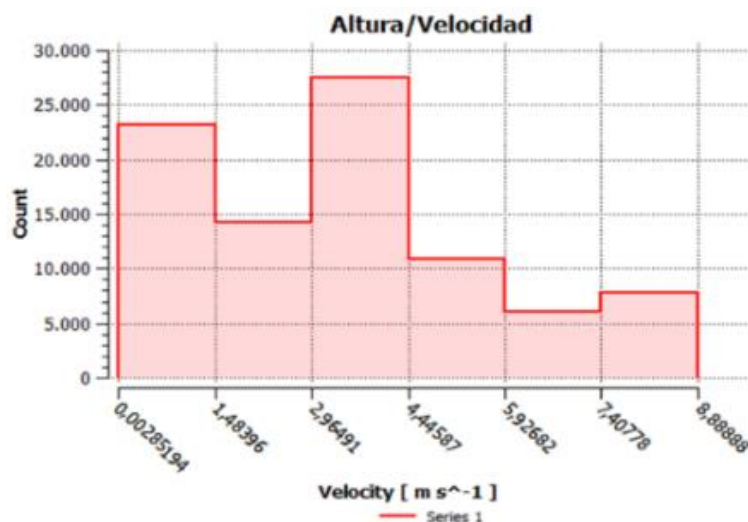
Análisis dinámico con velocidad de 3.89 m/s



En la prueba de relación con la altura y velocidad de la Universidad Técnica de Cotopaxi, se logra determinar que hay un movimiento constante en la Turbina espiral de Arquímedes determinado por un histograma se logra obtener que la velocidad con relación a la altura es de entre 25 a 30 metros de altura con una velocidad constante de 3.89 según la curva característica de Weibull.

Figura 10

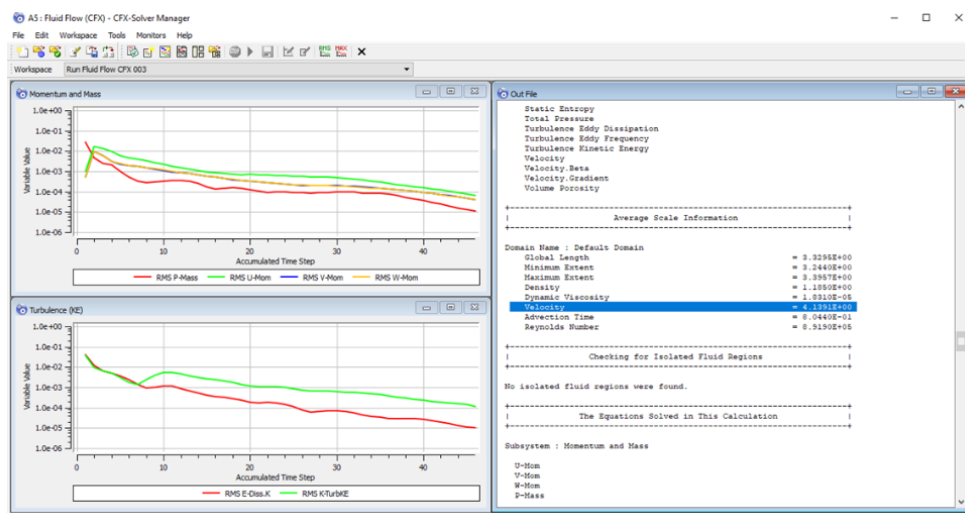
Histograma con velocidad del viento calculada



Logrando determinar por simulación las diferentes velocidades las ondas de generación y cálculos realizados por el Software de ANSYS.

Figura 11

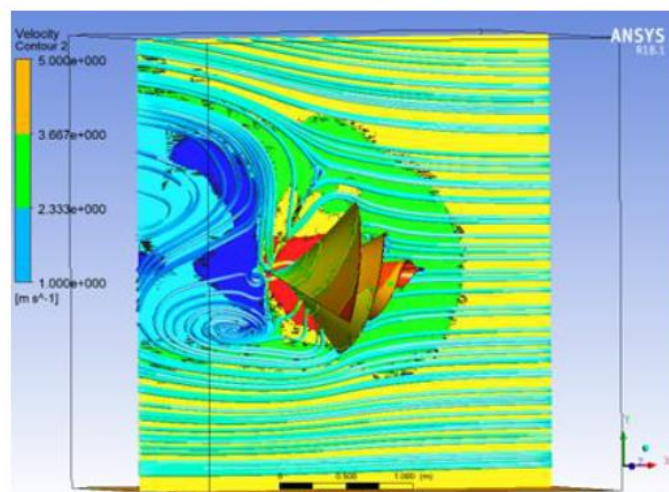
Ondas resultantes del cálculo CFX



Se determina por cálculo que la velocidad a una altura de 25 a 30 metros como la que tiene la universidad su velocidad de viento es de 4.1 m/s validando el histograma con relación altura velocidad.

Figura 12

Análisis CFX

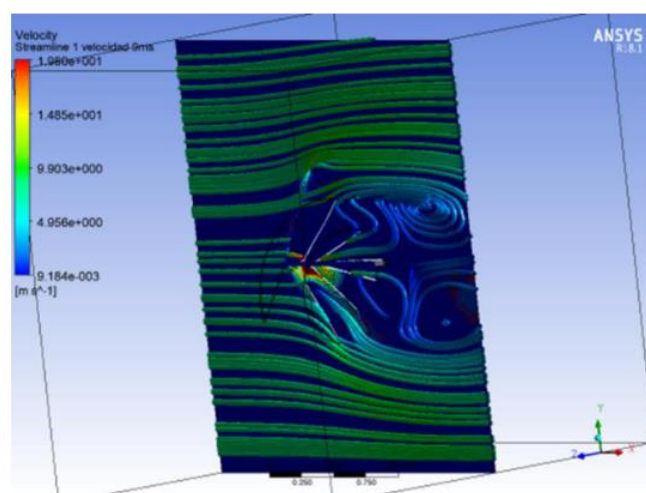


Al igual que en la comprobación de la simulación calcula que la velocidad que ingresa de manera eficiente y sin problemas al momento de trabajar el álabe es de 4.1 m/s el cual le permitirá trabajar mejor que en el rango de 3.89 según la curva Weibull.

Análisis de turbina espiral de Arquímedes en rango máximo

Figura 13

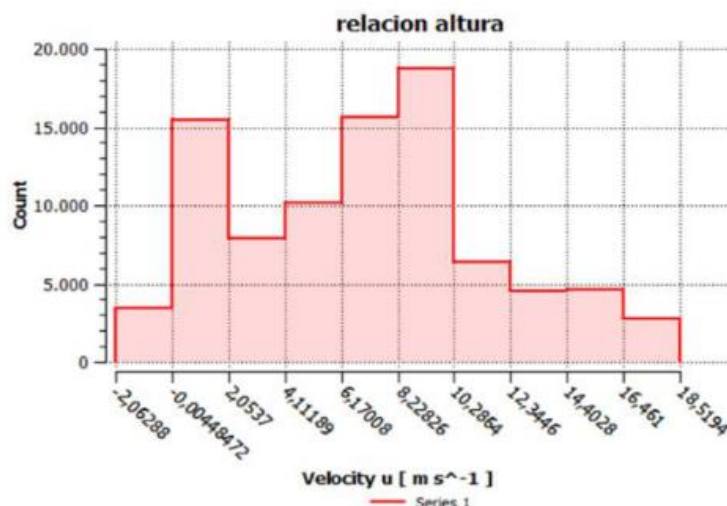
Análisis del álabe con velocidad máxima



La dirección del viento entrando por el Sur-Este medido por valores medios nos da una velocidad máxima de 9.6 m/s el cual se presentará en un histograma identificando la relación Altura a la cual se podrá determinar un valor promedio para lograr determinar cuál es el valor máximo según el software para que tenga un movimiento constante.

Figura 14

Histograma con máxima velocidad

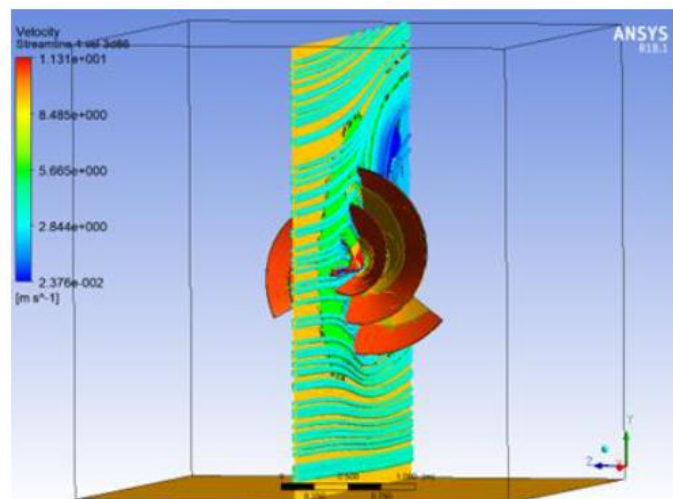


Se demuestra que con respecto a la altura el viento tiene una velocidad constante en un rango de 4.1 m/s hasta 10.2 m/s dentro de estos, no tendrá un funcionamiento óptimo y tendrá algunos problemas dejando de ser tan eficiente.

Análisis con velocidad máximo dentro de 4.1 a 10m/s en el álabe de la turbina espiral de Arquímedes

Figura 15

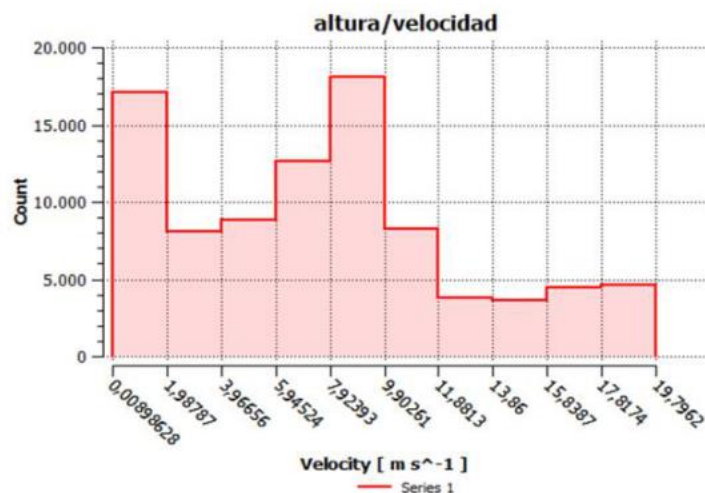
Análisis con velocidad máxima calculada



En la prueba de relación con la altura y velocidad de la Universidad Técnica de Cotopaxi se logra determinar que hay un movimiento máximo en el cual la turbina sufre ya algunos problemas en relación con la altura, determinado por un histograma se logra obtener que la velocidad de 9.6 m/s a una altura correspondiente de 20 m de altura.

Figura 16

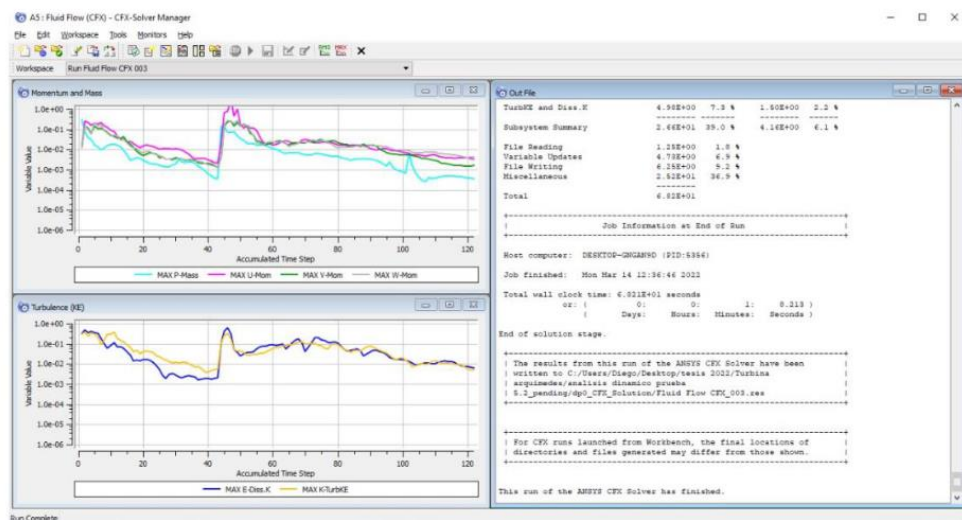
Histograma altura vs velocidad calculada



Logrando determinar por simulación a velocidad máxima se determina las ondas de generación y cálculos realizados por el Software de ANSYS.

Figura 17

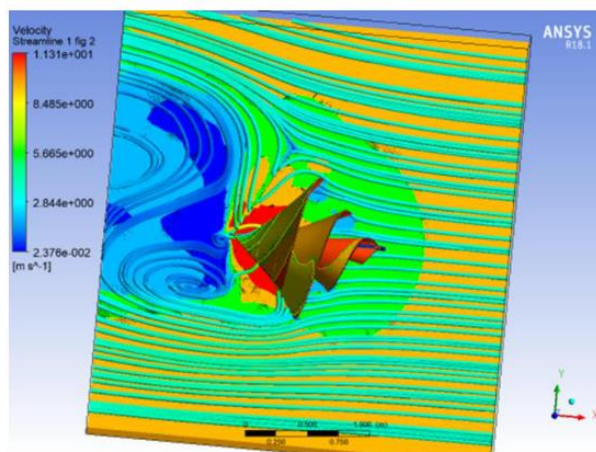
Generación de ondas por cálculos en CFX



Se determina por cálculo que la velocidad a una altura de 20 metros como la que tiene la universidad a una velocidad de viento máxima de 9.2 m/s validando el histograma con relación altura velocidad.

Figura 18

Análisis con la velocidad máxima



Al igual que en la comprobación de la simulación calcula que la velocidad que ingresa de manera un poco problemática al momento de trabajar el álabe es de 9.2 m/s el cual le permitirá trabajar, pero presenta más desgaste en el alabe y lo que producirá una menor duración en la vida del mismo.

Análisis de la potencia generada por la turbina

Tabla 8

Curva de potencia generada en base a velocidad del viento

Potencia teórica de la turbina	Velocidad del viento (m/s)	0	1.5	3.89	9.6	15
	Potencia (W)	0	1.91	33.25	485.73	1068

La tabla 8 muestra la curva de potencia que genera la turbina espiral de Arquímedes, este dato se obtiene mediante la simulación en el software ANSYS con la velocidad media de 3,89 m/s y la velocidad máxima medida por la estación meteorológica que es de 9,6 m/s, la velocidad medida a dos metros sobre el suelo y la velocidad calculada para generar 1000 W.

CONCLUSIONES

Con el uso de la estación meteorológica fue posible calcular la velocidad media de 3,89 m/s y la velocidad máxima medida de 9,6 m/s. también con los datos proporcionados se obtuvo la dirección del viento que en esta zona se presenta en mayor cantidad por el sur este.

Tras el análisis del potencial eólico, se deduce que no es viable generar 1kW debido a que en el lugar de recopilación de datos la velocidad del viento no es suficiente para alcanzar dicha potencia, otra opción fue aumentar el diámetro del rotor, pero esto no es factible debido a que el proyecto está enfocado para la zona urbana.

Mediante los cálculos de generación de potencia se especificó el tamaño y el ángulo que permite aprovechar al máximo la energía cinética del viento, el diámetro del rotor es de 1,5 m, el largo de 1,18 m y el ángulo de ataque es de 45°. Estas medidas permiten generar una potencia de 33,25 W funcionando con la velocidad media de 3,89 m/s y 476,35 W funcionando con velocidad máxima de 9,6 m/s.

REFERENCIAS

Cepeda Paredes, W. E., & Cepeda Travéz, W. H. (2015). Aprovechamiento de la energía eólica mediante el diseño, construcción e implementación de un generador eólico en una vivienda ubicada en el barrio La Florida, cantón Salcedo, provincia de Cotopaxi en el periodo 2013–2014. LATAACUNGA/UTC/2015.

Chavesta Rivera, P. A. F. (2021). Diseño paramétrico de las álabes-aleta de una turbina de viento de 3 kW mediante simulación numérica para zonas no electrificadas de la región Lambayeque.

Freire, L. O., Navarrete, L. M., Corrales, B. P., & Castillo, J. N. (2021). Efficiency in thermoelectric generators based on Peltier cells. *Energy Reports*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.099>

Gallo, L. A., Chica, E. L., & Florez, E. (2022). Estudio de desempeño de distintos perfiles de álabe de una turbina eólica para aprovechar vientos de baja velocidad. *Ingeniería*, 27(1).

González-Longatt, F. (2008). Comportamiento de Turbinas de Viento a Velocidad Constante accionando Generador de Inducción de Rotor Tipo Jaula de Ardilla. I EXPOSICIÓN INDUSTRIAL INTERNACIONAL DE ENERGÍA EÓLICA.

Igartua, J. J., & Humanes, M. L. (2004). El método científico aplicado a la investigación en comunicación social. *Journal of Health Communication*, 8(6), 513–528.

JIMÉNEZ-RAMÍREZ, A., LÓPEZ-GARZA, V., MOLINEROHERNÁNDEZ, D., & CASILLAS-FARFÁN, C. (n.d.). Diseñar y optimizar el perfil aerodinámico del hub de una turbina de viento de baja capacidad. Volumen 3, Número 9–Octubre–Diciembre-2016, 10.

Marín Téllez, P. (2020). Análisis y ensayos estructurales de aspas de turbina de viento de baja capacidad empleando la Norma IEC 61400-2.

MARIN TELLEZ, P., LÓPEZ-GARZA, V., PÉREZ-JUÁREZ, E., & GONZÁLEZ-ÁVALOS, G. (2020). Simulación y pruebas de laboratorio de un aspa de turbina de viento de 600 W de acuerdo a la Norma IEC-61400-2. UMSNH.

Merolla, J. L., Stephenson, L. B., & Zechmeister, E. J. (2007). La aplicación de los métodos experimentales en el estudio de los atajos informativos en México. *Política y Gobierno*, Volumen XIV, Número 1, 1er Semestre de 2007, Pp 117-142.

Pita Fernández, S., & Pértegas Díaz, S. (2002). Investigación cuantitativa y cualitativa. *Cad Aten Primaria*, 9(1), 76–78.

Renewable Energy Agency International. (2018). Renewable Capacity Statistics 2018. In *Statistics Explained*. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Category:Tourism_glossary

Rico, J. C. S. (2013). Comparación de métodos para determinar los parámetros de Weibull para la generación de energía eólica. *Scientia et Technica*, 18(2), 315–320.

Rubio, J. O. M., Bustos, L. T. A., Montoya, J. A. D., & Guzman, C. A. C. (2014). Diseño de Control de una Turbina de Viento para Optimización de Potencia.

Sánchez Flores, F. A. (2019). Fundamentos epistémicos de la investigación cualitativa y cuantitativa: Consensos y disensos. *Revista Digital de Investigación En Docencia Universitaria*, 13(1), 102–122.

Todo el contenido de **LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades**, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](#) 