UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y URBANISMO

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA.

TESIS

ANÁLISIS COMPARATIVO AERODINÁMICO DE LAS TURBINAS DARRIEUS Y SAVONIUS PARA LA OBTENCIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN

PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRISISTA

Autor:

Bach. Cubas Salas, Harly
https://orcid.org/0000-0001-6280-0167

Asesor:

Mg. Vives Garnique Juan Carlos
https://orcid.org/0000-0003-0988-9881

Línea de Investigación:

Infraestructura, Tecnología y Medio Ambiente

Pimentel – Perú

2021

ANÁLISIS COMPARATIVO AERODINÁMICO DE LAS TURBINAS DARRIEUS Y SAVONIUS PARA LA OBTENCIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN.

Aprobación del Jurado

Mg. Ing. Alvarado Silva Carlos Alexis

Presidente del Jurado de Tesis

Mg. Ing. Rojas Coronel Ángel Marcelo

Secretario del Jurado de Tesis

Mg. Ing. Vives Garnique Juan Carlos

Vocal del Jurado de Tesis

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de seguir creciendo profesionalmente y guiarme por el camino correcto, lograr superar los obstáculos que se presentaron en la vida para poder obtener este grado profesional.

A mis padres por todo el apoyo incondicional en el trascurso de mi carrera, la cual me ayudó bastante para seguir adelante.

HARLY CUBAS SALAS

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por darnos la vida, salud y los dones para tener la capacidad necesaria de poder realizar con éxito esta investigación.

A todas aquellas personas que han contribuido de una manera directa en mi desarrollo como persona moral, como ser humano, como estudiante, gracias por su apoyo y todos sus consejos, pero especialmente a mi familia, a mi padre, a madre que, con tanto esfuerzo, con tanta dedicación a base de tanto sacrificio me han proporcionado los medios para poder estudiar una carrera profesional.

Al Mg. Juan Carlos Vives Garnique, por su calidad de docente, asesor de este proyecto de investigación, gracias a su apoyo, colaboración y dedicación durante el desarrollo de este proyecto.

HARLY CUBAS SALAS

RESUMEN

Esta investigación se realizó con el objetivo de analizar las características aerodinámicas de las turbinas Darrieus y Savonius, compararlas y ver cuál es la más eficiente para obtener el potencial de energía eléctrica en la Universidad Señor de Sipán. Este estudio tuvo la metodología retrospectiva y diseño descriptivo. Como técnicas se utilizó la observación y la recolección de datos y de instrumentos, la guía de observación, guía y fichas de recolección de datos. La investigación inicia con la evaluación de la máxima demanda de la iluminación necesaria para el campo y lozas deportivas, en ella se pudo determinar que la máxima demanda es de 13,2 kW y una energía de 66 kW–h/día. Así mismo en la obtención de velocidades de viento, se obtuvo una velocidad de viento promedio de 3,39 m/s. En el análisis comparativo aerodinámico de las turbinas eólicas Darrieus y Savonius, se pudo determinar que la turbina Darrieus alcanzó un factor de potencia de 0,21 y la Savonius un factor de potencia de 0,36, la cual es la más eficiente. En la propuesta de diseño de la turbina se optó por una optimizada tipo Savonius "P", la cual genera una Potencia de 5 kW suficiente para iluminar el campo y lozas deportivas, con una velocidad de arranque menor a 1 m/s, cumpliendo con lo requerido en el caso de estudio. Finalmente, en el análisis económico con una inversión inicial de 42 890 soles, la cual se recupera a largo plazo, necesitando 21 años para amortizar la inversión.

Palabras Clave: Análisis, aerodinámica, turbina Darrieus, turbina Savonius, energía eléctrica.

ABSTRACT

This research was carried out with the objective of analyzing the aerodynamic characteristics of the Darrieus and Savonius turbines, compare them and see which one is the most efficient to obtain the potential electric energy at the Universidad Señor de Sipán. This study had a retrospective methodology and descriptive design. Observation and data collection were used as techniques and the observation guide, data collection guide and data collection forms were used as instruments. The research began with the evaluation of the maximum demand of the lighting necessary for the field and sports courts, where it was determined that the maximum demand is 13.2 kW and an energy of 66 kW-h/day. Likewise, in obtaining wind speeds, an average wind speed of 3.39 m/s was obtained. In the comparative aerodynamic analysis of the Darrieus and Savonius wind turbines, it was determined that the Darrieus turbine achieved a power factor of 0.21 and the Savonius turbine a power factor of 0.36, which is the most efficient. In the turbine design proposal, an optimized Savonius "P" type was chosen, which generates a power of 5 kW sufficient to illuminate the field and sports fields, with a start-up speed of less than 1 m/s, meeting the requirements of the case study. Finally, in the economic analysis with an initial investment of 42,890 soles, which is recovered in the long term, needing 21 years to amortize the investment.

Key words: Analysis, aerodynamics, Darrieus turbine, Savonius turbine, electric energy.

ÍNDICE

DEDICATORIA iii
AGRADECIMIENTO iv
RESUMEN v
ABSTRACT vi
I. INTRODUCCIÓN 13
1.1. Realidad problemática 13
1.2. Trabajos previos 15
1.3. Teorías relacionadas al tema 16
1.3.1. Energía eólica 16
1.3.2. Turbina eólica 17
1.3.3. El viento y su energía 17
1.3.4. Rendimiento de las turbinas eólicas 18
1.3.5. Anemómetro 19
1.3.6. Barquilla o góndola 19
1.3.7. Eje principal 19
1.3.8. Multiplicador 20
1.3.9. Generador 20
1.3.10. Turbinas de eje Vertical 21
1.3.11. Aerodinámica 23
1.3.12. Variación de las fuerzas tangenciales y normales 26
1.3.13. Aerodinámica de turbina Darrieus 27
1.3.14. Aerodinámica de turbina Savonius 30
1.3.15. Energía eléctrica 32
1.3.16. Potencia eléctrica 32
1.3.17. Nivel de iluminación 32
1.4. Formulación del problema 33
1.5. Justificación e importancia del studio 33
1.5.1. Justificación Técnica 33
1.5.2. Justificación Económica 33
1.5.3. Justificación Social 33
1.5.4. Justificación Ambiental 34

1.6. Hipótesis 34
1.7. Objetivos 34
1.7.1. Objetivo General 34
1.7.2. Objetivos específicos 34
II. MÉTODO 36
2.1. Tipo y diseño de investigación 36
2.2. Variables y Operacionalización 36
2.2.1. Variables 36
2.2.2. Operacionalización de variables 36
2.3. Población y muestra 37
2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad 37
2.4.1. Técnicas de recolección de datos 37
2.4.2. Instrumentos de recolección de datos. 38
2.4.3. Validez y confiabilidad 38
2.5. Procedimiento de análisis de datos 38
2.6. Criterios Éticos 38
III. RESULTADOS 41
3.1. Demanda de consumo eléctrico de la iluminación del campo y losas deportivas de la Universidad Señor de Sipán. 41
3.1.1. Propuesta de iluminación para campos y losas deportivas 41
3.1.2. Demanda de consumo eléctrico en el campo deportivo 42
3.1.3. Demanda de consumo eléctrico en la loza deportiva de baloncesto 42
3.1.4. Demanda de consumo eléctrico en la losa deportiva de vóleibol 43
3.1.5. Cálculo de máxima demanda Total 43
3.2. Velocidad promedio del viento 44
3.3. Análisis de las características aerodinámicas de las turbinas eólicas Darrieus y Savonius 45
3.3.1. Análisis aerodinámico de la turbina eólica Darrieus 45
3.3.2. Análisis aerodinámico de la turbina eólica Savonius 56
3.3.3. Análisis comparativo de resultados aerodinámicos de la turbina Darrieus y Savonius. 62
3.4. Propuesta de diseño de la turbina más eficiente y selección de componentes 63
3.4.1. Potencia de la turbina eólica 63

3.4.2. Selección del inversor....67
3.4.3. Selección de baterías de almacenamiento....68
3.5. Evaluación económica del proyecto....69
3.5.1. Costo de la inversión....69
3.5.2. Ingresos económicos....72
3.5.3. Egresos....73
3.5.4. Flujo de caja....73
3.5.5. Análisis económico....73
3.6. Discusión de resultados....74
CONCLUSIONES....77
RECOMENDACIONES....78
REFERENCIAS....80
ANEXOS....83
ANEXO N° 1....84
ANEXO N° 2....85
ANEXO N° 3....86
ANEXO N° 4....87
ANEXO N° 4....88
ANEXO N° 5....89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema conceptual de un generador eléctrico. 20
Figura 2. Generador de eje vertical Darrieus H. 22
Figura 3. Rotor de turbina tipo Savonius 23
Figura 4. Fuerzas aerodinámicas en un perfil. 25
Figura 5. Velocidades actuantes en el álabe de la turbina 28
Figura 6. Acción del viento sobre perfil de turbina eólica Savonius 30
Figura 7. Vista frontal de la turbina Savonius – 2 álabes 31
Figura 8. Velocidad del viento (m/s) en los últimos 4 años 44
Figura 9. Perfil aerodinámico NACA 0018. 46
Figura 10. Perfil aerodinámico NACA 0021. 46
Figura 11. Perfil aerodinámico NACA 0025. 46
Figura 12. Parámetros de análisis en software QBlade 49
Figura 13. Curvas de Cl, Cd y Cl/Cd - según número de Reynolds 50
Figura 14. Factor de potencia obtenido según perfil aerodinámico 56
Figura 15. Potencia obtenida según tipo de Turbina eólica 63
Figura 16. Turbina eólica Savonius 65
Figura 17. Turbina eólica Savonius “P” 65
Figura 18. Turbina eólica Savonius “P” – Vista Superior 66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Niveles mínimos de iluminación de campos deportivos. 41
Tabla 2. Máxima demanda total de losas y campo deportivo de la USS..... 43
Tabla 3. Estudio de la potencia a instalar en la Universidad Señor de Sipán. 44
Tabla 4. Velocidad del viento a una altura de 10 m según página de la NASA. 45
Tabla 5. Parámetros de entrada de diseño de Turbina eólica. 47
Tabla 6. Coeficientes según el perfil - QBlade 51
Tabla 7. Coeficientes de fuerza tangencial 51
Tabla 8. Coeficientes de fuerza normal de cada perfil. 52
Tabla 9. Fuerza tangencial de cada perfil 52
Tabla 10. Fuerza normal de cada perfil. 53
Tabla 11. Fuerza tangencial promedio 53
Tabla 12. Torque total de la turbina según su perfil. 54
Tabla 13. Potencia generada por la turbina según el perfil. 54
Tabla 14. Factor de Potencia de la turbina según el perfil..... 55
Tabla 15. Resumen de aerodinámica obtenida de la turbina eólica Darrieus según el perfil. .. 55
Tabla 16. Parámetros de entrada de la turbina eólica Savonius. 57
Tabla 17. Coeficientes de arrastre para distintas formas de alabes. 58
Tabla 18. Resumen de aerodinámica obtenida de la turbina eólica Savonius. 61
Tabla 19. Comparación de potencia y factor de potencia de turbina Darrieus y Savonius. 62
Tabla 20. Potencia de la turbina eólica en función a las horas del viento. 64
Tabla 21. Potencia de la turbina eólica en función a las horas del viento. 67
Tabla 22. Costo de materiales del proyecto. 70
Tabla 23. Costo de mano de obra. 71
Tabla 24. Costo de alquiler de maquinaria y herramientas. 71
Tabla 25. Total de costos directos. 71
Tabla 26. Costos indirectos del proyecto. 72
Tabla 27. Costo Total del proyecto. 72
Tabla 28. Flujo de caja del proyecto. 73
Tabla 29. Beneficio anual acumulado. 73

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I. INTRODUCCIÓN

1.1.Realidad problemática

Al generar energía eléctrica, mayormente se utilizan recursos no renovables, lo cual causa un gran daño y contaminación en el medio ambiente, como evidencia tenemos el calentamiento global. Por ello es el interés en las energías renovables, nuevas tecnologías que sean eficientes, con una contaminación menor y con la capacidad de satisfacer necesidades energéticas que hay en diferentes lugares del mundo, la eólica es una alternativa para cumplir lo requerido, aquella que aprovecha la fuerza del viento y generar energía eléctrica de una fuente limpia y sin contaminantes. (Torres, 2015)

La energía obtenida por la fuerza del viento o eólica es una gran alternativa con grandes expectativas de uso, presenta muchas ventajas comparadas con los sistemas energéticos convencionales de producción de electricidad, ya que tiene muy poca influencia en la contaminación del medio ambiente. (Orduz & Suárez, 2011)

Las centrales de energía eólica a nivel del mundo utilizan turbinas eólicas de gran tamaño de eje horizontal a pequeña escala, con potencias menores a 1 kW, con el objetivo de obtener una demanda de energía eléctrica y satisfacer a las comunidades, lo que se quiere obtener es que estos sistemas ayuden al ahorro de energía trabajando de manera complementaria con la instalación eléctrica residencial, como también para zonas aisladas satisfaciendo las necesidades de algunos hogares y usos de iluminación. La energía eólica está tomando gran importancia, recientemente ha aumentado el interés por el estudio de las aeroturbinas de eje vertical, ya que, comparadas con las tradicionales, estas presentan grandes ventajas en sistemas de generación de baja potencia. (Orduz & Suárez, 2011)

Para el desarrollo de un país se tiene que tener en cuenta un factor muy importante, el cual es disminuir el promedio de comunidades que no cuentan con sistemas de generación eléctrica, resalta que aproximadamente más de 6 millones de habitantes no cuentan con suministro eléctrico. (Jordán, 2009, pág. 6)

Como afirma Jordán (2009) “Es fundamental que todas las localidades cuenten con energía eléctrica, ya que de lo contrario la calidad de vida de las personas sería mala, de tal manera afectaría la salud de los habitantes” (pág. 10).

Perú tiene los recursos naturales adecuados y de gran variedad para generar energía eléctrica con un gran potencial, siendo entre estas la energía eólica, hidráulica y solar. Al pasar el tiempo el petróleo cada vez ha ido aumentando de precio y la quema de hidrocarburos trajo consecuencias, como es una de ellas el efecto invernadero, por ende, el gobierno del Perú está promoviendo la diversidad de energía en el país. (Atla eólico del Perú, 2016)

En el País, la costa del departamento de Piura, ubicada al norte tiene un gran potencial eólico, considerada una de las zonas más importantes. Además, también Lima, Arequipa, Lambayeque, Ancash y la libertad cuentan con un gran potencial, ubicadas al sur del país; sin embargo, uno de los departamentos que cuenta con el potencial eólico más alto es Ica, ya que su zona costera tiene una velocidad de viento medio anual que va superando los 8 m/s. (Ministerio de energía y minas, 2016, pág. 16)

Estudios del CRDS (2016) ubican a Piura como una región con potencial eólico, destacando a Talara y además otras zonas costeras de Piura, que podrían generar energía por 4,993 kWh año y 642 kWh año respectivamente. Lo que indicaría la posible viabilidad técnica de proyectos de energía eólica como efectivamente se ha dado en Talara, que dan muestras de la viabilidad también económica de estas inversiones. (García, 2018, pág. 22)

(Gamio, 2015) resalta. “Lambayeque registra un extraordinario potencial para instalar un Parque Eólico como los que existen ya en algunas localidades del país” (pág. 1). Según estudio realizado por la UNPRG en el 2015, el distrito de Pimentel cuenta con un gran potencial de energía eólica con velocidad de viento promedio de 3,8 m/s, lo cual resulta viable para generar energía eléctrica. (Sánchez, 2015, pág. 52)

1.2. Trabajos previos

(De la Calle, 2018) En su trabajo de investigación denominado "Estudio aerodinámico de una turbina de eje vertical mediante técnicas de cálculo CFD", Universidad Politécnica de Madrid. Determina problemas ambientales en el sector energético, donde es de suma importancia utilizar energías renovables para prevenir la contaminación ambiental. Esta tesis utilizó la metodología de investigación de simulación aerodinámica mediante programa de diseño CAD, la cual consiste en estudiar las distintas modificaciones de los parámetros que definen el diseño de una turbina eólica de eje vertical, de esta manera buscando una mejora para el diseño de este tipo de turbinas. Obteniendo como resultado que al aumentar la longitud de la cuerda se aumenta la solidez de la turbina, en el cual el coeficiente de potencia fue superior y llegando a una conclusión que mientras mayor es el grosor del perfil aerodinámico esta turbina tiende a ser más eficiente, un mayor factor de potencia.

(Guaque & Torres, 2014) En la tesis denominada "Análisis aerodinámico de una microturbina eólica de eje vertical para la generación de energía eléctrica en una zona urbana de Bogotá", Universidad Libre de Colombia. Señala que en Colombia la utilización del viento para generar energía eléctrica ha sido limitada. El objetivo de esta tesis es generar energía eléctrica en zonas urbanas de Bogotá haciendo un estudio aerodinámico de un micro generador eólico de eje vertical. Haciendo utilidad del método QFD, se pudo obtener el tipo de microturbina de capacidad de 120 W de tipo M-20, el cual satisface las necesidades del proyecto, ya sea en la facilidad de implementarse en zonas urbanas, como en las condiciones de velocidades de viento en Fontibón.

(Santibáñez, 2015) En la tesis titulada "Efecto de la inclinación de los álabes de una turbina de eje vertical tipo Darrieus", Universidad de Chile, Santiago de Chile, tiene como objetivo realizar el estudio del comportamiento aerodinámico de un aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus en función a su velocidad angular y el ángulo de inclinación que tienen sus álabes. Este proyecto de investigación obtiene como resultado que el aerogenerador puede extenderse para velocidades rotacionales superiores sin hacer cambio de su coeficiente de potencia, esto se debe a que el ángulo de inclinación de las

aletas o álabes produce un desplazamiento en la zona operacional del aerogenerador. Esto se genera tanto para velocidades de aire variables como uniformes.

Wong (2015). En su proyecto de investigación titulado “Diseño de turbina eólica de eje vertical tipo Savonius para ensayos a velocidades de 4 m/s a 8 m/s”, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. Determina la problemática en Perú, en el sector energético, donde es de suma importancia utilizar energías renovables para prevenir la contaminación ambiental. En esta tesis se diseñó una aeroturbina de eje vertical para funcionar a velocidades de 4 m/s a 8 m/s, se empleó estudios experimentales para un diseño óptimo que se pueda acomodar en las instalaciones del laboratorio de energía de la Universidad Católica del Perú. Este proyecto de investigación concluye que la turbina eólica diseñada empleando estudios experimentales si cumple con las recomendaciones para ser instalada en el laboratorio de la PUCP, el cual tiene como dimensiones en el rotor de una altura de 460 mm y el diámetro del álabe de 76 mm con un ángulo de inclinación de 15°.

Quicio (2016). En la tesis denominada “Propuesta de turbina eólica para suministrar energía eléctrica a la I.E San Francisco de Paredones, San José, Lambayeque. Determina la problemática que la institución no cuenta con suministro eléctrico, lo que genera que esta no desarrolle sus labores correspondientes. Su objetivo principal es proponer una turbina eólica para generar electricidad en la I.E San Francisco de Paredones ya que, la fuente convencional de suministro eléctrico de la institución dejó de funcionar por motivos de costos elevados. Llegando a la conclusión, que es necesario utilizar una turbina de eje vertical tipo Savonius, ya que tiene como característica que su arranque es a bajas velocidades aproximadamente 1,5 m/s.

1.3. Teorías relacionadas al tema

1.3.1. Energía eólica

> “Esta energía a la más antigua que el ser humano conoce. La molienda y el bombeo de agua fueron unas de las primeras aplicaciones de energía eólica, y solo hasta fines del siglo pasado se tuvo la generación de energía eléctrica” (Chachapoya, 2011).

La energía eólica es una de las fuentes de energía renovables, actualmente existen diversos conocimientos, debido a que viene desarrollándose desde muchos años atrás. Es un tipo de tecnología madura, ya que su diseño, su explotación y su mantenimiento es económicamente viable, en comparación a otras fuentes de energía como: hidráulica, geotérmica o termonuclear.(Cueva, 2015)

1.3.2. Turbina eólica

"Es aquella máquina que transforma la energía del viento en energía eléctrica, llamados aeroturbinas o aerogeneradores. Existen diversos tipos, los de más utilidad y los de mayor eficacia son los tri-palas de eje horizontal" (Asociación Empresarial Eólica, 2011).

Para determinar la potencia de una turbina eólica a diseñar o seleccionar se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{aerogenerador} = \frac{Consumo\ diario\left(\frac{W-h}{día}\right)}{Horas\ al\ día\ de\ viento} \quad (1)$$

1.3.3. El viento y su energía

El viento conforma uno de los elementos principales dentro del campo del conocimiento atmosférico, permite identificar la condición dinámica del aire y se reconoce como el aire en movimiento. El peso del aire sobre un objeto genera una fuerza por unidad de área en el mismo, esta fuerza es conocida como presión. Los vientos son desarrollados gracias a las diferencias de presión. (Torres, 2015)

1.3.3.1. Velocidad del viento

La velocidad del viento, es una magnitud vectorial. Este vector tiene 3 componentes, sin embargo, en aplicaciones de energía eólica solamente se consideran las componentes en el plano horizontal. Ésta se caracteriza por el módulo de la componente de la velocidad en el plano horizontal y su dirección. (Torres, 2015)

1.3.3.2. Potencial energético del viento

"Para poder determinar la cantidad de energía eléctrica que puede generar un equipo. El viento es uno de los factores muy importantes. Este varía, de acuerdo a las horas del día, de la situación geográfica general y de la topografía local" (Torres, 2015).

"La potencia eólica disponible a través de una superficie de sección A, perpendicular al flujo de viento, v, viene dada por el flujo de la energía cinética por unidad de tiempo" (Torres, 2015).

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

Donde:

ρ: densidad del aire

A: área que atraviesa el aire a su paso por la turbina eólica

v: velocidad del viento

1.3.4. Rendimiento de las turbinas eólicas

"Para obtener la potencia mecánica que tiene una turbina es importante tener en cuenta el factor de potencia, esto debido a que es imposible transformar toda la energía cinética generada por el viento en energía mecánica rotacional. (Torres, 2015)"

Factor de potencia de la turbina eólica:

$$C_p = \frac{P}{P_v} \quad (3)$$

potencia generada por la turbina eólica:

$$P = C_P\left(\frac{1}{2}\rho A v^3\right) \quad (4)$$

donde:

A: área de barrida del rotor

ρ: densidad del aire

v: velocidad del viento

C_p: coeficiente de potencia la turbina (de acuerdo a la forma del álabe)

1.3.5. Anemómetro

Es un instrumento que se utiliza para medir la velocidad del viento. Son capaces de hacer mediciones de manera instantánea, sin embargo, las ráfagas de viento desvirtúan la medida, de tal forma que la medida más adecuada viene a ser el promedio, para lograr obtener velocidades promedio es necesario realizar diferentes tipos de mediciones en un intervalo de tiempo. (Arbeloa, 2012, pág. 30)

1.3.6. Barquilla o góndola

Es el conjunto que contiene todo el tren de transmisión y sus elementos auxiliares, transmite a la torre los esfuerzos y momentos generados por el rotor. Es un elemento con un carácter estructural clave, que habitualmente se realiza en fundición, que soporta el tren electromecánico y externamente está recubierto con chapas de acero y/o fibra. (Arribas, 2011, pág. 76)

Tiene una abertura circular en su parte inferior para su conexión a la torre (corona de giro) y acceso, otra en la parte superior para acceder al techo de la misma, y una tercera para evacuación del personal en caso de peligro o manejo de material. (Arribas, 2011, pág. 76)

1.3.7. Eje principal

Es un elemento de transmisión de energía rotacional en baja velocidad, que no se incorpora en aquellas tecnologías que no disponen de multiplicador o incluso en nuevos diseños que incorporándolo presentan disposiciones que no lo hacen

necesario. Eje de acero que transmite el movimiento del rotor al multiplicador. Por su situación absorbe todos los esfuerzos del rotor por lo que está sometido a cargas cíclicas que se convierten en cargas de fatiga. (Arribas, 2011, pág. 76)

1.3.8. Multiplicador

Transmite el movimiento giratorio del eje principal al generador, aumentando las revoluciones del mismo para que, en función del número de polos, la energía eléctrica generada esté en la frecuencia de la red. Si no existiera, el eje principal transmite directamente el movimiento de giro del rotor al generador. (Arribas, 2011, pág. 77)

1.3.9. Generador

"Dispositivo encargado de conservar la diferencia de potencia eléctrica entre 2 polos. Estas máquinas son diseñadas para transformar energía mecánica a eléctrica, se da mediante la acción de un campo magnético en los conductores eléctricos dispuestos sobre la armadura" (Energía Nuclear, 2017).

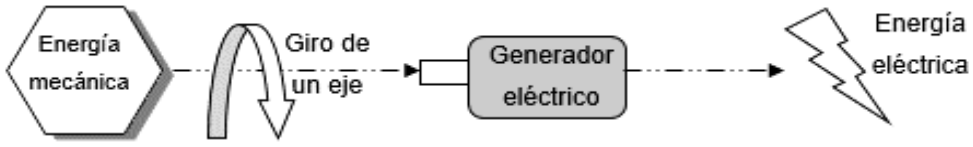


Figura 1. Esquema de generador eléctrico.

Fuente 1: *(Torres, 2015)*

1.3.9.1. Rotor

Consta de un buje que sostiene las palas y que está dispuesto en el exterior de la barquilla. Este componente recibe toda la fuerza del viento y lo convierte en energía cinética rotatoria, por lo que en él se generan los mayores esfuerzos sobre la turbina. (Arribas, 2011, pág. 80)

Buje: Es un elemento tanto estructural (en él se soportan las palas) como dinámico (transmite el movimiento giratorio al tren electromecánico de la barquilla). Es un conjunto de fundición posteriormente mecanizada que va recubierto

exteriormente por un protector/embellecedor de fibra de vidrio, y se monta sobre el eje principal, o, en caso de que este no exista, sobre el multiplicador o incluso directamente sobre el generador. En su interior alberga los actuadores sobre las palas, los soportes (fijos o móviles) de estas, y debe permitir el acceso y trabajo de los técnicos de servicio. (Arribas, 2011, pág. 81)

Palas: "Las palas se diseñan para aprovechar al máximo la energía del viento y minimizar el ruido aerodinámico (que no es sino una pérdida de energía); asimismo se tienen en cuenta los reflejos del Sol sobre ellas" (Arribas, 2011, pág. 82).

1.3.10. Turbinas de eje Vertical

En este tipo de máquinas, existe un efecto generadas por las fuerzas de arrastre que se dan por el viento en formas opuestas al eje de giro, este tipo de efecto es la fuente principal para que el rotor de la turbina genere movimiento es la que genera el movimiento en el rotor de esta turbina. En este grupo hay aeroturbinas que tienen movimiento por arrastre, estas tienen un movimiento más lento y otras por sustentación, las cuales su movimiento es más rápidas; es decir que una pala arrastrada por el viento siempre tendrá un movimiento de menor velocidad. (González, 2009)

Estas turbinas tienen el eje en posición vertical, el cual les permite responder a vientos que proceden de cualquier dirección sin la necesidad de ser reorientadas. Otra de sus ventajas es que el montaje de la caja de engranes pude ir junto al generador eléctrico y ubicados en el suelo. Mediante la caja de engranajes la velocidad rotatoria de los álabes se convierte en una velocidad óptima para el generador eléctrico. Aun así, este tipo de máquinas tienen un rendimiento menor que las de eje horizontal. (González, 2009)

1.3.10.1. Rotor Darrieus

Este tipo de rotor fue Inventado en el año de 1925 por un ingeniero francés de nombre Georges Darrieus. Este rotor está formado por 2 o 3

álabes curvados y montados sobre el eje vertical por sus extremos. El movimiento de las paletas se da principalmente por las fuerzas ascensionales o de sustentación. Cuando la paleta tiene un movimiento mucho mayor que la de el mismo, se genera el par máximo. Este tipo de rotores son utilizados para la generación de electricidad, el cual necesita un motor de arranque para ponerse en movimiento. Anteriormente se utilizaban con paletas curvadas, estas eran difícil de transportar, por lo que se sustituyeron por paletas rectas. (González, 2009)

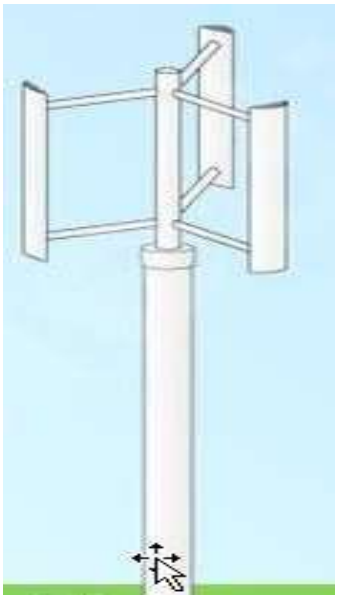


Figura 2. Generador de eje vertical Darrieus H.

Fuente 2: *(Mendoza & Rodríguez, 2017)*

1.3.10.2. Rotor Savonius

Este tipo de rotor es una máquina de baja eficiencia. Tiene dos hojas dobladas, donde una de ellas expone su parte cóncava al viento, mientras que la otra hace frente al mismo por su parte convexa. La fuerza de arrastre o de empuje es la generadora del par, esta es la diferencia entre el mayor empuje generado por el viento sobre la hoja cóncava y la menor resistencia opuesta por la hoja que hacer frente al viento por su parte convexa. Este tipo de rotor es muy sencillo de construir, además es barato y tiene un

momento de arranque muy fuerte ya que tiene una elevada solidez, esto le permite empezar a rotar a bajas velocidades del viento y es muy útil para bombear agua. (González, 2009)

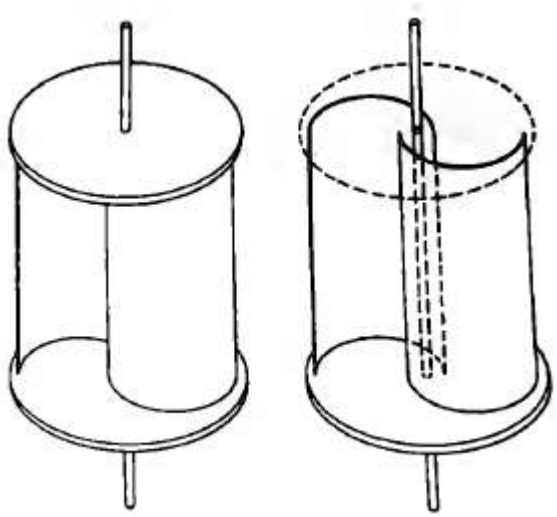


Figura 3. Rotor de turbina tipo Savonius

Fuente 3. *(Bernardo, 2008)*

1.3.10.3. Rotor Musgrove o H-VAWT

"Este es un tipo de rotor de eje vertical con forma de H, está formado por una torre central, en la que se monta un eje, unido con dos paletas verticales. Actualmente existen prototipos que son capaces de generar hasta 500 kW" (González, 2009, pág. 302).

1.3.10.4. El V-VAWT

"Este es similar al modelo anterior, pero las dos paletas, en vez de ser de forma vertical, van unidas por su parte inferior y forman una V" (González, 2009, pág. 302).

1.3.11. Aerodinámica

La aerodinámica es muy fundamental para poder diseñar un generador eólico, ya que con la información obtendida de su esrudio se puede hacer utilidad para perfeccionar sus componentes, como el diseño de su estructura, de sus álabes,

el rotor, entre otros. Por otra parte es importante saber los conceptos básicos para asegurar que la turbina tenga una eficiencia óptima, que tanto las fuerzas generadas por su movimiento, como las de arrastre y de fricción sean las mínimas. De esta manera un buen diseño aerodinámico garantizará que el aerogenerador no sufra un desgaste prematuro, lo cual conlleva a que los componentes que conforman este dispositivo tengan una duración mucho mayor. (Bernardo, 2008, pág. 15)

1.3.11.1. Número de Reynolds, Re

"Los aergoeneradores de eje vertical tienen la ventaja que el número de Reynolds puede ser calculado en culaquier punto de sus álabes, ya queestos están situados a la misma distancia del eje del rotor en todo momento" (De la calle, 2018, pág. 39).

$$Re = \frac{U.c}{\nu} \qquad (5)$$

donde:

ν: viscosidad cinemática del aire

c: longitud característica del perfil aerodinámico

U: velocidad del flujo del aire

1.3.11.2. Perfil Alar Aerodinámico

"El perfil aerodinámico es muy importante, ya que este ayuda a generar una diferencia de presión que existe entre la superficie superior, la cual también es conocida como "extrados" y la superficie inferior "intrados", de esta manera creando una fuerza de levantamiento o succión en su parte mas curveada, generalmente en la superficie superior" (Bernardo, 2008, pág. 15).

1.3.11.3. Sustentación y Arrastre

La fuerza de sustentación (L) es aquella producida por el viento y la de arrastre (D) es una fuerza contraria por consecuencia del movimiento de la turbina. Cabe reasaltar, que especificamente debemos saber la función aerodinámica requerida, ya que de acuerdo a ello se busca una relación L/D más eficiente posible.

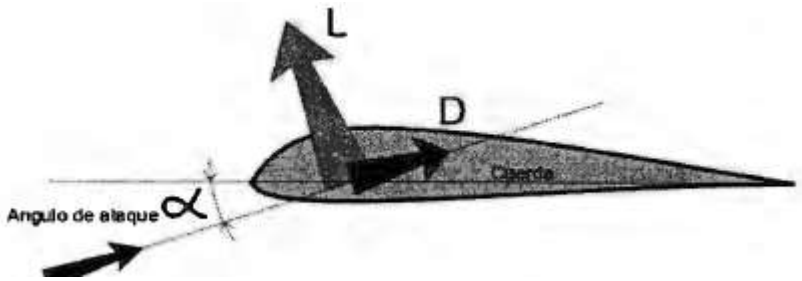


Figura 4. Fuerzas aerodinámicas en un perfil.

Fuente 4. *(Bernardo, 2008)*

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (6)$$

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (7)$$

donde:

C_L: Coeficiente de levantamiento o sustentación

C_D: Coeficiente de arrastre o Drag

ρ: densidad del aire

v: velocidad del viento

A: área barrida del rotor L: Fuerza de arrastre.

1.3.11.4. Cuerda

"Llamamos cuerda en un perfil aerodinámico, a la distancia que hay entre el extremo delantero del perfil y el extremo posterior" (Bernardo, 2008, pág. 16).

1.3.11.5. Viento Relativo

El viento relatio se define como el flujo de aire en movimiento paralelo a la trayectoria de un perfil aerodinámico, si se requiere direccionar este flujo este flujo, por lo general se cambia el ángulo de ataque de un perfil, de esta manera se puede controlar la diferencia de presión que existe en ambas superficies del perfil. (Bernardo, 2008, pág. 16)

1.3.11.6. Angulo de Ataque

"El ángulo de ataque, es aquel que hay entre el Viento relativo y la Cuerda del perfil" (Bernardo, 2008, pág. 16).

1.3.12. Variación de las fuerzas tangenciales y normales

"La diferencia que existe entre los componentes tangenciales de arrastre y levantamiento es conocida como el Coeficiente de fuerza tangencial Ct. De una manera parecida, el coeficiente de fuerza normal Cn es la diferencia que existe entre los componentes de fuerza normal del levantamiento y arrastre" (Bernardo, 2008, pág. 26).

Entonces:

$$C_t = C_l sen\alpha - C_d cos\alpha \quad (8)$$

$$C_n = C_l sen\alpha + C_d cos\alpha \quad (9)$$

La fuerza tangencial y normal se definen como:

$$F_t = \frac{1}{2} C_t \rho c l W^2 \quad (10)$$

$$F_n = \frac{1}{2} C_n \rho c l W^2 \quad (11)$$

donde:

C_t: Coeficiente de fuerza tangencial

C_n: Coeficiente de fuerza normal

ρ: densidad del aire

c: Cuerda del álabe

l: Longitud del álabe

W: Velocidad relativa del flujo

La fuerza tangecial y la normal son utilizadas para cualquier posición azimutal. Para cualquier álabe se hace uso de la fuerza tangencial promedio (Fta):

$$F_{ta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_t \theta d\theta \quad (12)$$

1.3.13. Aerodinámica de turbina Darrieus

El analisis aerodinámico de las turbinas Darrieus no es una tarea sencilla, ya que es fundamental conocer las fuerzas correctas que actuan en la turbina, para que esta pueda funcionar adecuadamente. Por otro lado es importante saber que en este tipo de turbinas eólicas las velocidades de flujo arriba y debajo de los álabes no son constantes, por lo que debemos considerar que dicho flujo sea tomado en una dirección axial, en el cual exista una velocidad cordal Vc y una velocidad normal Vn. (Bernardo, 2008, pág. 19)

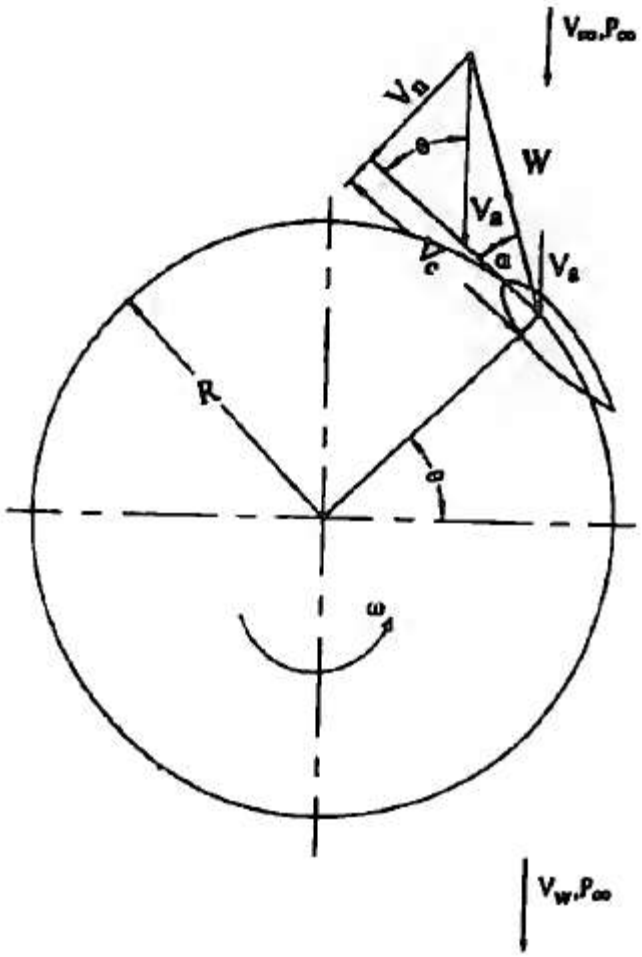


Figura 5. Velocidades actuantes en el álabe de la turbina

Fuente 5. *(Bernardo, 2008)*

Para calcular, tanto la velocidad cordal y velocidad normal hacemos uso de las siguientes ecuaciones:

$$V_c = R\omega + vcos\theta \quad (13)$$

$$V_n = vsen\theta \quad (14)$$

donde:

R: Radio del rotor de la turbina

ω: Velocidad rotacional

v: velocidad del viento

θ: ángulo azimutal

Conociendo estas velocidades, podemos encontrar el el ángulo de ataque (α) de cada álabe, así como su variación y la velocidad relativa de flujo (W), las cuales son expressadas como:

$$\alpha = tan^{-1}\left(\frac{V_n}{V_c}\right) \quad (15)$$

$$W = \sqrt{{V_c}^2 + {V_n}^2} \quad (16)$$

Para obtener el torque que genera una turbina eólica Darrieus, se hace utilidad de la siguiente ecuación:

$$\tau = NF_{ta}R \quad (17)$$

donde:

N: Número de álabes de la turbina

F_{ta}: Fuerza tangencial promedio

R: Radio de rotor de la aeroturbina

Obtenido el torque de la turbina y multiplicandolo por la velocidad angular, se puede conocer la potencia total de esta, de la siguinete manera:

$$P = \tau\omega \quad (18)$$

donde:

τ: Torque de la turbina

ω: velocidad rotacional

1.3.14. Aerodinámica de turbina Savonius

El funcionamiento de este tipo de turbinas se basa en las distintas fuerzas aerodinámicas ejercidas por el flujo del aire sobre objetos de diferentes formas, debido a esto, estos tipos de aeorogeneradores son conocidos como los aergoneradores de arrastre. El rotor está formado por álabes en forma de cazoletas semicilíndricas, donde el viento origina distintas fuerzas en la parte cóncava y en la convexa de estas, lo que dará lugar a un par, el cual generará que el rotor gire. (Arbeloa, 2012, pág. 97)

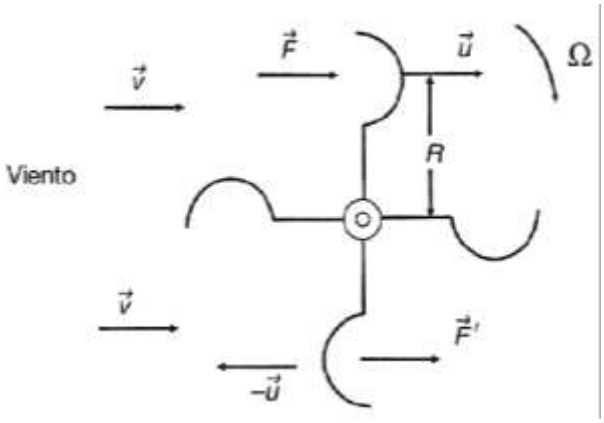


Figura 6. Acción del viento sobre perfil de turbina eólica Savonius

Fuente 6. *(Cueva, 2015)*

Se obtienen 2 fuerzas, F y F', las cuales actúan en las cazoletas, que se determinan:

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho A (v + u)^2 \quad (19)$$

$$F' = \frac{1}{2} C_d' \rho A (v - u)^2 \quad (20)$$

donde:

C_d: Coeficiente de arrastre en la parte cóncava del álabe

C_d': Coeficiente de arrastre en la parte convexa del álabe

ρ: densidad del viento

A: área frontal de las aspas

v: velocidad absoluta del viento

u: velocidad lineal de las cazoletas

El área frontal de las aspas para una turbina eólica Savonius.

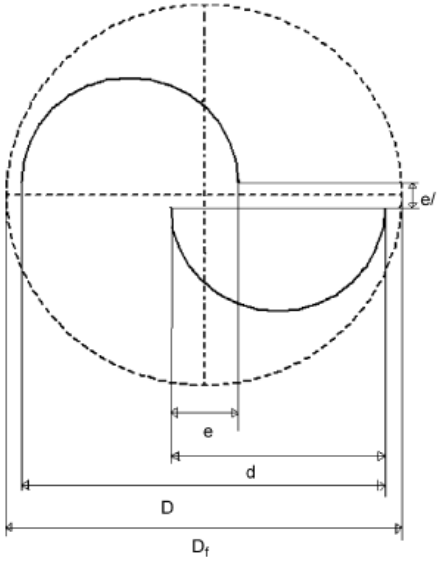


Figura 7. Vista frontal de la turbina Savonius – 2 álabes

Fuente 7. *(Wong, 2015)*

$$A = h(2d - e) \quad (21)$$

donde:

h: Altura del álabe

d: diámetro de la cazoleta o álabe

e: espacio entre álabes o overlap

La velocidad lineal de las cazoletas se determina con la siguiente ecuación:

$$u = \omega R \quad (22)$$

donde:

ω: velocidad angular de la turbina

R: radio de la turbina

1.3.15. Energía eléctrica

"La energía eléctrica es producida por la presencia del movimiento de electrones, el cual es causado por una diferencia de potencial. La cantidad de energía eléctrica que se produzca dependerá entonces de cuantos electrones se trasladen por unidad de tiempo" (Osinergmin, 2011, pág. 21).

1.3.16. Potencia eléctrica

"La potencia eléctrica, en el caso de un circuito eléctrico o cuando se genere energía a su máxima capacidad, en un determinado periodo, la potencia eléctrica equivale a la energía eléctrica que se produce en cada unidad de tiempo" (Osinergmin, 2011, pág. 22).

1.3.17. Nivel de iluminación

Este es definido como un flujo luminoso que insisde sobre una superficie. Tiene la unidad de medidad de "Lux".

Según (Casanova, 2019) "En el caso de iluminación para campos deportivos se pueden determinar según la siguiente ecuación".

$$E_m = \frac{N_R \emptyset}{S} \qquad (23)$$

donde:

N_R: Número de reflectores

$\emptyset$: Flujo luminoso del reflector (Lux)

S: Área a iluminar

1.4. Formulación del problema

¿Cuál es la mejor opción entre las turbinas eólicas Darrieus y Savonius para obtener el potencial de energía eléctrica en la Universidad Señor de Sipán?

1.5. Justificación e importancia del studio

1.5.1. Justificación Técnica

La finalidad de realizar un análisis aerodinámico comparativo de las turbinas Darrieus y Savonius es ver cuál es la más adecuada para obtener el potencial de energía eléctrica en la Universidad Señor de Sipán, según estudios previos realizados.

La eólica es una energía inagotable con gran importancia en el campo energético, utiliza la fuerza del viento para hacer funcionar grandes generadores y suministrar energía sin contaminación.

1.5.2. Justificación Económica

Este estudio se enfoca en energía eólica, capaz de generar energía eléctrica desde una fuente renovable con grandes beneficios económicos. Tiene un alto costo de inversión, sin embargo, a largo plazo se recupera lo invertido, los costos por mantenimiento de aerogeneradores no son muy elevados, lo cual genera un gran ahorro económico. Esta energía cada vez tiene más condiciones en competir con las energías convencionales, igualar y reducir los precios de combustibles fósiles. Tiene una fuente inagotable y de cero costos, por lo cual los productores pueden ofertar electricidad a un precio reducido, mientras mayor sea el porcentaje de energía generada, menores serán los costos de kW por hora en el mercado.

1.5.3. Justificación Social

La presente investigación tiene un aporte importante en el ámbito social, ayudará al desarrollo de la institución, habrá un mayor interés en generar electricidad con recursos renovables, generando ingresos económicos y muchos

puestos de trabajo, el daño en la salud de las personas será menor y menos riesgosa que el de la exposición al petróleo, carbón o energía nuclear.

1.5.4. Justificación Ambiental

La energía eólica tiene un menor impacto en el medio ambiente, no necesita grandes movimientos de terreno, no genera residuos contaminantes, no emisiones a la atmosfera de CO2, ni otros gases que provoquen el cambio climático. Los aerogeneradores utilizan la fuerza del viento, una fuente inagotable y que no causan daño, ya sea en la salud de las personas, como en el medio ambiente.

1.6. Hipótesis

Con el análisis aerodinámico de las turbinas eólicas Darrieus y Savonius se podrá conocer el nivel de potencial de energía eléctrica que produce cada diseño utilizando los parámetros de funcionamiento y diseño similares.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

Elaborar un análisis aerodinámico comparativo de las turbinas eólicas Darrieus y Savonius para obtener el potencial de energía eléctrica de la Universidad Señor de Sipán.

1.7.2. Objetivos específicos

Determinar la demanda de consumo eléctrico de la iluminación del campo y lozas deportivas de la universidad señor de Sipán.

Obtener las velocidades promedio del viento.

Analizar las características aerodinámicas de las turbinas eólicas Darrieus y Savonius.

Proponer el diseño de la turbina más eficiente y selección de componentes.

Realizar la evaluación económica del proyecto.

CAPÍTULO II

MÉTODO

II. MÉTODO

2.1. Tipo y diseño de investigación

Esta investigación fue retrospectiva, ya que los datos y diseños obtenidos de las turbinas eólicas ya han sido registrados, las cuales tienen un procedimiento de diseño ya planteados. Y descriptiva porque se propone realizar un análisis comparativo de dos turbinas eólicas de eje horizontal para la obtención de potencial eléctrico de la Universidad Señor de Sipán.

2.2. Variables y Operacionalización

2.2.1. Variables

Variable Independiente:

Análisis dinámico de turbinas Darrieus y Savonius

Variable Dependiente:

Potencial de energía eléctrica

2.2.2. Operacionalización de variables

Variable Independiente	**Dimensiones**	**Indicadores**	**Técnicas e instrumentos de Recolección de datos**
Análisis aerodinámico de turbinas Darrieus y Savonius	Energía eólica Energía mecánica Energía eléctrica	Velocidad de viento. Torque. Tensión eléctrica. Eficiencia de aeroturbina Potencia de aeroturbina Costos.	Guía de observación para el registro de la velocidad del viento. Registro de información estadística.

Variable Dependiente	Dimensiones	Indicadores	Técnicas e instrumentos de recolección de datos
Potencial de energía eléctrica.	Potencia media. Potencia Máxima.	Consumo (kWh) Potencia (kW)	Recolección de datos: Guía de recolección de datos Ficha de registro de la potencia instalada actual. Ficha de registro de las características de los equipos eléctricos. Ficha de registro de cargas eléctricas

2.3. Población y muestra

Población: Sistema de Iluminación de la Universidad Señor de Sipán.

Muestra: Sistema de Iluminación del campo de futbol y 02 lozas deportivas.

2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad

2.4.1. Técnicas de recolección de datos.

Observación: Se hará uso de esta técnica para poder ubicar el lugar y el área donde se instalará la turbina eólica, teniendo en cuenta el espacio físico y la posible instalación de los equipos.

Recolección de datos: Se tendrá en cuenta las informaciones obtenidas del tema, tanto como de libros, artículos, tesis y páginas web.

2.4.2. Instrumentos de recolección de datos.

Guía de observación.

Guía de recolección de datos

Fichas de recolección de datos de velocidades del viento.

2.4.3. Validez y confiabilidad

Validez: La validez de este estudio se da mediante el criterio del jurado y cuidado absoluto del proceso metodológico de los resultados obtenidos, en este caso el análisis dinámico de las turbinas Darrieus y Savonius.

Confiabilidad: La investigación presenta información y cálculos ya válidos obtenidos de investigaciones anteriores de temas similares, dando una buena confiabilidad.

2.5. Procedimiento de análisis de datos

Una vez obtenidos los datos correspondientes a la investigación se analizarán e interpretarán llegando a un resultado adecuado, esto se logrará haciendo una revisión y verificación de la información obtenida, en el cual se pretende utilizar la estadística descriptiva, esto ayuda analizar la conducta de la variable, en este caso la variable de potencial de energía eléctrica; Se hará uso de valores promedios, máximos y mínimos, con el objetivo de calcular la máxima demanda de energía eléctrica.

2.6. Criterios Éticos

Se tendrá en cuenta el código de ética de investigación de la Universidad Señor de Sipán.

Código de ética de la Universidad Señor de Sipán elaborado por la dirección de investigación, revisado por el área de planificación y desarrollo institucional – asesoría legal. Ratificado por el acuerdo de consejo universitario con resolución rectoral N° 0851 – 2017/USS

Art. 7°: Son deberes éticos de los investigadores:

- ✓ Autonomía.
- ✓ Responsabilidad.
- ✓ Profesionalismo.
- ✓ Compromiso con la sociedad.
- ✓ Supervisión.
- ✓ Desarrollo profesional.

Art. 14º: Respecto de los investigados y de lo investigado:

- ✓ Respetar las condiciones de salud, de integridad física, psicológica y moral de las personas o grupos que participan en el estudio.
- ✓ Solicitar y obtener el consentimiento expresado e informado de las personas sujetos investigación.
- ✓ Respetar la idiosincrasia y la cultura de los participantes en la investigación.
- ✓ Garantizar el bienestar de las personas, animales y plantas, como objeto de investigación.
- ✓ Garantizar el almacenamiento adecuado de la información obtenida para el estudio.
- ✓ Aplicar en todo momento los criterios de confidencialidad y anonimato.
- ✓ Presentar los resultados respetando las normas de Propiedad Intelectual.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

III. RESULTADOS

3.1. Demanda de consumo eléctrico de la iluminación del campo y losas deportivas de la Universidad Señor de Sipán.

3.1.1. Propuesta de iluminación para campos y losas deportivas

Para la iluminación del campo y losas deportivas de la Universidad Señor de Sipán nos basamos en las siguientes normas:

"La norma DGE 017-AI-1/1982: NORMA DE ALUMBRADO DE INTERIORES Y CAMPOS DEPORTIVOS, En alumbrado de locales deportivos debe procurar buenas condiciones de visibilidad para los deportistas, árbitros y espectadores" (Ministerio de Energía y Minas, 1982, pág. 9).

Los valores de iluminación nominal para recintos y campos deportivos son:

20/30/50/75/100/200/300/400/500/750/1000/1500/2000/3000/5000/7500/10,000lx.

Norma UNE 12.193: ILUMINACIÓN DE INSTALACIONES DEPORTIVAS. El alumbrado en campos deportivos se basa de acuerdo a los niveles de competición. Alumbrado Clase I, Competición del más alto nivel. Competiciones nacionales e internacionales. Normalmente acude un gran número de espectadores y los recintos son grandes. Alumbrado Clase II, Competición de nivel medio. Partidos de competición regional y local. Alumbrado Clase III, Entrenamiento general, educación física y actividades recreativas. (UNE, 2009, pág. 2)

Tabla 1. *Niveles mínimos de iluminación de campos deportivos.*

CLASE	ILUMINACIÓN	RENDIMIENTO CROMÁTICO	VALORACIÓN DE BRILLO
I	500	>60	<50
II	200	>60	<50
III	750	>20	<55

Fuente: (UNE, 2009)

Basándose en la tabla anterior, para el caso de campos deportivos en las universidades, se obtiene que es de clase II, el cual el valor mínimo de iluminación es 200 lux.

3.1.2. Demanda de consumo eléctrico en el campo deportivo

El campo deportivo de la Universidad Señor de Sipán tiene 96 m de largo por 56 m de ancho, un total de 5 376 m^2. Se propone utilizar reflectores LED con un consumo de 400 W, el cual genera un flujo luminoso de 40 000 lúmenes.

Para determinar el número de reflectores a utilizar en el campo deportivo según su área es necesario despejar N_R de la ecuación (23), obteniendo:

$$N_R = \frac{E_m S}{\emptyset}$$

$$N_R = \frac{200\left(\frac{lm}{m^2}\right) x5\ 376\ m^2}{40\ 000\ lm} = 26{,}88$$

Los reflectores a utilizar son 27 con una potencia de 400 W cada uno, obteniendo de esta manera una máxima demanda de 10,8 kW para el campo deportivo.

3.1.3. Demanda de consumo eléctrico en la loza deportiva de baloncesto

Para este caso se tiene las siguientes dimensiones de la losa deportiva, 32 m de largo por 24 m de ancho, un total de 768 m^2. Como propuesta de iluminación, se utilizará reflectores LED para campos deportivos, consumo 200 W, generan un flujo luminoso de 24 000 lúmenes.

Se necesita calcular cuántos reflectores son necesarios para el área de la losa deportiva de 768 m^2. La cual hacemos uso de la ecuación (23):

$$NR = \frac{200\left(\frac{lm}{m^2}\right) x768\ m^2}{24\ 000\ lm} = 6{,}4$$

Los reflectores a utilizar son 7 con una potencia de 200 W cada uno, obteniendo de esta manera una máxima demanda de 1,4 kW para la losa deportiva de baloncesto.

3.1.4. Demanda de consumo eléctrico en la losa deportiva de vóleibol

Para este caso se tiene las siguientes dimensiones de la losa deportiva, 30 m de largo por 18 m de ancho, un total de 540 m^2. Se utilizará reflectores LED para campos deportivos, consumo 200 W, generan un flujo luminoso de 24 000 lúmenes.

Cálculo del número de reflectores a utilizar en la losa deportiva según el área, ecuación (23).

$$NR = \frac{200\left(\frac{lm}{m^2}\right) x540\ m^2}{24\ 000\ lm} = 4{,}5$$

Los reflectores a utilizar son 5 con una potencia de 200 W cada uno, obteniendo de esta manera una máxima demanda de 1 kW para la losa deportiva de vóleibol.

3.1.5. Cálculo de máxima demanda Total

La máxima demanda total de losas y campo deportivo de la USS se obtiene en el siguiente cuadro:

Tabla 2. *Máxima demanda total de losas y campo deportivo de la USS.*

MÁXIMA DEMANDA	
NOMBRE	POTENCIA (kW)
Campo de Fútbol	10,8
Loza de Baloncesto	1,4
Loza de Vóleibol	1
TOTAL	**13,2**

Fuente: Autor

Para determinar la potencia de la aeroturbina es importante conocer el consumo energético del campo deportivo, el cual se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla 3. *Estudio de la potencia a instalar en la Universidad Señor de Sipán.*

Potencia a instalar (W)	Horas de consumo (h/día)	Consumo diario (W-h/día)
13 200	5	66 000

Fuente: Autor

3.2. Velocidad promedio del viento

La velocidad del viento se obtendrá mediante la página de la NASA, para este caso se revisará las velocidades de viento de la USS, ubicada en el Distrito de Pimentel, Provincia de Chiclayo, Departamento de Lambayeque. Con latitud: -6.7949 y longitud: -79.8854.

Los datos obtenidos de la velocidad de viento de acuerdo a la NASA se muestran en la siguiente figura:

Figura 8. *Velocidad del viento (m/s) en los últimos 4 años*

Fuente 8. *Página de la NASA*

Tabla 4. *Velocidad del viento a una altura de 10 m según página de la NASA.*

	VELOCIDAD DE VIENTO A UNA ALTURA DE 10 m (m/s)												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OBT	NOV	DIC	PROM. ANUAL
2015	3,35	3,02	2,68	3,28	3,78	3,79	3,94	3,93	4,03	3,98	3,66	3,87	3,61
2016	3,39	3,16	2,87	3,21	3,29	3,30	3,47	3,74	3,57	3,41	3,18	2,98	3,30
2017	2,75	2,97	2,79	3,10	3,24	3,55	3,63	3,63	3,81	3,49	3,00	3,07	3,25
2018	2,89	2,87	2,85	2,89	3,49	3,67	3,77	3,81	3,66	3,38	3,57	3,55	3,37
2019	3,34	2,81	2,73	3,10	3,41	3,62	3,78	3,64	3,86	3,67	3,48	3,52	3,41
VELOCIDAD MEDIA													**3,39**

Fuente: *Página de la NASA*

Según los datos obtenidos de la página de la NASA de los 5 últimos años, se puede observar que la velocidad media obtenida es de 3,39 m/s.

3.3. Análisis de las características aerodinámicas de las turbinas eólicas Darrieus y Savonius

En el presente estudio se busca conseguir el máximo coeficiente de potencia C_p para diferentes perfiles de álabes correspondientes a cada turbina. Para ello es necesario conocer la potencia generada por el viento.

3.3.1. Análisis aerodinámico de la turbina eólica Darrieus

> "Las turbinas eólicas Darrieus usan perfiles NACA 00XX, ya que generan un mejor factor de potencia, anteriormente se usaban perfiles de espesor bajo, como el NACA 0012 y NACA 0015, pero actualmente se ha optado por fabricar perfiles de un espesor mayor" (Hernández, 2016, pág. 29).

Para analizar las características aerodinámicas de esta turbina se seleccionó los perfiles NACA 0018, 0021 y 0025, ya que son los perfiles que tienen mayor espesor, ya que los dígitos últimos indican el espesor de cada perfil; además, y esto hace que se obtenga un mejor desempeño en el arranque.

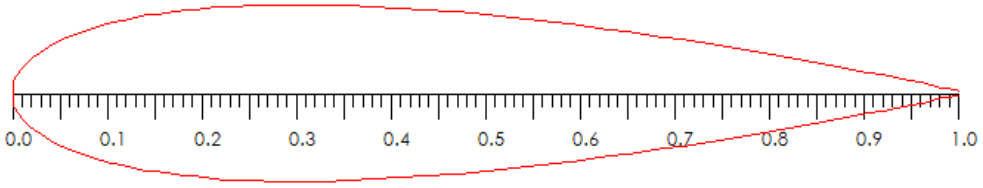


Figura 9. Perfil aerodinámico NACA 0018.

Fuente 9. *(Q-Blade)*

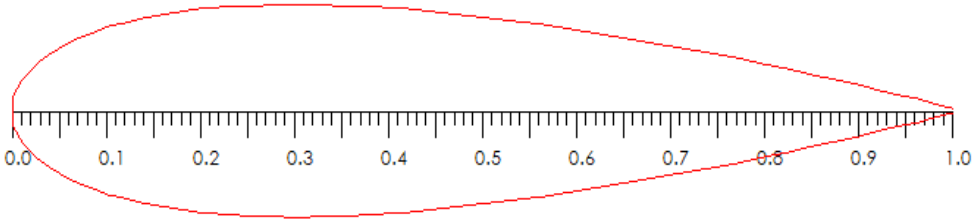


Figura 10. Perfil aerodinámico NACA 0021.

Fuente 10. *(Q-Blade)*

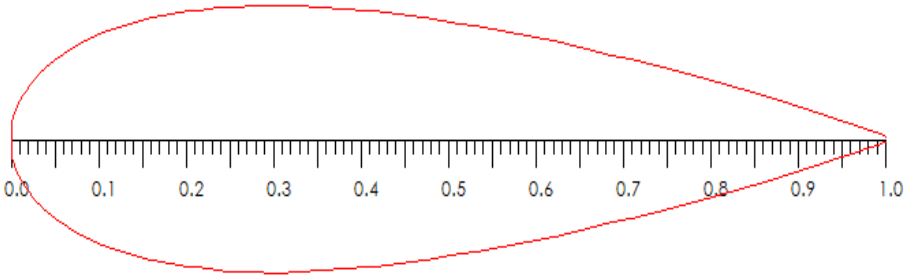


Figura 11. Perfil aerodinámico NACA 0025.

Fuente 11. *(Q-Blade)*

Para realizar el análisis aerodinámico de una turbina es necesario emplear algunos parámetros de entrada. Este tipo de turbina eólica es de pequeñas dimensiones, la cual presenta las siguientes características:

Tabla 5. *Parámetros de entrada de Turbina eólica Darrieus.*

Parámetros de entrada	Símbolo	Valor
Velocidad del viento	U	3,39 m/s
Radio del rotor	R	0,3 m
Número de palas	N	3
Longitud de la cuerda	C	0,1 m
Altura de la pala	H	0,7 m
Velocidad angular	ω	40 rad/s
Ángulo azimutal	θ	40°

Fuente: (Del Rio, 2017)

3.3.1.1.Cálculo de las velocidades que actúan en el álabe

Las velocidades que actúan sobre el álabe, tanto la velocidad cordal y la velocidad normal lo determinamos con las ecuaciones (13) y (14):

$$V_c = R\omega + V_a cos\theta$$
$$V_c = (0{,}3)(40) + (3{,}39)Cos(40) = \mathbf{14{,}6\ m/s}$$

$$V_n = V_a sen\theta$$
$$V_n = (3{,}39)\big(sen(40)\big) = \mathbf{2{,}18\ m/s}$$

Conociendo estos valores podemos calcular el ángulo de ataque que tendrá cada pala de la turbina Darrieus.

Angulo de ataque según Ecuación (15).

$$\alpha = tan^{-1}\left(\frac{V_n}{V_c}\right)$$
$$\alpha = tan^{-1}\left(\frac{2{,}18}{14{,}6}\right) = \mathbf{8{,}49°}$$

Una vez obtenidos estos datos, podemos calcular la velocidad relativa del flujo (W). Según la ecuación (16):

$$W = \sqrt{{V_c}^2 + {V_n}^2}$$

$$W = \sqrt{14{,}6^2 + 2{,}18^2} = \mathbf{14{,}76\ m/s}$$

3.3.1.2. Determinación de coeficientes aerodinámicas en los perfiles seleccionados

Para determinar los coeficientes aerodinámicos que se generan en cada perfil, hacemos utilidad del software QBlade, el cual nos brinda tanto las gráficas de sustentación, así como las de arrastre de acuerdo al ángulo de ataque del perfil, para ello debemos tener en cuenta la geometría y los puntos que definan al perfil aerodinámico según el número de Reynolds. En este software se analizará los coeficientes cada 0,25° en distintos ángulos de ataque según la necesidad.

Numero de Reynolds

Para calcular el número de Reynolds utilizamos la ecuación (5)

$$Re = \frac{U.c}{\nu} = \frac{(3{,}39 m/s)(0{,}1 m)}{1{,}51 \times 10^{-5}\ m^2/s} = 2\ 245$$

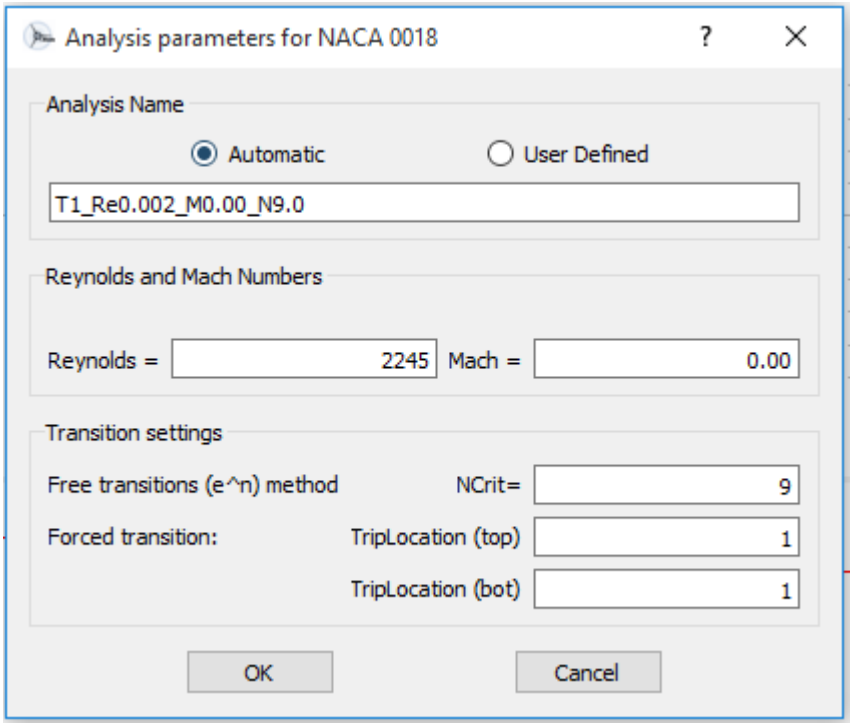


Figura 12. Parámetros de análisis en software QBlade

Fuente 12. Software QBlade

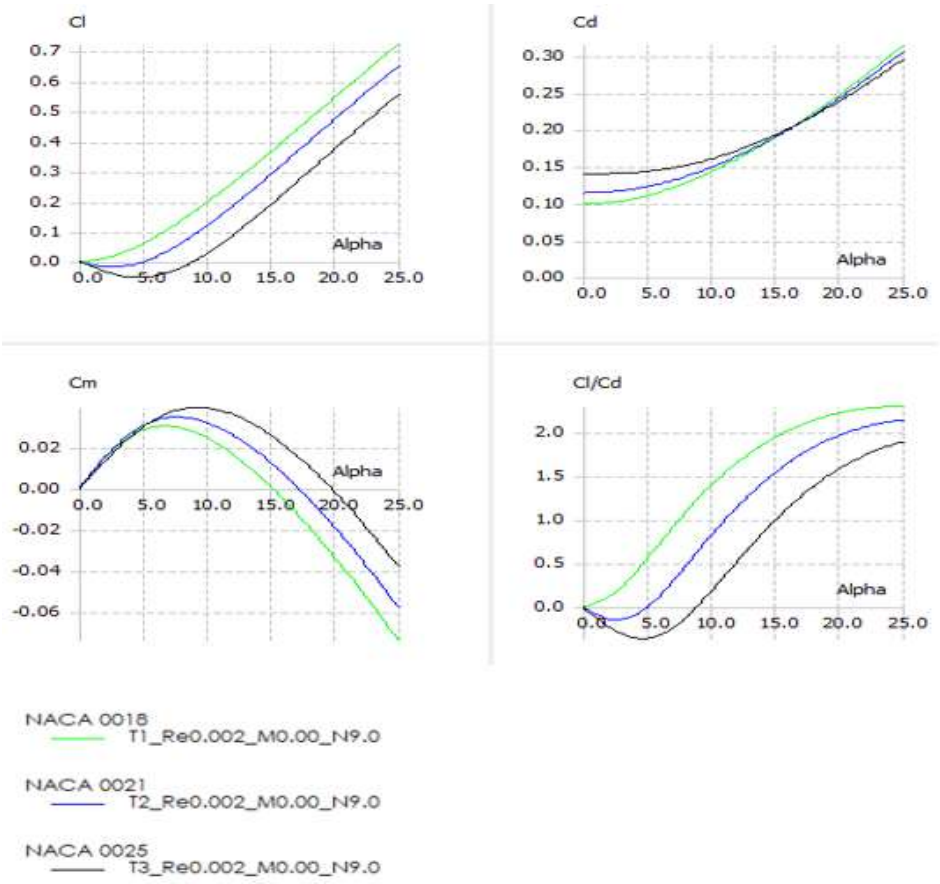


Figura 13. Curvas de Cl, Cd y Cl/Cd - según número de Reynolds

Fuente 13. Software QBlade

Según las gráficas obtenidas por el software QBlade, se puede observar que para un ángulo de ataque 8,49° del álabe de la turbina obtenemos los siguientes coeficientes, tanto de sustentación como de arrastre para cada perfil.

Tabla 6. *Coeficientes según el perfil - QBlade*

Perfil	Coeficiente de sustentación (Cl)	Coeficiente de arrastre (Cd)
NACA 0018	0,18	0,13
NACA 0021	0,10	0,14
NACA 0025	0,02	0,16

Fuente: Autor

3.3.1.3.Fuerzas tangenciales y normales

Para determinar la fuerza tangencial y normal es necesario hallar los coeficientes de fuerza en cada perfil.

Para calcular el coeficiente de fuerza tangencial utilizamos la ecuación (8):

$$C_t = C_l sen\alpha - C_d cos\alpha$$

Tabla 7. *Coeficientes de fuerza tangencial*

Perfil	Coeficiente de fuerza tangencial (C_t)
NACA 0018	0,1020
NACA 0021	0,1237
NACA 0025	0,1553

Fuente: Autor

Para calcular el coeficiente de fuerza normal utilizamos la ecuación (9) :

$$C_n = C_l sen\alpha + C_d cos\alpha$$

Tabla 8. *Coeficientes de fuerza normal de cada perfil.*

Perfil	Coeficiente Fuerza normal (C_n)
NACA 0018	0,1552
NACA 0021	0,1532
NACA 0025	0,1612

Fuente: Autor

Para calcular la fuerza tangencial y normal utilizamos las (10) y (11):

- ✓ Fuerza tangencial:

$$F_t = \frac{1}{2} C_t \rho f l W^2$$

Tabla 9. *Fuerza tangencial de cada perfil*

Perfil	Fuerza tangencial F_t (N)
NACA 0018	0,99
NACA 0021	1,20
NACA 0025	1,51

Fuente: Autor

- ✓ Fuerza normal

$$F_n = \frac{1}{2} C_n \rho f l W^2$$

Tabla 10. *Fuerza normal de cada perfil.*

Perfil	Fuerza normal F_n (N)
NACA 0018	1,59
NACA 0021	1,49
NACA 0025	1,57

Fuente: Autor

3.3.1.4.Cálculo del torque total

Para determinar el toque total según el perfil alar de la turbina es necesario calcular la fuerza tangencial promedio que se determina con la ecuación (12):

$$F_{ta} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} F_t(\theta)d\theta$$

Reemplazando y resolviendo la integral obtenemos los siguientes valores:

Tabla 11. *Fuerza tangencial promedio*

Perfil	Fuerza tangencial promedio F_{ta} (N)
NACA 0018	3,12
NACA 0021	3,78
NACA 0025	4,74

Fuente: Autor

Para calcular el torque utilizamos la ecuación (17):

$$\tau = NF_{ta}R$$

Tabla 12. *Torque total de la turbina según su perfil.*

Perfil	Torque Total τ (N.m)
NACA 0018	2,80
NACA 0021	3,40
NACA 0025	4,27

Fuente: Autor

3.3.1.5.Potencia mecánica generada por la turbina

Para calcular la potencia total de la turbina Darrieus hacemos utilidad de la ecuación (18):

$$P = \tau\omega$$

Tabla 13. *Potencia generada por la turbina según el perfil.*

Perfil	Potencia generada P (W)
NACA 0018	112,19
NACA 0021	136,06
NACA 0025	170,80

Fuente: Autor

3.3.1.6.Potencia generada por el viento

La potencia generada por el viento se determina con la ecuación (2):

$$P_v = \frac{1}{2}\rho A v^3$$

$$P_v = \frac{1}{2}(1{,}2754\ kg/m^3)(0{,}42\ m^2)(3{,}39\ m/s)^3$$

3.3.1.7.Factor de potencia de la turbina

Para determinar el factor de potencia de la turbina para cada perfil utilizamos la ecuación (3):

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

Tabla 14. *Factor de Potencia de la turbina según el perfil.*

Perfil	Factor de potencia de la turbina C_p
NACA 0018	0,14
NACA 0021	0,16
NACA 0025	0,21

Fuente: Autor

3.3.1.8.Resultados de aerodinámica de la turbina Darrieus

Resumen del análisis Aerodinámico de la Turbina eólica Darrieus y del factor de potencia de la turbina de acuerdo a cada perfil estudiado.

Tabla 15. *Resumen de aerodinámica obtenida de la turbina eólica Darrieus según el perfil.*

Turbina eólica Darrieus	Perfil	Fuerza tangencial actuante F_t (N)	Fuerza normal actuante F_t (N)	Torque Total T (N.m)	Potencia generada P (W)	Factor de potencia de la turbina C_p
	NACA 0018	0,99	1,59	2,8	112,19	0,14
	NACA 0021	1,2	1,49	3,4	136,06	0,16
	NACA 0025	1,51	1,57	4,27	170,8	0,21

Fuente: Autor

El cuadro anterior muestra que cuando el perfil aerodinámico tenga un mayor grosor se obtendrá una potencia superior, como es en el caso del perfil NACA 0025 que con el promedio de la velocidad de 3,49 m/s y parámetros de entrada de la turbina Darrieus se obtiene una potencia de 170,8 W.

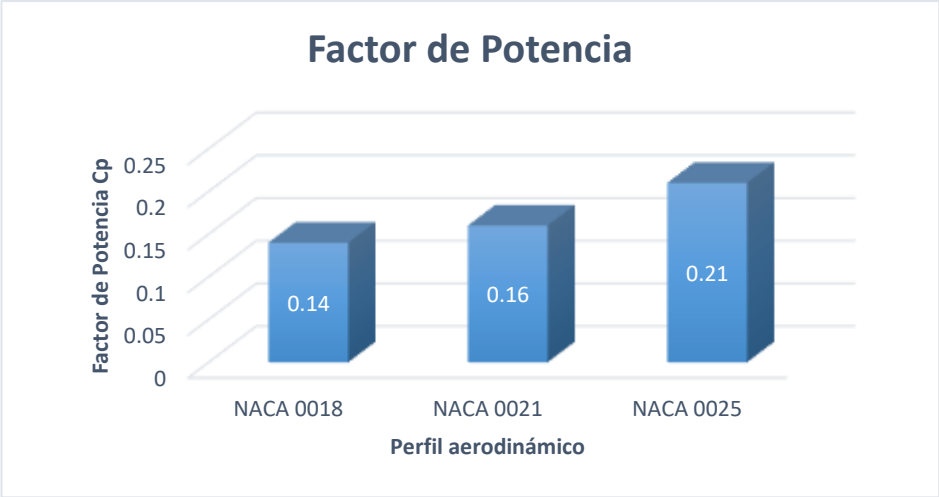


Figura 14. Factor de potencia obtenido según perfil aerodinámico

Fuente 14. Autor

La figura muestra que cuando utilizamos un perfil aerodinámico de mayor grosor, como es el caso de NACA 0025 obtenemos un factor de potencia superior.

3.3.2. Análisis aerodinámico de la turbina eólica Savonius

Para realizar el análisis aerodinámico de la turnia eólica savonius algunos parámetros de entrada de la turbina eólica Darrieus, para así analizar la diferencia de potencia que genera cada una de ellas.

Tabla 16. *Parámetros de entrada de la turbina eólica Savonius.*

Parámetros de entrada	Símbolo	Valor
Velocidad del viento	V	3,39 m/s
Radio del rotor	R	0,175 m
Diámetro del álabe	D	0,4 m
Espacio entre álabes	E	0,1 m
Altura de la pala	H	0,7 m
Velocidad angular	ω	40 rad/s

Fuente: (Del Rio, 2017)

Como se sabe, las fuerzas ejercidas por el viento en la parte cóncava y convexa en la turbina eólica Savonius son diferentes, ello hace que el conjunto gire alrededor del eje.

Para calcular las fuerzas aerodinámicas que ejerce el viento es necesario hallar el coeficiente de arrastre, el cual lo podemos obtener de acuerdo a la geometría del objeto. Saber la velocidad lineal y el área frontal de las aspas de la turbina eólica.

3.3.2.1.Coeficiente de arrastre

Para determinar los coeficientes de arrastre de las fuerzas que actúan en la turbina eólica Savonius hacemos utilidad de la siguiente tabla:

Tabla 17. *Coeficientes de arrastre para distintas formas de alabes.*

FORMA	Cd
Placa plana paralela	0,002-0,014
Placa plana normal	2
Cilindro circular	0,2-1
Barra cuadrada	2
Barra cuadrada	1,5
Barra de triángulo equilátero	Extremo afilado hacia delante: 1,40 Cara plana hacia delante: 2,0
Sección C	2,30
Sección C	1,20
Perfil aerodinámico	De acuerdo al tipo de perfil

Fuente: (Cámara , 2016)

La turbina eólica de eje vertical Savonius tiene la forma de una C. Según la tabla anterior se obtiene un coeficiente de arrastre **Cd=2,30** y un **Cd´=1,20**.

3.3.2.2.Velocidad lineal de las aspas

Para calcular la velocidad lineal de las aspas utilizamos la Ecuación (22):

$$u = \omega R$$
$$u = (40\ rad/s)(0{,}175\ m)$$
$$\boldsymbol{u = 7\ m/s}$$

3.3.2.3.Área frontal

El área frontal que tienen las aspas se calcula según la ecuación (21):

$$A = h(2d - e)$$
$$A = (0{,}7\ m)[(2 \times 0{,}4\ m) - (0{,}1\ m)]$$
$$\boldsymbol{A = 0{,}49\ m^2}$$

3.3.2.4.Fuerzas aerodinámicas que ejerce el viento

Existen dos fuerzas que ejerce el viento en las aspas de la turbina, una fuerza F que se origina en la parte cóncava de las aspas, la cual es la que hace girar a la turbina y una fuerza F´ que se origina en la parte convexa, esta es la que va en contra del giro de la turbina.

Para calcular la fuerza F, utilizamos la ecuación (19):

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho A (v + u)^2$$
$$F = \frac{1}{2}(2{,}30)(1{,}2754\ kg/m^3)(0{,}49\ m^2)[(3{,}39 + 7) m/s]^2$$
$$\boldsymbol{F = 77{,}58\ N}$$

Para calcular la Fuerza F´, hacemos utilidad de la ecuación (20):

$$F' = \frac{1}{2} C_d' \rho A (v - u)^2$$

$$F' = \frac{1}{2} (1{,}20)(1{,}2754\ kg/m^3)(0{,}49\ m^2)[(3{,}39 - 7) m/s]^2$$

$$\boldsymbol{F' = 4{,}89\ N}$$

Por lo tanto, la fuerza que ejerce el viento y hace girar a la turbina eólica es la diferencia entre F y F´, como se muestra en la siguiente operación:

$$F_T = 77{,}58 - 4{,}89$$

$$\boldsymbol{F_T = 62{,}69\ N}$$

3.3.2.5.Cálculo del torque

Para determinar el torque total que ejerce el viento en la turbina eólica Savonius utilizamos la ecuación (17):

$$\tau = F_T R$$

$$\tau = (62{,}69N)(0{,}175m)$$

$$\boldsymbol{\tau = 10{,}97\ Nm}$$

3.3.2.6.Cálculo de la potencia mecánica generada por la turbina

Para calcular la potencia total de la turbina Darrieus hacemos utilidad de la ecuación (18):

$$P = \tau\omega$$

$$P = (10{,}97\ N.m)(40\ rad/s)$$

$$\boldsymbol{P = 438.8\ W}$$

3.3.2.7.Potencia generada por el viento

La potencia generada por el viento se determina con la ecuación (2):

$$P_v = \frac{1}{2}\rho A v^3$$

$$P_v = \frac{1}{2}(1{,}2754\ kg/m^3)(0{,}49\ m^2)(3{,}39\ m/s)^3$$

$$\boldsymbol{P_v = 12,17\ W}$$

3.3.2.8.Factor de potencia de la turbina

El factor de potencia de la turbina eólica se determina con la ecuación (3):

$$C_P = \frac{P}{P_v}$$

$$C_P = \frac{438{,}8}{12{,}17}$$

$$\boldsymbol{C_P = 0,36}$$

3.3.2.9.Resultados de aerodinámica de la turbina Savonius

En el siguiente cuadro podemos mostrar el resumen obtenido de las características aerodinámicas de la turbina eólica Savonius.

Tabla 18. *Resumen de aerodinámica obtenida de la turbina eólica Savonius.*

Turbina eólica Savonius	Fuerza ejercida por el viento - parte cóncava de las aspas (N)	Fuerza ejercida por el viento - parte convexa de las aspas (N)	Torque Total T (N.m)	Potencia generada P (W)	Factor de potencia de la turbina
	77,58	4,89	10,97	438,8	0,36

Fuente: Autor

En la tabla se muestra que para una velocidad de 3,39 m/s y parámetros de entrada elegidos para la turbina eólica Savonius se puede obtener una potencia de 438,8 W y un factor de potencia de 0,36.

3.3.3. Análisis comparativo de resultados aerodinámicos de la turbina Darrieus y Savonius.

Para realizar el análisis entre la Turbina eólica Darrieus y Savonius, comparamos los resultados obtenidos de la potencia y el factor de potencia de cada turbina de acuerdo a sus características aerodinámicas estudiadas y seleccionar la mejor opción para obtener el potencial eléctrico del campo y lozas deportivas.

Tabla 19. *Comparación de potencia y factor de potencia de turbina Darrieus y Savonius.*

Turbina eólica	Potencia generada P (W)	Factor de potencia Fp
Darrieus (perfil NACA 0025)	170,8	0,21
Savonius	438,8	0,36

Fuente: Autor

La tabla anterior muestra que la turbina eólica Savonius con los mismos parámetros de entrada genera una potencia superior a la turbina Darrieus, por lo cual quiere decir que, para velocidades de viento bajas, como es el caso de estudio que tiene una velocidad promedio de 3,39 m/s es recomendable utilizar un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, ya que en este análisis se obtiene que el factor de potencia de la Savonius es mucho mayor a la Darrieus.

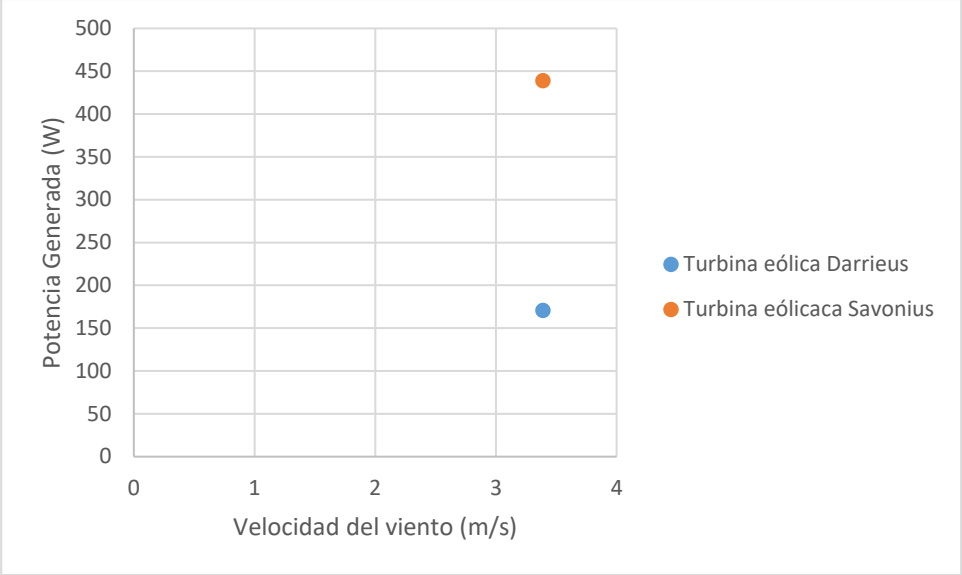


Figura 15. Potencia obtenida según tipo de Turbina eólica

Fuente 15. Autor

3.4.Propuesta de diseño de la turbina más eficiente y selección de componentes

La turbina eólica que se propone diseñar es de eje vertical tipo Savonius, la cual tiene una mayor eficiencia para generar energía eléctrica e iluminar el campo y lozas deportivas de la USS. Es necesario tener en cuenta que todos los cálculos tienen que ser realizados da tal manera que el modelo cumpla con su objetivo, es decir, que tenga una potencia necesaria para iluminar el campo y lozas deportivas. Para ello necesitamos saber la potencia de la turbina a diseñar.

3.4.1. Potencia de la turbina eólica

Para determinar la potencia de la turbina, se debe tener en cuenta la demanda de energía que se va a instalar y el número de horas de presencia de viento. Para este caso tenemos una demanda de 66 000 W-h/día.

Utilizamos la ecuación (1) para determinar la potencia del aerogenerador a diferentes horas de presencia de viento.

$$P_{aerogenerador} = \frac{Consumo\ diario\left(\frac{W-h}{día}\right)}{Horas\ al\ día\ de\ viento}$$

Tabla 20. *Potencia de la turbina eólica en función a las horas del viento.*

Horas de viento h/día	Potencia de turbina eólica (W)	Turbina a seleccionar
10	6600	7000
11	6000	6500
12	5500	6000
13	5076,923077	5500
14	4714,285714	5000
15	4400	5000
16	4125	4500
17	3882,352941	4000
18	3666,666667	4000
19	3473,684211	3500
20	3300	3500

Fuente: *Autor*

De la tabla anterior podemos observar que cuando hay presencia de viento de 15 a 16 horas por día la turbina a diseñar tendrá una potencia de 5000 W, en la cual para esta investigación se asumirá que hay presencia de viento de 15 horas por día, ya que, en el Distrito de Pimentel, lugar de ubicación del proyecto, el viento es muy frecuente, reemplazando este valor en ecuación número (1) se obtiene lo siguiente:

$$P_{aerogenerador} = \frac{66\ 000\ (W-h/día)}{15(h/día)} = 4\ 400\ W$$

La potencia obtenida es muy elevada para turbinas Savonius tradicionales, por lo que se puede optar por un diseño optimizado, como es el caso de la turbina eólica Savonius “P” mostrada en las siguientes figuras:

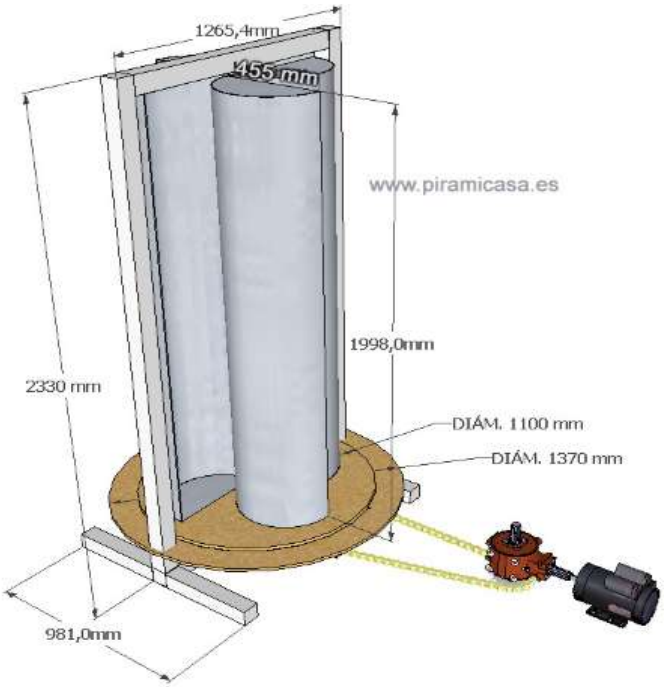


Figura 16. Turbina eólica Savonius

Fuente 16. Piramicasa

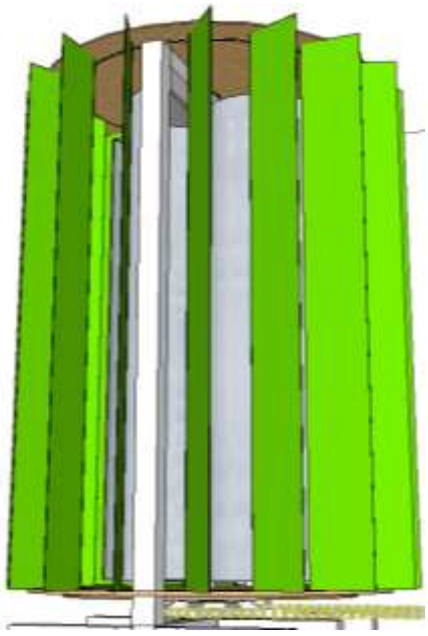


Figura 17. Turbina eólica Savonius "P"

Fuente 17. Piramicasa

Este es un diseño óptimo para que este tipo de turbina pueda alcanzar una potencia superior a las tradicionales, donde el viento al entrar será dirigido por las palas semifijas, de esta manera aprovechando al máximo el potencial eólico. Esta turbina para generar 5 kW es necesario tener las siguientes características:

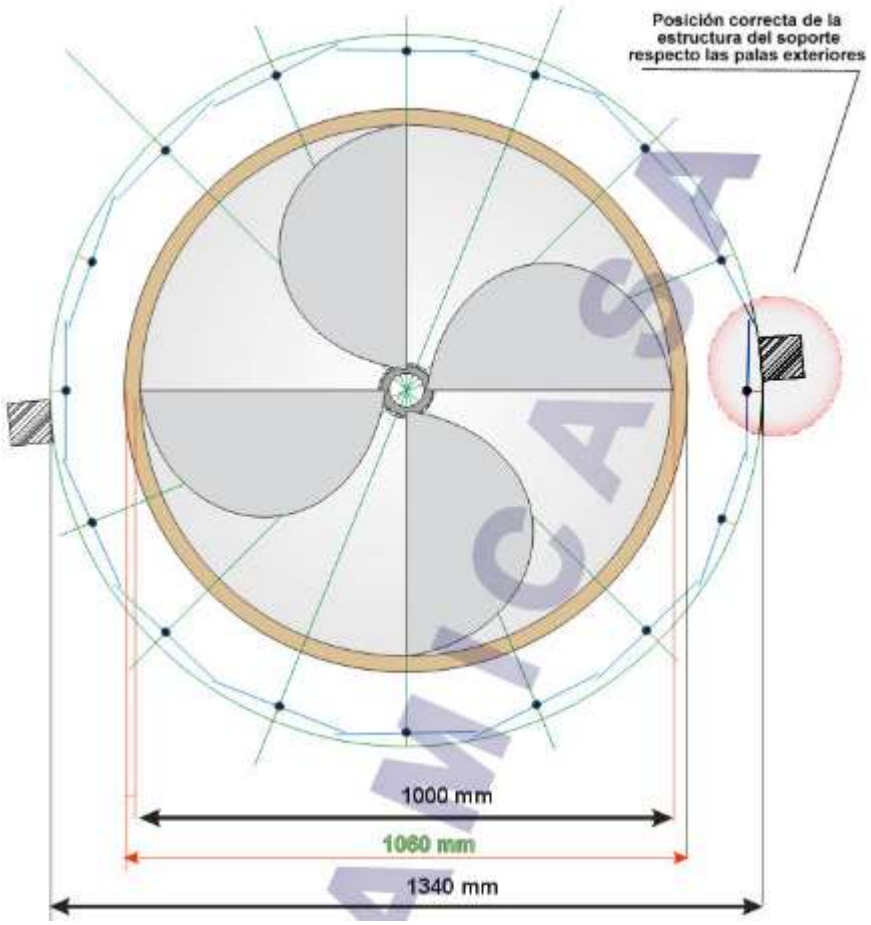


Figura 18. Turbina eólica Savonius "P" – Vista Superior

Fuente 18. Piramicasa

Tabla 21. *Materiales de turbina eólica tipo "P".*

Palas interiores	16 planchuelas de 265 x 200 x 2 mm
Palas exteriores	4 planchas de 1 835 x 722 x 2 mm
Círculos	2 planchuelas acero de 1340 diám. x 5 mm
	2 semicírculos para manejar las aspas interiores
	Interior: 2 círculos de 1000 x 2 mm
	2 aros de planchuela para limitar las aspas exteriores

Fuente: Piramicasa

Esta turbina se ajusta de acuerdo a nuestras necesidades, ya que no solamente genera el potencial de 5 kW, sino que tiene una velocidad de arranque menor a 1 m/s, la cual es perfecta para nuestro caso de estudio.

Esta es una de opción para obtener el potencial necesario e iluminar el campo deportivo de la Universidad Señor de Sipán, o también se puede optar por 2 turbinas eólicas Savonius de 2,5 kW, sin embargo, los costos de mantenimiento de instalación serían muy elevados, por lo que se recomienda el diseño de la turbina eólica Savonius "P".

3.4.2. Selección del inversor

El inversor a seleccionar debe cumplir los siguientes parámetros:

- ✓ Potencia: 5 kW
- ✓ Voltaje VDC (batería)
- ✓ Voltaje de salida 110 – 220 V CA (Consumo final)
- ✓ Frecuencia de 60 Hz

Se selecciona un inversor de rejilla de 5 kW, 12 V / 24V /48 VDC a 220 VAC (50 0 60 Hz) de onda sinusoidal pura, debido a que este cumple con las condiciones necesarias, los detalles y especificaciones se muestran en los anexos.

3.4.3. Selección de baterías de almacenamiento

Para la selección de la batería de nuestro sistema eólico, no solo tomaremos en cuenta el tamaño y las características de la aeroturbina, sino que también del período de calma más largo en el cual el suministro de energía eléctrica deba mantenerse. Lo esencial es tener una capacidad suficiente para 15 días, sin embargo, esto es demasiado costoso, por ello tomaremos en cuenta establecer entre dos a cuatro días de almacenamiento.

3.4.3.1. Tamaño del sistema de almacenamiento

Para determinar la cantidad de amperios que suministrará la batería, hacemos utilidad de la ecuación siguiente ecuación:

$$C = \frac{E(AUT)}{V(P_d)} \quad (24)$$

$E: Consumo\ diario\ = 66\,000\ W - h/día$

$AUT: Número\ días\ de\ autonomía = 3$

$V: Voltaje\ de\ batería\ 24\ VDC$

$P_d: porcentaje\ de\ descaraga\ de\ la\ batería = 80\%$

Reemplazando tenemos:

$$C = \frac{66\,000(2)}{24(0{,}8)} = 6\,875\ A - h$$

De acuerdo a ello, seleccionamos baterías de ciclo profundo 12V 220AH UPS AGM, estas son una excelente opción para sistemas eólicos y solares.

3.4.3.2. Tipo de conexión de las baterías

- ✓ **Baterías en paralelo**

  La batería seleccionada suministra 220 A-h, para calcular el número de baterías en paralelo utilizamos la siguiente ecuación:

$$\mathrm{N°}_{\textbf{baterías paralelo}} = \frac{\mathrm{C}}{(\mathbf{A}-\mathbf{h})\mathbf{Batería}} \quad (25)$$

$$N°_{\text{baterías paralelo}} = \frac{6\,875\ W-h}{220\ A-h} = 31$$

- ✓ **Baterías en serie**

  Para el cálculo del número de baterías en serie utilizamos la siguiente ecuación:

$$\mathrm{N°}_{\text{baterías serie}} = \frac{\text{Voltaje del sistema}}{\text{Voltaje de vateía}} \quad (26)$$

$$N°_{baterías\ serie} = \frac{24\ V}{12\ V} = 2$$

Por lo tanto, el número total de baterías a utilizar en nuestro sistema eólico es de 33.

3.5.Evaluación económica del proyecto.

3.5.1. Costo de la inversión

Al hacer utilidad de energías renovables para generar energía eléctrica, además que es una buena opción para mejorar la eficiencia, también es rentable económicamente comparado con energías tradicionales. Sin embargo, hay un inconveniente, el cual es que el consumidor al momento de ejecutar el proyecto tiene un costo de inversión bien elevado, por ello es de suma importancia hacer la demostración que al implantar un sistema eólico es una inversión muy buena, no solo en la parte económica, sino que también en el medio ambiente, estas instalaciones son cada vez son más confiables y su mantenimiento no es tan complicado, lo cual llegan a funcionar en un tiempo de 20 a 25 años.

3.5.1.1. Costos directos

"Son aquellos costos que se reconocen con productos característicos, o identificables con departamentos o entidades particulares" (Chachapoya, 2011, pág. 54).

Para este proyecto de investigación fueron todos los costos que están afiliados con la implementación del sistema eólico, como los materiales, los equipos y la mano de obra al momento de la ejecución.

En la tabla se muestran los costos del proyecto.

Tabla 22. *Costo de materiales del proyecto.*

MATERIALES				
Denominación	**Unidad**	**Cantidad**	**Precio por unidad (S/.)**	**Precio Total (S/.)**
Estructura base de la turbina, incluyendo elementos de instalación.	Unidad	1	1500	1500
Turbina eólica – 5 kW y controlador.	Unidad	1	15000	15000
Inversor de onda sinusoidal de 5000 W, 24 VDC.	Unidad	1	5000	5000
Caja Reductora de velocidad	Unidad	1	1800	1800
Cubierta metálica de la turbina-plancha galvanizada de 1/20"	Metros	2	500	1000
Cable 14 AWG	Metros	20	2	40
Tablero eléctrico	Conjunto	1	500	500
Batería 200 A – h	Unidad	33	150	4950
Sub total				**29 790**

Fuente: Autor

Tabla 23. *Costo de mano de obra.*

MANO DE OBRA				
Denominación	**Unidad**	**Cantidad**	**Precio por unidad (S/.)**	**Precio Total (S/.)**
Jefe de montaje	HH	9	40	360
Ayudante de montaje	HH	9	20	180
Técnico eléctrico	HH	7	30	210
Ayudante de eléctrico	HH	7	20	140
Sub total				**890**

Fuente: Autor

Tabla 24. *Costo de alquiler de maquinaria y herramientas.*

MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Denominación	**Unidad**	**Cantidad**	**Precio Unitario (S/.)**	**Precio Total (S/.)**
Tecle	H	2	30	60
Herramientas menores (5% de mano de obra)	%	5	890	44,5
Sub total				**104,5**

Fuente: Autor

Tabla 25. *Total de costos directos.*

Materiales	29790,00
Mano de obra	890,00
Maquinaria y herramientas	104,50
TOTAL	**30784,50**

Fuente: Autor

3.5.1.2. Costos indirectos

"Estos costos son los que no intervienen directamente en el desarrollo del estudio, como los gastos de administración, salarios de dirección técnica, electricidad, imprevistos y utilidad, entre otros. Este costo se considera el 25% del total de los costos indirectos" (Chachapoya, 2011).

Los costos indirectos del estudio se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 26. *Costos indirectos del proyecto.*

DENOMINACIÓN	CANTIDAD (%CD)	VALOR
Costos administrativos	2%	445,04
Servicios (agua, luz, etc)	1%	222,52
Diseño ingenieril	20%	4450,44
Otros	2%	445,04
TOTAL	25%	5563,06

Fuente: Autor

3.5.1.3. Costo Total

Tabla 27. *Costo Total del proyecto.*

COSTO TOTAL		36347,56
IGV	18.00%	6542,56
TOTAL (S/)		**42890,12**

Fuente: Autor

3.5.2. Ingresos económicos

Para conocer los ingresos de este proyecto tenemos que conocer el consumo de energía para iluminar el campo deportivo, para este caso tenemos 66 000 W-h/día, la cual mensual sería 1 980 kW-h.

La facturación mensual que correspondería a la USS por el consumo de iluminación del campo deportivo con una energía de kWh, si utilizaran energía procedente del SEIN, sería de S/0,5 por kW-h, por lo tanto, los ingresos serían: 0,5*1 980 = **S/990** Mensuales.

3.5.3. Egresos

Costo de Mantenimiento.

En los egresos tenemos el costo de mantenimiento, el cual se realizará uno preventivo, el que consiste en la limpieza, en los ajustes de accesorios, verificación de elementos y entre otros. Esto representa el 5% Anual del costo de la inversión del proyecto, o sea el 0.05*32 822,02 = **S/ 1 641** Anuales.

3.5.4. Flujo de caja

El flujo de caja se genera con todos los ingresos, los egresos y la inversión inicial del proyecto, en la siguiente tabla se calcula la utilidad mensual.

Tabla 28. *Flujo de caja del proyecto.*

Mes	0	1	2	3	4	…	11	12
Inversión inicial (S/.)	42890					…		
Ingresos (S/.)		990	1104	1218	1332	…	2130	2244
Egresos (S/.)		136	136	136	136	…	136	136
Utilidad: Ingresos - Egresos (S/.)		854	968	1082	1196	…	1994	2108

Fuente: Autor

3.5.5. Análisis económico

Para que es este proyecto tenga rentabilidad, el valor actual neto ha debe ser positivo. Para poder conocer el número de años que se necesitan para amortizar lo invertido, solo bastaría con igualar el valor actual neto a un valor cero.

Tabla 29. *Beneficio anual acumulado.*

Años	Beneficio acumulado
0	-42890,00
1	-40782,00
2	-38674,00
3	-36566,00
4	-34458,00
5	-32350,00
6	-30242,00
7	-28134,00

8	-26026,00
9	-23918,00
10	-21810,00
11	-19702,00
12	-17594,00
13	-15486,00
14	-13378,00
15	-11270,00
16	-9162,00
17	-7054,00
18	-4946,00
19	-2838,00
20	-730,00
21	1378,00

Fuente: Autor

El periodo para amortizar el capital invertido en este proyecto es de 21 años.

3.6.Discusión de resultados

Para la aerodinámica de la turbina Darrieus, se tomaron en cuenta los 3 perfiles más utilizados en este tipo de turbinas, NACA 0018, NACA 0021 y NACA 0025, en la cual actúan dos tipos de fuerza, una tangencial y la otra normal, donde se pudo apreciar que mientras mayor es el grosor del perfil estas fuerzas tienden a tener un coeficiente más elevado. De esta manera resaltando la turbina Darrieus con perfil NACA 0025, siendo la más eficiente de estos perfiles.

En el análisis comparativo aerodinámico de las turbinas Darrieus y Savonius, se obtuvo que la mejor opción y la turbina más eficiente para la iluminación del campo y lozas deportivas de la USS es la turbina de eje vertical Savonius, la cual obtuvo un coeficiente de potencia de 0,36, muy superior a la Darrieus con perfil aerodinámico NACA 0025 que arrojó 0,21.

Para el diseño propuesto de la turbina eólica se tuvo en cuenta la demanda de energía del campo y lozas deportivas, donde arrojó como resultado que la potencia de

esta turbina tiene q ser superior a 5 kW, donde la más eficiente es tipo Savonius “P”, una turbina de eje vertical con un diseño óptimo.

En la evaluación económica, se obtuvo que la inversión inicial del proyecto es muy elevada, la cual se requiere un largo plazo para recupérala, ya que la inversión se recupera a los 20 años.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Para la iluminación del campo y lozas deportivas de la Universidad Señor de Sipán se tuvo en cuenta la norma española UNE 12.193. Iluminación de instalaciones deportivas, la cual dice que el nivel mínimo de iluminación es 200 lum/m^2 para espacios deportivos. De esto se obtuvo que necesitamos una potencia de 13,2 kW para iluminar el campo y lozas deportivas según su área determinada.

La velocidad del viento en la Universidad Señor de Sipán según la página de la NASA arrojó un promedio de 3,39 m/s, la cual es una velocidad baja para obtener un potencial adecuado con una turbina convencional, es por ello que se optó por una de diseño optimizado.

En el análisis comparativo aerodinámico de la turbina Darrieus y Savonius se obtuvo como resultado que la turbina más eficiente es la Savonius con una eficiencia de 0,36, sin embargo, con el diseño convencional de esta turbina es imposible llegar al potencial que se necesita para la iluminación del campo y lozas deportivas, donde se tuvo que optar por un diseño optimizado de 5 kW que cumpla las condiciones de estudio.

Se propuso diseñar una turbina de eje vertical Savonius "P", la cual tiene un diseño óptimo para cumplir la potencia que se requiere para iluminar el campo y lozas deportivas, esta turbina tiene la ventaja de aprovechar el potencial eólico debido a que sus palas semifijas dirigen las fuerzas del viento hacia los álabes, obteniendo como resultado una mayor eficiencia y superioridad a las turbinas savonius convencionales.

La inversión inicial de nuestro sistema eólico con todos los elementos a utilizar y los propuestos es de S/ 42 890, esta inversión se recupera a largo plazo, necesitando 21 años para amortizar la inversión.

RECOMENDACIONES

Es recomendable realizar el estudio de energías renovables, ya que de esta manera no solo ayudamos al medio ambiente, sino que también aportamos en la parte económica de nuestro país, ya que nuestras fuentes de energías serían inagotables y más eficientes, y más aún con la caída de tensión de energía que se viene en este año 2020.

La elaboración de este tipo de investigaciones se debe llevar a cabo en zonas rurales, donde se un poco tedioso el acceso de la red eléctrica, ya que de esta manera el proyecto es justificable desde el punto de vista económico.

Se recomienda realizar un estudio de un sistema híbrido eólico - solar, con el fin de poder almacenar energía eléctrica y poder ser utilizada cuando sea requerida, de esta manera logrando un sistema estable.

Se recomienda a los futuros profesionales a orientarse en este sector productivo, ya que esta es una opción de desarrollo para nuestro país, ya que así se genera nuevas fuentes de trabajo, pero sobre todo tener en cuenta que así lograremos contrarrestar la contaminación ambiental.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

Arbeloa, L. (2012). *Diseño de aerogenerador de eje vertical tipo Savanius para electrificación rural.* Pamplona: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.

Arribas, L. (2011). *Energía Eólica (2da ed.).* Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.

Asociación Empresarial Eólica. (2011). *Acercate a la eólica*. Obtenido de Acercate a la eólica: https://www.aeeolica.org/uploads/BAJACuadrptico_ACERCATE_AEE_2.pdf

Atla eólico del Perú. (2016). *Atla eólico del Perú.* Lima: Barlovento recursos naturales - Ministerio de Energía y Minas del Perú.

Bernardo, E. (2008). *Prototipo experimental turbina eólica de eje vertical.* Monterrey: Tecnológico de Monterrey .

Cámara , J. (2016). *Diseño, construcción y pruebas de un modelo de turbina eólica de eje vertical tipo Savonius.* Ciudad de México: Universida Nacional Autónoma de Mexico.

Casanova, A. (2019). *Cálculo del número de reflectores de campos y lozas deportivas.* San Martín.

Chachapoya, V. C. (2011). *Diseño Técnico Económico para el Suministro de Electrecidad de baja Potencia, a travez de Energía Eólica.* Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Chávez, S. L. (2010). *Diseño de un microgenerador de eje vertical.* México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Cueva, L. V. (2015). *Diseño y construcción de un generador eólico de eje vertical tipo savonius para producir 20 watts.* Quito: Escuela Politécnica Nacional.

De la Calle, R. (2018). *Estudio aerodinámico de un aerogenerador de eje vertical mediante técnicas de cálculo CFD.* Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

De la calle, R. S. (2018). *Estudio aerodinamico de un aerogenerador de eje vertical mediante técnicas de cálculo CFD.* Madrid: Universidad Politécnica de Madrid .

Del Rio, S. (2017). *Diseño de un aerogenerador tipo Darrius y estudio de la influencia del ángulo de pitch, mediante Mecánica de Fluidos Computacional.* Valladolid: Universidad de Valladolid.

Energía Nuclear. (19 de 03 de 2017). *Energía Nuclear*. Obtenido de Energía Nuclear: https://pt.energia-nuclear.net/operacao-usina-nuclear/central-nuclear/gerador-eletrico

Escuadero, J. M. (2003). Manual de energía eólica. En J. M. Escuadero, *Manual de energía eólica* (pág. 477). España: Mundi-prensa.

Gamio, P. (9 de Agosto de 2015). Lambayeque registra extraordinario potencial para instalar parque eólico. *Andina*.

García, V. J. (2018). *Viabilidad económica de la provisión de energía eléctrica por generación eólica en el asentamiento humano "Hijos de Colán"- Paita-Perú.* Lambayeque: Universida Nacional Pedro Ruíz Gallo.

González, J. (2009). Energías Renovables. En J. González, *Energías Renovables* (págs. 300-303). España: Reverté.

Guaque, P. E., & Torres, A. G. (2014). *Análisis aerodinámico de una microturbina eólica de eje vertical para la generación de energía eléctrica en una zona urbana de Bogotá, Colombia.* Bogotá: Universidad Libre de Colombia.

Hernández, L. R. (2016). *Diseño de un generador vertical modelo darrieus para ensayos en el tunel de viento de laboratorio de energía de la PUCP.* Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Jarauta, L. (2015). Las energías renovables. En L. Jarauta, *Las energías renovables* (pág. 53). Barcelona: UOC.

Jordán, J. (2009). *Estudio de la utilización de energía eólica para la generación de electricicidad en un asentamiento humano de San Juan de Mancora.* Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Mendoza, N., & Rodríguez, M. E. (2017). Diseño de un rotor tipo Darrieus helicoidal. *Revista de Ingeniería Mecánica*, 34-41.

Ministerio de Energía y Minas. (1982). *Norma de alumbrado de interiores y campos deportivos.* Ministerio de Energía y minas.

Ministerio de energía y minas, d. P. (2016). *Mapa eólico del Perú.* Lima: Barlovento recursos naturales.

Orduz, O. I., & Suárez, J. (2011). *Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia.* Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Osinergmin. (2011). *Fundamentos Técnicos y Económicos del Sector Eléctrico Peruano.* Lima: Osinergmin.

Povis, J. A. (2016). *Estudio comparativo de perfiles aerodinámicos de álabes para una turbina eólica de 3 kW mediante método analítico y simulación numérica.* Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Quicio, L. E. (2016). *Propuesta de un aerogenerador para el suministro de energía eléctrica en la I.E San Francisco de Paredones, San José.* Lima: Universidad César Vallejo.

Sánchez, N. L. (2015). *Monitoreo potencial de las energías renovables en pimentel.* Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo.

Santibáñez, C. V. (2015). *Efecto de la inclinación de los álabes en una turbina de eje vertical tipo Darrieus.* Santiago de Chile: Universidad de Chile.

Talayero, A. P., Telmo, E., & Arribas de Paz, L. (s.f.). Energía eólica (2da. ed.). Prensas de la Universidad de Zaragoza.

Torres, D. (2015). *Diseño de un generador eólico de eje de baja potencia.* Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

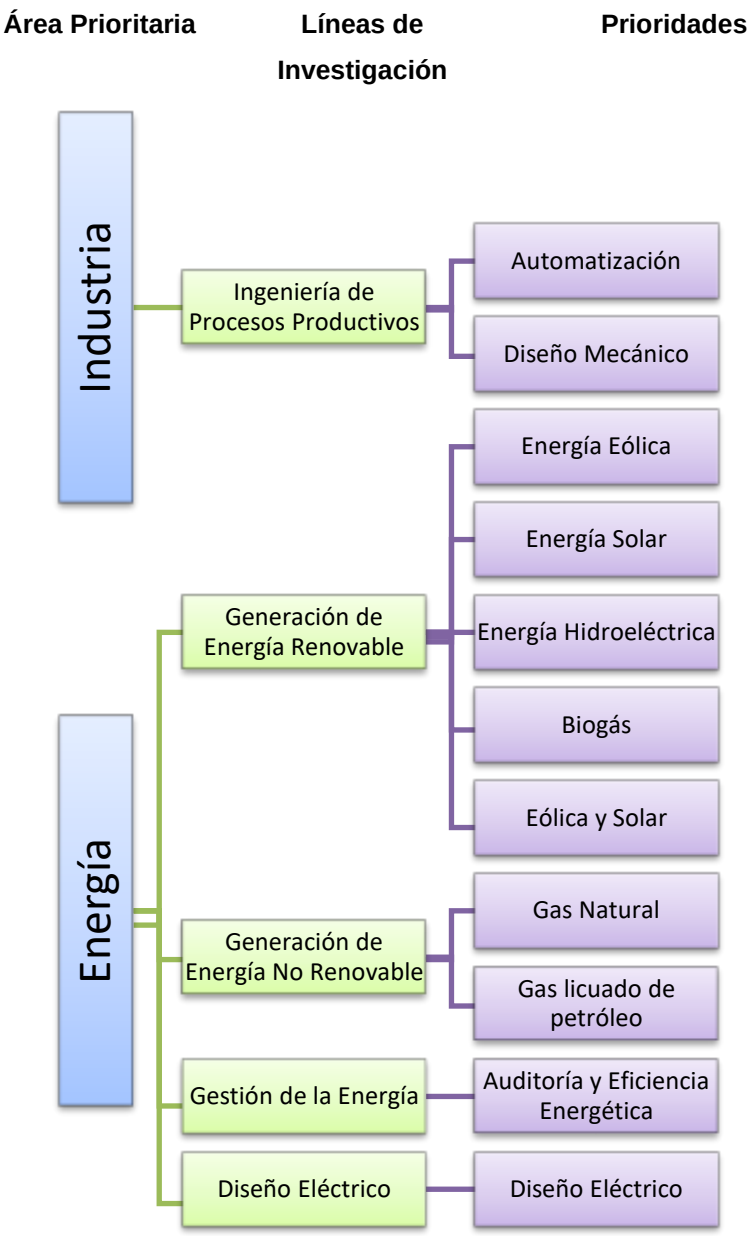
UNE. (2009). *Iluminación de instalaciones deportivos.* UNE.

Wong, M. E. (2015). *Diseño de un aerogenerador vertical Savonius-curvado para ensayos experimentales con velocidades de 4 m/s a 8 m/s.* Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

ANEXOS

ANEXO N° 1

Mapa de Investigación de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Señor de Sipán (USS)



ANEXO N° 2

Código de Ética del Colegio de Ingenieros del Perú (CIP)

CÓDIGO DE ETICA DEL CIP

APROBADO EN LA III SESIÓN ORDINARIA DEL CONGRESO NACIONAL DE CONSEJOS DEPARTAMENTALES DEL PERÍODO 1998 - 1999
EN LA CIUDAD DE TACNA 22, 23 Y 24 ABRIL 1999

ANEXO N° 3

Código de Ética de Investigación de la USS – Continuación

USS | UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN

www.uss.edu.pe

CÓDIGO DE ÉTICA DE INVESTIGACIÓN DE LA USS

VERSIÓN 03

RATIFICADO POR ACUERDO DE CONSEJO UNIVERSITARIO CON RESOLUCIÓN RECTORAL N° 0851-2017/USS

CHICLAYO - PERÚ

Versión: 03	Código: VRI-CE	F. Implementación:	Página 1 de 29
Elaborado por: Dirección de Investigación	Revisado por: Planificación y Desarrollo Institucional – Asesoría Legal		Ratificado con Resolución Rectoral N° 0851-2017/USS

ANEXO N° 4

Datos técnicos de reflectores utilizados

CRI (Ra>):	70
Curso de la vida de ...	50000
Marca:	YMY
Uso:	Estadios deportivos, almacén, suelo, construcción
Nombre del produc...	Reflector Led
Palabra clave:	Reflector LED impermeable IP66 exterior
Tipo de:	Luz de inundación Led para exteriores con ahorro de energía
Nombre del artículo:	Luz de inundación Led impermeable al aire libre
Material del cuerpo...	De aluminio
Certificación:	CCC, CE, LVD, Rohs
Flujo luminoso de l...	120lm/w
Temperatura de tra...	-35-65
Lugar del origen:	Shandong, China
Número de Modelo:	YMY-0914D
Garantía (año):	3-año
Aplicación:	Al aire libre
Temperatura de Co...	1800-6500 K
LED Chip:	HC SEMITEK (personalizable)
Conductor:	Cerficied los conductores
Clasificación IP:	IP66
Fuente de luz:	LED

ANEXO N° 4

Especificaciones técnicas de turbina Savonius "P"

Especificaciones para turbina Savonius "P"	
Potencia Nominal	5 kW
Máxima potencia de salida	6 kW
Voltaje de salida	220 V
Altura del rotor	2 m
Diámetro del rotor	1 m
Velocidad de arranque del viento	1 m/s
Eficiencia de la turbina	> 96

ANEXO N° 5

Especificaciones técnicas del inversor propuesto

Modelo		Inversor puro 5000W
Entrada	Voltaje DC	12V / 24V / 48V
	Rango de voltaje	11-15V DC o 22-30VDC
	Sin consumo de corriente de carga	1A
	Eficiencia	85%
	Conector DC	Cables con clips
Salida	Voltaje de corriente alterna	100/110 / 120VAC o 220/230/240 VAC
	Poder continuo	5000W
	Fuerza de sobretensión	10000W
	Forma de onda	Onda sinusoidal pura
	Frecuencia	50Hz o 60Hz
	THD	3%
Proteccion	Alarma de bajo voltaje	DC10.2-10.8V or20.4
	Apagado de bajo voltaje	9.5DC o 19.5DC
	Sobre carga	Salida apagada
	Apagado por sobretensión	15.5V o 30.5V
	Sobre termal	Cierre la salida automáticamente
	Fusibles	Cortocircuito
Ambiente	Temperatura de trabajo	Entre -10 y +50
	Humedad de trabajo	10% ~ 90% de HR
	Temperatura de almacenamiento	Entre -20 y +50
Otro	comienzo	Inicio suave
	Formas de refrigeración	Ventilador