

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica

Tesis

**Diseño de un vawt savonius para recolectar energía
eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector
de Quebrada Honda - Huancayo**

Juan Adalberto Aparicio Romero
Nikolas Andonni Meza Allpas
Priker Roland Núñez Flores

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Mecánico

Huancayo, 2022

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres, por su apoyo incondicional.

A nuestros hermanos, que siempre nos brindaron su apoyo en buenas o malas condiciones.

A la escuela académico profesional de Ingeniería Mecánica de la Universidad Continental, a los ingenieros de carrera por transmitirnos sus conocimientos, a nuestros compañeros de carrera y en general a todas las personas que de alguna manera nos apoyaron a cumplir con este objetivo que es un paso muy importante en nuestra vida profesional.

DEDICATORIA

A Dios, por guiar mi camino.

A mis padres, por brindarme su apoyo para lograr mis objetivos.

Juan

A Dios, por haberme brindado una hermosa familia, quienes depositaron en mí valores y mucho deseo de superación.

Nikolas

A mis padres, que se esforzaron en brindarme todo lo necesario para lograr mis metas.

Priker

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| AGRADECIMIENTOS..... | ii |
| DEDICATORIA | iii |
| ÍNDICE | iv |
| ÍNDICE DE TABLAS | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | viii |
| RESUMEN..... | x |
| ABSTRACT | xi |
| INTRODUCCIÓN..... | xii |
| CAPÍTULO I..... | 14 |
| PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO | 14 |
| 1.1. Planteamiento y formulación del problema..... | 14 |
| 1.1.1. Descripción de la situación problemática | 14 |
| 1.1.2. Formulación del problema..... | 16 |
| 1.1.2.1. Problema general | 16 |
| 1.1.2.2. Problemas específicos | 16 |
| 1.2. Objetivos de la investigación | 16 |
| 1.2.1. Objetivo general..... | 16 |
| 1.2.2. Objetivos específicos..... | 16 |
| 1.3. Justificación e importancia de la investigación | 17 |
| 1.3.1. Importancia de la investigación | 17 |
| 1.3.2. Viabilidad de la investigación | 17 |
| 1.4. Alcance del estudio..... | 18 |
| 1.5. Limitaciones del estudio | 18 |
| 1.6. Variables | 18 |
| 1.6.1. Variable independiente | 18 |
| 1.6.2. Variable dependiente..... | 18 |
| 1.6.3. Operacionalización de variables | 20 |
| CAPÍTULO II | 21 |
| MARCO TEÓRICO..... | 21 |
| 2.1. Antecedentes de la investigación | 21 |
| 2.1.1. Antecedentes internacionales | 21 |
| 2.1.2. Antecedentes nacionales..... | 22 |
| 2.2. Bases teóricas..... | 23 |
| 2.2.1. Generalidades | 23 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| 2.2.1.1. | Cómo se genera el viento..... | 23 |
| 2.2.1.2. | Energía eólica en el Perú..... | 24 |
| 2.2.1.3. | Energía eólica en Huancayo..... | 25 |
| 2.2.1.4. | Tráfico de vehículos en la vía del sector de Quebrada Honda, Huancayo 26 | |
| 2.2.1.5. | Medidas vehiculares..... | 28 |
| 2.2.1.6. | Aerogenerador..... | 28 |
| 2.2.1.7. | Turbina de viento de eje vertical (VAWT)..... | 29 |
| 2.2.1.8. | Estelas de vientos en las vías..... | 31 |
| 2.2.1.9. | Flujos de viento que inciden en los vehículos..... | 36 |
| 2.2.1.10. | Potencia que entrega el viento..... | 37 |
| 2.2.1.11. | Límite de Betz..... | 39 |
| 2.2.1.12. | Coeficiente de potencia..... | 39 |
| 2.2.2. | VAWT Savonius..... | 40 |
| 2.2.2.1. | Parámetros geométricos..... | 42 |
| 2.2.2.2. | Parámetros aerodinámicos..... | 52 |
| 2.3. | Definición de términos básicos..... | 57 |
| 2.3.1. | Definiciones básicas..... | 57 |
| 2.3.2. | Lista de símbolos..... | 57 |
| CAPÍTULO III..... | | 59 |
| METODOLOGÍA..... | | 59 |
| 3.1. | Método, tipo y alcance de la investigación..... | 59 |
| 3.1.1. | Método de investigación..... | 59 |
| 3.1.2. | Tipo de investigación..... | 60 |
| 3.1.3. | Nivel de investigación..... | 60 |
| 3.1.4. | Alcance de la investigación..... | 60 |
| 3.1.5. | Diseño de investigación..... | 60 |
| 3.1.6. | Unidad de observación..... | 61 |
| 3.1.7. | Técnicas e instrumentos de recolección de datos..... | 61 |
| 3.1.7.1. | Técnicas de recolección de datos..... | 61 |
| 3.1.7.2. | Instrumentos de recolección de datos..... | 61 |
| 3.1.8. | Procedimiento de recolección de datos..... | 62 |
| 3.2. | Materiales y métodos..... | 62 |
| 3.2.1. | Fases de la metodología..... | 63 |
| 3.2.1.1. | Lista de exigencias..... | 63 |
| 3.2.1.2. | Estructura de funciones..... | 63 |

| | | |
|---|---|-----|
| 3.2.1.3. | Matriz morfológica | 63 |
| 3.2.1.4. | Conceptos de solución | 63 |
| 3.2.1.5. | Concepto de solución óptima | 63 |
| 3.2.1.6. | cálculos | 64 |
| 3.2.2. | Desarrollo de aplicación de método | 64 |
| 3.2.2.1. | Secuencia de desarrollo de la metodología | 64 |
| 3.2.2.2. | Lista de exigencias | 64 |
| 3.2.2.3. | Estructura de funciones | 67 |
| 3.2.2.4. | Matriz morfológica | 70 |
| 3.2.2.5. | Conceptos de solución | 72 |
| 3.2.2.6. | Conceptos de solución óptima | 74 |
| 3.2.2.7. | Cálculos y selección de componentes | 77 |
| CAPÍTULO IV | ..... | 92 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | ..... | 92 |
| 4.1. Presentación de resultados | ..... | 92 |
| 4.1.1. Tablas | ..... | 93 |
| 4.1.2. Resultado del diseño de álabes | ..... | 94 |
| 4.1.3. Análisis de los resultados | ..... | 94 |
| 4.1.3.1. Análisis CFD del VAWT Savonius | ..... | 94 |
| 4.1.3.2. Analisis FEA del eje propulsor del VAWT Savonius | ..... | 96 |
| 4.2. Discusión de los resultados | ..... | 97 |
| 4.3. Aportes y aplicaciones | ..... | 98 |
| CONCLUSIONES | ..... | 99 |
| LISTA DE REFERENCIAS | ..... | 100 |
| ANEXOS | ..... | 102 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Matriz morfológica | 19 |
| Tabla 2. Operacionalización de variables..... | 20 |
| Tabla 3. Principales parques eólicos con HAWT en Perú | 25 |
| Tabla 4. Cantidad de vehículos que se mueven por la vía de Quebrada Honda | 27 |
| Tabla 5. Medidas vehiculares..... | 28 |
| Tabla 6. Ventajas y desventajas de los VAWT..... | 31 |
| Tabla 7. Principales VAWT..... | 31 |
| Tabla 8. Estimaciones de primera iteración de los factores de concentración Kt y Kts | 52 |
| Tabla 9. Tabla para determinar la cantidad promedio de vehículos | 62 |
| Tabla 10. Tabla para determinar la velocidad de viento promedio | 62 |
| Tabla 11. Recolección de datos del anemómetro | 62 |
| Tabla 12. Lista de exigencias..... | 65 |
| Tabla 13. Matriz morfológica del VAWT Savonius | 71 |
| Tabla 14. Evaluación de conceptos de solución - valor técnico | 74 |
| Tabla 15. Evaluación de concepto de solución - valor económico | 75 |
| Tabla 16. Estimaciones de primera iteración de los factores de concentración Kt y Kts | 89 |
| Tabla 17. Datos obtenidos para el cálculo del diámetro mínimo del eje..... | 91 |
| Tabla 18. Datos de la turbina eólica | 93 |
| Tabla 19. Propiedades físicas del eje propulsor del VAWT..... | 93 |
| Tabla 20. Condiciones de operación del eje propulsor del VAWT..... | 93 |
| Tabla 21. Medición de la velocidad de las estelas | 103 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Generación del viento. | 24 |
| Figura 2. Parque eólico con HAWT. | 25 |
| Figura 3. Estudio de campo – contabilización de vehículos | 26 |
| Figura 4. Cantidad de vehículos que circulan por la vía de Quebrada Honda . | 27 |
| Figura 5. Tráfico de vehículos por la vía de Quebrada Honda | 28 |
| Figura 6. Ejemplos de aerogeneradores con turbinas HAWT y turbinas VAW . | 29 |
| Figura 7. Flujos de aire inducido por un vehículo pequeño | 32 |
| Figura 8. Bosquejo de flujo de aire inducido por un vehículo pequeño | 32 |
| Figura 9. Perfil de viento de vehículos pequeños..... | 33 |
| Figura 10. Perfil de viento de vehículos medianos | 34 |
| Figura 11. Flujos de viento inducido por un vehículo grande | 34 |
| Figura 12. Bosquejo de flujo inducido por un vehículo grande | 35 |
| Figura 13. Perfil de viento de un vehículo grande | 36 |
| Figura 14. Flujo laminar que incide en un vehículo menor | 37 |
| Figura 15. Flujo turbulento que incide en un vehículo menor | 37 |
| Figura 16. Área por donde fluye la masa de aire..... | 39 |
| Figura 17. Parámetros básicos de un rotor Savonius: (a) parámetro básico, (b) fuerzas de arrastre y elevación..... | 41 |
| Figura 18. Modelo matemático del coeficiente par (C_T) y coeficiente de potencia (C_P) | 41 |
| Figura 19. Características de las curvas de C_p en función al TSR de varias turbinas eólicas..... | 43 |
| Figura 20. Resumen del TSR óptimo a través del tiempo | 43 |
| Figura 21. C_P versus velocidades del viento de varios AR | 44 |
| Figura 22. Coeficiente de potencia vs TSR para un rotor Savonius helicoidal . | 45 |
| Figura 23. C_P vs TSR en varios OR | 46 |
| Figura 24. Comparación de un rotor Savonius de dos y tres álabes | 47 |
| Figura 25. Efecto de los end plates en el C_P del rotor Savonius | 48 |
| Figura 26. VAWT Savonius con diferentes números de etapas | 49 |
| Figura 27. Rotor Savonius con eje y sin eje | 49 |
| Figura 28. C_P vs. TSR en varios números de Re..... | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 29. Efecto de la intensidad de turbulencia de corriente libre de aire en el CP promedio máximo | 54 |
| Figura 30. CP promedio vs. TSR a $Re = 867,00$ | 54 |
| Figura 31. Constante de gases. | 56 |
| Figura 32. Secuencias de pasos a desarrollar | 64 |
| Figura 33. Black box..... | 67 |
| Figura 34. Estructura de funciones del VAWT Savonius | 70 |
| Figura 35. Alternativa de solución 1 | 72 |
| Figura 36. Alternativa de solución 2 | 73 |
| Figura 37. Alternativa de solución 3 | 73 |
| Figura 38. Captación de aire mediante toberas..... | 74 |
| Figura 39. Diagrama de evaluación técnico – económico según VDI 2225 | 76 |
| Figura 40. Variación del rpm en función a la velocidad de viento de varios rotores Savonius..... | 84 |
| Figura 41. DCL del eje transmisor de potencia | 86 |
| Figura 42. Sensibilidad a la muesca para aceros y aleación de aluminio sometidos a flexión inversa | 89 |
| Figura 43. Sensibilidad a la muesca para aceros y aleación de aluminio sometidos a torsión inversa | 90 |
| Figura 44. Prototipo de solución..... | 94 |
| Figura 45. Análisis CFD del VAWT Savonius helicoidal (Contorno de velocidad - Inlet) | 95 |
| Figura 46. Análisis CFD del VAWT Savonius helicoidal (flujo de aire) | 95 |
| Figura 47. Análisis estático del eje propulsor del VAWT (desplazamiento)..... | 96 |
| Figura 48. VAWT Savonius helicoidal de doble etapa..... | 98 |

RESUMEN

El presente trabajo de investigación titulado “*Diseño de un VAWT Savonius para recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda, Huancayo*”, se inicia con la siguiente incógnita ¿cómo diseñar un *VAWT Savonius* para recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda, Huancayo?, el objetivo principal de esta tesis es impulsar el desarrollo de la energía eólica en la región centro del Perú mediante el diseño de una turbina eólica de eje vertical tipo *Savonius* que aproveche el recurso eólico que existe en la vía del sector de Quebrada Honda. Además, el objetivo general es diseñar un *VAWT Savonius* para recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda, Huancayo para así aprovechar el potencial eólico que existe en la mencionada zona.

En el estudio, el método de diseño empleado fue el método deductivo, el tipo de investigación seleccionado es tecnológica básica, nivel de investigación que se usó es descriptivo, ya que se logró describir el comportamiento de la turbina eólica bajo las condiciones de trabajo, el diseño de investigación elegido es descriptivo simple, donde el *VAWT Savonius* es la unidad de observación, la técnica de recolección de datos que se usó fue la técnica empírica, porque permite tener un contacto directo. Teniendo como resultado el diseño de una turbina eólica que se beneficiará del recurso eólico de la zona.

Palabras claves: diseño, Huancayo, Quebrada Honda, *Savonius*, turbina eólica, VAWT

ABSTRACT

The present research work entitled "Design of a Savonius VAWT to collect wind energy from vehicles that travel along the Quebrada Honda sector, Huancayo", begins with the following question: how to design a Savonius VAWT to collect wind energy? of vehicles that travel along the Quebrada Honda sector, Huancayo?, the main objective of this thesis is to promote the development of wind energy in the central region of Peru through the design of a Savonius-type vertical axis wind turbine that Take advantage of the wind resource that exists on the road in the Quebrada Honda sector. In addition, the general objective is to design a Savonius VAWT to collect wind energy from vehicles that travel along the Quebrada Honda sector, Huancayo, to take advantage of the wind potential that exists in the area.

In the study, the design method used was the deductive method, the type of research selected is basic technology, the level of research used is descriptive, since it was possible to describe the behavior of the wind turbine under working conditions, the chosen research design is simple descriptive, where the VAWT Savonius is the observation unit, the data collection technique used was the empirical technique, because it allows direct contact. Resulting in the design of a wind turbine that will benefit from the wind resource in the area.

Keywords: design, Huancayo, Quebrada Honda, Savonius, VAWT, wind turbine

INTRODUCCIÓN

En el Perú existe una gran cantidad de vías por donde se desplazan vehículos de todas las categorías a diferentes velocidades, generando así unas estelas de viento, este fenómeno se manifiesta cuando una persona circula en la vía o a sus alrededores con la sensación de viento de gran intensidad que dura segundos después de pasar el vehículo. Entonces, vale la pena considerar si una parte de esta energía cinética de aire generada por los vehículos puede ser usada en la generación de energía mecánica y, por qué no, transformarla en electricidad para suministrar a la red nacional de electricidad o energizar las señaléticas de las vías.

La intención de este trabajo de investigación es diseñar una turbomáquina que pueda transformar la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación. En el Perú no existen estudios desarrollados en el que se pretenda aprovechar la energía generada por los vehículos, aplicando la tecnología del VAWT (*vertical axis wind turbine*). Si bien es cierto son aerogeneradores de bajo rendimiento en comparación con los muy estudiados HAWT (*horizontal axis wind turbine*), pero los VAWT suelen ser muy productivos si se les ubica en zonas de alta turbulencia y si se les modifica los parámetros geométricos.

Como se mencionó en el párrafo anterior, las turbinas eólicas de eje vertical son ineficientes siempre y cuando no sean instaladas en zonas con viento de gran intensidad, teniendo como base esta restricción, en este estudio se realizó el análisis, selección y diseño de un VAWT tipo *Savonius*, ya que este es el que mejor se adapta para las condiciones de trabajo de la vía del sector de Quebrada Honda, Huancayo; el diseño de un VAWT *Savonius* basado en las recomendaciones de especialistas en la materia permitirá aprovechar las estelas de viento de los vehículos que se desplazan por la vía de la carretera central en el sector de Quebrada Honda en la ciudad de Huancayo, para así generar energía mecánica rotacional, con esta investigación se pretende impulsar el desarrollo de energías renovables en el Perú y la región centro, ya que estas no afectan al medio ambiente.

Esta tesis se desarrolló en cuatro capítulos:

En el capítulo I se fundamenta el planteamiento del estudio mediante la descripción de la situación problemática y la formulación del problema, además definiendo los objetivos generales y los objetivos específicos.

En el capítulo II se presenta el marco teórico de la tesis, basándose al planteamiento del estudio, bases teóricas, antecedentes del problema y la definición de los términos básicos.

En el capítulo III se trata sobre los aspectos metodológicos del trabajo de investigación, que tiene el enfoque de la VDI (Asociación Alemana de Ingenieros). VDI 2221-2225 con la mención de MÉTODO GENERALIZADO DE PROCEDIMIENTO EN EL PROCESO DE DISEÑO, es el documento de donde se extrajeron las pautas que dan la estructura y relación al plan metodológico de diseño.

El capítulo IV contiene la presentación, análisis y discusión de los resultados de la investigación, esto gracias a la simulación realizada con la dinámica computacional de fluidos (CFD) y el análisis de elementos finitos (FEA), además de los aportes y aplicaciones desarrolladas.

Para finalizar, se presentan las conclusiones, la lista de referencias y los anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

Este capítulo fundamenta el diseño del estudio del proyecto de tesis mediante la descripción de la situación problemática y la formulación del problema, además, se definen los objetivos generales y específicos de la investigación de tipo tecnológica.

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Descripción de la situación problemática

La generación de energía mecánica de rotación que proviene del viento o energía eólica es una fuente de energía alternativa que, a diferencia de otras formas convencionales de generación, no tiene un impacto negativo en el medio ambiente. Sin embargo, para obtener energía mecánica de rotación a partir del viento se requieren flujos de aire constante para ser aprovechado por los sistemas eólicos.

El Perú cuenta con una gran red de vías nacionales que sirve para el transporte de productos, personas y desarrollo monetario; por el sur está la Panamericana sur que va desde Lima hasta la frontera con Chile con 1234,52 km de longitud; por la costa norte está la Panamericana norte que va desde Lima hasta la frontera con Ecuador con 1141,30 km de longitud; la carretera Interoceánica que atraviesa la parte central de Sudamérica, conectando el océano Atlántico en Brasil con el océano

Pacífico en Perú con 2600 km de longitud, la vía de la carretera central que conecta a la capital del Perú con los departamentos de Huánuco, Cerro de Pasco y Junín con 173,7 km de longitud, etc.

“La zona de Quebrada Honda de la carretera central es una de las vías importantes para el acceso a la ciudad incontrastable de Huancayo, en donde existe un flujo continuo de vehículos que transportan a la población que llegan y salen de la metrópoli de Huancayo por motivos laborales, académicos, recreativos, etc. Estos vehículos, que en su mayoría son vehículos para el transporte de pasajeros y mercaderías, generan congestión y caos vehicular” (1). “En la ciudad de Huancayo el parque automotor se ha incrementado, generando mayor circulación de vehículos. Los aforos viales han sido rebasados por la cantidad de vehículos que circulan. Tal es así que más de 12 mil vehículos son colectivos, taxis y particulares, declinando más el tránsito, así indicó el gerente de Transporte y Tránsito de la municipalidad de Huancayo, Eduardo Reyes” (1).

La velocidad con la que circulan los automóviles producen movimiento en el aire tipo torbellino, así un volumen de aire intenta de llenar el vacío que deja otro volumen de aire que ha sido desplazado por los vehículos en movimiento, generando estelas de viento; esto se manifiesta con una fuerza aerodinámica que se puede apreciar y sentir cuando se está dentro de un vehículo o muy cerca de la vía, se puede mencionar que cierta cantidad de la energía cinética del viento producida por los vehículos en marcha tiene la posibilidad de ser aprovechado y utilizado para generar energía mecánica de rotación.

Por lo tanto, se considera firmemente, en una nueva tecnología para la región y que sea una energía disyuntiva que ayude a conservar el medio ambiente con en el diseño de un aerogenerador de eje vertical, este sistema aprovechará las estelas de viento de los vehículos que viajan a elevadas velocidades por la vía para generar energía eléctrica.

Para la recolección de energía eólica en la vía del sector de Quebrada Honda, existen condiciones de alto flujo y velocidad de vehículos para poder aprovechar las estelas de viento con flujo turbulento, por otro lado, también existen problemas geométricos para instalar un aerogenerador de grandes magnitudes, es por lo que se analiza el *VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) Savonius* que es el que más se acerca a las condiciones de análisis de esta investigación.

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema general

¿Cómo diseñar un *VAWT Savonius* para recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda, Huancayo?

1.1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo diseñar la estructura y soporte del *VAWT Savonius*?
- ¿Cómo seleccionar el *VAWT Savonius* que mejor se ajuste a las condiciones de trabajo en la vía del sector de Quebrada Honda?
- ¿Cómo determinar los límites máximos y mínimos de la velocidad de viento que ingresan al *VAWT Savonius*?

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

Diseñar un *VAWT Savonius* para recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda, Huancayo.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar el *VAWT Savonius* aplicando la metodología de la Asociación Alemana de Ingenieros (VDI).
- Diseñar la estructura y el soporte del *VAWT Savonius*.
- Seleccionar el *VAWT Savonius* que mejor se ajuste a las condiciones de trabajo en la vía del sector de Quebrada Honda.

- Determinar los límites máximos y mínimos del flujo de aire que son requeridos por el *VAWT Savonius*.
- Determinar el tipo de material del *VAWT Savonius* que mejor se ajuste a las condiciones de trabajo.

1.3. Justificación e importancia de la investigación

1.3.1. Importancia de la investigación

Esta investigación impulsará el desarrollo de la energía eólica en la región centro y en el Perú; además, con la aplicación de esta tecnología se mejorará la realidad de la región centro, porque aún no existe tecnología que transforme la energía cinética de las estelas de viento que generan los vehículos en marcha en energía mecánica de rotación mediante aerogeneradores de eje vertical en el Perú; entonces, la idea de los *VAWT Savonius* es aprovechar la energía cinética del viento que generan los vehículos que se desplazan a altas velocidades, y esto se logrará con la ubicación del *VAWT Savonius* al costado o al centro de la vía.

Esta investigación es importante e innovadora para la región centro, porque permitirá brindar un conocimiento de las energías alternativas, ya que la tecnología que trae este tipo de energía está encaminada a la conservación del medio ambiente.

1.3.2. Viabilidad de la investigación

La investigación se basa en un desarrollo tecnológico que tiene por finalidad el diseño de un módulo, es por lo que se requiere de herramientas tecnológicas como un software de diseño que está al alcance de los investigadores.

Los aerogeneradores de eje vertical cuentan con muchas investigaciones desarrolladas, artículos científicos, que son citados en esta investigación y serán las directrices para su desarrollo.

Los integrantes de esta investigación aplicaron los conocimientos adquiridos en la universidad para el desarrollo del diseño del *VAWT Savonius*.

La investigación tuvo una duración de, aproximadamente, 6 meses en el 2021, para la ejecución de todos los procesos de investigación.

1.4. Alcance del estudio

- Predecir el comportamiento del *VAWT Savonius* sometido a las condiciones de trabajo, mediante un análisis de elementos finitos (FEM).
- Se pretende generar la mayor cantidad de energía posible con el flujo de aire que se encuentre en la zona de Quebrada Honda.
- Calcular la fuerza del viento necesaria para generar un torque de arranque del *VAWT Savonius*.

1.5. Limitaciones del estudio

Las limitaciones del estudio fueron:

- Ausencia de investigaciones sobre el flujo de aire en la ciudad de Huancayo.
- Se considera solo el diseño y no la construcción del *VAWT Savonius*.
- No existen estudios sobre aerogeneradores de eje vertical instalados en las vías de la ciudad de Huancayo.
- La generación de energía mecánica del *VAWT* tipo *Savonius* está en función al flujo de vehículos, a su velocidad y a su forma.
- No existe información nacional de cuánto flujo de aire genera cada categoría de vehículo.

1.6. Variables

1.6.1. Variable independiente

Diseño de un *VAWT Savonius*

1.6.2. Variable dependiente

Recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda en Huancayo.

Tabla 1. Matriz morfológica

| Problema principal | Objetivo principal | Hipótesis principal | Operacionalización de variables |
|---|---|--|--|
| <p>¿Cómo diseñar un VAWT Savonius para recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda en Huancayo?</p> | <p>Diseñar un VAWT Savonius para recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda en Huancayo.</p> | <p>El diseño del VAWT Savonius logrará recolectar energía eólica de vehículos por la vía del sector de Quebrada Honda en Huancayo.</p> | <p>X: diseño de un VAWT Savonius</p> <p>X1: diseñar el VAWT Savonius aplicando la metodología de la Asociación Alemana de Ingenieros (VDI).</p> <p>X2: diseñar la estructura y el soporte del VAWT Savonius.</p> <p>X3: seleccionar el VAWT Savonius que mejor se ajuste a las condiciones de trabajo en la vía del sector de Quebrada Honda en Huancayo.</p> <p>X4: determinar los límites máximos y mínimos del flujo de aire que son requeridos por el VAWT Savonius.</p> <p>X5: determinar el tipo de material del VAWT Savonius que mejor se ajuste a las condiciones de trabajo.</p> <p>Y: recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda en Huancayo.</p> |

1.6.3. Operacionalización de variables

Tabla 2. Operacionalización de variables

| Variable independiente | Definición conceptual | Dimensión | Indicador |
|---|--|--|---|
| Diseño de un VAWT Savonius | Idea innata de una turbomáquina que mediante la metodología VDI 2222 permite tener un concepto de solución óptima. | Dimensiones de estructura del VAWT | Lista de exigencias |
| | | Cantidad de álabes | Matriz morfológica |
| | | Ubicación del VAWT | Evaluación técnico-económica |
| | | | Distancia de los vehículos respecto al VAWT |
| | | | Altura del VAWT respecto al suelo |
| Variable dependiente | Definición conceptual | Dimensión | Indicador |
| Recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda en Huancayo | Proceso innovador para la región que permite aprovechar las estelas de viento generados por los vehículos en marcha. | Cantidad de viento generado por cada vehículo | Velocidad de los vehículos |
| | | Tráfico de vehículos en la vía de Quebrada Honda en Huancayo (cantidad de vehículos) | Geometría de los vehículos |
| | | | Tiempo de duración de la estela de viento |
| | | | Parque automotor en Huancayo |
| | | | Capacidad vial de la carretera |

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta al marco teórico de la tesis, tomando como referencia al planteamiento de estudio que se realizó en el capítulo anterior, poniendo énfasis en las bases teóricas, antecedentes del problema y la definición de los términos básicos de la presente investigación tecnológica.

2.1. Antecedentes de la investigación

En la actualidad se están desarrollando proyectos referentes a energía eólica y aerogeneradores. Por la contaminación ambiental y por los escasos recursos se han visto interesados en desarrollar proyectos tecnológicos, utilizando las energías renovables como fuente de poder.

2.1.1. Antecedentes internacionales

En la investigación "*Diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical para un sistema de iluminación de emergencia con luces LED*" (2), se menciona que este aerogenerador helicoidal tiene 2 metros de altura y 1.20 metros de ancho diseñado en base al motor Amp Flow p40-500 que trabaja con un flujo de aire a una velocidad media de 24 km/h, produce una potencia de 112 W, que representa una eficiencia del 38 % de la capacidad máxima del motor, con lo cual es suficiente para cargar el banco de baterías instalado y mantener el sistema de alumbrado de

emergencia operativo en todo momento. También da un dato muy importante de cómo seleccionar un motor (2).

En la investigación “*Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico*” (3), se menciona que el diseño completo (mecánico, eléctrico y electrónico) de un aerogenerador de eje vertical *Savonius* con una altura aproximada de 2 m y un circuito electrónico que adapta y estabiliza la tensión a 5 V entrega potencia eléctrica de baja tensión entre 3 W y 6 W, que representa entre el 1 % y el 2 % del promedio de gasto energético de un hogar en electricidad, esto permite tener la posibilidad de cargar entre 3,8 y 7,5 teléfonos móviles al día (3).

En la investigación “*Numerical simulations of a VAWT in the wake of a moving car*” (4), se realizaron simulaciones con la dinámica de fluidos computacional (CFD) para evaluar los dos factores principales que influyen en el rendimiento de una turbina de eje vertical (VAWT) que fue diseñada para ser colocada al costado de un carril y ser activado por la estela de viento de los coches. Las simulaciones confirmaron la viabilidad de este estudio, el VAWT generó como máximo 100,49 J de energía a partir de la estela de un automóvil a 100 kph, además el rendimiento del VAWT tiene una relación directa con la velocidad del automóvil y la brecha entre el automóvil y el VAWT (4).

2.1.2. Antecedentes nacionales

En la investigación “*Perfil de un aerogenerador tipo vertical en el edificio de 15 pisos de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, 2018*” (5), se menciona que el edificio de 15 pisos de la UNAP es el más grande de la ciudad de Puno y tiene una altura de 74 m, y es ideal para la implementación del aerogenerador, finalmente, concluyen que el número total de aerogeneradores a implementarse deberá ser 5 con 3,681 kW de potencia cada uno para producir una potencia total de 18,4 kW, cabe mencionar que se podría implementar más módulos para aumentar la potencia de generación y así poder cubrir la demanda total requerida por el edificio (5).

En la investigación “*Captación de aire mediante toberas que genere la mayor cantidad de energía eólica en Huancayo, Perú, 2017*” (6), se demuestra que con una velocidad de 13,5 m/s en la garganta del túnel del convertidor eólico HAWT con captación de aire mediante toberas se logra 1,2 kW generando así 6 veces más energía que el convertidor eólico HAWT en situaciones atmosféricas similares e igualdad en el área de barrido (25m²) y la altura de instalación (20 m); además, el captador eólico cuenta con 16 divisiones, que le permite captar flujos de viento multidireccionales, reemplazando al sistema de dirección del HAWT (6).

En la investigación “*Diseño del rotor de un aerogenerador vertical tipo Savonius para la localidad de Tanaka, Arequipa, Perú, 2020*” (7), se menciona que la capacidad del rotor de un aerogenerador tipo *Savonius* está dada por dos factores y son la rugosidad del terreno y la velocidad del viento, cabe destacar con una altura de instalación del aerogenerador de 6 a 10 metros la capacidad máxima teórica es de 8000 watts con una velocidad de viento de 10 m/s, cuando suceda esto, el rotor estará girando a 10 rpm, todo esto según se ha encontrado en la formas teóricas de dicho trabajo de investigación (7).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Generalidades

2.2.1.1. Cómo se genera el viento

El Sol brinda generalmente dos tipos de energía, energía calorífica o energía luminosa, estas llegan a todos los rincones del globo terráqueo, pero no lo realiza de una manera uniforme, por ende, la superficie del globo terráqueo no se calienta homogéneamente. El viento es el efecto de las diferencias de presión atmosféricas provocadas por el calentamiento heterogéneo de la tierra y las masas de aire, existe aire caliente que se produce sobre todo cerca de la línea ecuatorial que es la parte donde más incidencia tiene el sol, este aire caliente que es más liviano que el aire frío tiende a subir generando un vacío, este vacío es ocupado

por el aire frío, por lo tanto, se genera movimiento de las masas de aire conocidas como viento.

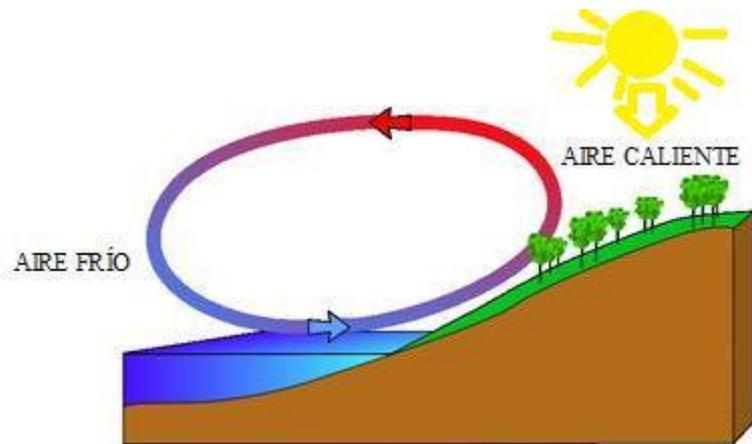


Figura 1. Generación del viento. Tomada de <https://n9.cl/37ab6>

2.2.1.2. Energía eólica en el Perú

El Perú tiene un gran potencial eólico por la costa, porque se generan vientos en todo el litoral de baja presión atmosférica (ciclón de la costa norte) en Piura y la zona de alta presión (anticiclón del Pacífico sur) cerca de la línea ecuatorial, en estas zonas se genera diferencias de presión, debido al cambio de temperaturas de los vientos, provocando así el desplazamiento de colosales masas de aire con más incidencia en la costa peruana. “De acuerdo al mapa eólico del país elaborado en el 2008 por la empresa Telemática y Consorcio *Meteosim Trweind-Latin Bridge Business*, los departamentos que registran los vientos más propicios para generar electricidad eólica son Ica (potencia eólica 9.144 MW), Piura (7.554), Cajamarca (3.450), Arequipa (1.158) y Lambayeque (564)” (6).



Figura 2. Parque eólico con HAWT. Tomada de <https://n9.cl/6lihu>

Tabla 3. Principales parques eólicos con HAWT en Perú

| Proyectos de aerogeneradores con HAWT en el Perú | Número de aerogeneradores | Inversión (millones US\$) |
|--|---|---------------------------|
| Central eólica San Juan de Marcona (Ica) | 11 aerogeneradores (8 x 3.15 MW + 3 x 2.3 MW) | 61,1 |
| Central eólica de Talara (Piura) | 17 aerogeneradores de 1,8 MW c/u | 101 |
| Central eólica de Cuspinique (La Libertad) | 45 aerogeneradores de 1,8 MW c/u | 242 |

Nota: tomada de www.osinergmin.gob.pe, 2021

2.2.1.3. Energía eólica en Huancayo

La incontrastable ciudad de Huancayo se encuentra a 3.249 m s. n. m., es una ciudad que tiene un potencial eólico deficiente, debido a la poca velocidad de viento promedio anual. “El periodo donde corren vientos muy fuertes dura 3.9 meses aproximadamente, y comprenden desde el 23 de julio hasta el 18 de noviembre, alcanzando velocidades hasta más de 9.9 kilómetros por hora. El día que corrieron vientos muy fuertes y alcanzaron una velocidad promedio de 11 kilómetros por hora fue el 4 de setiembre. El periodo de tiempo con vientos calmados tiene una duración de 8.1 meses aproximadamente, y comprende desde el 18 de noviembre hasta 23 de julio. El que tubo vientos moderados fue el 30 de mayo, alcanzando una velocidad de viento promedio de 8.8 kilómetros por hora” (8).

Tabla 4. Cantidad de vehículos que se mueven por la vía de Quebrada Honda

| Tipo de unidad | Cantidad |
|----------------|-------------|
| Auto | 2264 |
| Combi | 541 |
| Camioneta | 510 |
| Coaster | 94 |
| Camión | 196 |
| Bus | 35 |
| Semitrailer | 16 |
| Otros | 25 |
| Total | 3681 |

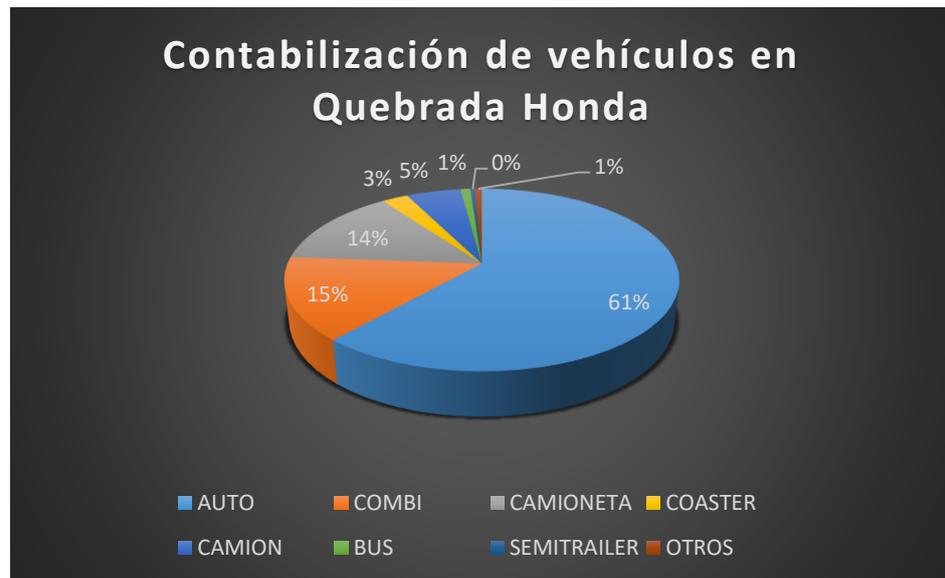


Figura 4. Cantidad de vehículos que circulan por la vía de Quebrada Honda

En la figura se observa que la mayoría de los vehículos que circulan por la vía de Quebrada Honda son los de la categoría autos, representando un 61 % del total de vehículos contabilizados (2.264), estos constituyen 4 veces más que la categoría combi, que representa el 15 % (541), seguida de la categoría camioneta con un 14 % (510), por otro lado, la categoría con menos cantidad de vehículos es semitrailer, representando apenas el 0.001 % (16).



Figura 5. Tráfico de vehículos por la vía de Quebrada Honda

2.2.1.5. Medidas vehiculares

“La ley N.º 27181, ley general de transporte y tránsito terrestre mediante el D. S. N.º 058-2003 aprobado por el MTC, menciona” (9):

Tabla 5. Medidas vehiculares

| Medidas vehiculares | | |
|---------------------|--|----------------------|
| Categoría | Ancho máximo (m) (sin espejos) | Altura máxima (m) |
| N | General | 4.10 |
| M | Carrocería convencional | 3.60 |
| | Carrocería integral | 4.30 |
| O | Compartimento cerrado tipo semirremolque | 4.30 |
| | Transporte de contenedores | 2.60 |
| | Transporte de contenedores de gran volumen (<i>high cube</i>) | 4.60 |

Nota: tomada del Decreto Supremo N.º 058-2003-MTC, 2003

2.2.1.6. Aerogenerador

La energía del aire se considera energía renovable y limpia porque se genera a partir del viento y se encuentra en la naturaleza para su posterior captación por turbomáquinas como los aerogeneradores, estos convierten la energía cinética (aire captado) en energía mecánica (revoluciones), y la turbomáquina (aerogenerador) aprovecha las revoluciones para generar energía

eléctrica. Para la captación de viento (energía cinética) se tiene dos tipos de turbinas, según la orientación existen turbinas de eje horizontal (HAWT) y turbinas de eje vertical (VAWT). Ejes más conocidos y ensayados son los aerogeneradores de eje horizontal que son instalados en los parques eólicos (central eléctrica), son ubicados en grandes extensiones donde existen fuertes corrientes de viento. La mejor dispersión de los HAWT en los parques eólicos donde son distribuidos apropiadamente de turbina a turbina que es fundamental para aprovechar su mejor rendimiento, caso contrario, existirá una mala corriente y velocidad de viento para el aerogenerador por el movimiento de los álabes de otro aerogenerador.

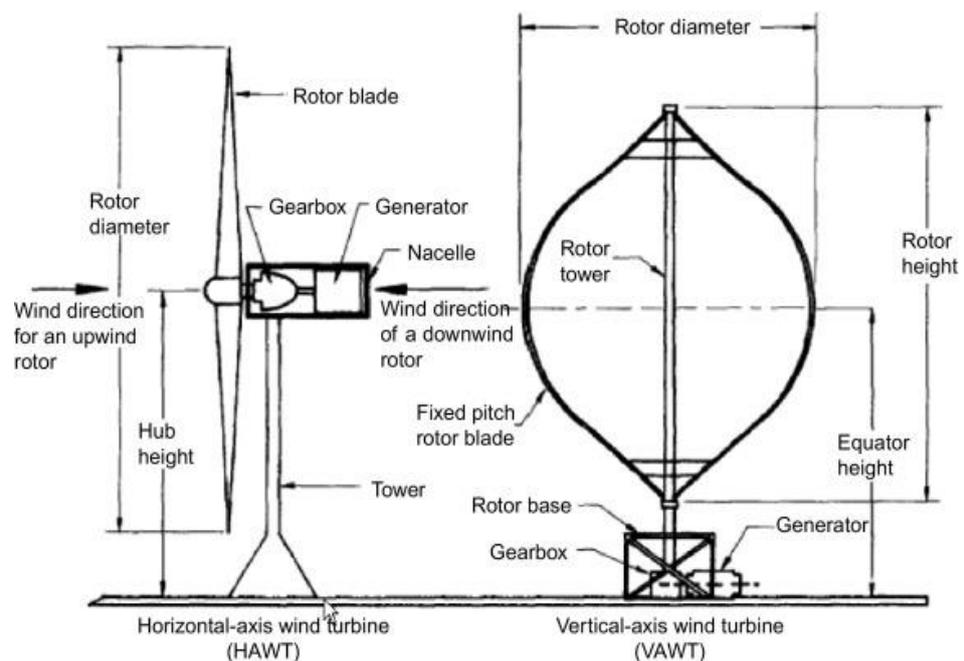


Figura 6. Ejemplos de aerogeneradores con turbinas HAWT y turbinas VAWT. Tomada de <https://n9.cl/5luvu>

2.2.1.7. Turbina de viento de eje vertical (VAWT)

Los VAWT al igual que los HAWT transforman la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación para luego convertir en energía eléctrica, la diferencia es el método de captación de viento, los álabes de los VAWT se encuentran en dirección contraía al viento.

Los diseños de sus álabes generalmente son curvados, el cual le permite captar el flujo del viento de cualquier dirección, esta es una característica común de los VAWT, ya que no es necesario contar con sistemas de orientación.

Los VAWT son eficientes con velocidades bajas del viento, lo cual es adecuado para instalar o implementar en lugares de pocos flujos de viento y sirve para brindar cobertura eléctrica a ciclo de vías, parques, zonas peatonales, paraderos de espera de buses y estaciones, donde exista la limitación de una red eléctrica y no exista servicios de iluminación y no se permite que se le dé otros usos.

Los aerogeneradores que utilizan las turbinas eólicas de eje vertical son los apropiados para suplir a los aerogeneradores que utilizan las turbinas eólicas de eje horizontal, debido a que estos solo serán implementados en parques eólicos, porque necesariamente, los aerogeneradores de eje horizontal deben estar separados a una distancia que no perturben el viento hacia el otro aerogenerador. Por ello, los aerogeneradores de eje vertical lograron un crecimiento exponencial por su eficiencia y facilidad de ser instalados en zonas urbanas, porque estos no requieren demasiado flujo de viento para empezar a girar.

Tabla 6. Ventajas y desventajas de los VAWT

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| No necesitan de un sistema de dirección, pueden recibir flujos de viento de todas direcciones. Funcionan con una menor velocidad de viento y pueden instalarse cerca del suelo aumentando la mantenibilidad. | No aprovechan las corrientes de viento a mayor altura. |
| Son silenciosos a diferencia que los HAWT. | No son confiables, ya que los álabes tienden a romperse o doblarse con fuertes vientos. |
| Pueden ser utilizados en instalaciones de baja potencia. | Son aerogeneradores de baja eficiencia. |

Tabla 7. Principales VAWT

| Principales turbinas eólicas de eje vertical | Características | Ventajas | Desventajas |
|--|--|--|---|
| VAWT <i>Darrieus</i> | Tiene dos o más álabes que giran en torno al eje vertical | No requiere un sistema de orientación. | Elevada velocidad de viento para un torque de arranque inicial. Es necesario cables de acero para tensar y estabilizar este VAWT |
| | Turbina del tipo sustentación | Mediano rendimiento | Compleja geometría |
| VAWT <i>Savonius</i> | Los álabes forman una "S" en una vista de planta | Torque de arranque con baja velocidad de viento. | Bajo rendimiento Poca velocidad de giro |
| | El perfil de alabe es cóncavo Turbina del tipo arrastre | No requiere de un sistema de orientación. | Complicada geometría |

2.2.1.8. Estelas de vientos en las vías

“La velocidad y el flujo del viento es mayor en zonas de alta turbulencia como los edificios altos de las zonas urbanas, en donde la velocidad del viento puede ser amplificado por medio de efectos de canalización entre o a través de los edificios altos, que significaría un aumento de la energía potencial” (10).

“Además, el viento puede amplificarse en las vías de alta velocidad y transpirabilidad por los vehículos que viajan a grandes velocidades, entonces vale la pena considerar si una parte de la energía producida por los vientos inducidos podría ser aprovechada y utilizada para generar electricidad” (11).

Cuando los vehículos pequeños se desplazan hacia adelante, empuja una región de bloque que se produce en la parte frontal del vehículo pequeño. Cuando el vehículo pequeño está en movimiento, en ella se produce una estela triangular, y los límites laterales de la estela son los dos fuertes vórtices contrarrotación. En general, el flujo presente en la estela triangular se mueve en la misma dirección del vehículo pequeño, pero la magnitud de la velocidad cambia con el desplazamiento del vehículo pequeño (12).

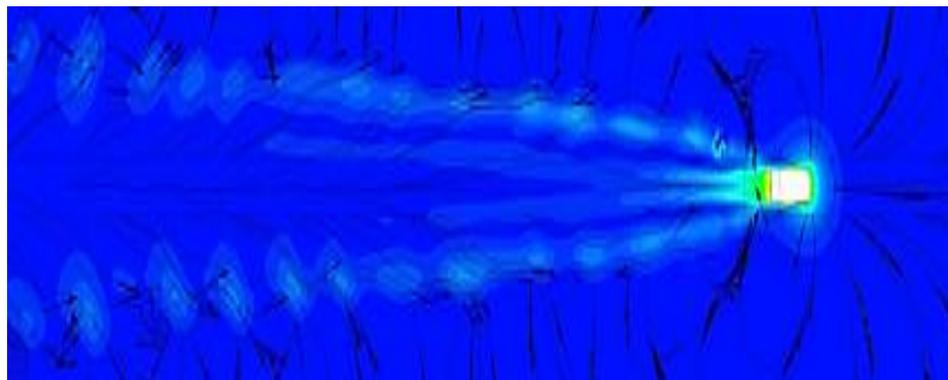


Figura 7. Flujos de aire inducido por un vehículo pequeño (12)

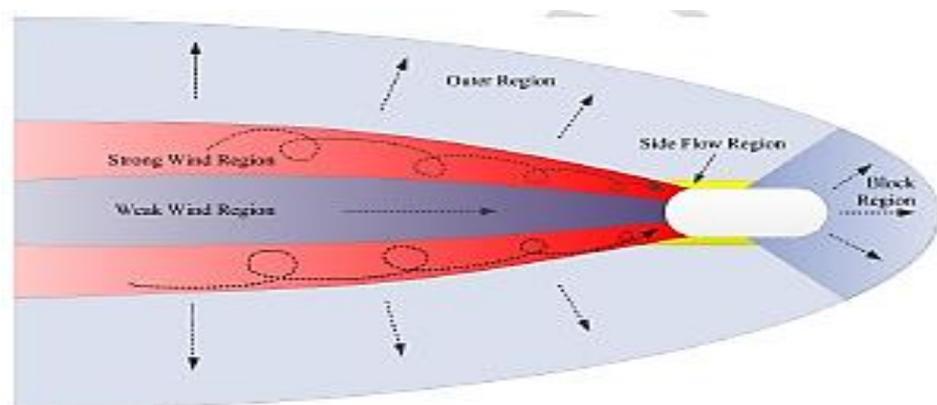


Figura 8. Bosquejo de flujo de aire inducido por un vehículo pequeño (12)

La figura 8 muestra que el flujo alrededor del vehículo pequeño se compone de una zona de bloques antes de que la superficie frontal, una región de flujo lateral adyacente a las superficies laterales, una región de fuerte viento causado por los dos vórtices de contrarrotación, y una región de viento débil directamente aguas abajo de la parte trasera de la superficie del vehículo pequeño. La energía cinética en la estela del vehículo pequeño se almacena principalmente en la región de bloque, la región de flujo lateral, y la fuerte región del viento donde las magnitudes de velocidad son más altos (12).

Se encontró que los vehículos pequeños (Sedan) viajando a 75 mph producían un promedio de cinco mph de velocidad de viento que duraban alrededor de un segundo, con el VAWT ubicado a 4 pies del vehículo (11).

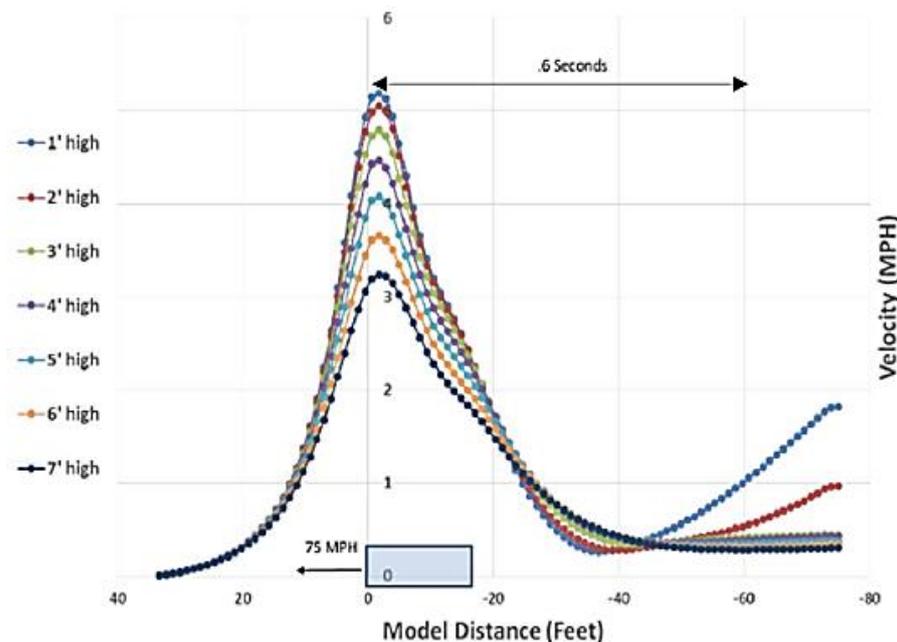


Figura 9. Perfil de viento de vehículos pequeños (11)

Los vehículos más grandes (*Pick up o SUV*) viajando a 75 mph produjeron cerca de ocho mph de velocidad de viento durante aproximadamente un segundo con el VAWT ubicado a 4 pies del vehículo (11).

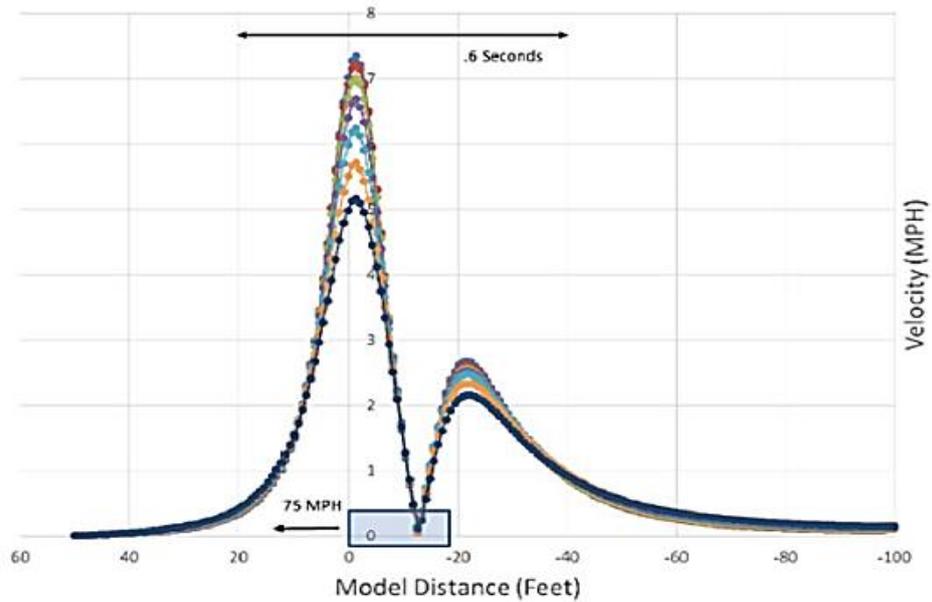


Figura 10. Perfil de viento de vehículos medianos (11)

Cuando los vehículos grandes se mueven hacia adelante, una región de secuencia se produce en la zona delantera del vehículo. Alta velocidad del flujo se observa en ambos lados y la superficie trasera del vehículo grande. La estela lejos del vehículo grande se limita a una región que tiene casi tres veces su ancho, que es muy diferente de la estela expansiva del vehículo pequeño. La velocidad de la corriente abajo del vehículo grande es mayor que la otra parte, que marca otra diferencia con la estela del vehículo pequeño (12).

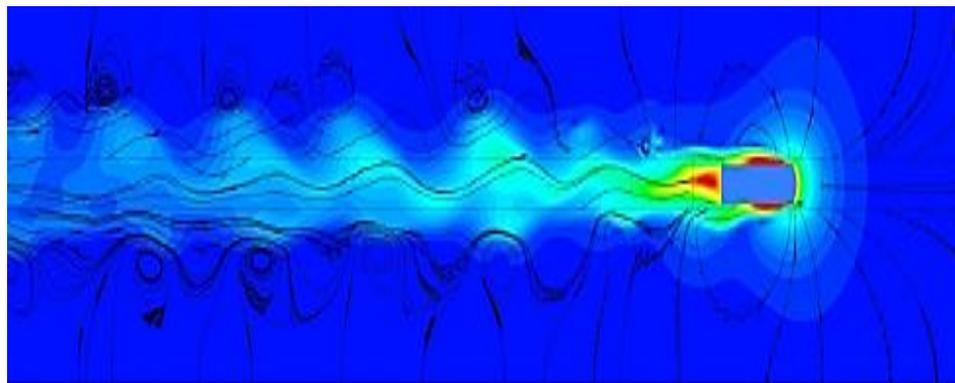


Figura 11. Flujos de viento inducido por un vehículo grande (12)

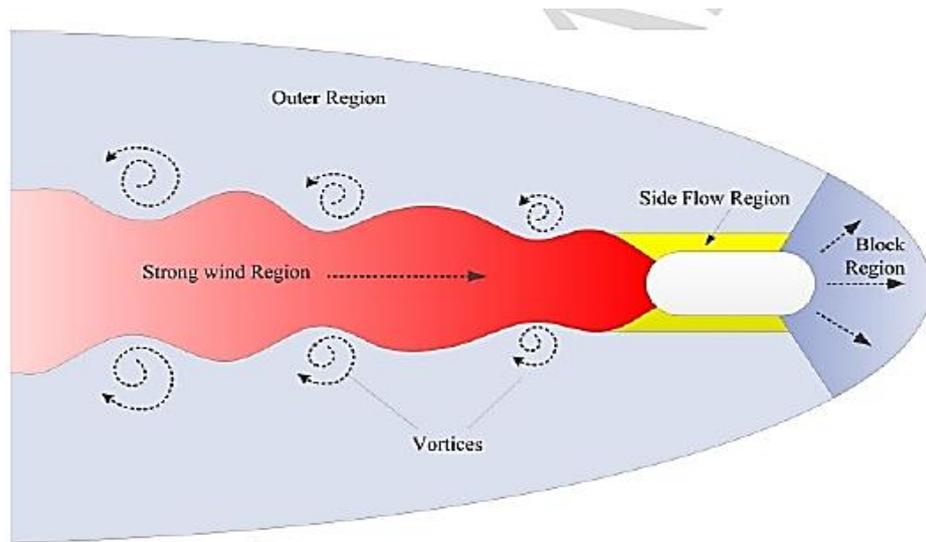


Figura 12. Bosquejo de flujo inducido por un vehículo grande (12)

La figura 12 muestra el flujo alrededor del vehículo grande que se compone de una zona de bloques antes de la superficie frontal, una región de flujo lateral adyacente a las superficies laterales del vehículo grande, una región de fuerte viento directamente aguas debajo de la superficie trasera del vehículo grande, y dos líneas de vórtices contrarrotación. La energía cinética en la estela de los vehículos grandes se almacena principalmente en la región de bloque, la región de flujo lateral, y la región de fuerte viento donde la magnitud de velocidad es más alta (12).

“Los vehículos grandes (camiones o semirremolques) viajando a 75 mph produjeron cerca de cuarenta mph de velocidad de viento durante casi 4 segundos, con el VAWT ubicado a 4 pies del vehículo. Los resultados de las simulaciones mostraron que a 60 mph y cuatro pies de distancia, el semirremolque produce vientos cercanos a 45 mph que duran alrededor de 4 segundos” (11).

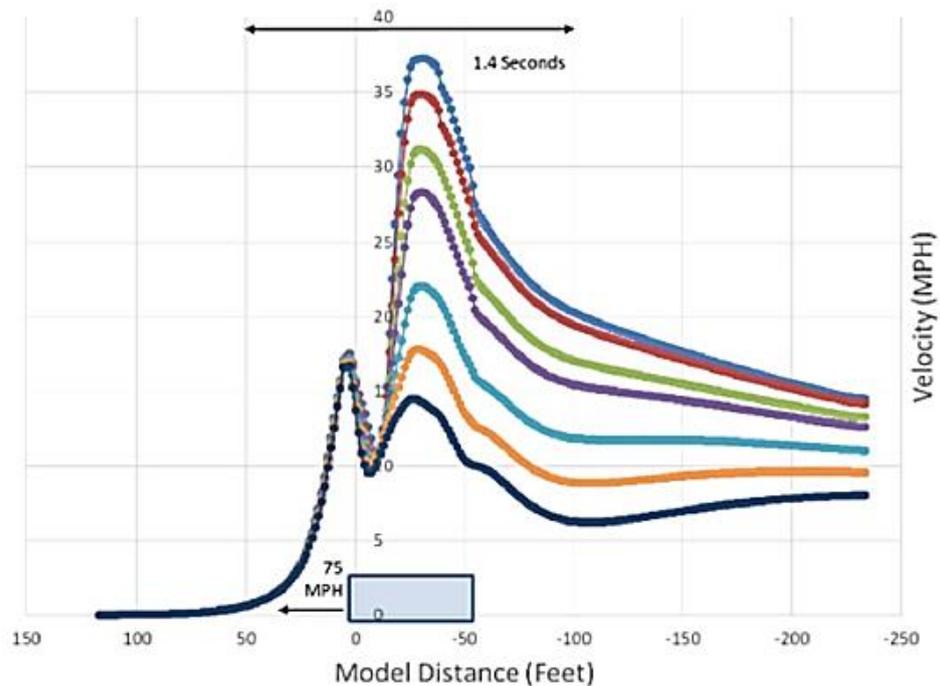


Figura 13. Perfil de viento de un vehículo grande (11)

“Como sugiere la intuición, cuando la estela está más cerca del vehículo, entonces la velocidad el viento es mayor. Desafortunadamente, pasa lo contrario cuando la velocidad del viento es menor cuando las estelas de vientos están más lejos del vehículo. El área donde se utilizarán las velocidades del viento está comprendida a menos de 2,1336 metros (siete pies) del vehículo y dentro 2,1336 metros (siete pies) del suelo. Las ráfagas relativamente pequeñas asociadas con los vehículos más pequeños tienen un mínimo potencial de generación de electricidad, mientras que las estelas de viento de gran velocidad del tráfico de semirremolques tienen la capacidad de generar enormes cantidades de electricidad” (11).

2.2.1.9. Flujos de viento que inciden en los vehículos

a. Uniforme o laminar

Este tipo de flujo es donde las partículas de viento viajan en capas paralelas uniformes en el mismo sentido de la carrocería, la velocidad de las partículas dependerá de cuan cerca estén apegados a la carrocería del vehículo. Este desplazamiento se

conoce como flujo laminar, cuanto mayor sea este flujo, menor será la resistencia aerodinámica (2).

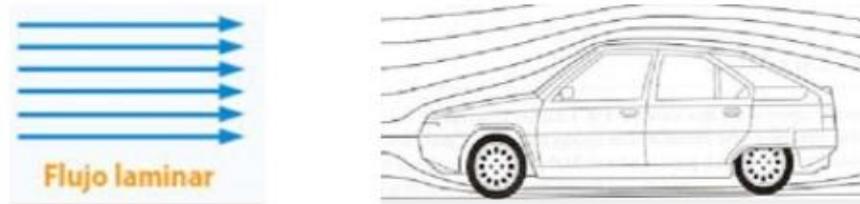


Figura 14. Flujo laminar que incide en un vehículo menor (2)

b. Turbulento

En este otro tipo de flujo las partículas de viento se mueven de forma irregular a la trayectoria de la carrocería del vehículo, llegando a hacer el tipo de flujo más frecuente en los vehículos por los desniveles y la parte posterior de cada vehículo (salto brusco de su forma). Hay partículas de aire que pierden velocidad con respecto a las demás e incluso cambian de dirección, produciendo así un flujo turbulento (2).

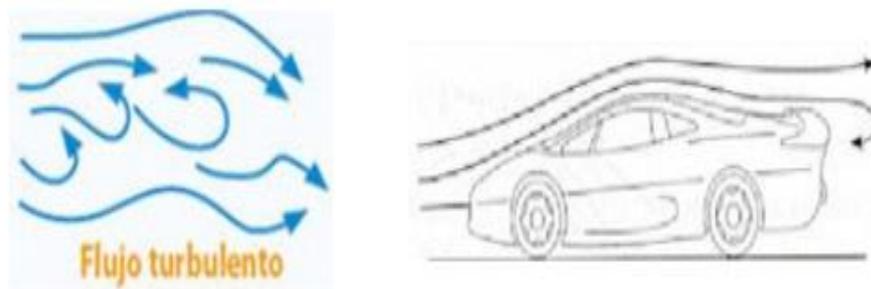


Figura 15. Flujo turbulento que incide en un vehículo menor (2)

2.2.1.10. Potencia que entrega el viento

La mecánica de fluidos y sus leyes dicen que los flujos de masa de aire conocidas como viento se generan por las diferencias de presión, y sometidas a una presión variable son un medio portador de energía cinética. Estos flujos de aire son ricas fuentes de energía cinética que pueden ser absorbidas por las turbinas eólicas para transformar energía mecánica de rotación.

La energía cinética en términos matemáticos de cualquier masa, siendo sólida, líquida o gaseosa, está demostrada con la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1)$$

Donde

- $m = \text{masa}$
- $v = \text{velocidad de la masa}$

El flujo de masa se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (2)$$

Donde

- $\rho = \text{densidad del fluido}$
- $A = \text{área por donde fluye la masa}$
- $v = \text{velocidad de la masa}$

La potencia que podría entregar el viento se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$P_{\text{viento}} = E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \quad (3)$$

Con esta fórmula se interpreta que la potencia del viento será mayor cuando mayor sea la velocidad y el área por donde fluye el viento, es decir que la potencia que puede extraerse del viento es directamente proporcional con el área proyectada de la turbina eólica, es por lo que el sistema eólico debe ser instalado en áreas en donde la velocidad del viento sea la mayor posible.

2.2.1.11. Límite de Betz

La energía cinética del viento no puede ser absorbida en su totalidad por una turbina eólica, existe una relación óptima de velocidad del viento antes y después de pasar por la turbina eólica, es decir que la velocidad de entrada debe ser el triple que la velocidad de salida es por lo que el límite de Betz indica que la potencia máxima extraíble es:

$$P_{max} = \frac{16}{27} \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} = 0.593 \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} = 0.593 P_{viento}$$

Según el límite de Betz, el coeficiente de potencia no debe exceder el valor de 0.593 para cualquier diseño de turbina eólica.

2.2.1.12. Coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia CP se utiliza para evaluar el rendimiento de la turbina eólica. Este coeficiente representa una parte de la energía extraída del total disponible en la corriente libre de flujo de aire a una velocidad constante (V_o) que atraviesa el área proyectada del rotor en la dirección del flujo (13), que se muestra en la figura 16.

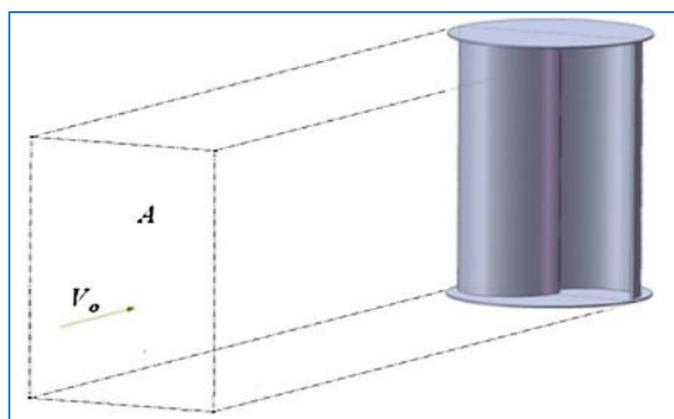


Figura 16. Área por donde fluye la masa de aire (13)

Para determinar el coeficiente de potencia, se requiere la división de la potencia máxima extraíble del viento y la potencia del viento.

$$C_P = \frac{P}{P_{available}} = \frac{M\omega}{(1/2)\rho AV_o^3} = \frac{M}{(1/2)\rho AV_o^2 r} \frac{\omega r}{V_o} = C_M \lambda \quad (4)$$

Donde

- P = potencia del rotor (máxima extraíble)
- M = momento del rotor
- v = velocidad de la masa
- ρ = densidad del fluido
- A = área proyectada del rotor
- V_o = velocidad de la masa
- r = radio del rotor
- C_m = coeficiente del momento
- w = velocidad angular
- λ = TSR

2.2.2. VAWT Savonius

“El VAWT Savonius es una turbina eólica de eje vertical que es menos eficiente que las turbinas de eje horizontal, el VAWT Savonius puede ser útil en zonas urbanas y también puede ser útil para la generación energía eléctrica a pequeña escala en viviendas rurales. Sin embargo, para conseguir un alto rendimiento de estos rotores es necesario modificar sus parámetros aerodinámicos así como también los parámetros geométricos” (14).

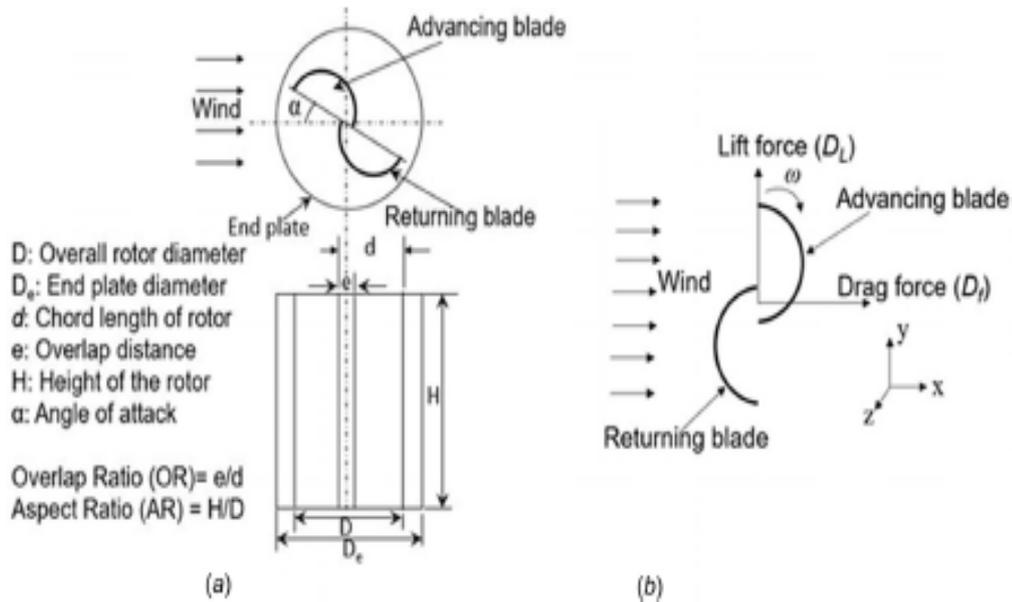


Figura 17. Parámetros básicos de un rotor Savonius: (a) parámetro básico, (b) fuerzas de arrastre y elevación (14)

“El VAWT Savonius convierte la energía cinética de las corrientes de viento, en un par que actúa en los álabes del rotor. Este par que genera la rotación de los álabes se utiliza para poner en actividad un generador. El torque generado se transmite a través del eje giratorio para poner en actividad un generador eléctrico. La eficiencia del rotor Savonius está expresado en términos matemáticos por el coeficiente de torque (C_T) y el coeficiente de potencia (C_P)” (14), y estos se pueden expresar con la siguiente fórmula:

$$C_T = \frac{T_{\text{turbine}}}{T_{\text{available}}} = \frac{T_{\text{turbine}}}{\frac{1}{2}\rho AV^2 R} = \frac{F \times r_p}{\frac{1}{2}\rho AV^2 R}$$

$$C_P = \frac{P_{\text{turbine}}}{P_{\text{available}}} = \frac{T_{\text{turbine}} \times \omega_s}{\frac{1}{2}\rho AV^3} = \frac{T_{\text{turbine}}}{\frac{1}{2}\rho AV^2 R} \frac{R\omega_s}{V} = C_T \times \text{TSR}$$

Figura 18. Modelo matemático del coeficiente par (C_T) y coeficiente de potencia (C_P) (14)

2.2.2.1. Parámetros geométricos

Como se dijo anteriormente, para incrementar los coeficientes del rendimiento (C_T y C_P) de un *VAWT Savonius* se requiere modificar los parámetros geométricos, entre estas están:

a) *Tip speed ratio*

La velocidad específica del viento (λ) es una de las variables fundamentales para hallar la potencia y el rendimiento de una turbina eólica, el *tip speed ratio* está definido como la relación entre la velocidad periférica del alabe ($u = \omega_s \cdot R$) y la velocidad del caudal de viento entrante (v).

$$\lambda = \frac{v_{pala}}{v_{viento}} = \frac{\omega_{rotor} \cdot r_{rotor}}{v_{viento}} = \frac{2\pi}{60} \cdot n_{rpm,rotor} \cdot r_{rotor} \quad (5)$$

El indicador de la velocidad de rotación de los álabes respecto a la velocidad del viento es el TSR, debido a que la velocidad angular del rotor no es un indicador lo suficientemente eficiente para aportar información por sí sola porque no se considera la velocidad del viento que impulsa al rotor.

A continuación, la figura 19 muestra los coeficientes de potencia de diversos tipos de turbinas eólicas en función de la velocidad específica ($TSR = \lambda$) del viento.

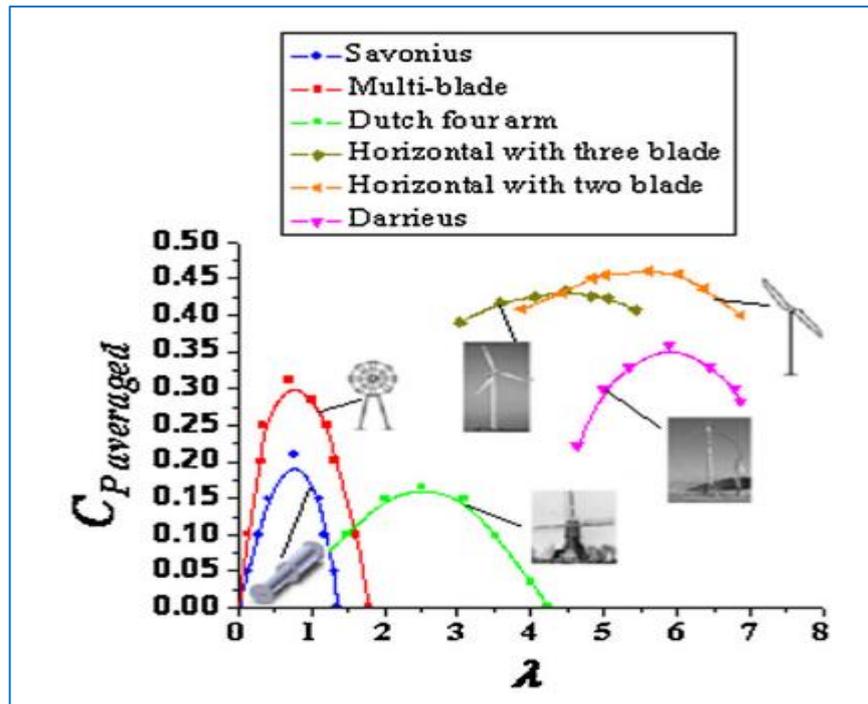


Figura 19. Características de las curvas de C_p en función al TSR de varias turbinas eólicas (13)

Los estudios de los investigadores especialistas en la materia demostraron el mejor TSR, a continuación, se presenta la siguiente tabla que presenta un resumen de estudios desarrollados en donde la mayoría coincide que el coeficiente de potencia (C_p) es óptimo cuando el TSR(λ) está entre 0.7- 1 [14].

| Authors | Year | Optimum TSR |
|--------------------------------|------|-------------|
| Sheldahl et al. [30] | 1978 | 0.7–1.0 |
| Sivasegaram and Sivapalan [35] | 1983 | 0.75 |
| Huda et al. [36] | 1992 | 0.68–0.71 |
| Fujisawa and Gotoh [33] | 1994 | 0.8–0.9 |
| Fujisawa et al. [34] | 1995 | 0.9 |
| Saha and Rajkumar [37] | 2006 | 0.65 |
| Kamoji et al. [38] | 2008 | 0.64–0.69 |
| Kamoji et al. [39] | 2009 | 0.7–0.9 |
| D'Alessandro et al. [40] | 2010 | 0.9–1.02 |
| Nasef et al. [41] | 2013 | 0.90 |
| Banerjee et al. [42] | 2014 | 0.80 |
| Jeon et al. [43] | 2015 | 0.67 |
| Alom et al. [44] | 2016 | 0.80 |
| Lee et al. [45] | 2016 | 0.45 |
| Ricci et al. [46] | 2016 | 0.899 |

Figura 20. Resumen del TSR óptimo a través del tiempo (14)

b) Aspect ratio

“La relación de aspecto del rotor *Savonius* ($AR = H/D$), el torque y la inercia del rotor son inversamente proporcional con el *aspect ratio*, pero directamente proporcional con aceleración angular, debido a esta lógica se llega a la conclusión que a mayor velocidad del viento debería existir un mayor *aspect ratio*” (14).

“La mayoría de los estudios relacionados al tema muestran relaciones de aspecto de aproximadamente 2,0 que brindan buenos resultados sobre el rendimiento de los rotores *Savonius*” (13).

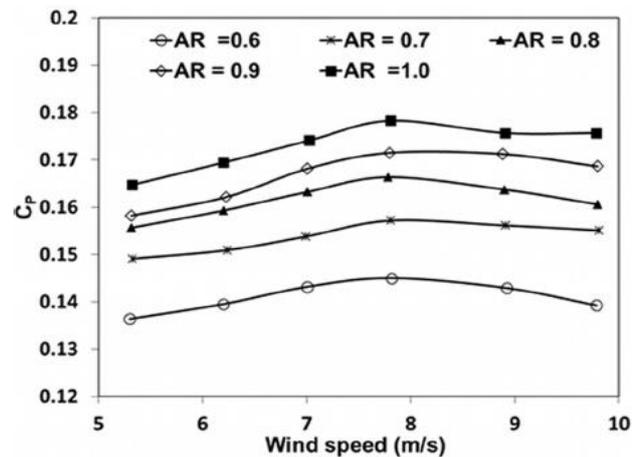


Figura 21. C_p versus velocidades del viento de varios AR (14)

En la figura 21 se muestra que el coeficiente de potencia máximo (C_{pmax}) para rotores *Savonius* se obtiene cuando la relación de aspecto es 0.8.

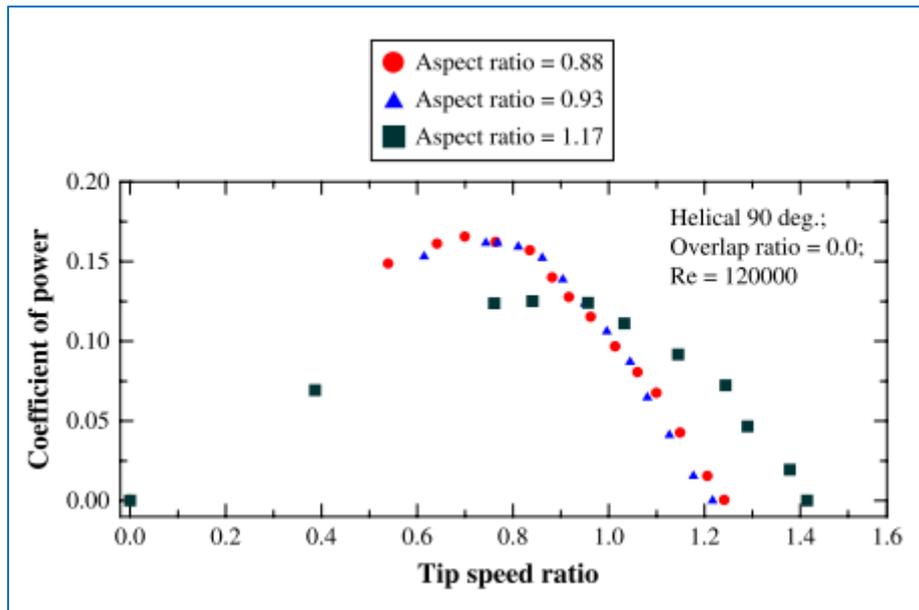


Figura 22. Coeficiente de potencia vs TSR para un rotor Savonius helicoidal (15)

La figura 22 muestra el efecto de la relación de aspecto sobre el coeficiente de potencia para un rotor *Savonius* helicoidal con un ángulo de inclinación de 90° con un número de Reynolds de 120.000. “El rendimiento del rotor *Savonius* helicoidal con una relación de aspecto de 0,88 es ligeramente superior ($C_{pmax} = 0,165$ a $TSR = 0,7$) en comparación con el rotor helicoidal con una relación de aspecto de rotor de 0,93 ($C_{pmax} = 0,16$ a $TSR = 0,74$)” (15).

c) Overlap ratio

“La relación de superposición y en términos matemáticos $OR = e/d$, que es importante para incrementar el coeficiente de potencia (C_p) del rotor. El coeficiente de torque estático (C_{TS}) aumenta en el rotor de una etapa cuando la distancia de superposición (e) aumenta. Es decir, cuando se aumenta la distancia de superposición (e), el flujo de viento que pasa a través de la brecha se incrementa generando así mayor torque estático (C_{TS}). Cuando el viento fluye a través de la abertura del interior del rotor genera presión en el lado cóncavo del alabe de retorno,

generando así una fuerza de empuje efectiva, por lo tanto es mejor tener un pequeño espacio negativo” (14).

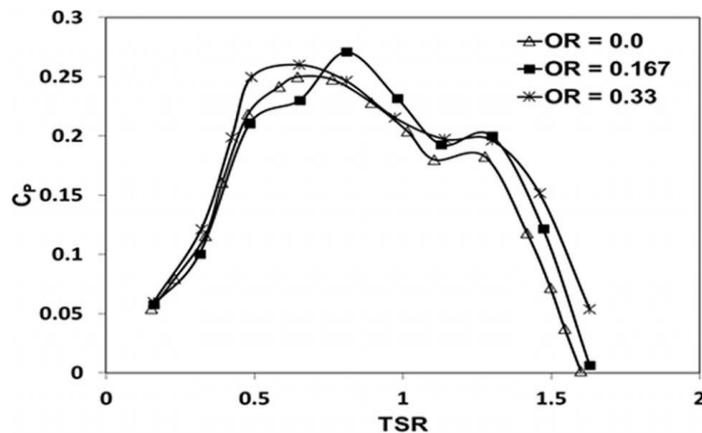


Figura 23. C_p vs TSR en varios OR (14)

Se puede ver en la figura 23 que el rotor *Savonius* de una etapa con $OR = 0.167$ tiene la capacidad de generar el coeficiente de potencia máximo (C_{Pmax}). Para el rotor *Savonius* de álabes helicoidales con $OR = 0$ muestra el coeficiente de potencia (C_p) más alto que el $OR = 0.1$ y 0.15 .

d) Número de álabes del rotor

Los coeficientes de rendimiento (C_T y C_p) de los rotores *Savonius* se determinan por el número de álabes, estas pueden ser de 2 álabes a 4 álabes.

Estudios realizados demuestran que los rotores *Savonius* de 3 álabes, generan contrafuerza porque el viento que choca en el primer alabe se refleja en al alabe sucesivo, el alabe sucesivo gira en la dirección negativa, no obstante, los vórtices que se forman detrás de las álabes de retorno minimizan el coeficiente de potencia (C_p) del rotor *Savonius*. Los resultados de estudios realizados con dinámica de fluidos computacional (CFD) muestran un mayor coeficiente de potencia (C_p) en un rotor *Savonius* de 2 álabes a diferencia de un rotor *Savonius* de 3 y 4 álabes.

Es por lo que se llega a la conclusión desde el punto de vista del coeficiente de potencia (C_p) que los rotores *Savonius* de 2 álabes muestran resultados superiores. “El coeficiente de potencia máximo (C_{pmax}) del rotor de 2 álabes es aproximadamente 1.5 veces mayor al rotor de 3 álabes” (14).

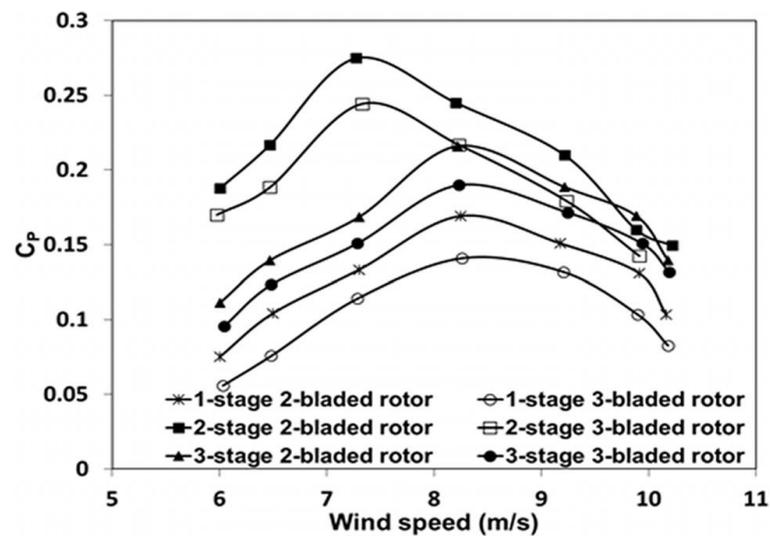


Figura 24. Comparación de un rotor *Savonius* de dos y tres álabes (14)

e) Efecto de los *end plates*

“Los platos o placas finales son elementos de suma importancia en las turbinas eólicas, porque une los extremos del rotor para aumentar su desempeño, estas placas finales impiden las fugas de aire que fluyen por el lado cóncavo del rotor hacia la atmosfera. Al implementar los *end plates*, el rotor tiene un funcionamiento más eficiente con mayor TSR” (14).

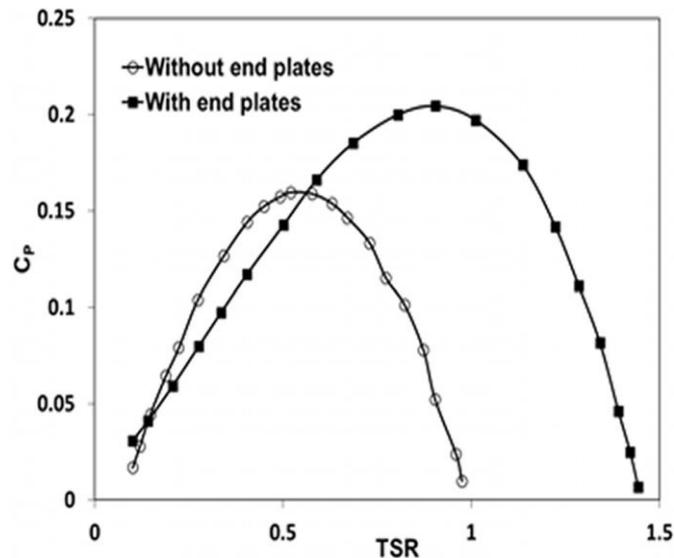


Figura 25. Efecto de los end plates en el C_p del rotor Savonius (14)

Se puede observar en la figura 25 que los platos finales brindan un aumento significativo al C_p del rotor. Estudios desarrollados recomiendan que el diámetro de los platos finales (D_e) debe ser 1.1 veces el diámetro del rotor (D). Asimismo, se debe tomar en cuenta que al incrementar el diámetro de las placas finales también incrementa la inercia y reducir el rendimiento del rotor.

f) Número de etapas

“Estudios de los especialistas en rotores *Savonius helicoidal* demuestran que, el número de etapas óptimo es 2, porque cuando se emplea un rotor *Savonius helicoidal* 3 etapas, se produce una disminución en el rendimiento. Esto se debe a un incremento en la inercia del VAWT. Un rotor de 3 etapas es más eficiente que con un rotor de 1 etapa, pero menos eficiente que el rotor de 2 etapas, entonces se puede decir que el rotor de 2 etapas es por una gran diferencia el rotor más eficiente” (16).

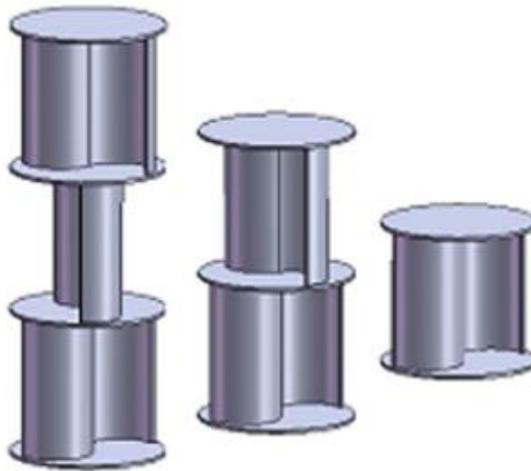


Figura 26. VAWT Savonius con diferentes números de etapas (13)

g) Influencia del eje

“El eje es importante para cualquier elemento de máquina que gire o que tenga revoluciones en un determinado tiempo por que brinda rigidez a la estructura, pero en este tipo de rotor el eje perjudica al desempeño del rotor, porque interfiere en el flujo de aire que existe en la brecha de los álabes del rotor” (13).

“Debido a esta interferencia de flujo de aire se reduce la eficiencia. Sin embargo, para minimizar este efecto se debe modificar los parámetros como *overlap ratio* y *bucket spacing*, es decir incrementar la brecha donde se desplazará el flujo de viento entre los álabes del rotor” (13).



Figura 27. Rotor Savonius con eje y sin eje (13)

h) El eje

Eje o flecha según Budynas y Nisbet es un elemento de máquina rotatorio, en la mayoría de los casos tiene una sección transversal de forma circular y se emplea para transmitir energía mecánica de rotación. Esta rotación u oscilación de elementos de máquina se da en engranes, poleas, ruedas dentadas, volantes de inercia, manivelas y elementos similares. Un eje es un elemento no giratorio que no transmite par de torsión y que se utiliza para soportar ruedas rotatorias, poleas y elementos similares, el eje de un automóvil no es un eje, el término viene de la época de caballo y calesa cuando las ruedas giraban sobre el elemento no rotatorio. Un eje no rotatorio puede diseñarse con sencillez y estudiarlo como una biga estática. “El diseño de una flecha está en función al trabajo que realizará, se encontrará muchos elementos a favor y en contra del diseño, por lo cual en el proceso de selección de la solución óptima se obtienen flechas, cojinetes y engranajes ideales para el tamaño y forma de dicha máquina” (17).

“Para el diseño y estudio de un eje no precisamente es necesario evaluar todos los puntos del eje, sino evaluar en los puntos críticos, por lo general se encuentran ubicados en las superficies exteriores del eje, ubicaciones axiales, donde el momento flexionante, el de par torsión, y donde las concentraciones de esfuerzo son grandes” (17).

“Los esfuerzos de torsión, flexión o axiales se presentan alternativamente distribuidos y cuando se encuentran estos esfuerzos combinados, de acuerdo con la teoría de falla por energía de distorsión, Von Mises o energía de máxima distorsión que es un criterio de resistencia estática para ejes giratorios circulares sin considerar a las cargas axiales”, están dadas por (17):

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\} \right)^{1/3} \quad (6)$$

Para el presente diseño la fórmula general se simplifica al siguiente:

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} \right\}^{1/3} \quad (7)$$

- d = diámetro de árbol
- M_a = momento flector máximo
- n = factor de seguridad
- K_f = factor de concentración de esfuerzo por fatiga de la flexión
- K_{fs} = factores de concentración de esfuerzo por fatiga de la torsión
- S_e = límite de fluencia
- T_a = par de torsión

Para los factores de concentración del esfuerzo típico de las primeras interacciones en el diseño de un eje esencialmente dependen de relaciones geométricas y no de dimensiones especificativas de la máquina, debido a que, en primera instancia las concentraciones de esfuerzos se normalizan. Los valores iniciales sirven para un diseño base para después reemplazar con valores reales una vez hallado (17).

“Para el caso del presente estudio el filete hombro estándar, para estimar los valores de primera iteración, se debe seleccionar una relación r/d de manera que puedan obtenerse los valores del factor de concentración de esfuerzo en flexión (K_t). Para el peor extremo del espectro con $r/d = 0.02$ y $D/d = 1.5$ los valores de K_t a

partir de los diagramas de esfuerzo (diagrama de fuerza cortante y diagrama de momento flector) en hombro indican 2.7 para la flexión, 2.2 para la torsión y 3 para el esfuerzo axial” (17).

Tabla 8. Estimaciones de primera iteración de los factores de concentración K_t y $K_t s$

| | Flexión | Torsión | Axial |
|---|---------|---------|-------|
| Filete de hombro: agudo ($r/d = 0.02$) | 2.7 | 2.2 | 3.0 |
| Filete de hombro: bien redondeado ($r/d = 0.1$) | 1.7 | 1.5 | 1.9 |
| Cuñero fresado ($r/d = 0.02$) | 2.2 | 3.0 | – |
| Cuñero de patín o trapecoidal | 1.7 | – | – |
| Ranura para anillo de retención | 5.0 | 3.0 | 5.0 |

Los valores faltantes en la tabla no pueden obtenerse con facilidad.

Nota: tomada de Budynas y Nisbett (17)

2.2.2.2. Parámetros aerodinámicos

Existen dos parámetros aerodinámicos muy importantes que tienen mucha influencia en el rendimiento de las turbinas eólicas, en especial de un rotor *Savonius*. Número de Reynolds (R_e), fuerzas de arrastre y elevación (D_f y D_L) son los parámetros aerodinámicos ya mencionados explícitamente.

a) Número de Reynolds (R_e)

El número de Reynolds (R_e) tiene un valor adimensional que define y caracteriza el movimiento de fluidos alrededor de un sistema y está comprendido entre la relación de inercia y viscosidad ($Re = \rho V D / \mu$). En el presente trabajo de investigación el fluido será el aire. El rotor *Savonius* está ordenado y en función del número de Reynolds y su coeficiente de potencia (C_p) siempre a favor con el aumento de R_e , es decir, que tienen una relación directamente proporcional, estudios demostraron que el C_p se incrementa cuando se aumenta de R_e , esto se puede verificar en la figura 28, ya que para un número de Reynolds (R_e) de 201958 el coeficiente de potencia (C_p) es 0.21, siendo el valor más alto. Por otro lado, investigadores especialistas en la materia encontraron que existen valores de C_p que varían en función a los diferentes perfiles de rotor (curvado, recto) y geometría de las palas, pero con estos mismos

parámetros geométricos el C_p aumenta con el aumento de Re y esto lo ratificaron muchos investigadores. “Otros estudios reportaron que el coeficiente de potencia máximo (C_{pmax}) se da con el incremento del número de Reynolds (Re) de 57,7000 a 202,000, cuando el $Re = 202,000$ el $C_{pmax} = 0.2$ con un $\lambda = 0.71$. Además, se encontró un C_{pmax} con el aumento de Re para rotores *Savonius* de múltiples etapas” (14).

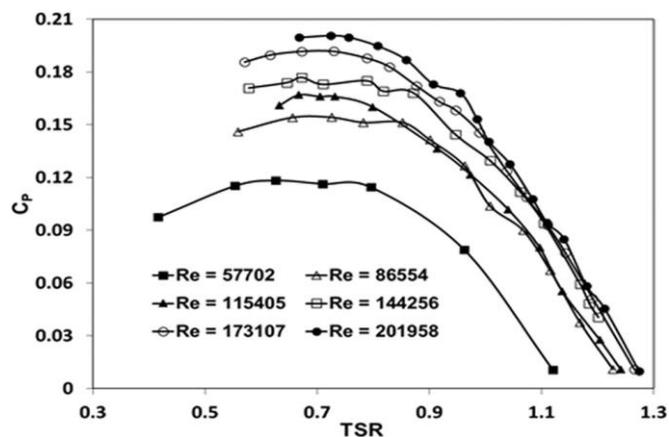


Figura 28. C_p vs. TSR en varios números de Re (14)

b) Intensidad de turbulencia

La turbulencia es otro factor que afecta el rendimiento y a la eficiencia de una turbina *Savonius*, que caracteriza la calidad del viento (flujo de aire) alrededor del VAWT. El flujo de aire de baja calidad o el flujo turbulento afectan el rendimiento de la turbina eólica. En la figura 29 se puede ver la disminución en el coeficiente de potencia (C_p) promedio máximo a medida que aumenta la intensidad de la turbulencia en la corriente libre de aire. La influencia de la intensidad de la turbulencia para otras TSR se obtuvo en el estudio de Vicente et al. (13) y se puede apreciar en la figura 29.

| Study | Search type | Turbulence intensity (%) | Maximum $C_{p\text{ averaged}}$ |
|-----------------------|------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Blackwell et al. [18] | Closed section wind tunnel test | 1.40 | 0.24 |
| Cochran et al. [27] | Simulation by finite volume method | 1.00 | 0.26 |
| Cochran et al. [27] | Simulation by finite volume method | 10.0 | 0.23 |
| Akwa [16] | Simulation by finite volume method | 1.00 | 0.25 |
| Akwa [16] | Simulation by finite volume method | 10.0 | 0.20 |

Figura 29. Efecto de la intensidad de turbulencia de corriente libre de aire en el C_P promedio máximo (13)

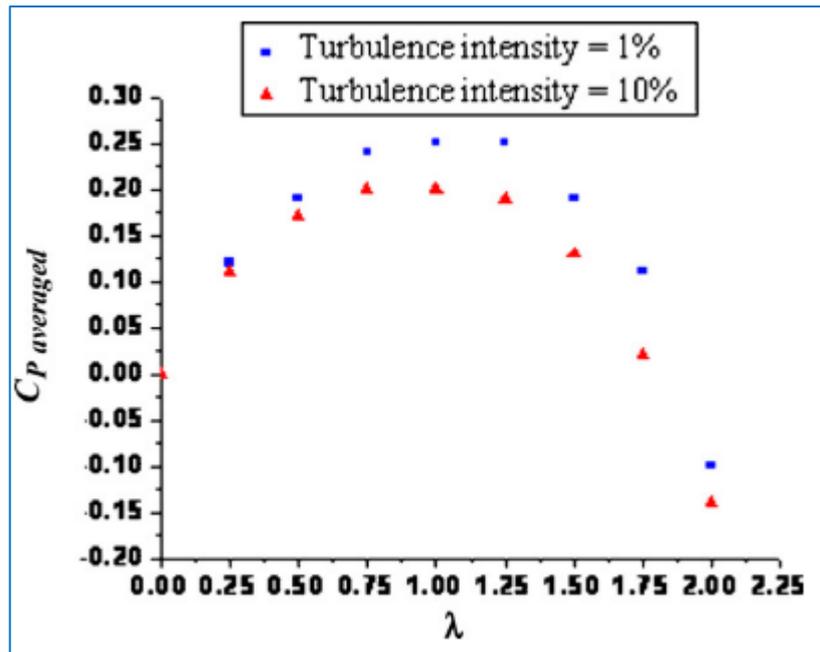


Figura 30. C_P promedio vs. TSR a $Re = 867,00$ (13)

c) Fuerzas de elevación y arrastre

“Fuerza de arrastre o fricción de fluidos, como se mencionó anteriormente el rotor *Savonius* trabaja esencialmente con la fuerza de arrastre (D_f), pero también presenta fuerza de elevación (D_L), estas fuerzas que se generan en el rotor *Savonius* están en función de velocidad angular del rotor (α) y la velocidad específica del viento (λ). La fuerza de elevación tiene un valor similar a la fuerza de arrastre, cuando existe un bajo TSR la fuerza de arrastre comienza a disminuir después que el rotor llega a alcanzar su máxima potencia. De esto se dice que un rotor *Savonius* no produce su torque de inicial solo por la baja velocidad específica del viento (λ). Sin embargo, cuando existen altas TSR, se reduce

la fuerza de elevación y la fuerza de arrastre se convierte en la fuerza principal de la rotación” (14).

d) Densidad del aire

La energía cinética del aire depende de la densidad la cual es proporcional a su masa y peso. La densidad de aire “ ρ ” para esta zona de estudio se estará calculando a partir de la ecuación de gases ideales debido que la densidad está en función directamente con la temperatura termodinámica y presión, de la fórmula general de los gases ideales, ecuación [8] y [9], donde se tiene masa y volumen, que son proporcionales a la densidad, ecuación [10], donde se reemplazan variables de la ecuación [10] en [9] para la obtención de la fórmula que se necesitará en el cálculo de la densidad del aire a 3276 m s. n. m. en la ciudad de Huancayo en el distrito de Cajas en la zona de Quebrada Honda.

$$P \times V = n \times R \times T \quad (8)$$

$$P \times V = m \times R^* \times T \quad (9)$$

$$d = \frac{m}{V} \quad (10)$$

$$d = \frac{P}{R^* \times T} \quad (11)$$

- P: presión
- V: volumen
- n: número de moles
- R: constante universal de los gases
- R: constante específico del gas
- T: temperatura promedio en la zona
- M: masa

| CONSTANTES DE LOS GASES | | | | | | |
|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------|--------|----------------------------|----------|
| Ru = 8.314kJ/kmolK | | Ru: constante universal de los gases | | | Ing. Jorge Salcedo 2006 | |
| Substancia | Unidades Sistema Internacional (SI) | | | | | |
| | Masa molar | | cv | R=Ru/M | k=cp/cv | densidad |
| | M | cp |  |  |  |  | R | k | ρ |
| kg/kgmol | KJ/kgK | KJ/kgK | KJ/kgK | k | kg/m ³ | |
| ACETILENO (C2H2) | 26,038 | 1,712 | 1,393 | 0,319 | 1,23 | 1,162 |
| ACIDO SULFHDRIICO (SH2) | 34,082 | 1,373 | 1,130 | 0,243 | 1,21 | 1,522 |
| AIRE | 28,967 | 1,004 | 0,718 | 0,287 | 1,40 | 1,293 |
| AMONIACO (NH3) | 17,032 | 2,219 | 1,715 | 0,503 | 1,29 | 0,760 |
| ANHIDRO CARBONICO (CO2) | 44,011 | 0,846 | 0,658 | 0,187 | 1,28 | 1,965 |
| ANHIDRO SULFUROSO (SO2) | 64,066 | 0,645 | 0,515 | 0,130 | 1,25 | 2,860 |
| ARGON (A) | 39,944 | 0,523 | 0,313 | 0,210 | 1,67 | 1,783 |
| ETANO (C2H6) | 30,070 | 1,766 | 1,494 | 0,273 | 1,18 | 1,342 |
| ETILENO (C2H4) | 28,054 | 1,566 | 1,272 | 0,294 | 1,23 | 1,252 |
| HELIO (He) | 4,003 | 5,233 | 3,155 | 2,078 | 1,66 | 0,179 |
| HIDROGENO (H2) | 2,016 | 14,320 | 10,190 | 4,131 | 1,40 | 0,090 |
| ISOBUTANO (C4H10) | 58,124 | 1,758 | 1,619 | 0,139 | 1,09 | 2,595 |
| METANO (CH4) | 16,043 | 2,231 | 1,711 | 0,520 | 1,30 | 0,716 |
| NITROGENO (N2) | 28,016 | 1,040 | 0,743 | 0,297 | 1,40 | 1,251 |
| OXIDO DE CARBONO (CO) | 28,011 | 1,041 | 0,744 | 0,297 | 1,40 | 1,250 |
| OXIDO NITRICO (NO) | 30,008 | 0,995 | 0,718 | 0,277 | 1,38 | 1,340 |
| OXIDO NITROSO (N2O) | 44,020 | 0,883 | 0,695 | 0,189 | 1,27 | 1,965 |
| OXIGENO (O2) | 32,000 | 0,918 | 0,658 | 0,260 | 1,39 | 1,429 |
| PROPANO (C3H8) | 44,097 | 1,691 | 1,506 | 0,185 | 1,12 | 1,969 |

NOTA: la densidad ρ tomada en condiciones normales

M: masa molecular

R: constante particular

Relación de Mayer: R = cp - cv

Figura 31. Constante de gases. Tomada de Ingeniería Mecánica UTM, Termodinámica

Para hallar la densidad es necesario obtener la presión barométrica donde la presión barométrica es la fuerza que ejerce el aire en un punto cualquiera sobre el nivel del mar y para la solución de la ecuación [11] la presión atmosférica en Quebrada Honda es necesaria hallar con la siguiente ecuación:

$$P(h) = P_o e^{-\alpha \cdot h} \quad (12)$$

- P_o: presión a nivel del mar
- α: densidad específica
- h: altura o metros a nivel del mar

Donde la densidad específica se halla con la siguiente ecuación

$$\alpha = \frac{\delta_{aire} * g}{P_o} \quad (13)$$

- Densidad específica del aire $\delta_{\text{aire}} = 1.22 \text{ kg/m}^3$
- Presión atmosférica $P_0 = 101325 \text{ Pa}$
- Gravedad $g = 9,8 \text{ N/kg}$

Con la densidad específica se obtiene el valor de la presión a 3276 m s. n. m. para luego obtener la densidad del aire en Quebrada Honda.

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1. Definiciones básicas

- VDI Asociación Alemana de Ingenieros
- ISO Organización Internacional de Normalización
- DIN Instituto de Normalización Alemán
- SI Sistema internacional
- ASTM Asociación Americana de Ensayo de Materiales
- FN o s Factor de Seguridad
- IT Tolerancia Internacional
- CAD Diseño Asistido por Computadora
- FEA Análisis por Elementos Finitos
- DCL Diagrama de Cuerpo Libre
- DMF Diagrama de Momento Flector
- VAWT Vertical Axis Wind Turbine
- HAWT Horizontal Axis wind turbine
- LED Diodo Emisor de Luz
- CFD Dinámica de Fluido Computacional

2.3.2. Lista de símbolos

- V Velocidad m/s
- V_0 Velocidad constante m/s
- Q Caudal m^3/s
- ρ Densidad kg/m^3
- D Diámetro m
- A Área m^2

- **HP** Caballo de fuerza lbf.pie/min
- **EC** Energía cinética J
- \dot{m} Flujo Másico kg/s
- P Potencia watt
- **Cp** Coeficiente de potencia
- M Momento Nm
- **W** Velocidad angular rad/seg
- λ TSR Tip Speed Ratio
- AR Aspect Ratio
- OR Ovelap Ratio
- **Kf** Factor de concentración del esfuerzo por fatiga de la flexión
- **Kt** Factor de concentración de esfuerzo en flexión
- **q** Sensibilidad a la muesca de materiales sometidas a flexión inversa de cargas axiales
- **K_{fs}** Factores de concentración del esfuerzo por fatiga de la torsión
- **K_{ts}** Factor de concentración de esfuerzo en torsión
- **f** Factor de fricción
- **Se** Limite a la fluencia
- **Su** Esfuerzo último
- **Ma** Momento flector máximo

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

La presente tesis propone el enfoque de la metodología VDI 2221-2225 con referencia de la Metodología de Diseño en Ingeniería, que es un formato guía que brindó las pautas que dan la estructura y relación al plan metodológico. Además, se ejecutó la metodología identificando los requerimientos, las posibles soluciones, cálculo para el análisis de componentes que dieron por definido el diseño de un *VAWT Savonius helicoidal*.

3.1. Método, tipo y alcance de la investigación

3.1.1. Método de investigación

Esta investigación tiene el enfoque cuantitativo deductivo, ya que sigue una serie de procesos, los pasos a seguir que brinda el formato metodológico son secuenciales, y se deben omitir ninguna, entonces cada etapa tiene su entregable para seguir con el siguiente paso. “El método deductivo se inicia de una idea que va de lo general a lo específico, es decir la idea va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco teórico. De las preguntas se establecen hipótesis y determinan variables, se planifica cómo probarlas (diseño), se miden las variables en un determinado contexto, se analizan las mediciones obtenidas utilizando

métodos estadísticos, y se extrae una serie de conclusiones respecto de las hipótesis" (18).

3.1.2. Tipo de investigación

El tipo de investigación que se realizó fue tecnológico fundamental, porque permite incrementar el conocimiento y aplicarlos en otras investigaciones, mas no busca la ejecución práctica de sus conocimientos.

En esta investigación se utilizó la investigación tecnológica básica analizando el *VAWT Savonius* para la vía del sector de Quebrada Honda, ya que existe potencial energético y se pueden encontrar muchas aplicaciones prácticas.

3.1.3. Nivel de investigación

El nivel de la investigación que se utilizó fue el descriptivo, porque se logró describir el comportamiento del *VAWT Savonius* bajo las condiciones de trabajo de la vía del sector de Quebrada Honda.

3.1.4. Alcance de la investigación

El alcance de la investigación fue exploratorio, ya que la recolección de los datos se hizo en dos fases, las cuales se segmentaban en clasificación y cantidad de vehículos en la vía de Quebrada Honda y también el análisis de la magnitud de velocidad de viento que generan sus estelas.

3.1.5. Diseño de investigación

El diseño de la investigación fue descriptivo simple, porque se hace una revisión de información actualizada del *VAWT* tipo *Savonius* y se selecciona la información más relevante.

Diagrama: M → O

Donde

M: muestra u objeto donde se realizó el estudio

O: observación de la muestra

3.1.6. Unidad de observación

La unidad de observación fue el *VAWT Savonius*

3.1.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Cuando estuvo definido el diseño de la investigación se determinó la técnica de recolección de datos para obtener datos estadísticos de la velocidad de viento que generan las estelas de viento de los vehículos que en conjunto con el área proyectada del *VAWT Savonius* se calculó el flujo volumétrico y flujo másico de aire que ingresó al *VAWT*, los que representaron los datos principales para esta tesis.

3.1.7.1. Técnicas de recolección de datos

Para este estudio se definió la técnica empírica de la observación, ya que permite tener un contacto directo con la cantidad de automóviles para poder cuantificarlos de acuerdo a su categoría mediante una nota de campo. Por otro lado, se utilizaron los datos estadísticos de un equipo que mide la velocidad promedio de viento (anemómetro) que se genera por la zona por efecto de las estelas de viento de los vehículos.

3.1.7.2. Instrumentos de recolección de datos

A continuación, se utilizan las tablas para representar la muestra de datos.

Tabla 9. Tabla para determinar la cantidad promedio de vehículos

| Tipo de unidad | Cantidad (uni.) |
|-----------------------|------------------------|
| Auto | |
| Combi | |
| Camioneta | |
| Coaster | |
| Camión | |
| Bus | |
| Semitrailer | |
| Otros | |
| Total | |

Tabla 10. Tabla para determinar la velocidad de viento promedio

Medición de la velocidad de las estelas de viento generados por los vehículos con un parámetro de 30 minutos

| Fecha | Intervalo de tiempo (5 min) | Velocidad del viento (m/s) |
|--------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| | | |
| | | |

Tabla 11. Recolección de datos del anemómetro

| Date time | Temp out | Hi temp | Low temp | Out hum | Dew pt. | Wind speed |
|------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|
| | | | | | | |
| | | | | | | |

3.1.8. Procedimiento de recolección de datos

La recolección de datos se ejecutó en el área de trabajo del VANWT Savonius, en donde el diseñador observa y apunta las exigencias del cliente en la tabla de exigencias, en función a esas exigencias el diseñador realiza el diseño. La tabla de exigencias lo celebran el cliente y diseñador.

3.2. Materiales y métodos

Como se mencionó anteriormente, la metodología de diseño que seleccionamos es la metodología VDI 2221-2225 (MÉTODO GENERALIZADO DE PROCEDIMIENTO EN EL PROCESO DE DISEÑO) propuesto por el señor Benjamín Gamarra, nos permite hacer un estudio de valor de tres diseños iniciales para luego seleccionar mediante un análisis el diseño óptimo, a continuación, se presentan las fases de la mencionada metodología.

3.2.1. Fases de la metodología.

3.2.1.1. Lista de exigencias

En la primera fase se definen los propósitos a desarrollarse en la creación de esta máquina y las características de la máquina a diseñar, además se estudia el estado de la tecnología. El resultado final de esta fase es una lista de las demandas y los deseos del usuario (lista de exigencias).

3.2.1.2. Estructura de funciones

En esta fase se realiza una estructura de funciones en el cual se representa el ingreso y salida de datos, se representa también la señal, la energía y la materia en una secuencia lógica.

3.2.1.3. Matriz morfológica

Después de analizar las funciones se investigan portadores de solución para cada función individual o parcial, la cual se representa en forma esquemática en una matriz de doble entrada (en las filas se coloca las funciones y en las columnas los portadores de cada solución).

3.2.1.4. Conceptos de solución

Se obtienen bosquejos de conceptos de solución al combinar los mencionados portadores. Es más fácil generar soluciones parciales cuando existe funciones parciales, y esto se logra cuando se divide la función total.

3.2.1.5. Concepto de solución optima

Esta fase se toma como referencia la solución óptima seleccionada y se analiza la solución, se determina las principales geometrías basados en los requerimientos, restricciones geométricas, los esfuerzos y deformaciones, tolerancias dimensionales. Además, se pueden desarrollar estudios técnico-económicos para optimizar el diseño.

3.2.1.6. Cálculos

En esta fase final se define la configuración definitiva de la máquina, se habrán realizado los cálculos de los elementos o sistemas de la máquina, lo que conllevará a tener una lista de todas las piezas mecánicas, así como también se establecerán los materiales de la máquina a diseñar, las holguras y acabados superficiales. El resultado de esta fase son los planos de detalle.

3.2.2. Desarrollo de aplicación de método

3.2.2.1. Secuencia de desarrollo de la metodología

A continuación, se ilustra la secuencia de pasos a desarrollar tomando las directrices de la metodología VDI2221.

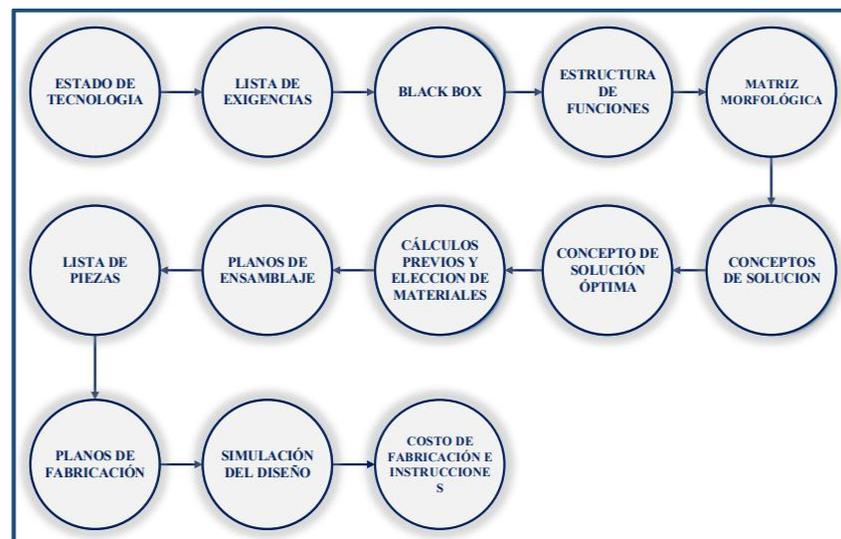


Figura 32. Secuencias de pasos a desarrollar

3.2.2.2. Lista de exigencias

La lista de exigencias es importante para esta fase, ya que en ella se posee la información recolectada de las condiciones de trabajo a la que va a estar sometida la turbomáquina, además es complementada con información de las bases teóricas recolectadas, es por lo que se establece la lista de demandas y deseos que necesita el diseño para alcanzar el objetivo de la turbomáquina.

Tabla 12. Lista de exigencias

| Lista de exigencias | | Universidad Continental | Pág.: | 1 de 4 |
|---|--------------------|--|-------------|---|
| “Diseño de un VAWT Savonius para recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda, Huancayo” | | Facultad de Ingeniería E. A. P. Ingeniería Mecánica Área de Diseño | Fecha: | 9/9/2021 Priker Roland Núñez Flores |
| Características | Deseo o exigencias | Descripción | Responsable | |
| Función principal | E | El VAWT Savonius recolectará energía eólica de las estelas de viento del flujo de vehículos en marcha. | J. Aparicio | |
| Función | E | El VAWT Savonius para recolectar energía eólica deberá soportar flujos turbulentos. | P. Núñez | |
| Función | E | Sistema eólico diseñado para ser ubicado en las vías. | P. Núñez | |
| Función | E | El VAWT Savonius deberá recolectar la mayor cantidad de energía eólica. | P. Núñez | |
| Función | D | Debe tener un sistema para un torque de arranque. | P. Núñez | |
| Geometría | E | La altura del VAWT Savonius no debe exceder los 4 pies de altura respecto al suelo. | P. Núñez | |
| Geometría | E | El diámetro del VAWT Savonius, no deberá exceder el ancho de la acera o berma central. | P. Núñez | |
| Geometría | E | La relación de aspecto debe ser lo recomendado por los especialistas. | P. Núñez | |
| Energía | E | La energía cinética del viento debe dar movimiento al VAWT Savonius. | P. Núñez | |
| Materia prima | E | Estelas de viento de los vehículos que se desplazan en Quebrada Honda. | P. Núñez | |
| Materia prima | D | Vientos generados en la geografía de la zona. | N. Meza | |
| Productividad | D | Recolección de la mayor cantidad de energía eólica de las estelas de viento. | P. Núñez | |
| Calidad | E | Debe ser de un material ligero que debe de soportar las inclemencias climatológicas como el sol, lluvias y otras fuentes que pueden causar daño. | J. Aparicio | |
| Seguridad | E | Se contará con una valla de seguridad de forma circular para garantizar la integridad física de los mantenedores y peatones. | J. Aparicio | |

| | | | |
|----------------|---|---|-------------|
| Seguridad | D | Se contará con un sistema de protección para descargas eléctricas. | P. Núñez |
| Seguridad | E | El <i>VAWT Savonius</i> tendrá señaléticas de advertencia para evitar los impactos de los vehículos en las vías. | N. Meza |
| Cinemática | E | El <i>VAWT Savonius</i> debe soportar cargas giratorias sobre su eje en rpm. | P. Núñez |
| Cinética | E | Los álabes y el eje principal deberán soportar la carga aerodinámica sin sufrir deformaciones o fisuras. | P. Núñez |
| Fabricación | E | El <i>VAWT Savonius</i> será construida con materiales disponibles en el mercado local. | P. Núñez |
| Fabricación | E | La construcción de los elementos de la turbomáquina será fácil de fabricar y con las exigencias y calidad para un buen resultado. | P. Núñez |
| Fabricación | E | EL <i>VAWT Savonius</i> contará con un sistema de anclaje al suelo para mantener su rigidez. | P. Núñez |
| Transporte | E | El <i>VAWT Savonius</i> dispondrá de materiales ligeros para facilitar su traslado hacia el área de funcionamiento. | J. Aparicio |
| Montaje | E | El <i>VAWT Savonius</i> tendrá un diseño que permita realizar el montaje de los accesorios de manera fácil y sencilla sin la necesidad de requerir herramientas especiales. | J. Aparicio |
| Medio ambiente | D | El <i>VAWT Savonius</i> debe ser amigable con el medio ambiente y no deberá tener efecto adverso en el ecosistema de la quebrada. | N. Meza |
| Mantenimiento | E | El <i>VAWT Savonius</i> debe contar con un plan de mantenimiento para realizar los mantenimientos preventivos. | N. Meza |
| Mantenimiento | E | Las piezas de recambio deben tener repuestos en el mercado o ser de fácil fabricación. | P. Núñez |
| Mantenimiento | D | Debe tener un fácil acceso para las actividades típicas de manto (mantenibilidad). | P. Núñez |
| Costos | E | La máquina no deberá ser muy costosa para poder ser rentable. | P. Núñez |

3.2.2.3. Estructura de funciones

Para desarrollar esta fase se realizan los siguientes pasos:

A) Black box

En la caja negra se realiza la conversión de variables de acuerdo a la función de la turbomáquina, por lo general los factores que se evalúan son materia, energía y señal. Para ello se toma como referencia las especificaciones de la lista de exigencia.

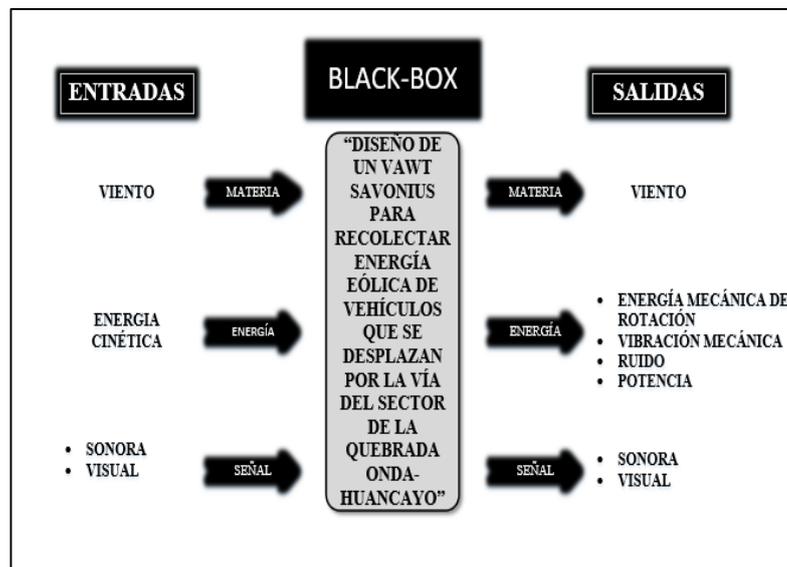


Figura 33. Black box

Entradas

Materia

- Viento de los vehículos que circulan por la vía de Quebrada Honda, además de los vientos locales generados por la geografía de la quebrada.

Energía

- La energía suministrada, por lo general es la energía cinética que generan las estelas de viento de los vehículos.

Señal

- Ya que las estelas de viento no se pueden ver, para determinar las señales, se considera a las señales visuales y sonoras de los

vehículos a velocidad que recorren la vía y esto es fundamental para que el VAWT pueda realizar su función.

Salidas

Materia

- Vientos despedidos de manera centrífuga debido a la acción del VAWT

Energía

- Energía mecánica de rotación en el eje principal del VAWT y por ende potencia mecánica.
- El *VAWT Savonius* genera vibraciones mecánicas, porque sus álabes semicilíndricos absorben la energía del viento por arrastre, y estas vibraciones tienen relación directa con la fuerza aerodinámica que impacta en los álabes.
- Los álabes del *VAWT Savonius* impactan con los flujos de viento turbulentos, generando fricción y emitiendo ruidos.

Señal

- El viento despedido del VAWT genera rotación y sonidos, estos son indicadores que el rotor cumplió su función.

B) Secuencia de operaciones

El *VAWT Savonius* que aprovechará la energía cinética de los vehículos que se desplazan por la vía de Quebrada Honda, Huancayo tendrá las siguientes secuencias de operaciones.

Preparación

- Verificar que no exista obstrucción en el área proyectada del VAWT, para que reciba mayor caudal de viento.
- Determinación del caudal de viento que ingresa al VAWT.
- Recolección de viento (energía cinética) por el VAWT.

Ejecución

- El caudal de viento pasa por la turbomáquina.
- Romper el momento de inercia por el efecto de arrastre aerodinámico en los álabes del VAWT.
- Con buenos parámetros geométricos del VAWT se aprovecha mejor la energía del viento.
- Con la velocidad de caudal entrante y la velocidad periférica del VAWT se determina el TSR.
- Generación de energía mecánica de rotación en el eje del VAWT.

Control

- Se verifica que el tipo de material del VAWT sea el más liviano y resistente para este tipo de trabajo donde se tiene un ambiente con vientos con enormes velocidades y flujos muy turbulentos.
- Se verifica que el tipo de unión de los álabes al eje sean los mejores, para las condiciones de trabajo.
- Se verifica que no haya impurezas de gran magnitud en los vientos.

Fase final

- El eje de giro principal del VAWT desarrolla energía mecánica de rotación.

C) Estructura de funciones

La secuencia de funciones del proceso que transformará la energía mediante el *VAWT Savonius* desde el inicio hasta el final se esquematiza en la estructura de funciones, esta ayuda a ordenar cada función.

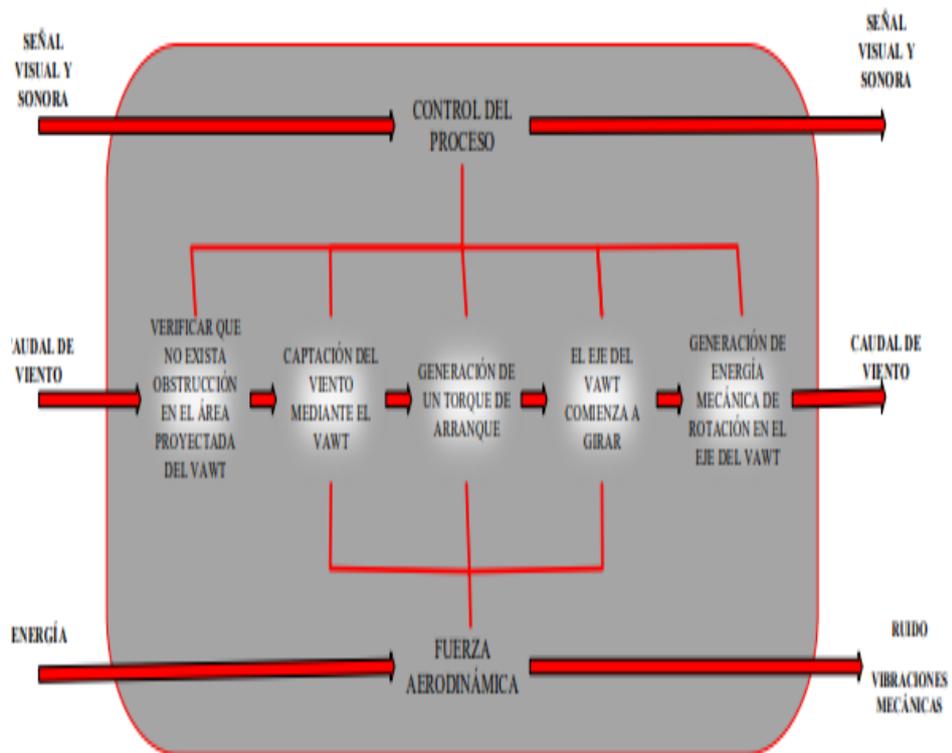
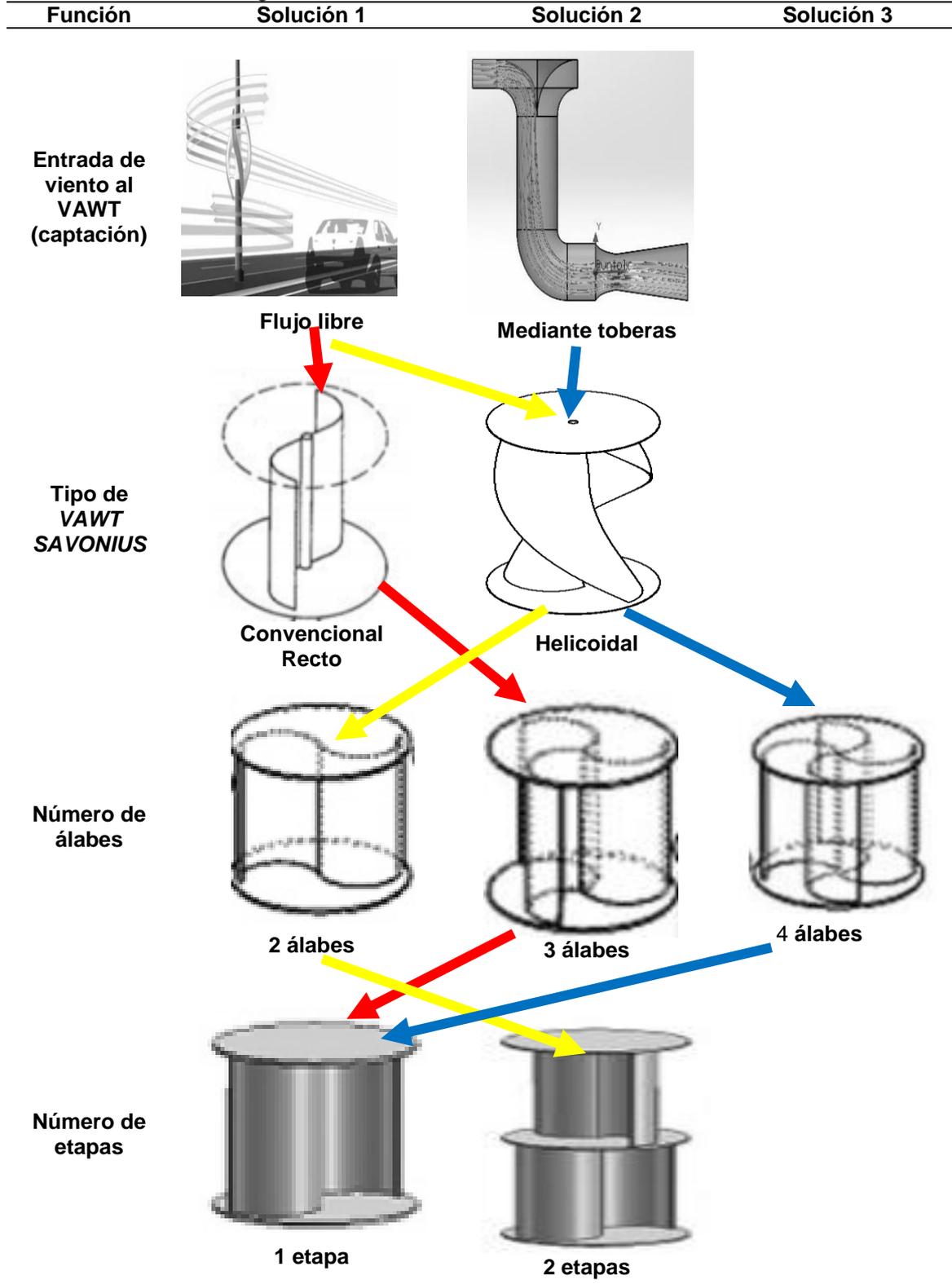


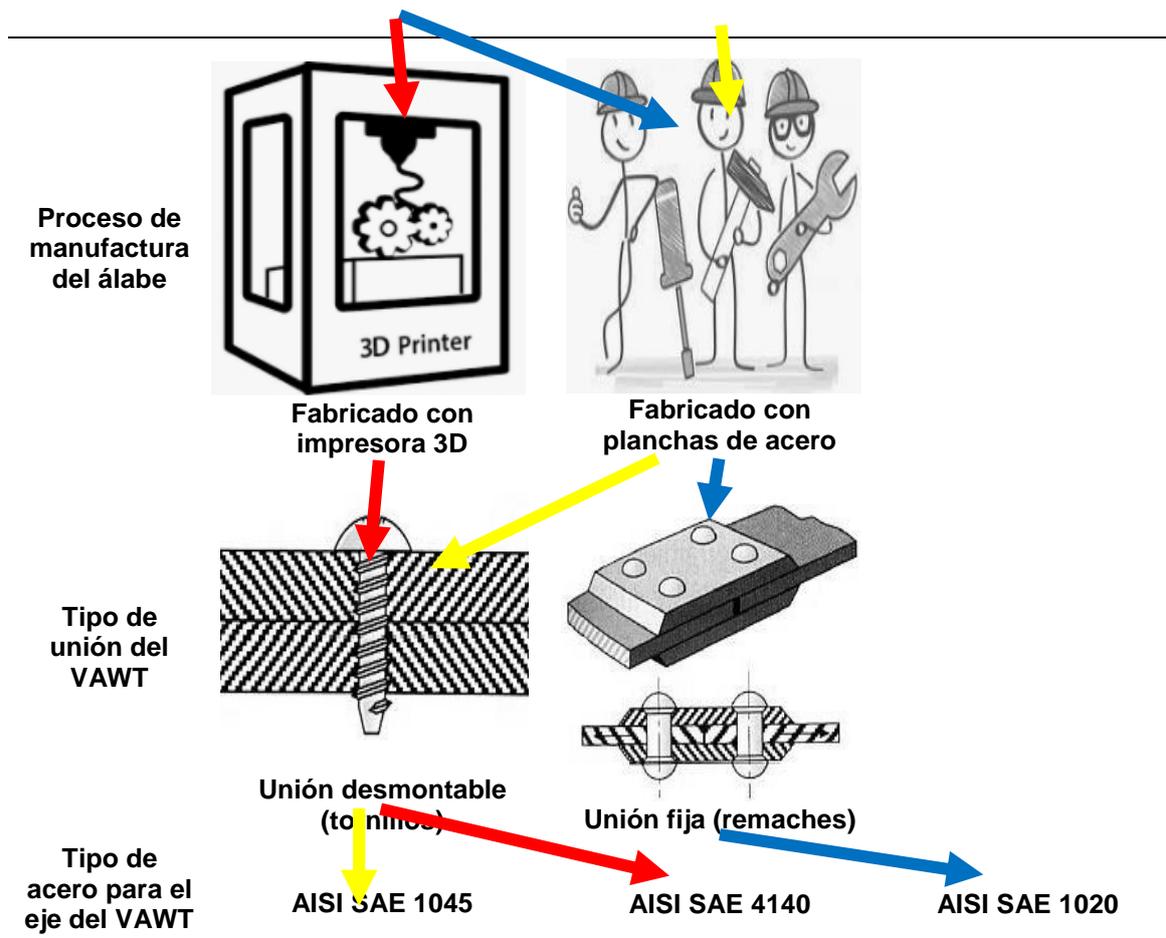
Figura 34. Estructura de funciones del VAWT Savonius

3.2.2.4. Matriz morfológica

Cuando se desarrolla la estructura de funciones del VAWT Savonius se realiza la matriz morfológica con la finalidad de seleccionar los mejores elementos mecánicos para la turbomáquina.

Tabla 13. Matriz morfológica del VAWT SAVONIUS





3.2.2.5. Conceptos de solución

Alternativa de solución 1

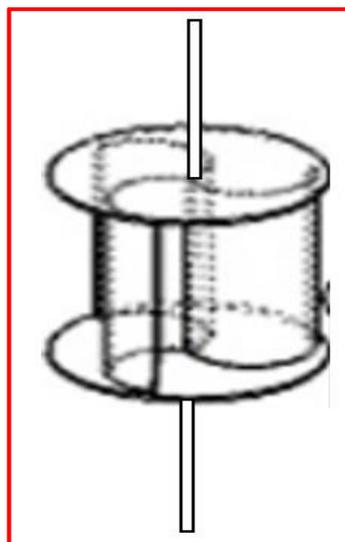


Figura 35. Alternativa de solución 1

La posible solución número uno, para la captación de estelas de viento se utiliza un *VAWT Savonius* de 3 álabes de perfil semicircular, cuenta con los platos finales y eje transmisor de potencia que brinda rigidez al rotor.

- Alternativa de solución 2

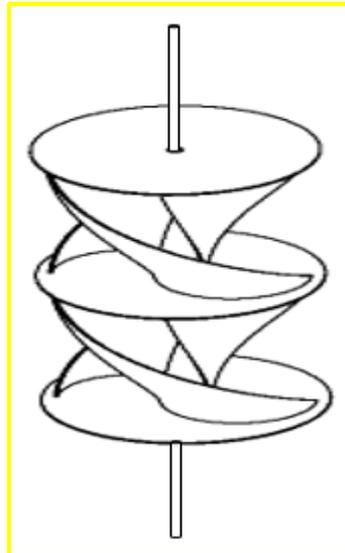


Figura 36. Alternativa de solución 2

La alternativa de solución 2 es un *VAWT Savonius* con 2 álabes helicoidales, este rotor cuenta con tres platos finales y es de doble etapa para la mejor captación de la energía cinética del viento y ayudará a mejorar el coeficiente de potencia del VAWT. Además, cuenta con un eje transmisor de potencia que brinda rigidez al rotor.

- Alternativa de solución 3

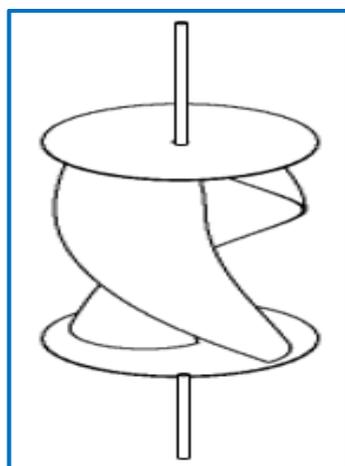


Figura 37. Alternativa de solución 3

La tercera alternativa de solución es un *VAWT Savonius* de 4 álabes helicoidales y es de una etapa para la captación de la energía cinética del viento, además cuenta con un eje transmisor de la potencia, la captación de los caudales de viento será mediante un sistema de tobera, que amplificará la velocidad de viento como se muestra en la figura 38.

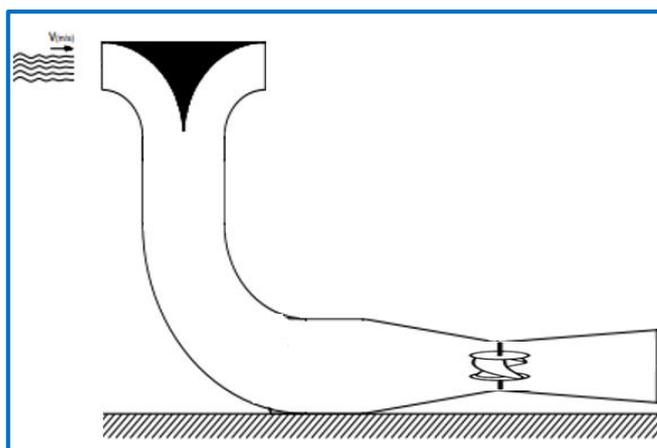


Figura 38. Captación de aire mediante toberas

3.2.2.6. Conceptos de solución óptima

Tabla 14. Evaluación de conceptos de solución - valor técnico

| Diseño mecánico - evaluación de proyectos | | | Universidad Continental | | | | | | | |
|---|------------------------------------|-------------------------|------------------------------|----|------------|----------|------------|----|------------|----|
| Valor técnico (xi) | | | E. A. P. Ingeniería Mecánica | | | | | | | |
| Estudio: Diseño de un <i>VAWT Savonius</i> para recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda, Huancayo | | | | | | | | | | |
| p: puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI2225) 0 = No satisface, 1 = Aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien (ideal). G: es el peso ponderado y se da en función de la importancia de criterios de evaluación | | | | | | | | | | |
| Criterios de evaluación para diseños en fase de conceptos o proyectos | | | | | | | | | | |
| N.º | Variantes de concepto/ proyecto | Criterios de evaluación | Solución 1 | | Solución 2 | | Solución 3 | | Sol. ideal | |
| | | | S1 | S2 | S3 | S. ideal | | | | |
| | | g | p | gp | p | gp | p | gp | p | gp |
| 1 | Función | 10 | 3 | 30 | 4 | 40 | 2 | 20 | 4 | 40 |
| 2 | Geometría | 8 | 1 | 8 | 3 | 24 | 1 | 8 | 4 | 32 |
| 3 | Eficiencia | 8 | 3 | 16 | 2 | 16 | 2 | 16 | 4 | 32 |
| 4 | Ergonomía | 7 | 2 | 14 | 2 | 14 | 2 | 14 | 4 | 28 |
| 5 | Rapidez | 8 | 2 | 16 | 2 | 16 | 2 | 16 | 4 | 32 |
| 6 | Fabricación | 8 | 1 | 8 | 2 | 16 | 3 | 24 | 4 | 32 |
| 7 | Montaje | 7 | 2 | 14 | 2 | 14 | 2 | 14 | 4 | 28 |
| 8 | Mantenimiento | 9 | 2 | 18 | 2 | 18 | 2 | 18 | 4 | 36 |
| 9 | Transportabilidad | 7 | 2 | 14 | 2 | 14 | 2 | 14 | 4 | 28 |
| 10 | Seguridad | 6 | 1 | 6 | 4 | 24 | 1 | 6 | 4 | 24 |
| 11 | Estabilidad | 7 | 1 | 7 | 4 | 28 | 2 | 14 | 4 | 28 |
| 12 | Factibilidad de manejo | 6 | 2 | 12 | 2 | 12 | 2 | 12 | 4 | 24 |
| 13 | Complejidad | 9 | 2 | 18 | 2 | 18 | 1 | 9 | 4 | 36 |

| | | | | |
|--|-------|-------|-------|-----|
| Puntaje máximo $\sum gp$ | 181 | 254 | 185 | 400 |
| Valor técnico | 0.430 | 0.635 | 0.463 | 1 |

$$x_i = \frac{g_1 \cdot p_1 + g_2 \cdot p_2 + \dots + g_n \cdot p_n}{(g_1 + g_2 + \dots + g_n) \cdot p_{max}} \leq 1$$

Tabla 15. Evaluación de concepto de solución - valor económico

| | |
|--|-------------------------------------|
| Diseño mecánico - evaluación de proyectos | Universidad Continental |
| Valor económico (yi) | E. A. P. Ingeniería Mecánica |

Estudio: diseño de un *VAWT Savonius* para recolectar energía eólica de vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda, Huancayo

p: puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI2225) 0= No satisface, 1= Aceptable a las justas, 2= suficiente, 3= bien, 4=Muy bien (Ideal). G: Es el peso ponderado y se da en función de la importancia de criterios de evaluación

Criterios de evaluación para diseños en fase de conceptos o proyectos

| Variantes de concepto/ proyecto | | Solución 1 | | Solución 2 | | Solución 3 | | Sol. ideal | | |
|--|---------------------------------|------------|----|------------|----------|------------|---|------------|---|----|
| | | S1 | S2 | S3 | S. ideal | | | | | |
| N.º | Criterios de evaluación | g | p | gp | p | gp | p | gp | p | gp |
| 1 | Número de piezas | 7 | 1 | 7 | 2 | 14 | 1 | 7 | 4 | 28 |
| 2 | Costos de materiales | 10 | 1 | 10 | 3 | 30 | 2 | 20 | 4 | 40 |
| 3 | Fácil adquisición de materiales | 8 | 1 | 8 | 2 | 16 | 2 | 16 | 4 | 32 |
| 4 | Facilidad de montaje | 6 | 2 | 12 | 2 | 12 | 1 | 6 | 4 | 24 |
| 5 | Facilidad de mantenimiento | 6 | 2 | 12 | 2 | 12 | 3 | 18 | 4 | 24 |
| puntaje máximo $\sum gp$ | | 49 | | 84 | | 67 | | 148 | | |
| valor técnico | | 0.331 | | 0.568 | | 0.453 | | 1 | | |

$$y_i = \frac{g_1 \cdot p_1 + g_2 \cdot p_2 + \dots + g_n \cdot p_n}{(g_1 + g_2 + \dots + g_n) \cdot p_{max}} \leq 1$$

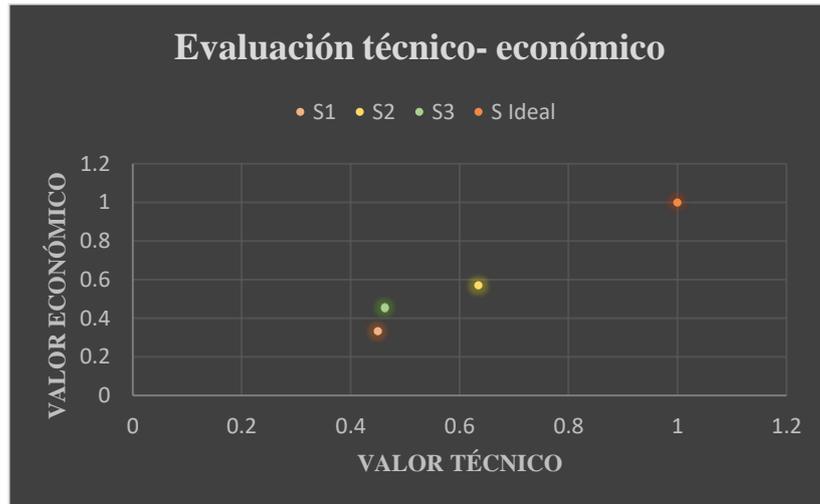


Figura 39. Diagrama de evaluación técnico – económico según VDI 2225

Según la VDI2225 proporciona el diagrama técnico económico trabajado con los datos de este trabajo de investigación visto en la figura 39, se llega a la conclusión que una de las posibles soluciones que esté más cerca al equilibrio del valor técnico versus el valor económico será la solución ideal que cumple con los requisitos de diseño del *VAWT Savonius* establecido en la lista de requerimientos es la solución número 2, de esta solución óptima (solución número 2) se desarrollan los capítulos siguientes.

Descripción del funcionamiento de la solución óptima

Para iniciar se requiere un caudal que ingresará a la turbina eólica, del cual se consideran sus límites máximos y mínimos de acuerdo a la velocidad de viento que generan los vehículos en marcha, recopilados con el anemómetro, a continuación, la energía cinética del caudal del viento se convertirá en energía mecánica de rotación, además se analizarán los parámetros geométricos y aerodinámicos del *VAWT* para un mejor aprovechamiento de los recursos eólicos en el lugar de trabajo y obtener la máxima potencia.

3.2.2.7. Cálculos y selección de componentes

i. Cálculo del caudal

Para determinar los cálculos de caudal entrante a la turbina eólica, se requiere saber su área proyectada y la velocidad promedio del viento entrante.

“El área donde se utilizarán las velocidades del viento está a menos de siete pies (2,134 m) del vehículo y dentro de los siete pies (2,134 m) desde el suelo” (11).

De acuerdo al reglamento nacional de vehículos, la altura de los vehículos de la categoría N y M que son los de mayor altura, no debe exceder en altura los 4.3 m, y se ve que está dentro de los límites tomar como referencia la altura máxima de 2.134 m, ya que los vientos son sustancialmente más altos.

a) Área proyectada del VAWT

Para la determinación del área proyectada del VAWT se selecciona una altura tentativa de 1.20 m, considerando también una altura del bastidor que soportará el VAWT de 0,9 m, sumando así la altura total de 2,1 m y esto puede modificarse; ya que la metodología VD1 2221 menciona que un diseño es iterativo.

De acuerdo a los estudios realizados sobre relación de aspecto (15) se menciona que para rotores *Savonius* helicoidales el *aspect ratio* que mayor coeficiente de potencia brinda es 0.88 y 0.93, con una ligera ventaja de 0.88 como muestra la figura 39.

Para este proyecto de investigación se toma el *aspect ratio* = 0.88. Entonces el ancho del área proyectada sería 1.36 m.

$$A_r = \frac{H}{D} \quad (14)$$

Donde

- $A_R = \text{relación de aspecto}$
- $H = \text{altura}$
- $D = \text{diámetro}$

$$D = \frac{1,2 \text{ m}}{0,88} = 1.36 \text{ m}$$

El diámetro del rotor es el ancho del área proyectada, por lo tanto, el área proyectada será $1,64 \text{ m}^2$.

$$\hat{A}_p = H * w \quad (15)$$

Donde

- $\hat{A}_p = \text{área proyectada}$
- $H = \text{altura}$
- $w = \text{ancho}$

$$\hat{A}_p = 1,2 \text{ m} * 1,36 \text{ m} = 1,64 \text{ m}^2$$

El área proyectada es de $1,64 \text{ m}^2$ y tendrá la forma rectangular con lados de $1,2 \text{ m} \times 1,36 \text{ m}$.

b) Velocidad promedio del viento

A continuación, se seleccionan la máxima velocidad promedio del viento para iniciar el cálculo, ya que se requiere diseñar una turbina eólica que soporte altas cargas aerodinámicas, la velocidad máxima será utilizada para determinar el cálculo y diseño del VAWT. Entonces, para este estudio la velocidad máxima del viento generado por los vehículos es de 6.9 m/s , esta ha sido seleccionada de los datos estadísticos del anexo 1 en donde se

hizo un trabajo de campo con la ayuda de un instrumento de medición (anemómetro).

Como el flujo de viento tendrá un comportamiento normal a la superficie proyectada, entonces la velocidad máxima será multiplicada por el área proyectada del VAWT.

$$Q = v * \dot{A}_p \quad (16)$$

Donde

- $Q = \text{caudal}$
- $v = \text{velocidad del viento}$
- $\dot{A}_p = \text{área proyectada}$

$$Q = 6,9 \text{ m/s} * 1,64 \text{ m}^2$$

$$Q = 11,316 \text{ m}^3/\text{s}$$

De este resultado se puede afirmar que un flujo volumétrico de aire de magnitud $11,316 \text{ m}^3/\text{s}$ ingresa al VAWT Savonius.

Por otro lado, es fundamental saber cuánto flujo de masa ingresa al área proyectada del VAWT, es por lo que es necesario aplicar la ecuación (2) del flujo de masa, y esta se expresa mediante:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v$$

Donde

- $\dot{m} = \text{flujo de masa}$
- $\rho = \text{densidad del fluido}$
- $A = \text{área por donde fluye la masa}$
- $v = \text{velocidad de la masa}$

Para determinar la densidad del aire en Quebrada Honda se formula la ecuación de estado para los gases ideales [8], [9] y [10], que conllevará a obtener la ecuación [11] que será necesario para hallar la densidad en cualquier punto de altura:

$$P \times V = n \times R \times T$$

$$P \times V = m \times R^* \times T$$

$$\rho = m / V$$

$$\rho = \frac{P}{R^* T}$$

- P: presión = 101325 Pa = 1atm
- V: volumen
- n: número de moles
- R: constante universal de los gases
- R: constante específico del gas = 287 J/kg.K
- T: temperatura promedio en la zona
- M: masa

Para determinar la densidad del aire en Quebrada Honda se formula la ecuación de estado para los gases ideales [8], [9] y [10], que conllevará a obtener la ecuación [11] que será necesario para hallar la densidad en cualquier punto de altura:

$$P \times V = n \times R \times T$$

$$P \times V = m \times R^* \times T$$

$$\rho = m / V$$

$$\rho = \frac{P}{R^* T}$$

- P: presión = 101325 Pa = 1atm

- V: volumen
- n: número de moles
- R: constante universal de los gases
- R: constante específico del gas = 287 J/kg.K
- T: temperatura promedio en la zona
- M: masa

Donde primero se halla la presión atmosférica en Quebrada Honda con la ecuación [12].

$$P(h) = P_0 \times e^{-\alpha \cdot h}$$

- P_0 : presión atmosférica a nivel del mar
- α : densidad específica
- h: altitud o metros a nivel del mar

Para determinar la presión atmosférica en Quebrada Honda a 3276 m s. n. m. se requiere la densidad específica y esta se halla con la siguiente ecuación [13]:

$$\alpha = \frac{\rho_{aire} \cdot g}{P_0}$$

$$\rho_{aire} = 1.22 \text{ kg/m}^3$$

$$P_0 = 101325 \text{ Pa}$$

$$g = 9,8 \text{ N/kg}$$

Remplazando datos en la ecuación, se obtiene que la densidad específica es:

$$\alpha = 1.18 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

A continuación, se reemplaza los valores obtenidos en la ecuación para determinar la presión atmosférica a 3276 m s. n. m.

$$P(h) = P_0 \times e^{-\alpha \cdot h}$$

$$P(3276) = 101325 \times e^{-1.18 \cdot 10^{-4} \cdot 3276}$$

$$P(3276) = 0,6794 \text{ atm.} = 68840,205 \text{ Pa}$$

Obteniendo los datos que se utilizan en la ecuación de estado de los gases ideales, ecuación [11]:

$$P(3276) = 68840,205 \text{ Pa}$$

$$R = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°K}}$$

$$T = 8,7 \text{ °C} = 281,85 \text{ °K}$$

Se halla que la densidad a 3276 m s. n. m. es igual:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T}$$

$$\rho = \frac{68840,205}{287 \cdot 281,85}$$

$$\rho = 0,851 \text{ kg/m}^3$$

Entonces, ya se puede determinar el flujo de masa reemplazando valores en la ecuación [2] del flujo másico.

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v$$

$$\dot{m} = 0,851 \text{ kg/m}^3 \cdot 11,316 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{m} = 9,6299 \text{ kg/s}$$

ii. Potencia *máxima extraíble* del viento

Para determinar la potencia que podría entregar el viento se requiere la siguiente ecuación [3]:

$$P_{viento} = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2}$$

Donde

- P_{viento} = potencia disponible del viento
- ρ = densidad del aire a 3276 m s. n. m.
- A = área proyectada del VAWT
- v = velocidad promedio del viento

$$P_{viento} = \frac{0,851 \times 1.64 \times (6.9)^3}{2}$$

$$P_{viento} = 229.240 \text{ watts}$$

Como resultado existe una potencia disponible del viento de 229.240 watts, pero el límite de Betz dice que no toda la energía cinética puede ser aprovechada por una turbina eólica, es por lo que indica que la potencia máxima extraíble del viento o potencia mecánica en la turbina es:

$$P_{max} = 0.593 P_{viento}$$

$$P_{max} = 0.593 \times 229.240 \text{ watts}$$

$$P_{max} = 135.94 \text{ watts}$$

Según el límite de Betz, el coeficiente de potencia no debe exceder el valor de 0.593 para cualquier diseño de turbina eólica.

iii. Cálculo de par motor del eje

Para determinar el par que se genera la turbina eólica, se debe considerar a la velocidad angular y esta va a variar en función a la velocidad del viento, en un rotor *Savonius* helicoidal de doble etapa en el que ingresa una masa de aire con una velocidad de 6,9 m/s tiene como resultado una velocidad angular de 600 rpm (19).

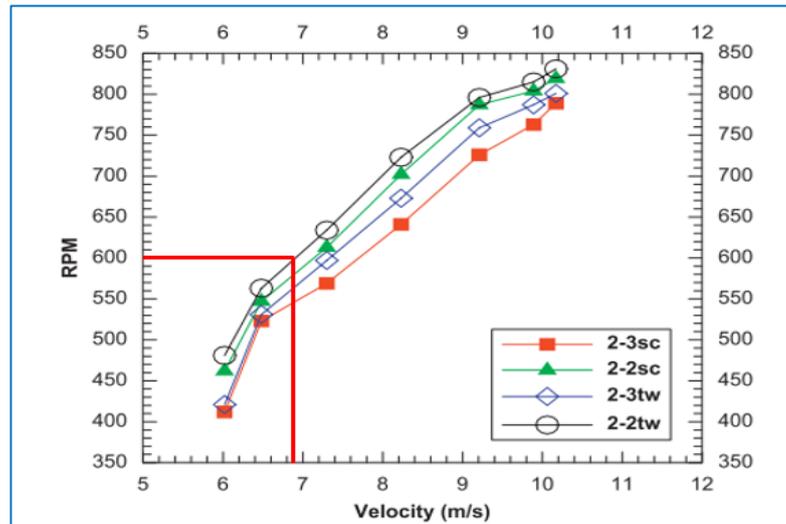


Figura 40. Variación del rpm en función a la velocidad de viento de varios rotores *Savonius* (19)

Teniendo ya la velocidad angular se puede determinar el par motor del rotor *Savonius*, mediante la siguiente expresión:

$$P_{turbine} = T\omega \quad (17)$$

Donde

- $P_{turbine}$: potencia del rotor en watts
- T : torque en Nm
- ω : velocidad angular en rad/s

$$T = \frac{\omega}{P_{turbine}} = \frac{62\text{rad/s}}{135.94\text{w}} = 0,462\text{Nm}$$

iv. Diseño del eje transmisor de potencia del rotor

El eje es el componente que soportará las cargas aerodinámicas a las que están sometidos los álabes y es el que recorre toda la altura del rotor, este estará apoyado en la parte superior del bastidor, se realizará un cálculo aproximado, para ello se puede considerar una carga distribuida a lo largo del eje por la acción de la fuerza del viento.

Debido a que el VAWT estará sometido a flujos turbulentos, es necesario considerar la velocidad máxima que se dará en el medio donde este se desempeñará que es 6,9 m/s debido al paso de un vehículo grande. Ya que será muy común que estos vehículos se desplacen por la vía del sector de Quebrada Honda y el VAWT deberá soportarlos. Entonces, la presión que el viento ejercerá sobre el VAWT está dada por:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (18)$$

Donde

ρ : densidad del aire en kg/m^3

v : velocidad del viento en m/s

$$P = \frac{1}{2} \times 0,851 \times 6,9^2$$

$$P = 20,258 Pa$$

El eje recibirá la carga aerodinámica q como consecuencia de la fuerza del viento, y este efecto hará que el eje se flexione, a continuación, se calcula la fuerza del viento que actúa en el eje.

$$F_{viento} = 1,2q$$

$$P = \frac{F_{viento}}{A} = \frac{F_{viento}}{1,2 \times 1,36} = 20,258$$

$$F_{viento} = 33,061N = 1,2q$$

Para comenzar con el cálculo se requiere hacer un diagrama de cuerpo libre (DCL) con la finalidad de mostrar todas las reacciones que se ejercen en el eje transmisor de potencia para poder determinar las ecuaciones de equilibrio.

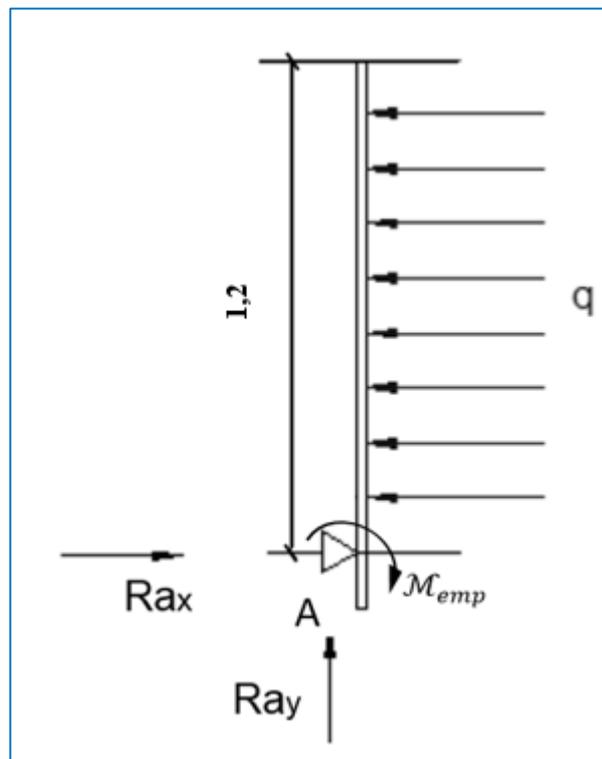


Figura 41. DCL del eje transmisor de potencia

En primer lugar, se determinan las reacciones por medio de las ecuaciones de equilibrio, en donde los resultados de las reacciones son:

$$R_{ay} = 0$$

$$R_{ax} = 33,061 N$$

$$\mathcal{M}_{emp} = 33,061N(1,36 m) = 44,96 Nm$$

Por las ecuaciones de equilibrio se determina que el momento flector máximo estará en el punto de empotramiento del eje (brida) y su valor será:

$$\mathcal{M}_{max} = 44,96Nm$$

Se requiere determinar el diámetro mínimo del eje transmisor de potencia mediante la teoría de falla por energía de distorsión (Von Mises).

A continuación, se presenta la siguiente ecuación [7].

$$d = \left\{ \frac{16 n}{\pi S_e} \left[4 (K_f M_a)^2 + 3 (K_{fs} T_a)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

Donde

d = diámetro de árbol

M_a = momento flector máximo

n = factor de seguridad

K_f = factor de concentración de esfuerzo por fatiga de la flexión

K_{fs} = factores de concentración de esfuerzo por fatiga de la torsión

S_e = límite de fluencia

T_a = par de torsión

Se utilizará el acero AISI SAE1045 de aceros Böhler, ya que este es aplicable para árboles de transmisión sometidos a esfuerzos normales como es el caso del eje de transmisión de potencia del VAWT.

Según Aceros Böhler del Perú S. A. el límite de fluencia para el acero AISI SAE1045 es $S_y = 340 \text{ N/mm}^2$, para ejes de 16 a 100 mm de diámetro.

a) Factor de seguridad (F. S.)

El factor de seguridad es $n = 2,5$, ya que es un valor recomendado para la fabricación de maquinaria y se usa con materiales que trabajan en condiciones ideales.

b) Factor de concentración de esfuerzo por fatiga de la flexión (K_f).

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

$$K_f = 1 + 0.62(2.7 - 1)$$

$$K_f = 2,054$$

c) Factor de concentración de esfuerzo por fatiga de la flexión (K_{fs}).

$$K_{fs} = 1 + q_{cortante}(K_{ts} - 1)$$

$$K_{fs} = 1 + 0.62(2.2 - 1)$$

$$K_{fs} = 1,744$$

• Factor de concentración de esfuerzo (k_t):

Para el caso de filete de hombro agudo se estimarán los valores k_t y k_{ts} .

$$K_t = 2.7$$

$$K_{ts} = 2.2$$

Tabla 16. Estimaciones de primera iteración de los factores de concentración K_t y K_{ts}

| | Flexión | Torsión | Axial |
|---|---------|---------|-------|
| Filete de hombro: agudo ($r/d = 0.02$) | 2.7 | 2.2 | 3.0 |
| Filete de hombro: bien redondeado ($r/d = 0.1$) | 1.7 | 1.5 | 1.9 |
| Cuñero fresado ($r/d = 0.02$) | 2.2 | 3.0 | — |
| Cuñero de patín o trapezoidal | 1.7 | — | — |
| Ranura para anillo de retención | 5.0 | 3.0 | 5.0 |

Los valores faltantes en la tabla no pueden obtenerse con facilidad.

Nota: tomada de Budynas y Nisbett (17)

- Sensibilidad a la muesca sometida a flexión inversa de cargas axiales inversas (q) en primera instancia se debe seleccionar un diámetro tentativo y reemplazarlo en la relación $\frac{r}{d} = 0.02$ que es para el caso de filete de hombro agudo.

Para el eje de transmisión se optó por el diámetro tentativo de 1" pulgada, entonces, reemplazando en la relación se tendría que el radio de muesca sería $r = 0.02$.

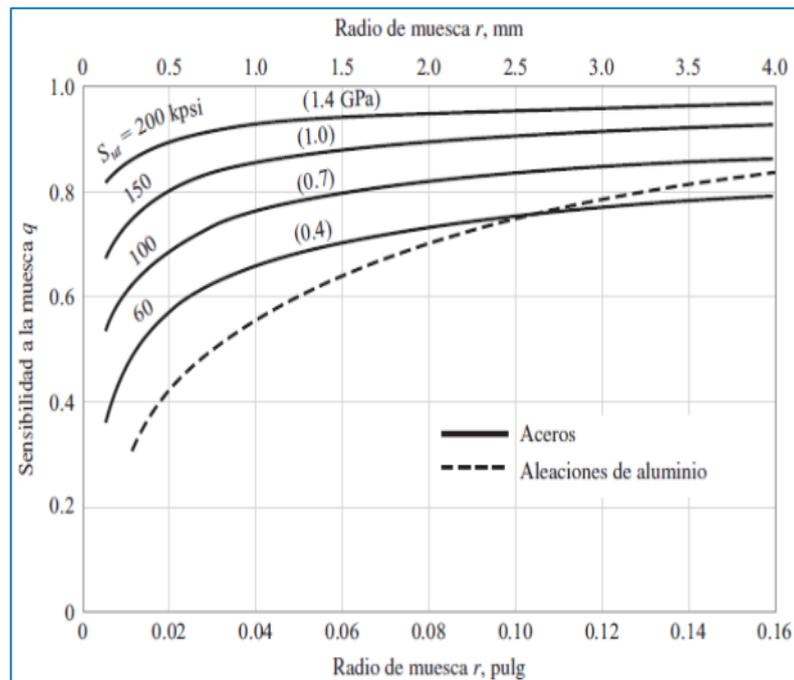


Figura 42. Sensibilidad a la muesca para aceros y aleación de aluminio sometidos a flexión inversa (17)

Se elige trabajar el radio de muesca de 0.02 pulg. y el acero tiene un $S_{ut} = 0.5GPa$, entonces la línea del radio de

muesca en pulgadas intersecta en la curva de menor esfuerzo último de la figura, por ello la sensibilidad a la muesca es de $q = 0.62$.

- Sensibilidad a la muesca sometida a flexión inversa de cargas axiales inversas ($q_{cortante}$).

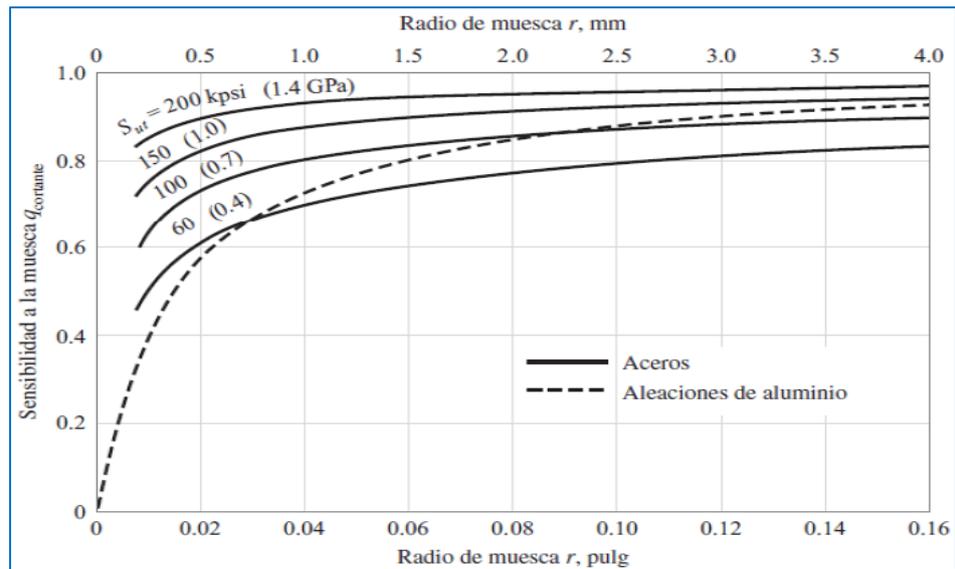


Figura 43. Sensibilidad a la muesca para aceros y aleación de aluminio sometidos a torsión inversa (17)

Se elige trabajar con el radio de muesca de 0.02 pulg. y el acero tiene un $S_{ut} = 0.5GPa$, entonces la línea del radio de muesca en pulgadas intersecta en la curva de menor esfuerzo último del acero en la figura, por ello la sensibilidad a la muesca cortante es de $q_{cortante} = 0.62$.

Con todos los valores obtenidos, se aplica la fórmula de la teoría de falla por energía de distorsión (Von Mises).

Tabla 17. Datos obtenidos para el cálculo del diámetro mínimo del eje

| | |
|--|--|
| FS (factor de seguridad) | $n = 2,5$ |
| S_y L (límite de fluencia del eje) | $S_y = 340 \text{ N/mm}^2$ |
| Factor de concentración del esfuerzo por fatiga de la flexión | $K_f = 2,054$ |
| Momento de flexión máxima | $\mathcal{M}_{max} = 44,96 \text{ Nm}$ |
| Factor de concentración del esfuerzo por fatiga de la torsión. | $K_{fs} = 1,774$ |
| Par motor | $T = 0,462 \text{ Nm}$ |

$$d = \left\{ \frac{16 \times 2.5}{\pi \times 340 \times 10^6} [4(2.054 \times 44,96)^2 + 3(1.774 \times 0.46)^2] \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 0.019 \text{ m} \langle \rangle 3/4''$$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados de la simulación de los componentes del *VAWT Savonius helicoidal* utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD) de *SolidWorks Simulations* y el método de análisis de elementos finitos (FEA) de *Inventor Simulations*, para la turbina eólica y el eje propulsor, respectivamente, con el objetivo de predecir el comportamiento de los componentes sometidos a cargas aerodinámicas. Además, se presentan y analizan los resultados.

4.1. Presentación de resultados

Este trabajo de investigación tiene la intención de servir como antecedente de soluciones energéticas, además para explicar la conversión de energía en las vías en donde circulan vehículos a elevadas velocidades siempre respetando el medio ambiente. La energía mecánica generada podría ser aprovechada por un generador eléctrico y así alimentar a la red eléctrica local o energizar las señaléticas de las vías, así como también podría ser utilizado como instrumento de medición de velocidad.

Entonces, este trabajo de tesis incentiva y da a conocer el potencial energético de las turbinas eólicas instaladas en las vías, ya que estas pueden tener muchas aplicaciones productivas para poblaciones aledañas o para los conductores que circulan por la vía del sector de Quebrada Honda.

Se presentó que la energía mecánica obtenida sería a través de una turbina eólica, para ello el diseño se realizó mediante las condiciones de trabajo y variables de entrada en el VAWT, además, considerando los estudios desarrollados, que fueron citados en esta investigación. A continuación, se resumen los resultados mediante tablas y figuras.

4.1.1. Tablas

Como se mencionó párrafos anteriores, esta investigación se realizó para que sirva como referencia de soluciones energéticas, se pretendió que la obtención de esta energía será a través de una turbina eólica de eje vertical, para empezar el diseño de este VAWT se hizo un estudio de la cantidad de vehículos y velocidad de los flujos de viento que generan los vehículos, con las cuales se determinó la velocidad de viento que ingresa en el área proyectada del VAWT.

Tabla 18. Datos de la turbina eólica

| Descripción | Abreviatura | Unidad | Cantidad |
|----------------------------------|-------------|----------|----------|
| Diámetro externo del rotor | D_e | mm | 1360 |
| Altura del rotor | H | mm | 1200 |
| Relación de aspecto | A_R | - | 0.88 |
| Número de álabes | - | - | 2 |
| Número de etapas | - | - | 2 |
| Flujo volumétrico | Q | m^3/s | 11.316 |
| Velocidad absoluta en la entrada | V | m/s | 6.9 |
| Densidad del aire | ρ | kg/m^3 | 0.851 |
| Flujo másico | \dot{m} | kg/s | 9.623 |

Tabla 19. Propiedades físicas del eje propulsor del VAWT

| | |
|----------|-------------------------|
| Material | Acero AISI 1045 |
| Densidad | 7850 kg/m ³ |
| Masa | 15.9687 kg |
| Área | 179435 mm ² |
| Volumen | 2034230 mm ³ |

Tabla 20. Condiciones de operación del eje propulsor del VAWT

| Restricción | Fuerza de reacción | | Momento de la reacción | |
|-----------------------------------|--------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| | Magnitud | Componente (X, Y, Z) | Magnitud | Componente (X, Y, Z) |
| Restricción fija (brida inferior) | | 31.9831 N | | 4.40244 N m |
| | 33.061 N | 0.524777 N | 17.4135 N m | 0 N m |
| | | 8.35664 N | | -16.8478 N m |

4.1.2. Resultado del diseño de álabes

Tomando como referencia los estudios desarrollados y revisiones sobre VAWTS del tipo *Savonius* en la figura indica que es la turbina eólica que mejor se ajusta a las condiciones de trabajo según el diseño basado en la metodología VDI2221-2225.

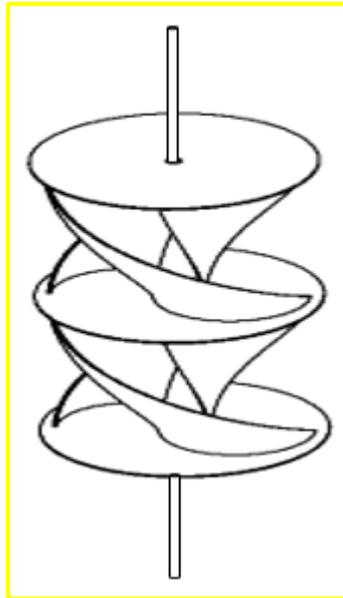


Figura 44. Prototipo de solución

4.1.3. Análisis de los resultados

4.1.3.1. Análisis CFD del VAWT *Savonius*

Según los datos recolectados el VAWT *Savonius Helicoidal* de doble etapa, estará sometido a una velocidad máxima de 6.9 m/s con el cual se simulará, utilizando el método de dinámica de fluidos (CFD) del programa *Flow Simulations* de *SolidWorks*.

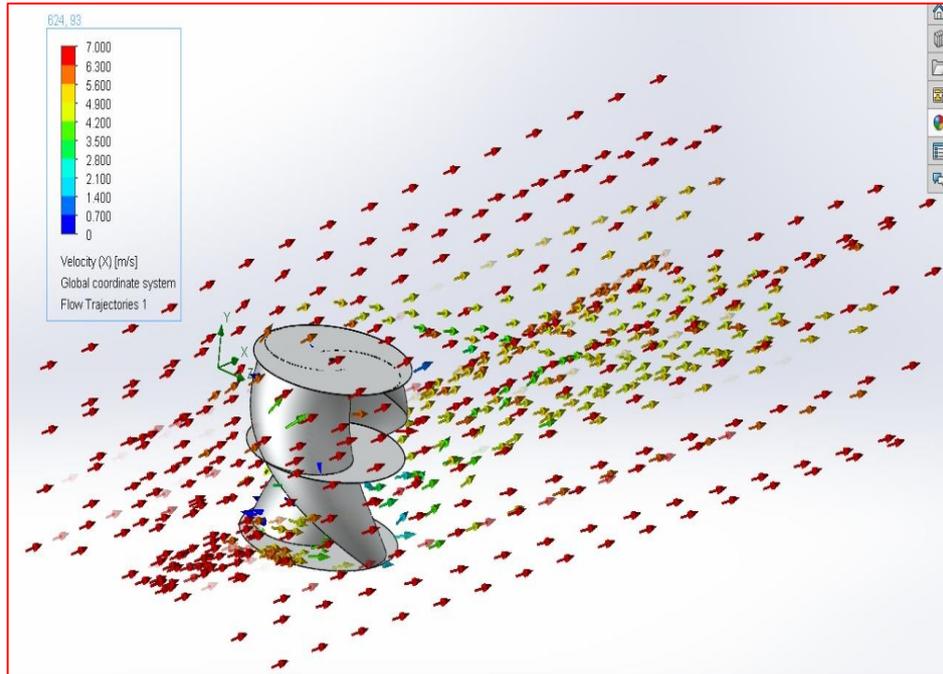


Figura 45. Análisis CFD del VAWT Savonius helicoidal (Contorno de velocidad - Inlet)

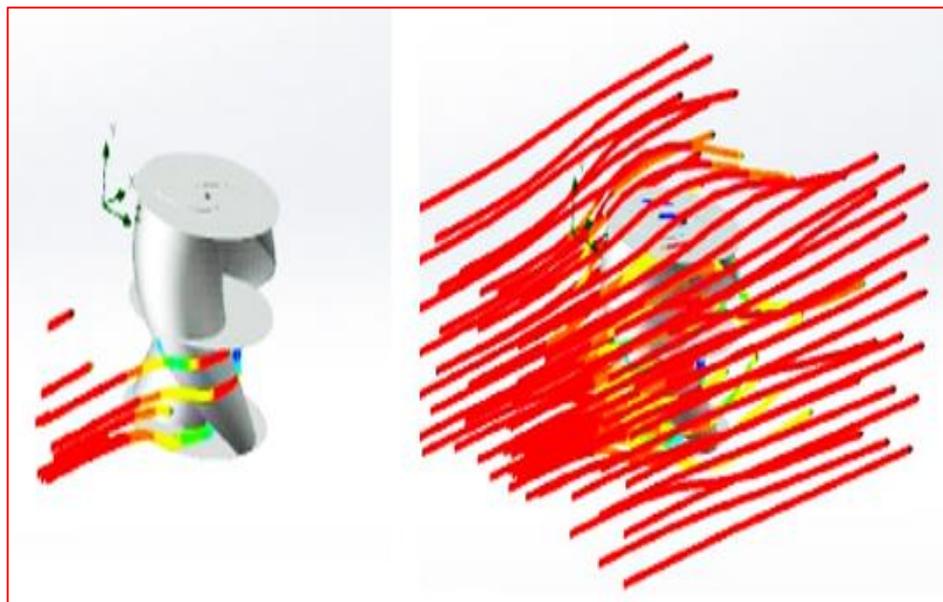


Figura 46. Análisis CFD del VAWT Savonius helicoidal (flujo de aire)

El análisis del VAWT sometido a una velocidad máxima de 6.9 m/s muestra las líneas de flujo de aire que se desplazan por los perfiles de los álabes, generando presión en el lado concavo del álabe que a su vez logra generar un torque de arranque. Además, muestra que la coloración de las líneas del flujo de aire varían cuando ingresan al VAWT, es decir, que la velocidad del viento disminuye cuando ingresa al VAWT, entonces de esto se puede deducir que la energía cinética del viento se transforma en energía

mecánica de rotación, cumpliendo así con la primera ley de la termodinámica que dice que la energía no se crea ni se destruye solo cambia de forma.

4.1.3.2. Analisis FEA del eje propulsor del VAWT Savonius

El eje propulsor del VAWT brindará rigidez y soportará las cargas aerodinámicas, es por lo que es necesario simularlo para predecir su comportamiento con las condiciones de trabajo, según las características del catálogo de aceros Böhler, el acero AISI 1045 puede ser aplicado a árboles de transmisión con esfuerzos normales. Como existirán posibles variaciones se considerará un factor de seguridad de 1,5 con el cual se simularán utilizando el método de análisis de elementos finitos (FEA) de *Inventor Simulation*.

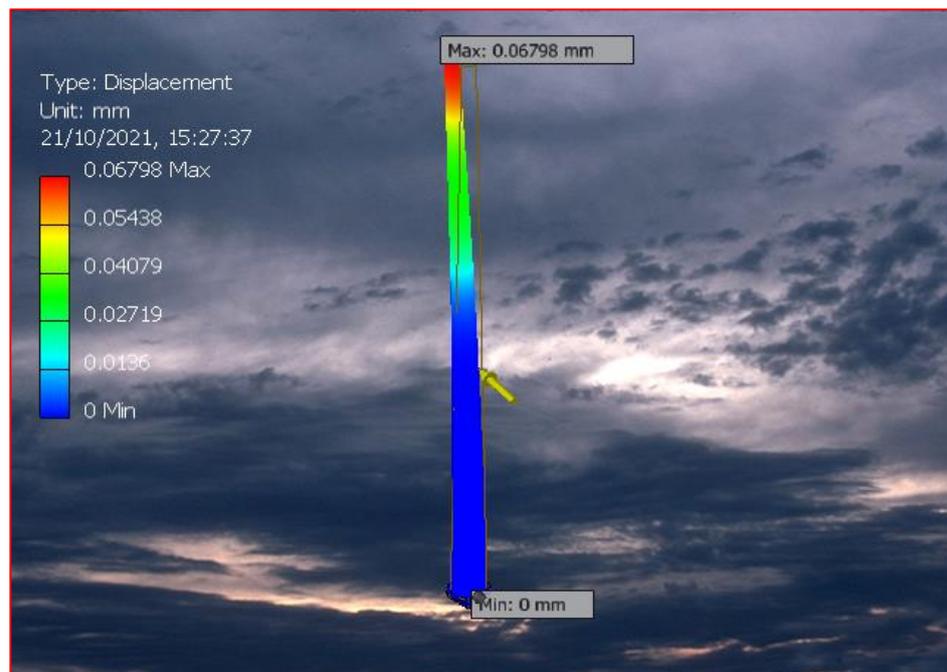


Figura 47. Análisis estático del eje propulsor del VAWT (desplazamiento)

El análisis estático del eje propulsor del VAWT Savonius sometido a esfuerzos máximos muestra que el desplazamiento es 0,068 mm.

4.2. Discusión de los resultados

Cuando se hizo estructura de funciones en esta investigación, se realizó la matriz morfológica para determinar los materiales más livianos y resistentes para el VAWT.

Concepto de solución óptima

Siguiendo las directrices del análisis de la metodología VDI-2225 se concluye que la solución óptima es la opción 2, por ser el prototipo que mejor se ajusta a las condiciones de trabajo; y esto pudo apreciarse en el diagrama de análisis técnico-económico, ya que la solución 2 se acercaba más a la solución ideal de la figura 47. Además, se puede observar que en el dibujo CAD de la solución 2 es una turbina eólica de eje vertical del tipo *Savonius* de forma helicoidal.

En este análisis se consideraron los criterios de evaluación de la metodología VDI-2225 con las características de la lista de exigencias (función, geometría, materia prima, etc.), para luego determinar la solución óptima mediante la evaluación técnico-económica.

Para los álabes se seleccionó un álabe que aprovechara los flujos de viento en todos sus puntos e incrementar el rendimiento de la energía obtenida del flujo de viento, se consideró que los álabes helicoidales se prestaban mejor para la condición de trabajo, además para incrementar el rendimiento, se modificaron los parámetros geométricos como el número de etapas y la relación de aspecto. La figura muestra el dibujo CAD en donde se aprecia el número de etapas y la forma de los álabes.

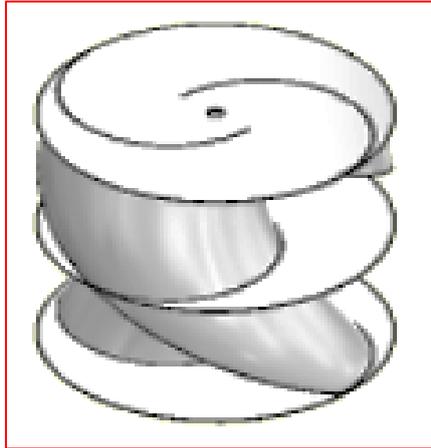


Figura 48. VAWT Savonius helicoidal de doble etapa

4.3. Aportes y aplicaciones

El diseño del VAWT Savonius se podrá utilizar en las bermas centrales o los costados de la vía del sector de Quebrada Honda, en donde se ejecutó este trabajo de investigación, porque existe bastante flujo de vehículos que circulan a elevadas velocidades que generan estelas de viento muy prolongadas.

CONCLUSIONES

1. La presente tesis cumple con el objetivo general de diseñar una VAWT para recolectar energía eólica de las estelas de viento que generan los vehículos, debido a que tiene un diseño en el rotor que aprovecha mejor los caudales de viento por su forma helicoidal.
2. Mediante las directrices de la metodología VDI2221, se realizó el diseño de la turbina eólica de eje vertical puliéndola en cada una de sus fases del proceso de diseño, haciendo una evaluación técnico-económica, que brindó una solución óptima con ponderados de 0.568 y 0.635 de valor técnico y valor económico, respectivamente.
3. El diseño de la geometría del VAWT está basada en revisiones e investigaciones científicas de especialistas en *VAWT Savonius* cuyo objetivo es incrementar el rendimiento del rotor *Savonius*. El *VAWT Savonius* posee un diámetro exterior de 1.36 m y una altura de 1.2 m, se empleó un polímero por sus propiedades resistentes a la tracción y bajo peso específico.
4. Mediante la recolección de datos con el instrumento de medición de la velocidad de viento (anemómetro) que se realizó en Quebrada Honda se determinó que el promedio mínimo de la velocidad de viento es 5,15 m/s y que existe un máximo promedio de velocidad de viento que representa 6,9 m/s, estos límites de velocidad son los adecuados para el buen funcionamiento del VAWT.
5. El eje que brindará rigidez al *VAWT Savonius* se fabricará de acero AISI 1045, porque puede ser aplicado en ejes de transmisión, además tiene propiedades mecánicas de mediana resistencia y tenacidad, y son maquinables.

LISTA DE REFERENCIAS

1. **Diario Correo.** Más de 12 mil vehículos menores generan caos en la provincia de Huancayo. [En línea] 31 de julio de 2019. [Citado el: 2 de agosto de 2021.] <https://diariocorreo.pe/edicion/huancayo/mas-de-12-mil-vehiculos-menores-generan-caos-en-la-provincia-de-huancayo-901659/?ref=dcr>.
2. **CHING VALLE, Jonathan Xavier y FIGUEROA BRIONES, Ángel Gerardo.** *Diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical para un sistema de iluminación de emergencia con luces LED.* Universidad Católica de Santigao de Guayaquil. Ecuador : s.n., 2017.
3. **DIAGO VIDAL, Carlos.** *Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico.* Valencia, España : s.n., 219.
4. **TIAN, Wenlong; MAO, Zhaoyong; LI, Yukai.** *Numerical simulations of a VAWT in the wake of a moving car.* 4, 2017, *Energies* [online]. 2017, 10(4). ISSN 19961073. Dostupné z: doi:10.3390/en10040478, Vol. 10. ISSN 19961073.
5. **USNAYO ESTEFANERO, Carlos Saúl; CHECALLA UMPIRI, Stiff Bryan.** *Perfil de un aerogenerador tipo vertical en el edificio de 15 pisos de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, 2018.* Universidad Nacional del Altiplano Puno. Puno, Perú : s.n., 2018. Tesis de grado.
6. **SAYAS RAMOS, Franks.** *Captación de aire mediante toberas que genere la mayor cantidad de energía eólica en Huancayo, Perú.* 2017.
7. **BERNA HUILLCA, José Luis.** *Diseño del rotor de un aerogenerador vertical tipo Savonius para la localidad de Tanaka, Arequipa, Perú, 2020.*
8. **SPARK, Weather.** El clima promedio en el Tambo. [En línea] 2021. <https://es.weatherspark.com/y/22261/Clima-promedio-en-El-Tambo-Perú-durante-todo-el-año>.
9. **Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú.** *Reglamento Nacional de Vehículos. Decreto Supremo N.o 058-2003-MTC.* 2003.
10. **BAI, H. L.; CHAN, C. M.; ZHU, X. M.; LI, K. M.** *A numerical study on the performance of a Savonius-type vertical-axis wind turbine in a confined long channel.* 2019, *Renewable Energy*, Vol. 139, págs. 102-109. ISSN 18790682.

11. **PENNE, Matthew; QIAO, Wei; HUDGINS, Jerry L.** *Converting waste vehicle aerodynamic energy into electricity.* 2018, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2018, págs. 416 - 422.
12. **AN, Xinyu; WEN Haibing; TIAN Wenlong; MAO Zhaoyong; ZHANG, Baoshou.** *Numerical study of energy recovery from the wakes of moving vehicles on highways by using a vertical axis wind turbine.* 2017, Energy, Vol. 141, págs. 715 - 728. ISSN 03605442.
13. **VICENTE, João; ANTONIO, Horácio; PRISCO, Adriane.** *A review on the performance of Savonius wind turbines.* 2012, Renewable and Sustainable Energy Reviews, págs. 3054 - 3064. ISSN 1364-0321.
14. **ALOM, Nur; SAHA, Ujjwal K.** *Evolution and progress in the development of savonius wind turbine rotor blade profiles and shapes.* 3, 2018, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 141. ISSN 0199-6231.
15. **KAMOJI, M. A.; KEDARE, S. B.; PRABHU, S. V.** *Performance tests on helical Savonius rotors.* 3, 2009, Renewable Energy, Vol. 34, págs. 521 - 529. ISSN 0960-1481.
16. **WONG GARCÍA, Stefanie Michelle.** *Diseño de un aerogenerador vertical Savonius-curvado para ensayos experimentales con velocidades de 4 m/s a 8 m/s.* Pontificia Universidad Católica del Perú. 2015. Tesis de grado.
17. **BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, Keith J.** *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley.* 9. México, D. F. : McGraw Hill, 2012.
18. **HERNÁNDEZ, R.; FERNÁNDEZ, C.; BAPTISTA, P.** *Metodología de la investigación.* 2014. ISBN 9788578110796.
19. **SAHA, U. K.; THOTLA, S.; MAITY, D.** *Journal of wind engineering optimum design configuration of savonius rotor through wind tunnel experiments.* 2008. págs. 1359 – 1375. Vol. 96.

ANEXOS

Anexo 1

Muestreo de velocidad promedio del viento generados por los vehículos que se desplazan por la vía del sector de Quebrada Honda, Huancayo, 2021

Tabla 21. Medición de la velocidad de las estelas

| Medición de la velocidad de las estelas de viento generados por los vehículos con un parámetro de 30 minutos | | |
|---|---------------------|----------------------------|
| Fecha | Intervalo de tiempo | Velocidad del viento (m/s) |
| 16/9/2021 | 10:25 | 5.35 |
| 16/9/2021 | 10:55 | 5.15 |
| 16/9/2021 | 11:25 | 5.17 |
| 16/9/2021 | 11:55 | 5.30 |
| 16/9/2021 | 12:25 | 5.73 |
| 16/9/2021 | 12:55 | 6.25 |
| 16/9/2021 | 13:25 | 6.70 |
| 16/9/2021 | 13:55 | 6.27 |
| 16/9/2021 | 14:25 | 6.03 |
| 16/9/2021 | 14:55 | 5.90 |
| 16/9/2021 | 15:25 | 5.73 |
| 16/9/2021 | 15:55 | 5.92 |
| 16/9/2021 | 16:25 | 6.28 |
| 16/9/2021 | 16:55 | 6.30 |

| Date Time | Temp Out | Hi temp | Low Temp | Out Hum | Dew pt. | Wind speed |
|-----------|----------|---------|----------|---------|---------|------------|
| 16/9/2021 | 10:25 | 17.6 | 17.6 | 17.3 | 43 | 5.8 |
| 16/9/2021 | 10:30 | 17.5 | 17.6 | 17.5 | 42 | 5.4 |
| 16/9/2021 | 10:35 | 17.7 | 17.7 | 17.4 | 41 | 5.3 |
| 16/9/2021 | 10:40 | 17.9 | 17.9 | 17.8 | 39 | 4.8 |
| 16/9/2021 | 10:45 | 18.1 | 18.1 | 17.9 | 42 | 6 |
| 16/9/2021 | 10:50 | 18 | 18.2 | 18 | 39 | 4.8 |
| 16/9/2021 | 10:55 | 17.8 | 18.1 | 17.8 | 40 | 5 |
| 16/9/2021 | 11:00 | 17.8 | 17.8 | 17.7 | 41 | 5.3 |
| 16/9/2021 | 11:05 | 17.7 | 17.8 | 17.7 | 41 | 5.3 |
| 16/9/2021 | 11:10 | 17.8 | 17.8 | 17.7 | 40 | 5 |
| 16/9/2021 | 11:15 | 17.9 | 17.9 | 17.9 | 40 | 5.1 |
| 16/9/2021 | 11:20 | 18 | 18.1 | 17.9 | 40 | 5.2 |
| 16/9/2021 | 11:25 | 18.1 | 18.1 | 17.9 | 40 | 5.2 |
| 16/9/2021 | 11:30 | 17.9 | 18.1 | 17.9 | 40 | 5.1 |
| 16/9/2021 | 11:35 | 17.9 | 18 | 17.9 | 40 | 5.1 |
| 16/9/2021 | 11:40 | 18 | 18 | 17.9 | 40 | 5.2 |
| 16/9/2021 | 11:45 | 18.1 | 18.1 | 18 | 40 | 5.2 |
| 16/9/2021 | 11:50 | 18 | 18.1 | 18 | 40 | 5.2 |
| 16/9/2021 | 11:55 | 17.9 | 18.1 | 17.9 | 40 | 5.1 |

| | | | | | | |
|-----------|-------|------|------|------|----|-----|
| 16/9/2021 | 12:00 | 17.9 | 18 | 17.9 | 40 | 5.1 |
| 16/9/2021 | 12:05 | 18 | 18 | 17.9 | 40 | 5.2 |
| 16/9/2021 | 12:10 | 18 | 18.1 | 18 | 41 | 5.5 |
| 16/9/2021 | 12:15 | 18.1 | 18.1 | 18 | 41 | 5.6 |
| 16/9/2021 | 12:20 | 18.2 | 18.2 | 18.1 | 40 | 5.3 |
| 16/9/2021 | 12:25 | 18.2 | 18.2 | 18.1 | 41 | 5.7 |
| 16/9/2021 | 12:30 | 18.2 | 18.3 | 18.2 | 41 | 5.7 |
| 16/9/2021 | 12:35 | 18.2 | 18.3 | 18.2 | 41 | 5.7 |
| 16/9/2021 | 12:40 | 17.9 | 18.2 | 17.9 | 42 | 5.8 |
| 16/9/2021 | 12:45 | 17.8 | 18 | 17.8 | 42 | 5.7 |
| 16/9/2021 | 12:50 | 17.9 | 17.9 | 17.8 | 42 | 5.8 |
| 16/9/2021 | 12:55 | 17.9 | 17.9 | 17.8 | 42 | 5.5 |
| 16/9/2021 | 13:00 | 17.8 | 17.9 | 17.7 | 43 | 6 |
| 16/9/2021 | 13:05 | 17.8 | 17.8 | 17.7 | 44 | 6.4 |
| 16/9/2021 | 13:10 | 17.7 | 17.8 | 17.7 | 45 | 6.6 |
| 16/9/2021 | 13:15 | 17.8 | 17.8 | 17.7 | 44 | 6.4 |
| 16/9/2021 | 13:20 | 17.7 | 17.8 | 17.7 | 45 | 6.6 |
| 16/9/2021 | 13:25 | 17.6 | 17.7 | 17.6 | 46 | 6.8 |
| 16/9/2021 | 13:30 | 17.7 | 17.7 | 17.6 | 46 | 6.9 |
| 16/9/2021 | 13:35 | 17.6 | 17.7 | 17.6 | 46 | 6.8 |
| 16/9/2021 | 13:40 | 17.6 | 17.6 | 17.6 | 46 | 6.8 |
| 16/9/2021 | 13:45 | 17.4 | 17.6 | 17.4 | 46 | 6.5 |
| 16/9/2021 | 13:50 | 17.1 | 17.4 | 17.1 | 46 | 6.4 |
| 16/9/2021 | 13:55 | 17.1 | 17.1 | 17 | 46 | 6.3 |
| 16/9/2021 | 14:00 | 17.1 | 17.1 | 17 | 46 | 6.4 |
| 16/9/2021 | 14:05 | 16.9 | 17.1 | 16.9 | 46 | 6.2 |
| 16/9/2021 | 14:10 | 16.7 | 16.9 | 16.7 | 47 | 6.3 |
| 16/9/2021 | 14:15 | 16.6 | 16.7 | 16.6 | 47 | 6.2 |
| 16/9/2021 | 14:20 | 16.6 | 16.6 | 16.6 | 47 | 6.2 |
| 16/9/2021 | 14:25 | 16.4 | 16.6 | 16.4 | 47 | 6 |
| 16/9/2021 | 14:30 | 16.1 | 16.4 | 16 | 48 | 6 |
| 16/9/2021 | 14:35 | 15.8 | 16.1 | 15.8 | 49 | 6.1 |
| 16/9/2021 | 14:40 | 15.8 | 15.8 | 15.8 | 49 | 6.1 |
| 16/9/2021 | 14:45 | 15.8 | 15.9 | 15.8 | 49 | 6.1 |
| 16/9/2021 | 14:50 | 15.6 | 15.8 | 15.6 | 49 | 5.9 |
| 16/9/2021 | 14:55 | 15.4 | 15.6 | 15.4 | 50 | 6 |
| 16/9/2021 | 15:00 | 15.4 | 15.4 | 15.4 | 50 | 6.1 |
| 16/9/2021 | 15:05 | 15.4 | 15.4 | 15.4 | 49 | 5.8 |
| 16/9/2021 | 15:10 | 15.6 | 15.6 | 15.4 | 49 | 5.9 |
| 16/9/2021 | 15:15 | 15.8 | 15.8 | 15.6 | 48 | 5.8 |
| 16/9/2021 | 15:20 | 15.8 | 15.8 | 15.8 | 48 | 5.8 |
| 16/9/2021 | 15:25 | 15.9 | 15.9 | 15.8 | 47 | 5.6 |
| 16/9/2021 | 15:30 | 16.1 | 16.1 | 15.9 | 47 | 5.8 |
| 16/9/2021 | 15:35 | 16.3 | 16.3 | 16.1 | 47 | 5.9 |
| 16/9/2021 | 15:40 | 16.3 | 16.3 | 16.3 | 47 | 6 |

| | | | | | | |
|-----------|-------|------|------|------|----|-----|
| 16/9/2021 | 15:45 | 16.3 | 16.3 | 16.3 | 48 | 6.3 |
| 16/9/2021 | 15:50 | 16.5 | 16.5 | 16.3 | 47 | 4.8 |
| 16/9/2021 | 15:55 | 16.8 | 16.8 | 16.6 | 46 | 4.8 |
| 16/9/2021 | 16:00 | 16.9 | 16.9 | 16.8 | 46 | 6.2 |
| 16/9/2021 | 16:05 | 17.1 | 17.1 | 16.9 | 45 | 6 |
| 16/9/2021 | 16:10 | 16.9 | 17.1 | 16.9 | 46 | 6.2 |
| 16/9/2021 | 16:15 | 16.8 | 16.9 | 16.8 | 46 | 6.1 |
| 16/9/2021 | 16:20 | 16.6 | 16.8 | 16.6 | 47 | 6.2 |
| 16/9/2021 | 16:25 | 16.7 | 16.7 | 16.6 | 47 | 6.3 |
| 16/9/2021 | 16:30 | 16.8 | 16.8 | 16.7 | 47 | 6.4 |
| 16/9/2021 | 16:35 | 16.9 | 16.9 | 16.8 | 46 | 6.2 |
| 16/9/2021 | 16:40 | 17.1 | 17.1 | 16.9 | 46 | 6.2 |
| 16/9/2021 | 16:45 | 17 | 17.1 | 17 | 46 | 6.3 |
| 16/9/2021 | 16:50 | 17.1 | 17.1 | 17 | 46 | 6.3 |
| 16/9/2021 | 16:55 | 17.1 | 17.1 | 17 | 46 | 6.3 |

Anexo 2

Acero al carbono "H" (AISI 1045)

H



AISI : 1045 W N°: 1.1191
DIN : CK 45

Tipo de aleación promedio : C 0,45 Si 0,3 Mn 0,7 %
Color de identificación : Rojo - Blanco - Rojo
Estado de suministro : Dureza natural 193 HB máx.

ACERO FINO AL CARBONO DE ALTA CALIDAD

Gran pureza de fabricación y estricto control de calidad.

APLICACIONES: Partes de maquinaria y repuestos sometidos a esfuerzos normales. Árboles de transmisión, ejes, pernos, tuercas, ganchos, pines de sujeción, pasadores, cuñas, chavetas, etc. También para herramientas de mano, portamatrices, etc.

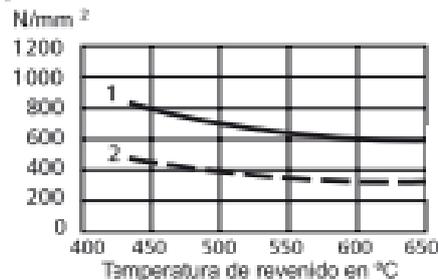
INDICACIONES PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO

| | | | |
|--------------------------------|------|---|--------|
| Forjar: | 1100 | - | 850 °C |
| Normalizar: | 840 | - | 870 °C |
| Recocer: | 650 | - | 700 °C |
| Enfriamiento lento en el horno | | | |
| Temple: al agua (*) | 820 | - | 850 °C |
| Dimensiones menores: al aceite | 830 | - | 860 °C |
| Revenido: Según el uso | 100 | - | 300 °C |
| Nitrurado: en baño de sal | | | 580 °C |

SOLDADURA: Con soldadura especial de alta resistencia.

Según tamaño y complejidad del trabajo, se recomienda un precalentamiento entre 200-300°C. Electrodo BÖHLER UTP 76/ UTP 6020

28



1.- Resistencia a la tracción
2.- Limite de Fluencia

| Estado | CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS | | | | |
|----------|---------------------------|--------------------------------------|---|-------------------------------|--------------------|
| | Diámetro mm. | Limite de fluencia N/mm ² | Resistencia a la tracción N/mm ² | Alargamiento (Lo = 5d) mín. % | Contracción mín. % |
| Natural | - | 370 | 650 | 15 | 35 |
| Recocido | 16 - 100 | 340 | 650 - 750 | 17 | 35 |
| | 100 - 250 | 330 | 580 - 700 | 18 | - |

(*) Soldadura y Tratamiento Térmico: Consultar con Departamento Técnico.

www.voestalpine.com/highperformancemetals/peru
www.boehlerperu.com

voestalpine
ONE STEP AHEAD

Nota: tomada de Aceros Böhler del Perú S. A.

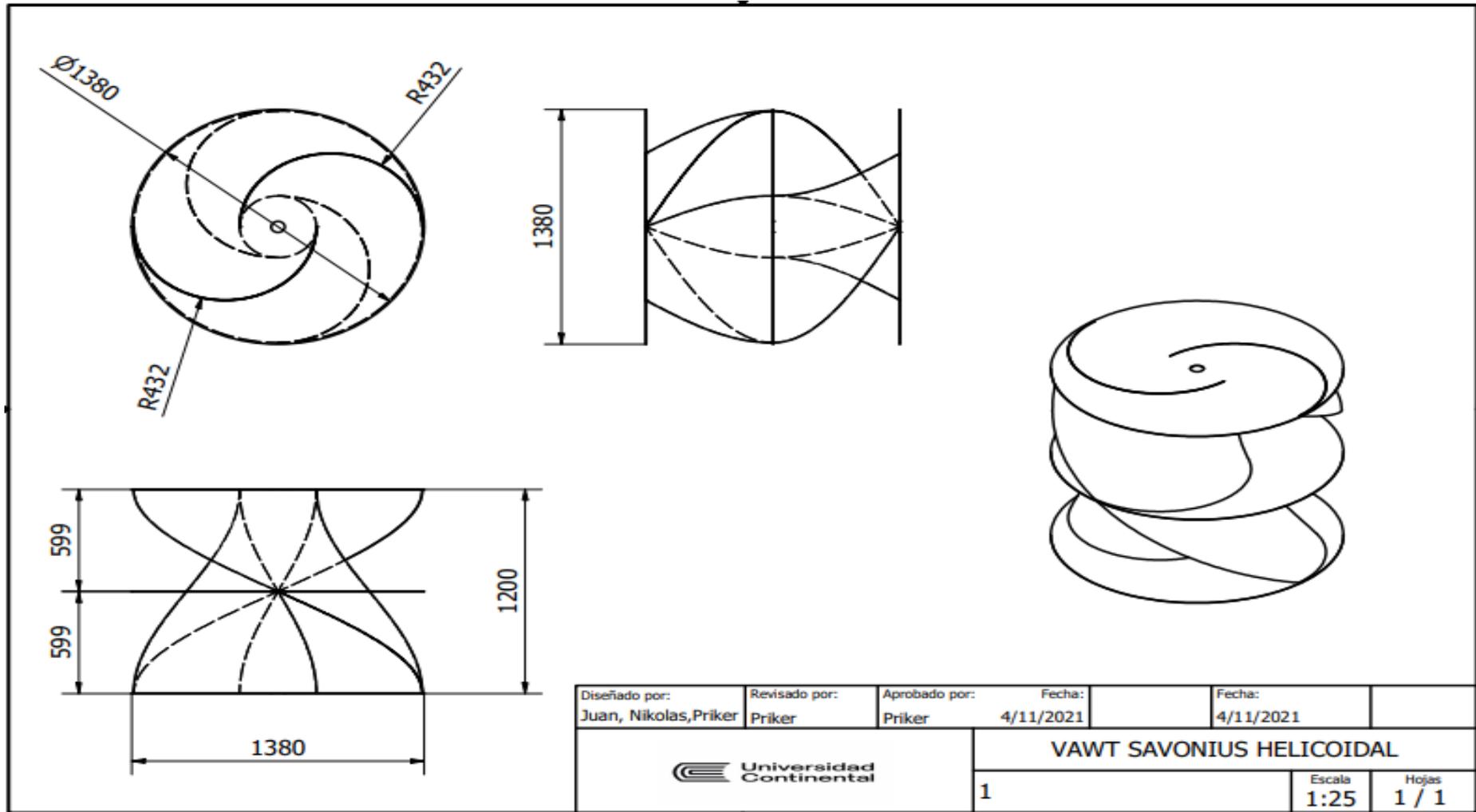
Anexo 3

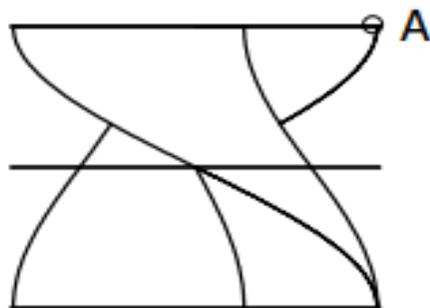
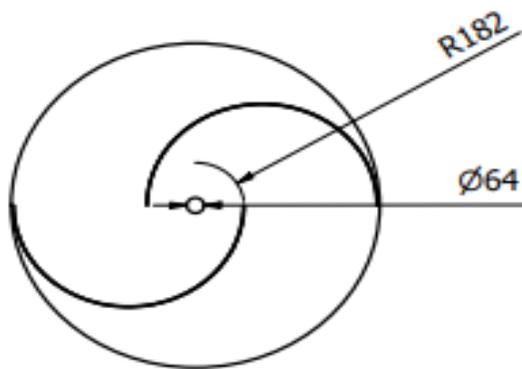
Resistencia determinística mínima a la tensión y a la fluencia ASTM

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|----------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------|
| | | Resistencia | | Resistencia a | | | |
| UNS núm. | SAE y/o AISI núm. | Procesa- miento | a la tensión, MPa (kpsi) | la fluencia, MPa (kpsi) | Elongación en 2 pulg, % | Reducción en área, % | Dureza Brinell |
| G10060 | 1006 | HR | 300 [43] | 170 [24] | 30 | 55 | 86 |
| | | CD | 330 [48] | 280 [41] | 20 | 45 | 95 |
| G10100 | 1010 | HR | 320 [47] | 180 [26] | 28 | 50 | 95 |
| | | CD | 370 [53] | 300 [44] | 20 | 40 | 105 |
| G10150 | 1015 | HR | 340 [50] | 190 [27.5] | 28 | 50 | 101 |
| | | CD | 390 [56] | 320 [47] | 18 | 40 | 111 |
| G10180 | 1018 | HR | 400 [58] | 220 [32] | 25 | 50 | 116 |
| | | CD | 440 [64] | 370 [54] | 15 | 40 | 126 |
| G10200 | 1020 | HR | 380 [55] | 210 [30] | 25 | 50 | 111 |
| | | CD | 470 [68] | 390 [57] | 15 | 40 | 131 |
| G10300 | 1030 | HR | 470 [68] | 260 [37.5] | 20 | 42 | 137 |
| | | CD | 520 [76] | 440 [64] | 12 | 35 | 149 |
| G10350 | 1035 | HR | 500 [72] | 270 [39.5] | 18 | 40 | 143 |
| | | CD | 550 [80] | 460 [67] | 12 | 35 | 163 |
| G10400 | 1040 | HR | 520 [76] | 290 [42] | 18 | 40 | 149 |
| | | CD | 590 [85] | 490 [71] | 12 | 35 | 170 |
| G10450 | 1045 | HR | 570 [82] | 310 [45] | 16 | 40 | 163 |
| | | CD | 630 [91] | 530 [77] | 12 | 35 | 179 |
| G10500 | 1050 | HR | 620 [90] | 340 [49.5] | 15 | 35 | 179 |
| | | CD | 690 [100] | 580 [84] | 10 | 30 | 197 |
| G10600 | 1060 | HR | 680 [98] | 370 [54] | 12 | 30 | 201 |
| G10800 | 1080 | HR | 770 [112] | 420 [61.5] | 10 | 25 | 229 |
| G10950 | 1095 | HR | 830 [120] | 460 [66] | 10 | 25 | 248 |

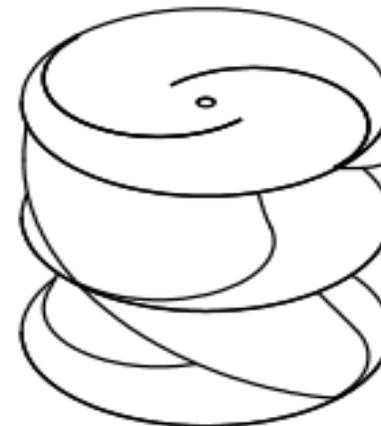
Nota: tomada de Budynas y Nisbett (17)

Anexo 4
Planos de detalle

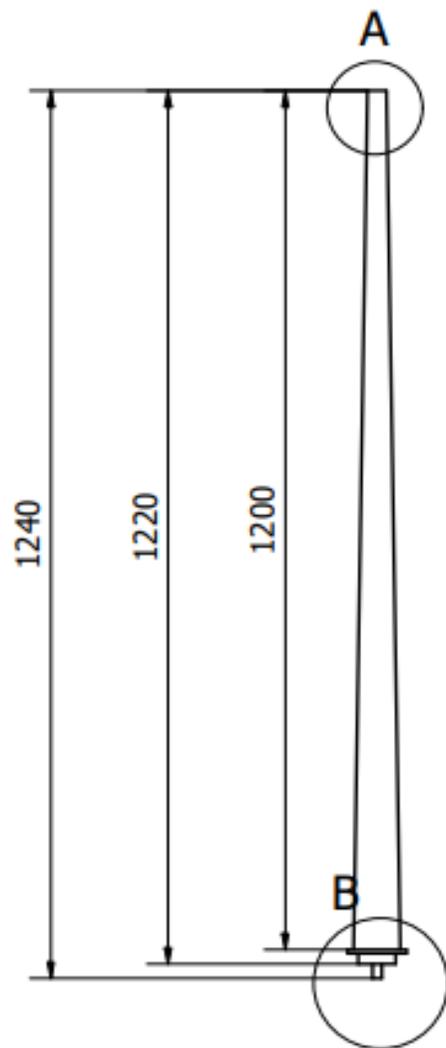




A (0.5 : 1)



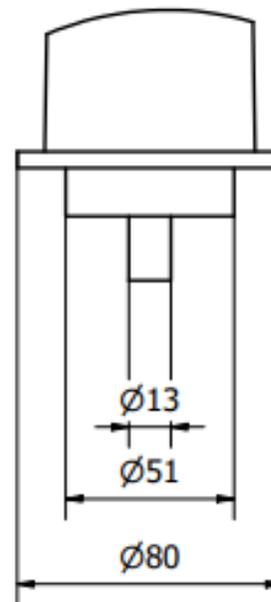
| | | | | |
|---|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------|
| Diseñado por: Juan, Nikolas, Priker | Revisado por: Priker | Aprobado por: Priker | Fecha: 4/11/2021 | Fecha: 4/11/2021 |
|  | | | VAWT SAVONIUS HELICOIDAL | |
| | | | 3 | Escala 1:25 | Hojas 1 / 2 |



A (0.5 : 1)



B (0.5 : 1)



| | | | | |
|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Diseñado por: Juan, Nikolas, Priker | Revisado por: Priker | Aprobado por: Priker | Fecha: 4/11/2021 | Fecha: 4/11/2021 |
| | | | EJE DE VAWT SAVONIUS | |
| | | | 2 | Escala 1:09 | Hojas 1 / 1 |

