UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN EÓLICA BASADO EN RESONANCIA AEROELÁSTICA"

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

Línea de investigación: Biotecnología, energía y recursos naturales renovables

AUTOR:

Luis Bayardo Salazar Urcuango

Director:

Ing. Guerra Masson Julio Esteban MSc.

Ibarra - Ecuador 2026

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Salazar Urcuango Luis Bayardo

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN EÓLICA BASADO EN RESONANCIA AEROELÁSTICA"
AUTOR:	Salazar Urcuango Luis Bayardo
FECHA: DD/MM/AAAA	14/07/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** □ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
DIRECTOR /ASESOR:	Ing. Julio Esteban Guerra Masson MSc. Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 14 días del mes de julio de 2026

EL AUTOR:



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
LUIS BAYARDO
SALAZAR URCUANGO

.....

Nombre: Luis Bayardo Salazar Urcuango

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, MSc. Guerra Masson Julio Esteban en calidad de director del señor estudiante Salazar Urcuango Luis Bayardo, certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERACIÓN EÓLICA BASADO EN RESONANCIA AEROELÁSTICA"

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JULIO ESTEBAN GUERRA MASSON

.....

Ing. Julio Esteban Guerra Masson MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con profundo agradecimiento a mis queridos padres, Santiago Salazar y Teresa Urcuango, así como a mis hermanos, por su apoyo constante, su comprensión y por los valiosos consejos que han guiado mi vida. Ustedes han sido el pilar fundamental de este logro. Asimismo, expreso mi sincera gratitud a todas las personas que me brindaron apoyo y orientación, contribuyendo de manera significativa a la realización de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por concederme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar este trabajo. Por acompañarme en cada etapa de este proceso, iluminar mi camino y permitirme superar con fe y esperanza cada dificultad presentada.

Agradezco a mis hermanos, por haber permanecido siempre a mi lado, en los momentos de alegría y también en los más difíciles, ofreciéndome tu apoyo incondicional, tu cariño sincero y tu compañía constante. Gracias por estar siempre presente, por ser una voz de aliento en los días de desánimo y por impulsarme, con tus palabras llenas de amor, a no rendirme y a culminar mi formación profesional. Tu presencia en mi vida ha sido un verdadero regalo y una fuente infinita de fortaleza.

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al MSc. Julio Guerra, tutor de este trabajo, por su paciencia, dedicación y valiosa orientación, elementos fundamentales en el desarrollo de esta investigación. De igual manera, agradezco al MSc. Jhonny Barzola por su acertada asesoría y por compartir generosamente sus conocimientos, contribuyendo de manera significativa a la mejora de este estudio

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Técnica del Norte por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente como ingeniero eléctrico. De igual manera, extiendo mi reconocimiento a los docentes de la carrera, quienes, a lo largo de mi proceso de formación, compartieron sus conocimientos y contribuyeron de manera significativa a mi desarrollo académico y profesional.

Asimismo, deseo expresar mi especial agradecimiento al Sr. Mesías Reyes y a la Sra. Mercedes Carlosama, propietarios de la Floristería Los Lirios, quienes me brindaron la oportunidad de estudiar y trabajar en su distinguida empresa simultáneamente, contribuyendo de manera significativa a mi desarrollo académico y profesional.

CONTENIDO

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE ... II

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR ... IV

DEDICATORIA ... V

AGRADECIMIENTOS ... VI

CONTENIDO ... VII

INDICE DE FIGURAS ... X

INDICE DE TABLAS ... XII

INDICE DE ECUACIONES ... XIII

RESUMEN ... XIV

ABSTRACT ... XV

1 CAPITULO I ... XVI

INTRODUCCIÓN ... XVI

1.1 Problema de investigación. ... XVI

1.2 Objetivos ... XVII

1.2.1 Objetivo general ... XVII

1.2.2 Objetivos específicos ... XVII

1.3 Alcance y delimitación ... XVII

1.4 Justificación ... XVIII

2 CAPÍTULO II ... 1

MARCO TEÓRICO ... 1

2.1 Antecedentes ... 1

2.1.1 Evolución de la energía eólica ... 2

2.1.2 Aprovechamiento de la energía eólica para la generación de electricidad ... 4

2.1.3 Potencial eólico el Ecuador ... 5

2.2 Energía eólica ... 6

2.3 Clasificación de los aerogeneradores ... 6

2.3.1 Aerogeneradores según su potencia nominal ... 7

2.3.2 Aerogeneradores en base a la velocidad de trabajo ... 8

2.3.3 Según el principio de funcionamiento ... 8

2.4 Aerogenerador basado en resonancia aeroelástica ... 10

2.5 Componentes de un aerogenerador de resonancia aeroelástica ... 13

2.5.1 Mástil o estructura cilíndrica oscilantes 13

2.5.2 Sistema de anclaje o base fija 14

2.5.3 Sistema de conversión mecánico-eléctrico 15

2.5.4 Imanes permanentes y Bobinas 16

2.5.5 Control de resonancia y amortiguamiento 18

2.6 Variaciones que intervienen en la generación eólica 19

2.7 Variación del viento 19

2.8 Variables principales que intervienen en la generación eólica basado en resonancia aeroelástica 20

2.8.1 Vórtices inducidos por vibraciones 21

2.8.2 Número de strouhal - st 21

2.8.3 Frecuencia de desprendimiento de vórtices – fs 22

2.8.4 Fuerza de arrastre – fd 22

2.8.5 Resonancia Aeroelástica 22

3 CAPÍTULO III 23

MATERIALES Y MÉTODOS 23

3.1 Enfoque y metodología 23

3.1.1 Enfoque 23

3.1.2 Metodología 23

3.2 Diseño de la investigación materiales, equipos y Softwares utilizados 25

3.2.1 Materiales y equipos 25

3.2.2 Softwares utilizados 26

3.3 Ecuaciones que intervienen en la generación eólica basado en resonancia aeroelástica 27

3.3.1 Ecuaciones mecánicas 27

3.3.2 Ecuaciones eléctricas 34

3.4 Generador eólico basado en resonancia aeroelástica 37

4 CAPITULO IV 39

DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 39

4.1 Cálculo de parámetros 39

4.1.1 Cálculo del número de Reynolds 39

4.1.2 Cálculo de la frecuencia de desprendimiento de vórtices 40

4.1.3 Cálculo de la fuerza de arrastre 41

4.1.4 Cálculo de la velocidad reducida 42
4.1.5 Cálculo de la potencia extraíble 43
4.2 Proceso de diseño y construcción estructural 45
4.2.1 Cálculo de bobina y selección de imanes 45
4.3 Diseño de las distintas partes del aerogenerador 46
4.3.1 Diseño del anillo de imanes 46
4.3.2 Diseño de la base del aerogenerador 47
4.3.3 Diseño del eje flexible del aerogenerador 47
4.3.4 Diseño del JACK DC del aerogenerador 48
4.3.5 Diseño del mástil 49
4.3.6 Diseño del núcleo del alternador del aerogenerador 52
4.3.7 Diseño del soporte del alternador del aerogenerador 53
4.3.8 Diseño del soporte del eje flexible del aerogenerador 53
4.3.9 Diseño del soporte de imanes del aerogenerador 54
4.3.10 Diseño del soporte fijo del aerogenerador 54
4.4 Sistema de sintonización 55
4.5 Diseño del sistema de generación de energía 56
4.6 Montaje del aerogenerador 58
4.7 Recolección de datos de generación 59
4.8 Análisis de resultados 59
CONCLUSIONES 62
RECOMENDACIONES 63
Referencias 64
ANEXOS 68

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Turbina eólica construida por Brush en 1888. [10] 3
Fig. 2. Densidad de potencial del viento en el Ecuador. [13] 5
Fig. 3. Clasificación de los aerogeneradores según su configuración [20] 10
Fig. 4. Fenómeno de resonancia aeroelástica (VIV) en un cuerpo cilíndrico. [21] 11
Fig. 5. Esquemático de un aerogenerador sin elementos rotativos. [24] 12
Fig. 6. Mástil. [21] 14
Fig. 7. sistema de conversión mecánico- eléctrico [21] 16
Fig. 8 Sistema de inducción electromagnética. [21] 17
Fig. 9. Sistema de amortiguamiento del mástil oscilante. [21] 18
Fig. 10. Perfiles de velocidad de viento. [31] 20
Fig. 11.Diagrama de metodología de investigación. 24
Fig. 12. Diagrama de metodología de investigación. 24
Fig. 13. estructura del aerogenerador basado en resonancia aeroelástica. 38
Fig. 14. diagrama de número de Reynolds 39
Fig. 15. diagrama de desprendimiento de vórtices. 40
Fig. 16. Diagrama de la fuerza de arrastres y el momento flector. 41
Fig. 17. Diagrama de potencia extraíble con un aerogenerador convencional 44
Fig. 18. Diagrama de potencia extraíble con un aerogenerador basado en resonancia aeroelástica 44
Fig. 19. Diseño de anillo de imanes para la repulsión magnética, a) vista superior del anillo, b) vista lateral del anillo, c) solido del anillo. 47
Fig. 20. Diseño de la base el aerogenerador, a) vista superior de la base, b) vista lateral de la base, c) solido de la base. 47
Fig. 21. Diseño del eje flexible del aerogenerador, a) vista superior del eje flexible del aerogenerador, b) vista lateral del eje flexible del aerogenerador 48
Fig. 22. Diseño de la compuerta JACK DC, a) vista superior de la compuerta JACK DC, b) vista lateral de la compuerta JACK DC, c) solido de la compuerta JACK DC. 49
Fig. 23. Diseño de la parte inferior del mástil, a) vista superior de la parte inferior del mástil, b) vista lateral de la parte inferior del mástil, c) solido de la parte inferior del mástil. 50
Fig. 24. Diseño de la parte superior del mástil, a) vista superior de la parte superior del mástil, b) vista lateral de la parte superior del mástil, c) solido de la parte superior del mástil. 51

Fig. 25. Diseño de la punta del mástil, a) vista superior de la punta del mástil, b) vista lateral de la punta del mástil, c) solido de la punta del mástil. 51

Fig. 26. Diseño del soporte del mástil, a) vista superior del soporte del mástil, b) vista lateral del soporte del mástil, c) solido del soporte del mástil. 52

Fig. 27. Diseño del núcleo del alternador, a) vista superior del núcleo del alternador, b) vista lateral del núcleo del alternador, c) solido del núcleo del alternador. 52

Fig. 28. Diseño del soporte del alternador, a) vista superior del soporte del alternador, b) vista lateral del soporte del alternador, c) solido del soporte del alternador, d) soporte del alternador impreso. 53

Fig. 29. Diseño del soporte del eje flexible, a) vista superior del soporte del eje flexible, b) vista lateral del soporte del eje flexible, c) solido del soporte del eje flexible. 53

Fig. 30. Diseño del soporte de imanes, a) vista superior del soporte de imanes, b) vista lateral del soporte de imanes, c) solido del soporte de imanes, d) soporte de imanes impreso. 54

Fig. 31. Diseño del soporte fijo del aerogenerador, a) vista superior del soporte fijo del aerogenerador, b) vista lateral del soporte fijo del aerogenerador, c) solido del soporte fijo del aerogenerador. 54

Fig. 32. Sistema de sintonizado 55

Fig. 33. Sistema de sintonizado con un sistema magnético 55

Fig. 34. Diseño del sistema de sintonización, a) Diseño del anillo exterior de imanes, b) Diseño del anillo interior de imanes, c) colocación de los dos anillos de imanes dentro del mástil del aerogenerador 56

Fig. 35. circuito eléctrico del aerogenerador basado en resonancia aeroelástica 57

Fig. 36. Diseño del sistema de generación de energía, a) Diseño de la bobina, b) Diseño del anillo interior de imanes, c) colocación de la bobina y el anillo de imanes en el interior del mástil. 57

Fig. 37. Armado del aerogenerador, a) Instalación de las partes fijas del aerogenerador, b) Instalación de las partes móviles del aerogenerador, c) aerogenerador en funcionamiento. 58

Fig. 38. Comportamiento del voltaje generado a diferentes velocidades del viento. 60

Fig. 39. Histograma de la distribución del voltaje generado por el prototipo 61

INDICE DE TABLAS

TABLA I EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA ENERGÍA EÓLICA 3

TABLA II CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES SEGÚN RANGO DE POTENCIA NOMINAL..... 7

TABLA III CLASIFICACIÓN SEGÚN LA VELIDAD DEL VIENTO 8

TABLA IV CLASIFICACIÓN SEGÚN EL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO..... 9

TABLA V LISTA DE MATERIALES UTILIZADOS PARA LA ELABORACIÓN DEL AEROGENERADOR..... 25

TABLA VI VELOCIDAD REDUCIDA 42

TABLA VII POTENCIA EXTRAÍBLE ENEL LUGAR DONDE SE REALIZA EL TRABAJO 43

TABLA VIII ESPECIFICACIONES DE LOS IMANES DE NEODIMIO UTILIZADOS PARA EL TRABAJO..... 45

TABLA IX POTENCIA OBTENIDA EN EL PROTOTIPO DEL AEROGENERADOR BASADO EN RESONANCIA AEROELÁSTICA..... 59

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Número de Reynolds (Re). 27

Ecuación 2.Número de Strouhal (St). 28

Ecuación 3. Frecuencia de desprendimiento de vórtices (fs). 28

Ecuación 4. Fuerza de arrastre (FD). 29

Ecuación 5. Coeficiente de arrastre CD. 29

Ecuación 6. fuerza de sustentación (FL). 30

Ecuación 7. Fuerza de arrastre de forma adimensional CL. 30

Ecuación 8. velocidad reducida (Ur) 31

Ecuación 9. Frecuencia Natural fn. 32

Ecuación 10. Momento de Inercia. 33

Ecuación 11. Masa de la estructura 33

Ecuación 12. Potencia extraíble Pv. 34

Ecuación 13. Fuerza electromotriz 35

Ecuación 14. Flujo magnético. 35

Ecuación 15. Fuerza electromotriz 35

Ecuación 16. Corriente eléctrica. 36

Ecuación 17. Impedancia (z). 36

Ecuación 18. Corriente eléctrica 37

Ecuación 19. Potencia eléctrica 37

RESUMEN

El cambio de la matriz energética a nivel mundial a impulsado a buscar nuevas formas de generar energía mediante el aprovechamiento de recurso renovables, esto se debe a que el uso indiscriminado de combustibles fósiles para transformar en energía emite toneladas de dióxido de carbono a la atmosfera y esto incrementa de manera acelerada el calentamiento global, una de estas alternativas es el aprovechamiento de la energía cinética contenida en el movimiento del aire para transformarla en energía eléctrica por medio de un aerogenerador. En los últimos años se ha desarrollado diversos estudios acerca de un tipo de aerogenerador que aprovecha el fenómeno de resonancia aeroelástica, esto debido a que este tipo de aerogeneradores es diferente a los convencionales ya que estos no cuentan con elemento móviles y por ende no emiten mucho ruido comparación a los aerogeneradores tradicionales. En este trabajo se realiza la implementación de un aerogenerador eólico basado en resonancia, para lo cual se inicia realizando una sinopsis de los principales aspectos de que intervienen para la generación de energía con estos aerogeneradores y luego el diseño e implementación del prototipo. Los aerogeneradores lineales carentes de elemento móviles basados en resonancia aeroelástica utilizan campos magnéticos para ampliar la oscilación del del prototipo debido vibraciones inducidas por vórtices, este tipo de aerogenerador utiliza la inducción electromagnética para generar energía, esto consiste en hacer oscilar un anillo de imanes al contorno de una bobina lineal con un cierto número de espiras de alambre de cobre.

Palabras clave: resonancia aeroelástica, vibraciones inducidas por vórtices, inducción electromagnética, sinopsis, oscilación.

ABSTRACT

The global shift in the energy matrix has driven the search for new ways to generate energy by harnessing renewable resources. This is due to the indiscriminate use of fossil fuels to produce energy, which emits tons of carbon dioxide into the atmosphere and accelerates global warming. One such alternative is harnessing the kinetic energy contained in air movement to convert it into electrical energy through a wind turbine. In recent years, various studies have been conducted on a type of wind turbine that exploits aeroelastic resonance. This is because this type of wind turbine differs from conventional ones, as it lacks moving elements and therefore produces much less noise compared to traditional wind turbines. This work implements a wind turbine based on resonance, beginning with a synopsis of the main aspects involved in energy generation with these wind turbines, followed by the design and implementation of the prototype. Linear wind turbines without moving elements, based on aeroelastic resonance, use magnetic fields to amplify the prototype's oscillation due to vortex-induced vibrations. This type of wind turbine employs electromagnetic induction to generate energy, which consists of oscillating a ring of magnets around a linear coil with a certain number of turns of copper wire.

Keywords: aeroelastic resonance, vortex-induced vibrations, electromagnetic induction, synopsis, oscillation.

1 CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Tema Implementación de un prototipo de generación eólica basado en resonancia aeroelástica.

El problema

1.1 Problema de investigación.

1.1.1 Problemática a investigar.

El impacto negativo en el medioambiente y en la salud pública por el uso de combustibles fósiles-finitos al transformarlos en energía ha hecho que algunos de los países más desarrollados firmen un tratado para reducir la emisión de gases tóxicos a la atmosfera. En varios países de Europa ante una falta de generación de energía generada por el petróleo se miraron en la necesidad de desarrollar un sistema de producción de energía basado en fuentes alternativas amigables con el medioambiente, de donde aprovechan el recurso eólico por su posición geográfica, esto ha hecho que esta tecnología cubra gran parte de la demanda energética, siendo así este capo de generación de energía el principal en crecimiento energético a nivel mundial. Ecuador tiene varios lugares donde se pueden desarrollar proyectos de generación de energía eléctrica con energía eólica, sin embargo, hay pocos lugares donde se desarrollan este tipo de energías limpias que ayudan a conservar el medioambiente.

En la actualidad en el Ecuador cada día la demanda energética va en aumento, este acontecimiento sucede debido a varios factores y los principales son, falta de lluvias en los lugares donde se ubican las hidroeléctricas, por el aumento de la población y por el incremento de las industrias en el país. También cabe recalcar que en el Ecuador las energías convencionales esta expuestas al precio del barril de petróleo, entonces, si el crudo sube de precio el costo de la energía también se verá afectado y por ende lleva a que los recursos como el gas y el carbón también impulsen una subida de precio, ya que estos son los recursos que más se los utiliza para la generación de la energía convencional.

El Ecuador pese a tener varias zonas donde existe la disponibilidad del recurso eólico para generar energía eléctrica mediante la implementación de aerogeneradores, es algo que no se usa mucho, debido a la gran inversión inicial que proyectos de generación eólica requieren y a los espacios que se deben tener para instalar estos dispositivos de generadores eólicos.

El incremento de escalas de los aerogeneradores convencionales ha permitido colocar a esta forma de generación de energía como una de las más utilizadas para obtener energía eléctrica, pero la tecnología más destacable para obtener energía quizás sean los paneles fotovoltaicos, porque esta tecnología no genera ruidos molestos y carece de elementos móviles como las palas del rotor de un generador eólico convencional.

1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación

¿Cómo generar energía eléctrica por medio de un dispositivo de generación eólica basado en resonancia aeroelástica?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Implementar un prototipo de generación eólica basado en resonancia aeroelástica parala generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento del fenómeno de resonancia.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Describir los parámetros y condiciones que intervienen en la generación eólica basado en resonancia aeroelástica.
2. Realizar el diseño del prototipo del aerogenerador eólico basado en resonancia aeroelástica
3. Construir el prototipo de generación eólica basado en resonancia aeroelástica.

1.3 Alcance y delimitación

El presente trabajo de investigación se enfoca en realizar un estudio de los generadores eólicos basados en resonancia aeroelástica con el fin de obtener información

bibliográfica y matemática de su funcionamiento enfocándose en sus características mecánicas y eléctricas para su posterior implementación.

Para el desarrollo de este proyecto se recopilará información relativa sobre los distintos parámetros y condiciones necesarias al momento de la generación de energía eólica basada en resonancia aeroelástica, como la información relativa a las etapas necesarias para generar energía a partir de la energía del viento.

El diseño del aerogenerador a implementar en este trabajo se lo realizará para comprender visualmente la magnitud del prototipo, ayudando a explorar otras opciones para su diseño y con ello permitiendo anteponerse a problemas a futuro al momento de la implementación.

Tras el estudio y diseño del prototipo de aerogenerador eólico basado en resonancia aeroelástica, se procederá a realizar la implementación del prototipo para posterior a esto realizar las pruebas de funcionamiento y con esto realizar las verificaciones de los resultados obtenidos.

El prototipo del aerogenerador eólico basado en resonancia aeroelástica será un aerogenerador eólico de sección circular sin elemento rotativos, el cual para mantener la resonancia en un mayor rango de la velocidad del viento se basara de imanes permanentes para provocar que la parte oscilante de la estructura tenga un a repulsión magnética y luego para la conversión de energía mecánica producida en el aerogenerador a energía eléctrica de forma similar a un alternador tradicional en este prototipo interaccionaron bobinas y campos magnéticos y de esta forma generar electricidad por inducción electromagnética.

1.4 Justificación

La constitución de la república del Ecuador promueve al sector público y privado, la utilización de tecnologías limpias y de energías alternativas no contaminantes que tengan un bajo impacto en la contaminación ambiental. De acuerdo con AECERNNER (Dirección de Agencia de Regulación y Control de Energías y Recursos no Renovables), en la regulación 012/2021, se considera el desarrollo y usos de prácticas y tecnologías

ambientales sana, así como las energías renovables, diversificadas no convencionales como la energía eólica [1].

Con la implementación de un prototipo de generación eólica basada en resonancia aeroelástica se propone un método alternativo de generación de energía mediante el aprovechamiento de la energía del viento de manera amigable con el medio ambiente, ya que en países desarrollados con el objetivo de obtener energía limpia están optando por aprovechar todos los recursos que en el Ecuador no se están aprovechando al máximo.

De esta manera se incentiva al cambio de la matriz energética del Ecuador, ya que si aplicamos estos métodos de generación de energía mediante el aprovechamiento de energía renovables se estará dando prioridad a la protección y sostenibilidad ambiental.

2 CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

A nivel mundial la generación de energía mediante el aprovechamiento de la energía eólica se está utilizando cada vez más, esto se debe a que este tipo de energía aparte de ser energía limpia y amigable con el medio ambiente es una fuente de energía que tiene muchos beneficios económicos y globales [2].

Magaju [3] en su estudio prevé que entre los años 2015 y 2040 que los combustibles fósiles seguirán siendo una de las fuentes principales para la generación de energía, pero el constante desarrollo de energías renovables aumentara notoriamente el futuro esto se deberán en gran parte a la creciente preocupación mundial por los efectos del cambio climático y el agotamiento de los recursos fósiles finitos.

Zarf [4] en su estudio menciona que el rápido crecimiento de la población mundial, el desarrollo económico, el inevitable cambio climático debido a las emisiones de gases de efecto invernadero y la necesidad de brindar a la gran mayoría de las personan en el mundo el acceso a la electricidad han estimulado la indagación de nuevas formas de generar electricidad mediante fuentes limpias y renovables.

La producción de energía eléctrica con generadores eólicos a pequeña escala en principio es costosa, sin embargo, es una fuente muy confiable de para la generación de energía si se dimensiona y usa en las condiciones adecuadas, además, esto ayuda al desarrollo socioeconómico a los países que se encuentran en vías de desarrollo [5].

Según García [6] el incremento de la producción de la energía mediante fuentes renovables y amigables con el medioambiente genera importantes consecuencias positivas ya que esto ayuda al proceso de cambio de la matriz energética. Otros impactos sociales vendrán con el cambio de las relaciones a nivel mundial a medida que las naciones pongan fin a su dependencia de terceros para la generación de energía, y las

esperadas en materia de salud, al no estar expuestas a las emisiones por la combustión de combustibles fósiles.

Recalde [7] indica que en los últimos años el uso y generación de energía mediante fuentes renovables amigables con el medio ambiente está teniendo un importante crecimiento con un significativo impacto sobre el desarrollo de varios países. En algunos países la razón por la que dan uso a la generación de energía con la ayuda de fuentes que son renovables por el propósito de ayudar a reducir las emisiones de gases tóxicos debido al uso indiscriminado de combustibles fósiles en cambio en otros países la generación de energía con fuentes renovables l realizan con el objetivo de generar energía con la ayuda de fuentes de energía que se tienen disponibles en sus territorios.

Palacios [8] en su estudio acerca de la energía eólica en el Ecuador, menciona que es se necesita varias estrategias que permitan ayudar a la conservación de los recursos agotables (agua dulce o petróleo) que se tiene, una de estas soluciones es la implementación de nuevas formas de generar energía con la ayuda de fuentes que no sean agotables o renovables como es la energía del viento para la transformación de esta en energía eléctrica sin llegar a contaminar excesivamente el medioambiente.

El Ecuador es un país que cuenta con zonas que tienen recursos que pueden ser muy favorables para la generación de energía eléctrica mediante fuentes limpias y renovables, este país se cuenta con zonas en donde la implementación de aerogeneradores para la obtención de energía eléctrica es muy favorable y con esto se tendría un impacto positivo en la apuesta por la generación de energía con la ayuda de fuentes amigables con el medioambiente en las zonas en donde existe la presencia del viento [9].

2.1.1 Evolución de la energía eólica

Según Pérez [10] la energía eólica es una de las formas más antiguas de aprovechar la fuerza que tiene el viento. Desde la antigüedad la humanidad ha utilizado la energía del viento para mover embarcaciones, mover molinos de cereales bombear agua, sin embargo, este tipo de energía como fuente para generar electricidad se la utilizo a finales del siglo XIX, cuento en estados unidos se construyó la primera turbina eólica capaz de generar electricidad.

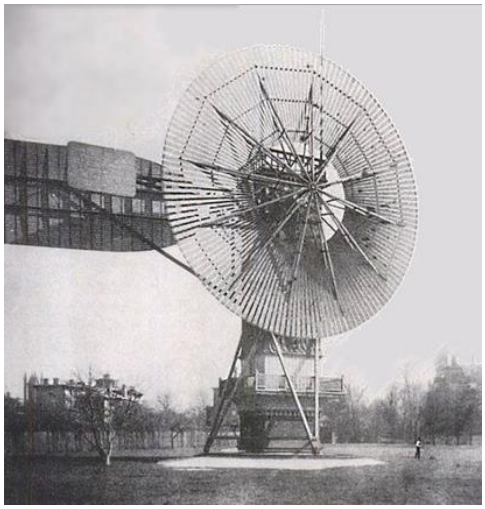


Fig. 1. Turbina eólica construida por Brush en 1888. [10]

Nota: en la ilustración 1 se muestra la imagen de la primera turbina eólica capaz de generar corriente eléctrica, la cual fue construida por el inventor estadounidense Charles Francis Brush en 1888, esta tenía un diámetro de 17 metros, 144 alabes de madera y una potencia de 12 kW, este aerogenerador funciono alrededor de 20 años y alimento la iluminación de la mansión de Brush en Cleveland [10].

A continuación, en la siguiente Tabla I se expone algunos de los datos más importantes acerca de la evolución histórica de la energía eólica [10].

TABLA I
EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA ENERGÍA EÓLICA

Año	Evento	País
1888	Construcción del primer aerogenerador eléctrico (Charles F. Brush).	Estados Unidos
1891	Construcción del primer molino eléctrico con cuatro álabes (Poul La Cour).	Dinamarca
1904	Fundación de la Sociedad de Electricistas del Viento (Poul La Cour).	Dinamarca
1918	Existencia de unas 120 empresas abastecidas por energía eólica en Dinamarca.	Dinamarca

1956-1957	Construcción del tripala Gedser con sistema de control automático (Johannes Juul).	Dinamarca
1979	Instalación del primer parque eólico comercial en Crotched Mountain.	Estados Unidos
1991	Instalación del primer parque eólico marino en Vindeby.	Dinamarca
2009	China alcanza el récord mundial de potencia eólica instalada, con 25 GW.	China
2016	Dinamarca alcanza el récord mundial de generación eólica, con un 42 % del consumo eléctrico nacional.	Dinamarca

Nota: En la Tabla I de muestra como ha ido evolucionando la energía eólica a través de los años, en los últimos años se muestra que este tipo de energía a alcanzado a cubrir gran parte de las demandas de electricidad a algunos países, es por eso es primordial buscar o mejorar las turbinas eólicas para una generación más eficiente de electricidad.

2.1.2 Aprovechamiento de la energía eólica para la generación de electricidad

La energía cinética llevada por el movimiento de las masas de aire puede ser aprovechada por medio de aerogeneradores conectados a las grandes redes de distribución de energía eléctrica o puede aplicarse a la generación de energía eléctrica en zonas aisladas. En la actualidad el recurso eólico, específicamente los parques eólicos construidos en tierra suponen una fuente de energía cada vez más barata y competitiva frente a las otras formas de energía incluyendo las no convencionales, favoreciendo así a la sociedad y su economía [11].

Según [11] en su estudio menciona que la energía eólica es la que mayor aumento y acogida ha tenido a nivel mundial si se habla de crecimiento de energías renovables en los últimos años. Esta es utilizada en gran porcentaje para la generación eléctrica de varios países, y se puede observar su incremento en los últimos 10 años.

2.1.3 Potencial eólico el Ecuador

Según el "Atlas Eólico del Ecuador con fines de generación eléctrica", el potencial eólico eléctrico bruto de Ecuador es de 1691 MW, considerando zonas con una velocidad de viento promedio anual mayor a 32.4-34.6 km/h como se ilustra en la figura 1, lo que generaría una energía media de 2869 GWh. El potencial factible a corto plazo se ha estimado en valores de potencia instalable de 884 MW y energía media anual de 1518 GWh [12].

El Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables (MERNNR) señala que, la energía eólica en el Ecuador se está aprovechando en la isla San Cristóbal con una capacidad de 2,4 MW, en la isla Baltra con una capacidad de 2,25 MW y en la provincia de Loja, en el cerro Villonaco, con una potencia instalada de 16,5 MW. A través del Ministerio de Electricidad y Energía Renovables (MEER), gracias a los últimos veinte años de progreso tecnológico, han desarrollado el "Atlas Eólico del Ecuador", el cual se ha elaborado mediante mapeo satelital, y permite conocer las zonas potenciales para el aprovechamiento energético en el Ecuador [13].

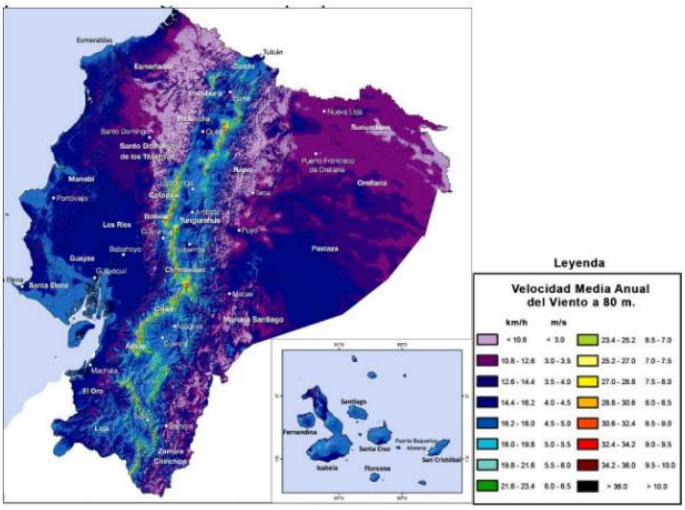


Fig. 2. Densidad de potencial del viento en el Ecuador. [13]

Nota: En el Ecuador la densidad de potencia de viento depende en la región y ubicación en donde se encuentre, como se observa en la figura 1 en el país tenemos zonas en donde la velocidad del viento vas desde los 3 m/s hasta los 8 a 8.5 m/s, los lugares en

donde se tiene más presencia del recurso viento están en zonas montañosas o laderas, usualmente en la sierra ecuatoriana.

2.2 Energía eólica

La energía eólica es un tipo de energía renovable que puede obtenerse cuando se aprovecha la energía cinética que produce el viento. Su utilización para poder generar electricidad está fundamentada en la conversión de esta energía en energía mecánica y posteriormente cuando se transforme en energía eléctrica, todo esto por medio de diferentes dispositivos tecnológicos. Este tipo de recurso natural ha sido considerado inagotable a escala humana por presentar un bajo impacto ambiental si se lo llega a comparar con otro tipo de energías convencionales que suelen estar basadas en combustibles fósiles [14] .

El desarrollo de esta energía eólica ha podido cobrar relevancia cuando se habla acerca de la transición energética a nivel global, sobre todo porque se requiere minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero y poder diversificar la matriz energética. Gracias a los avances es posible implementar sistemas eólicos a grandes o pequeñas escalas que van a depender de la condición geográfica o de las necesidades energéticas [15].

2.3 Clasificación de los aerogeneradores

Los aerogeneradores pueden llegar a clasificarse esta manda en cuenta diversos criterios sobre todo técnicos lo que les permite que se identifique de mejor manera características de operación y la utilización dentro del campo. La clasificación facilita una selección de este tipo de aerogeneradores para poder determinar el óptimo según las condiciones del entorno o los requerimientos energéticos [20].

Entre los principales criterios para poder clasificar los encuentra la potencia nominal, la velocidad de trabajo, la orientación que puede tomar el eje del rotor y el número de palas. Cada uno de estos puede llegar a influir de forma directa en el rendimiento, la eficiencia y la viabilidad técnica de este aerogenerador [21].

2.3.1 Aerogeneradores según su potencia nominal

Este tipo de clasificación se refiere a la capacidad máxima de generación eléctrica que puede llegar a generar un aerogenerador cuando se encuentra bajo condiciones óptimas para operar. En función de este criterio se dividen también en micro, pequeños, medianos y de gran potencia. Aquellos aerogeneradores de baja potencia se los emplea generalmente en aplicaciones domésticas o a nivel rural, mientras que aquellos de gran potencia se nos utiliza en parques eólicos pues permiten una generación a escala industrial. Este tipo de clasificación puede evaluarse de acuerdo con la idoneidad de los sistemas y en función de la demanda. [18]

TABLA II
CLASIFICACIÓN DE AEROGENERADORES SEGÚN RANGO DE POTENCIA NOMINAL

Tipo de aerogenerador	Potencia nominal	Características principales
Microaerogenerdores	Hasta 1 kW	Tamaño reducido, instalación sencilla, bajo costo, ideales para uso individual o experimental.
Pequeña potencia	1kW – 100kW	Equipos compactos, pueden operar aislados o conectados a red, adecuados para viviendas y pequeñas instalaciones.
Mediana potencia	100kW – 1 MW	Mayor diámetro de rotor, requieren infraestructura técnica, utilizados en proyectos comunitarios.
Alta potencia	Mayor a 1 MW	Gran altura y tamaño de aspas, alta producción energética, empleados en parques eólicos comerciales.

Nota. La clasificación presentada se basa en el rango de potencia nominal de los aerogeneradores, criterio comúnmente utilizado para diferenciar su escala de operación, dimensiones estructurales y nivel de generación energética dentro de proyectos residenciales, comunitarios o comerciales.

2.3.2 Aerogeneradores en base a la velocidad de trabajo

Este tipo de aerogeneradores al igual que los anteriores para llegar a clasificarse en base a la velocidad del viento que se requiere para operar. Se considera que existen aerogeneradores diseñados para operar en bajas, medias o altas velocidades del viento todo esto va a condicionar la aplicación en determinadas regiones. El tipo de diseño que se lo orienta a bajas velocidades resulta relevante en aquellas zonas en las que este recurso eólico o viento puede ser limitado, de esta forma se aprovecha de mejor forma el viento, mientras que aquellos sistemas de alta velocidad quien a presentar mayores niveles de potencia sin embargo llegan a requerir condiciones más específicas. [18]

TABLA III
CLASIFICACIÓN SEGÚN LA VELIDAD DEL VIENTO

Tipo	Potencia nominal	Descripción
Baja velocidad	2–4 m/s (velocidad de arranque)	Diseñados para zonas con vientos suaves, comienzan a generar energía con poco viento.
Velocidad media	4 – 12 m/s	Rango óptimo de operación en la mayoría de aerogeneradores comerciales.
Alta velociad	> 12 m/s	Funcionan en zonas con vientos intensos; incluyen sistemas de control para evitar sobrecargas.

Nota. De acuedo a la Tabla III la clasificación se basa en la velocidad del viento a la que el aerogenerador inicia, desarrolla y limita su funcionamiento, considerando parámetros como la velocidad de arranque, la velocidad nominal y la velocidad de corte, los cuales determinan su desempeño y condiciones de seguridad operativa.

2.3.3 Según el principio de funcionamiento

La clasificación de los aerogeneradores puede realizarse considerando su configuración estructural y el tipo de eje sobre el cual se produce el movimiento de generación. Esta diferenciación permite identificar las características técnicas, el

comportamiento frente al viento y las aplicaciones más adecuadas de cada diseño. De esta manera, se distinguen principalmente los aerogeneradores de eje horizontal, de eje vertical y los sistemas innovadores sin aspas, cada uno con particularidades que influyen en su rendimiento y uso dentro del sector energético. [19]

TABLA IV
CLASIFICACIÓN SEGÚN EL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Aerogeneradores	Principio de operación
Eje horizontal (rotación)	El eje de rotación está alineado horizontalmente con el suelo; las palas giran perpendicularmente al viento. Son los más comunes y eficientes, usados tanto en tierra como en mar.
Ejer vertical (rotación)	El eje de rotación es perpendicular al suelo; no necesitan orientarse según la dirección del viento y pueden funcionar con vientos cambiantes.
Resonancia aeroelástica (Sin aspas)	Tecnología innovadora que no utiliza palas giratorias emplea estructuras que oscilan con el viento para generar electricidad por vibraciones controladas.

Nota. La clasificación según el principio de funcionamiento permite diferenciar entre tecnología eólica convencional, basadas en rotación mecánica, y tecnologías no convencionales, basadas en rotación mecánica, y tecnologías no convencionales, como los sistemas por vibración, que emplean mecanismos alternativos de conversión energética sin el uso de palas.

En la Figura 3 se presenta una comparación visual de los principales tipos de aerogeneradores según la disposición de su eje y su diseño estructural. Se observan modelos de eje horizontal, eje vertical tipo Darrieus, eje vertical tipo Savonius y un sistema sin aspas, lo que permite identificar las diferencias en su configuración,

mecanismo de captación del viento y principio de funcionamiento dentro de la generación de energía eólica.

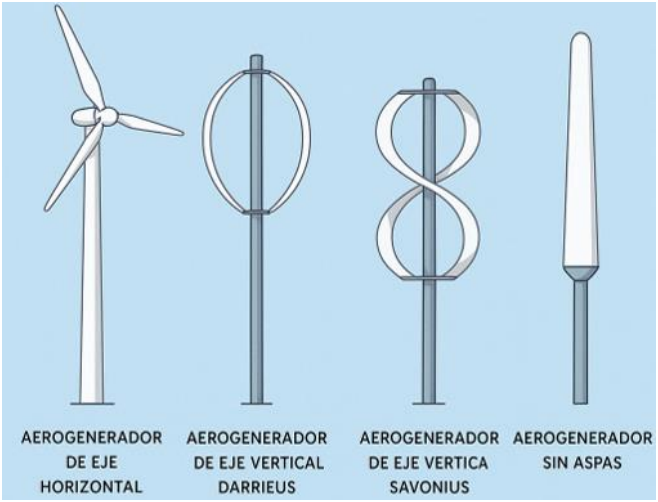


Fig. 3. Clasificación de los aerogeneradores según su configuración [20]

Nota. La Figura 3 ilustra las configuraciones más representativas de aerogeneradores, destacando las variaciones en el diseño del rotor y el eje de rotación, así como la incorporación de tecnologías innovadoras sin aspas que emplean mecanismos alternativos para la conversión de energía eólica.

2.4 Aerogenerador basado en resonancia aeroelástica

Los aerogeneradores sin elementos rotativos son una nueva tecnología que se encuentra actualmente en desarrollo. Este tipo de dispositivos utilizan principios diferentes a los de los aerogeneradores convencionales, ya que estos buscan eliminar los componentes mecánicos que giran, como el rotor y la caja de engranajes. En lugar de estos elementos estos aerogeneradores utilizan tecnologías como la vibración inducida, la resonancia y la oscilación para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica [22].

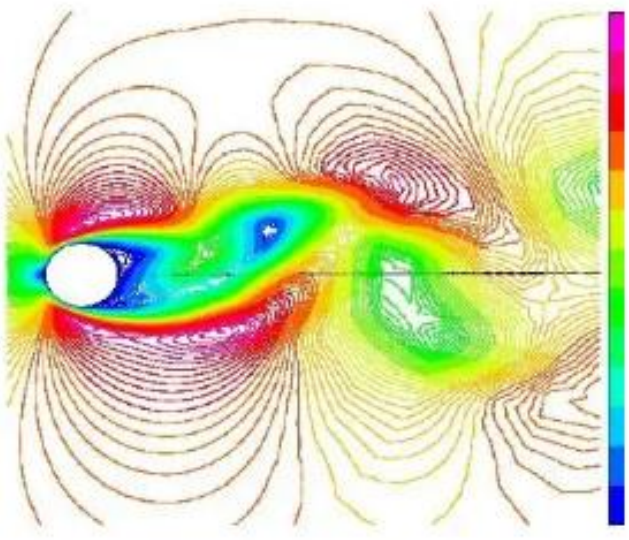


Fig. 4. Fenómeno de resonancia aeroelástica (VIV) en un cuerpo cilíndrico. [21]

Nota. La Figura 4 ilustra el fenómeno de desprendimiento de vórtices generado cuando el flujo de aire incide sobre un cuerpo cilíndrico. Se observa la formación alternada de remolinos en la estela del objeto, produciendo variaciones periódicas de presión que inducen fuerzas laterales oscilatorias. En un aerogenerador basado en resonancia aeroelástica, este efecto aerodinámico provoca vibraciones controladas del mástil cuando la frecuencia de los vórtices coincide con la frecuencia natural de la estructura, permitiendo la conversión de energía eólica en energía eléctrica mediante el fenómeno conocido como Vortex Induced Vibration (VIV).

Este aerogenerador como se muestra en la Figura 1 se compone de un cilindro que oscila al impactar el viento sobre él a causa de los remolinos o vórtices que se producen como fruto de ese impacto; esta oscilación o vibración se denomina en inglés Vortex Induced Vibration (VIV). El movimiento del cilindro genera energía mecánica que, a su vez, se transforma en energía eléctrica gracias a un alternador [23].

El cilindro se ancla con firmeza al suelo mediante la varilla o núcleo; la parte superior de este último sujeta el mástil. Por lo que respecta a su estructura, se compone de resina reforzada con fibra de carbono o fibra de vidrio, materiales que se utilizan de manera habitual para elaborar los aerogeneradores convencionales [23].

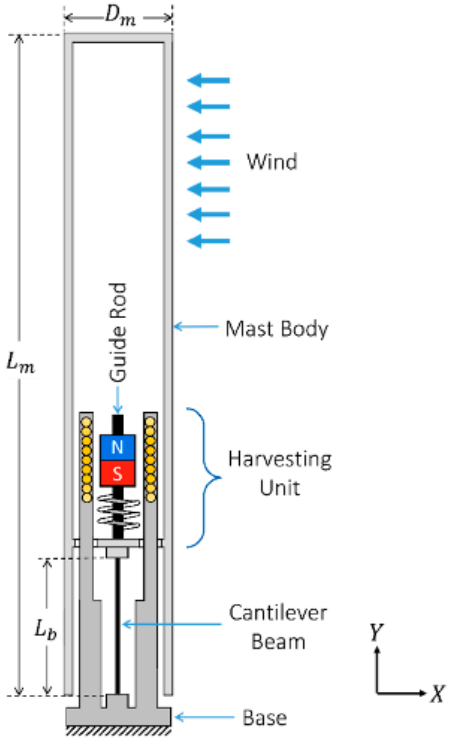


Fig. 5. Esquemático de un aerogenerador sin elementos rotativos. [24]

Nota: la Figura 5 muestra la estructura de la turbina eólica lineal sin elementos rotativos, que consta de tres componentes principales: una viga en flexible, un cuerpo (mástil)cilíndrico y una unidad de recolección. Este tipo de aerogenerador utiliza un imán permanente que oscila dentro de una bobina multicapa para capturar la vibración inducida por el vórtice del mástil del cuerpo unido a una viga vertical flexible [24].

Este tipo de aerogeneradores están basados en resonancias aeroelástica llegan a utilizar estructuras que son más flexibles y pueden oscilar debido a la acción que tienen del viento. Las oscilaciones pueden llegar a producir cerca de un tipo de frecuencia natural del sistema esto llega a maximizar la amplitud del movimiento además de la energía disponible [25].

Por medio de imanes que son permanentes y bobinas, el movimiento lineal que tiene este tipo de estructura llega a transformarse en energía eléctrica por inducción electromagnética. Este tipo de aerogenerador también permite eliminar la necesidad de

tener componentes rotativos lo que permite poder simplificar el diseño además de reducir pérdidas mecánicas [26].

2.5 Componentes de un aerogenerador de resonancia aeroelástica

Los generadores eólicos que están basados en resonancia aeroelástica llegan a estar compuestos por diferentes elementos a nivel estructural y eléctricos que trabajan de una forma integrada. Este tipo de componentes principales se encuentra en estructuras que son flexibles, o en sistemas de generación eléctrica y elementos de soporte [27].

Una correcta selección y diseño de este tipo de componentes resulta ser muy importante para poder garantizar un funcionamiento de forma correcta y segura de este prototipo. Considerando que cada elemento llega a cumplir funciones específicas dentro de estos sistemas además del desempeño que llega a influir de forma directa al poder generar energía [28]. Es por eso que se presentan los siguientes componentes.

2.5.1 Mástil o estructura cilíndrica oscilantes

Es la estructura principal vertical del dispositivo que se instala de forma fija en la base y oscila libremente perpendicular a la dirección del viento. Esta vibración se genera por el fenómeno de desprendimiento de vórtices cuando el viento interactúa con la superficie del mástil, lo que permite captar la energía eólica sin palas ni partes rotativas tradicionales, constituyendo el elemento esencial para iniciar el proceso de conversión eléctrica [21].

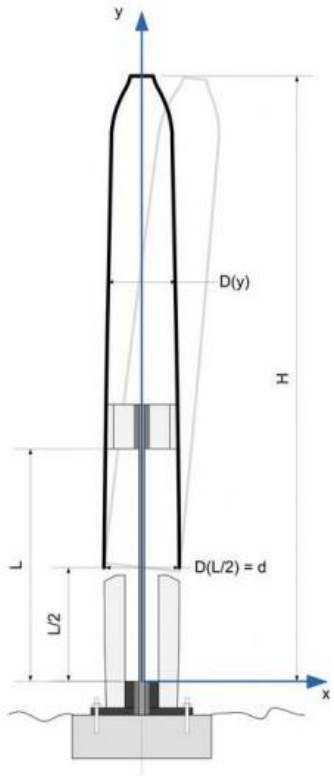


Fig. 6. Mástil. [21]

Nota. La Figura 6 representa el esquema estructural de un aerogenerador de resonancia aeroelástica, donde se observa el mástil cilíndrico anclado a una base fija y su eje vertical de referencia. El dispositivo realiza movimientos oscilatorios laterales (perpendiculares a la dirección del viento) debido al fenómeno de desprendimiento de vórtices, generando vibraciones controladas a lo largo de su altura (H). Estas oscilaciones, especialmente pronunciadas en la parte superior del mástil, son transmitidas al sistema interno de conversión electromagnética para producir energía eléctrica.

2.5.2 Sistema de anclaje o base fija

El sistema de anclaje o base fija es el componente estructural encargado de sostener el mástil oscilante y garantizar la estabilidad del aerogenerador frente a las cargas dinámicas producidas por el viento. Este elemento se encuentra firmemente fijado al suelo mediante pernos, cimentación de hormigón u otros sistemas de sujeción estructural, permitiendo que la parte superior del dispositivo vibre de manera controlada mientras la base permanece estática. Además, el sistema de anclaje cumple la función de transmitir

las fuerzas generadas por las oscilaciones hacia el terreno, asegurando la seguridad estructural y el correcto funcionamiento del sistema de resonancia aeroelástica.

En la Figura 6 observa el sistema de anclaje o base fija como el elemento estructural inferior que conecta el mástil oscilante con la cimentación. Esta base permanece estática y firmemente sujeta al suelo, permitiendo que las vibraciones se desarrollen únicamente en la parte superior del dispositivo. Su función principal es absorber y transmitir al terreno las cargas dinámicas generadas por el movimiento oscilatorio, garantizando estabilidad, seguridad estructural y un adecuado funcionamiento del sistema.

2.5.3 Sistema de conversión mecánico-eléctrico

El sistema de conversión mecánico-eléctrico es el componente encargado de transformar la energía mecánica generada por las oscilaciones del mástil en energía eléctrica utilizable. En los aerogeneradores de resonancia aeroelástica, este proceso no se realiza mediante un eje rotativo como en los aerogeneradores convencionales, sino a través de un sistema electromagnético que aprovecha el movimiento vibratorio lineal. Generalmente, el mecanismo está compuesto por imanes permanentes y bobinas dispuestas estratégicamente, de modo que el desplazamiento relativo entre ellos induce una corriente eléctrica por el principio de inducción electromagnética. Este sistema permite convertir las vibraciones en electricidad de manera eficiente, sin necesidad de engranajes ni partes giratorias complejas. Véase la Figura 7

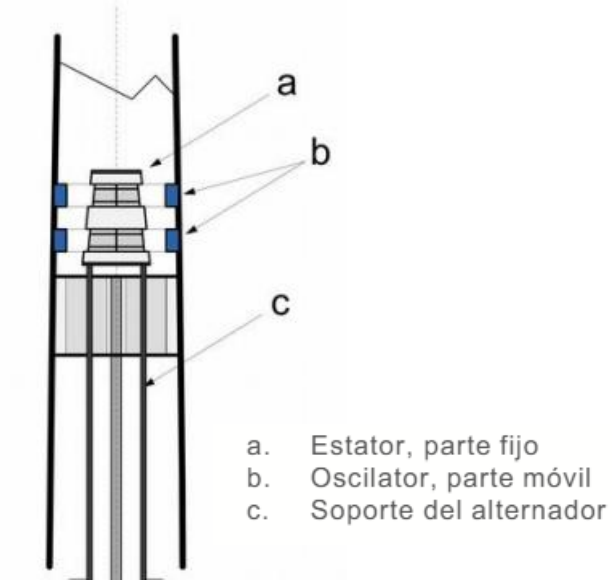


Fig. 7. sistema de conversión mecánico- eléctrico [21]

Nota. La Figura 7 muestra el sistema de conversión mecánico-eléctrico ubicado en la parte inferior del aerogenerador de resonancia aeroelástica. Se identifican tres elementos principales: (a) el estator, que corresponde a la parte fija donde se encuentran las bobinas encargadas de captar la energía inducida; (b) el oscilador, que constituye la parte móvil solidaria al mástil y que se desplaza lateralmente producto de las vibraciones; y (c) el soporte del alternador, estructura que mantiene alineados y estabilizados los componentes del sistema.

El movimiento oscilatorio del mástil provoca el desplazamiento relativo entre el oscilador y el estator, generando una variación del campo magnético que induce corriente eléctrica según el principio de inducción electromagnética. De esta manera, la energía mecánica vibratoria se transforma en energía eléctrica sin necesidad de mecanismos rotativos convencionales.

2.5.4 Imanes permanentes y Bobinas

Los imanes permanentes y las bobinas conforman el núcleo del sistema de generación eléctrica en el aerogenerador de resonancia aeroelástica. Ambos elementos trabajan de manera conjunta bajo el principio de inducción electromagnética. Los imanes permanentes, generalmente fabricados con materiales de alta densidad magnética como

el neodimio, generan un campo magnético constante que no requiere alimentación externa.

Por su parte, las bobinas constituidas por conductores enrollados, usualmente de cobre se disponen estratégicamente en el estator (parte fija). Cuando el mástil oscila debido al fenómeno de desprendimiento de vórtices, se produce un movimiento relativo entre los imanes (parte móvil) y las bobinas (parte fija), generando una variación del flujo magnético que induce una corriente eléctrica. Este sistema permite transformar directamente la energía mecánica vibratoria en energía eléctrica sin necesidad de engranajes ni partes rotativas, reduciendo pérdidas mecánicas y mantenimiento, y aumentando la simplicidad estructural del dispositivo. Véase la Figura 8.

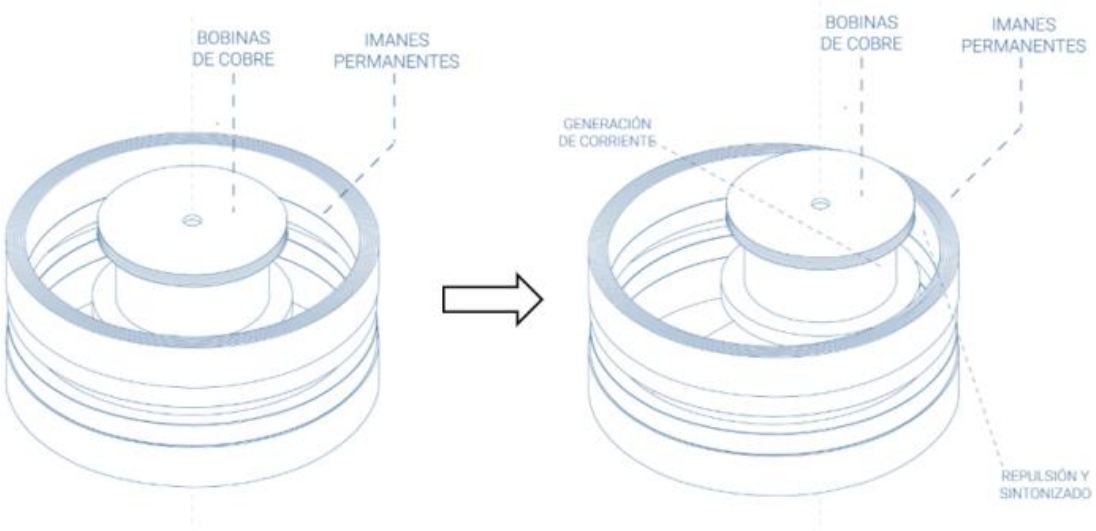


Fig. 8 Sistema de inducción electromagnética. [21]

Nota. La Figura 8 muestra la interacción entre las bobinas de cobre (parte fija) y los imanes permanentes (parte móvil) dentro del sistema de conversión electromagnética. El desplazamiento relativo entre ambos elementos, producto del movimiento oscilatorio del mástil, genera una variación del flujo magnético que induce corriente eléctrica. Asimismo, se aprecia el efecto de repulsión y sintonización magnética, el cual contribuye a mantener la estabilidad del sistema y optimizar la generación de energía durante las vibraciones.

2.5.5 Control de resonancia y amortiguamiento

El control de resonancia y el sistema de amortiguamiento constituyen elementos fundamentales en el funcionamiento de un aerogenerador basado en resonancia aeroelástica, ya que permiten regular la respuesta dinámica de la estructura frente a la excitación producida por el desprendimiento de vórtices. Cuando la frecuencia del flujo se aproxima a la frecuencia natural del mástil, se produce el fenómeno de lock-in o sincronización, incrementando la amplitud de las oscilaciones. Para mantener el sistema en un rango operativo seguro y eficiente, se implementan mecanismos de control que ajustan parámetros como la rigidez, la masa efectiva o la interacción electromagnética del generador, permitiendo optimizar la captación de energía [28].

De manera complementaria, el sistema de amortiguamiento actúa disipando parte de la energía vibratoria, evitando desplazamientos excesivos que puedan generar fatiga estructural o inestabilidad. El equilibrio entre resonancia controlada y amortiguamiento adecuado garantiza que el dispositivo opere cerca de su punto óptimo de generación sin comprometer su integridad mecánica, tal como se analiza en estudios recientes sobre vibraciones inducidas por flujo y sistemas aeroelásticos. Véase la figura 9.

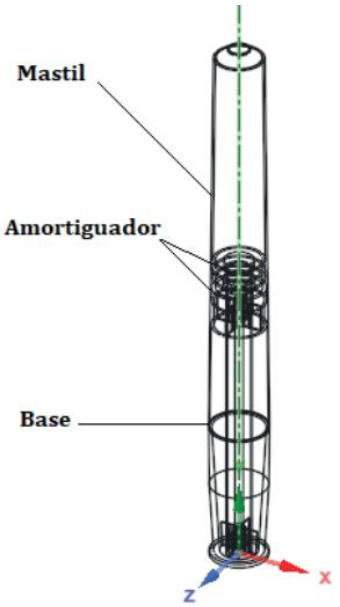


Fig. 9. Sistema de amortiguamiento del mástil oscilante. [21]

Nota. La Figura 9 muestra la disposición del mástil oscilante, el sistema de amortiguamiento ubicado en la sección intermedia y la base fija anclada al suelo. El amortiguador regula la amplitud del movimiento lateral del mástil, disipando parte de la energía vibratoria para evitar oscilaciones excesivas, mientras que la base proporciona estabilidad estructural y transmite las cargas dinámicas al terreno.

2.6 Variaciones que intervienen en la generación eólica

Cuando llega a generarse energía eólica que está basada en resonancia aeroelástica llegan a intervenir diferentes variables que pueden afectar el rendimiento de estos sistemas. Y entre las más relevantes se encuentra la velocidad del viento, la frecuencia de la resonancia y la amplitud que pueda tener la vibración de la estructura [29].

Además, la potencia eléctrica que llega a generarse junto con la eficiencia del sistema depende además de la correcta integración que puedan tener estas variables entre sí. Este análisis de los parámetros puede permitir realizar análisis y evaluaciones del comportamiento del prototipo para poder optimizar su desempeño energético [30].

2.7 Variación del viento

Este factor acerca de la variación de la velocidad del viento está relacionada con la altura de la instalación de los aerogeneradores. Hay que considerar que la flexión con la superficie terrestre llega a afectar la velocidad qué se le conoce como un agraviante de velocidad del viento por lo que impacta de forma directa en la producción de energía eólica.

La altitud del viento es considerada uno de los recursos más valiosos para que se pueda generar la energía eólica pues el viento tiende a ser más estable y uniforme cuando se encuentra a una mayor altitud. Todo esto puede ser beneficioso considerando las turbulencias y que las ráfagas de viento pueden ser menos pronunciadas a grandes alturas. También hay que considerar que los vientos llegan a ser más predecibles cuando se tiene una mayor altitud esto permite que reproduzca energía de una forma más fácil de gestionar [31].

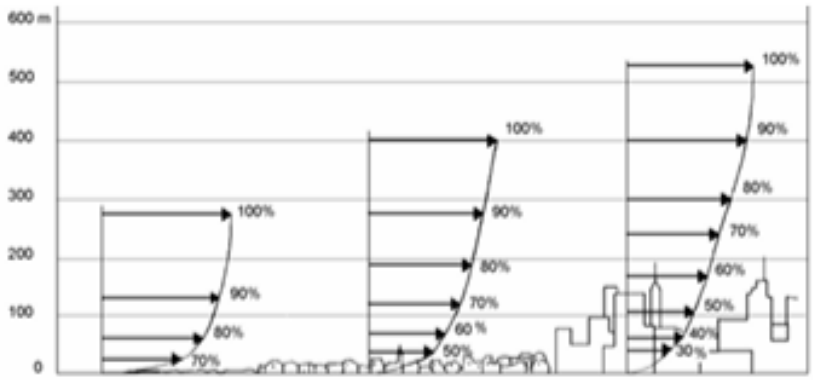


Fig. 10. Perfiles de velocidad de viento. [31]

Nota. La velocidad con la que el viento sopla también se la considera otra de los factores para poder determinar la cantidad de energía que puede llegar a convertir un dispositivo en electricidad, por lo tanto, la cantidad que llega a producir la energía eólica puede variar a tercera potencia de velocidad media del viento. La energía eólica que se encuentra disponible resulta ser proporcional al cubo de la velocidad del viento cuando se produce un aumento de velocidad en una unidad por lo general decimos que pasa de 3 a 4 m/s, esto puede representar con aumento que es significativo de la potencia que puede variar de 120 si se los compara con 216, es decir que en realidad hubo un incremento del 72% aproximadamente [32].

2.8 Variables principales que intervienen en la generación eólica basado en resonancia aeroelástica

Existen aerogeneradores sin que cuenten con elementos rotativos los cuales han podido representar una alternativa innovadora aquellos sistemas eólicos convencionales. A diferencia de aquellos aerogeneradores que son tradicionales, este tipo de dispositivos no llegan a utilizar ni rotores ni palas para lograr capturar la energía del viento más bien aprovechan fenómenos físicos como las vibraciones que son inducidas cuando existe el flujo de aire.

Este tipo de sistemas han podido presentar ventajas sobre todo en la reducción del tiempo que se tienen los mantenimientos mecánicos, una menor generación de impacto visual y acústico además que presentan mayor seguridad de operación. Son este tipo de

características los que llegan a convertirlo en una opción atractiva cuando se trata de aplicaciones urbanas o experimentales.

También existen parámetros aerodinámicos, estructurales y dinámicos que llegan a influir de forma directa en la eficiencia de todos estos sistemas, que han sido analizadas en diversos estudios acerca de aerogeneradores sin aspas

2.8.1 Vórtices inducidos por vibraciones

Este tipo de vórtices que son inducidas por vibraciones también se las conoce como vórtex induced vibrations VIV, qué es un tipo de fenómeno que llegue a ocurrir sobre todo cuando los flujos de aire pasan alrededor de la estructura lo que ocasiona desprendimientos periódicos de bordes, además de provocar fuerzas oscilatorias que pueden inducir vibraciones transversales en toda la estructura.

Este fenómeno es aprovechado en estos aerogeneradores sin aspas sobre todo de forma controlada para poder generar algún tipo de oscilación mecánica, pues cuando este tipo de vibraciones llegan a sincronizarse con la frecuencia natural de este sistema se produce un cierto aumento de forma significativa en el grado de la amplitud del movimiento [33].

2.8.2 Número de strouhal - st

Es un tipo de parámetro adimensional que permite relacionar la frecuencia del desprendimiento de los vórtices con la velocidad de los flujos y una dimensión que es característica de la estructura. Este número permite que se describa el comportamiento del flujo que se tiene alrededor de cuerpos que están expuestos al viento. Y en este tipo de aerogeneradores este número puede permitir que se llegue a predecir la frecuencia con la cual pueden llegar a generarse este tipo de vórtice y las vibraciones que están inducidas. También hay que tener en cuenta que el análisis resulta clave para diseñar sistemas que operan cerca de condiciones de resonancia aeroelástica [33].

2.8.3 Frecuencia de desprendimiento de vórtices – fs

Corresponde a una tasa en la que los vórtices llegan a formarse y separarse de toda esta estructura todo esto producto del flujo del aire. Este tipo de frecuencias también depende de la velocidad con la que está el viento y de las dimensiones geométricas del cuerpo que ha sido expuesto. Este tipo de frecuencia debe ser analizada de forma cuidadosa para que se logre coincidir o aproximarse a la frecuencia natural de este sistema, esto principalmente para maximizar la transferencia de energía mecánica que se produce desde el viento hacia toda la estructura vibrante [34].

2.8.4 Fuerza de arrastre – fd

Este componente de la fuerza de la dinámica llega a actuar en la dirección con la que se encuentra el flujo del viento, se origina por la diferencia que existe en la presión y la fricción entre el aire y la superficie de las estructuras [34].

2.8.5 Resonancia Aeroelástica

Es un tipo de fenómeno que llega a ocurrir cuando un tipo de estructura flexible se encuentra en interacción con un flujo de aire, esto llega a generar vibraciones que son amplificadas y que ocurren bajo determinadas condiciones de frecuencia [35]. Hay que considerar que este tipo de fenómenos han sido ampliamente estudiadas ya en áreas de la ingeniería aeronáutica o civil. Ya en contextos de generación eólica, la resonancia aeronáutica también puede aprovecharse para poder inducir movimientos que son oscilatorios y que están controlados para que puedan permitir una conversión de energía mecánica vibratoria en energía eléctrica. Teniendo en cuenta que este tipo de enfoques ha podido constituirse en una base para los diseños de aerogeneradores sin elementos rotativos [36].

3 CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Enfoque y metodología

3.1.1 Enfoque

El capítulo tiene como fin explicar la metodología que se utilizó para la fabricación del prototipo del generador eólico basado en resonancia aeroelástica. Se presenta las ecuaciones que interviene en diseño, los materiales utilizados, los softwares empleados y por último un resumen de cómo está estructurado el aerogenerador.

3.1.2 Metodología

La metodología en este trabajo asume que en el Ecuador se tiene suficiente presencia del recurso renovable eólico para el uso en la generación de energía eléctrica. Las fases que involucra este trabajo son: estudio bibliográfico acerca del potencial eólico del ecuador y los aerogeneradores basados en resonancia aeroelástica, estudio de las principales ecuaciones que rigen en un aerogenerador basado en resonancia aeroelástica para su posterior diseño y construcción del prototipo propuesto.

En la figura 12 muestra un diagrama el cual detalla el procedimiento que se llevó acabó para la ejecución de este trabajo, este permitió el desarrollo ordenado y sistemático en la elaboración del prototipo de generación eólica basado en resonancia aeroelástica.

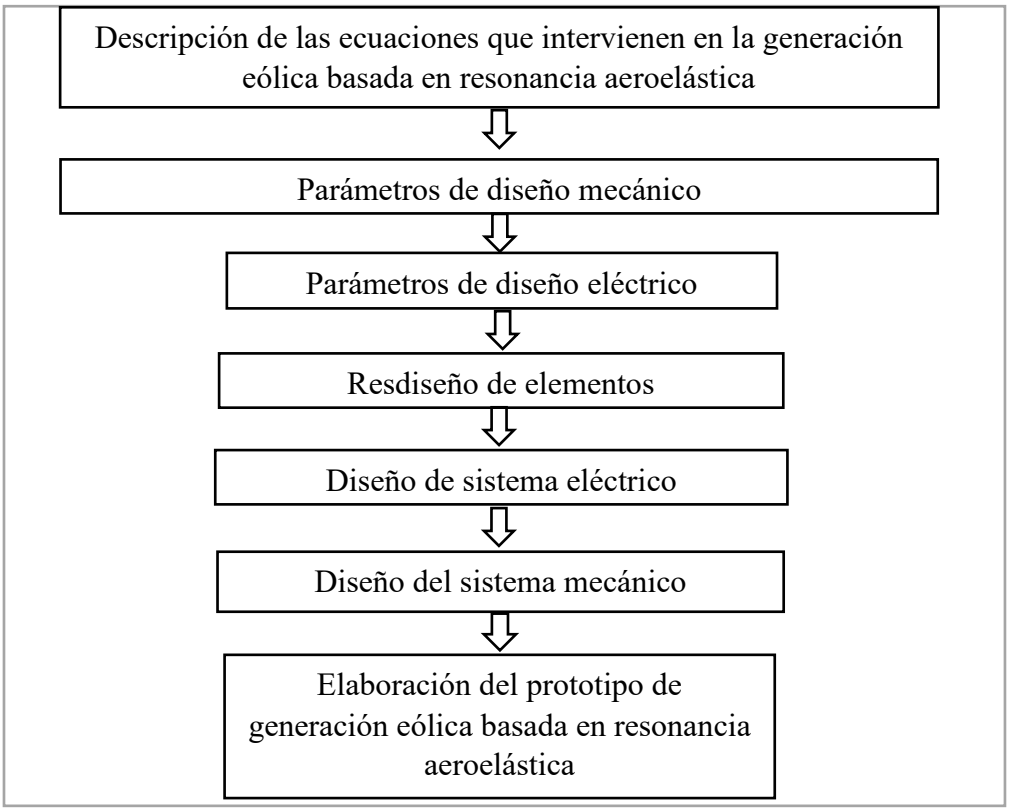


Fig. 12. Diagrama de metodología de investigación.

Para comprender a fondo la generación eólica basada en resonancia aeroelástica, el primer paso implica una exhaustiva revisión bibliográfica. Esta etapa se involucró la recopilación y análisis de literatura relevante sobre la resonancia aeroelástica en el contexto específico de la generación eólica. Se identificó las ecuaciones fundamentales que gobiernan este fenómeno, abarcando conceptos o parámetros de dinámica de fluidos, mecánica, eléctrica, estructural y aerodinámica.

En cuanto al diseño del prototipo lo cual incluye el diseño mecánico, el diseño eléctrico, el cálculo de elementos, se inicia definiendo las especificaciones técnicas y los objetivos de rendimiento. Estos incluyen aspectos como la capacidad de generación de energía, la eficiencia, la estabilidad y la robustez estructural del prototipo. A partir de estas especificaciones, se desarrollaron conceptos de diseño preliminares que incorporan los principios de resonancia aeroelástica descritos en la investigación previa.

La fase de elaboración del prototipo comenzó con la adquisición de los materiales y componentes necesarios según el diseño establecido. Se estableció un plan de fabricación que detalla las etapas y los procedimientos requeridos para ensamblar el prototipo. Durante este proceso, se garantizó la precisión y la calidad en la fabricación de cada componente. Una vez completado el ensamblaje, se realizaron pruebas exhaustivas para verificar el funcionamiento y el rendimiento del prototipo bajo condiciones reales.

3.2 Diseño de la investigación materiales, equipos y Softwares utilizados

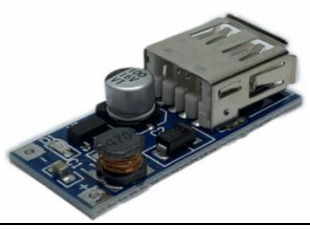
3.2.1 Materiales y equipos

Para la implementación del prototipo es indispensable seleccionar materiales y componentes adecuados ya que el seleccionado de estos nos permitirá tener un buen producto final al momento de la construcción del prototipo.

El aerogenerador basado en resonancia aeroelástica para su funcionamiento requiere de ciertos materiales, los cuales se detallan en la siguiente Tabla V

TABLA V
LISTA DE MATERIALES UTILIZADOS PARA LA ELABORACIÓN DEL AEROGENERADOR.

Material o dispositivo	Apariencia	Resumen
Ácido poliláctico (PLA)		Este es un material esencia para la impresión de cualquier objeto que se imprime en las impresoras 3D.
Imanes de neodimio		Este elemento tiene una alta fuerza magnética los hace ideales para motores eléctricos, generadores, altavoces, cierres magnéticos, dispositivos de sujeción y muchas otras aplicaciones donde se requiere un campo magnético intenso y compacto.

Alambre de cobre calibre 28		El alambre de cobre calibre numero 28 (AWG 28) es un tipo de alambre ideal para realizar trabajos pequeños en donde se necesita realizar bobinas, ya que la elaboración de estas con este tipo de alambre nos permite realizar bobinas de forma compacta y esto nos aumenta la eficiencia de inducción electromagnética sin incrementar demasiado el tamaño de las bobinas.
HW-106		Módulo de convertidor DC-DC (elevador) este integrado aumenta voltajes bajos a una salida estable de 5V a través de un puerto USB con una corriente de output de 500 mA.

Nota: la TABLA V muestra los principales materiales que se va a utilizar en la construcción de la parte mecánica, y eléctrica del prototipo de aerogenerador.

3.2.2 Softwares utilizados

Para realizar el diseño del prototipo de generación eólica basado en resonancia aeroelástica, se tomó en cuenta que los softwares que se va a utilizar sean programas con herramientas especializadas que nos permitan diseñar lo que es la parte mecánica, electica y electrónica del dispositivo y adicional a esto, que estos programas que no requieran tener permiso para su utilización

3.2.2.1 Software SolidWorrks

SolidWorks, un software de diseño asistido por computadora (CAD) comúnmente empleado en ingeniería y diseños mecánicos, posibilita a los usuarios la creación de modelos en 3D de piezas y ensambles mecánicos, representando de manera realista el producto final y permitiendo detectar posibles problemas en los diseños o estructuras. Una función clave es la simulación virtual de prototipos, lo que nos permite observar mediante graficas su rendimiento y funcionamiento.

Entre sus características destacadas se encuentran: herramientas para la creación de dibujos técnicos, capacidad de análisis de esfuerzos y fatiga, así como una interfaz intuitiva y fácil de utilizar. Estas cualidades han consolidado a SolidWorks como una

herramienta ampliamente adoptada en la industria de la ingeniería y el diseño mecánico, posicionándolo como uno de los principales softwares en este ámbito.

3.3 Ecuaciones que intervienen en la generación eólica basado en resonancia aeroelástica

3.3.1 Ecuaciones mecánicas

3.3.1.1 Número de Reynolds (Re)

Es un número que esta considerablemente relacionado con la estela que puede producir en los bordes de la estructura. En nuestro caso un cilindro circular, en la ecuación 1 se considera los parámetros dinámicos y estructurales para obtener la constante de Reynolds [37].

Ecuación 1 Número de Reynolds (Re).

$$Re = \frac{U_{inf} * d * \rho}{\mu} \quad (1)$$

Donde:

- U_{inf}: Velocidad de la corriente Aguas arriba $[m/s]$
- d: Diámetro del cilindro $[m]$
- ρ: Densidad fluida $[Kg/m^3]$
- μ: Viscosidad del fluido $[m^2/s]$

En un generador eólico basado en resonancia aeroelástica el número de Reynolds es fundamental para comprender y predecir el comportamiento de los fluidos de aire que circularan al redor del aerogenerador.

3.3.1.2 Número de Strouhal (S_t)

Es un parámetro adimensional que describe los mecanismos de flujo oscilante fundamental en la mecánica de fluidos. Se relaciona con la generación de vórtices al moverse un objeto en un fluido de aire o de agua, influenciado por el número de Reynolds y el numero adimensional de Lighthill [38].

El número de Strouhal se obtiene de la siguiente ecuación:

Ecuación 2.Número de Strouhal (S_t).

$$S_t = \frac{f_v * D}{U_{inf}} \quad (2)$$

Donde:

- U_{inf}: Velocidad de la corriente Aguas arriba $[m/s]$
- D: Diámetro del cilindro $[m]$
- f_v: Frecuencia de los vórtices $[Hz]$

El número de Strouhal se lo utiliza básicamente para evaluar la eficiencia de propulsión en notación y vuelo, este número es aproximadamente constante $S_t = 0.2$, en un rango de Reynolds bastante amplio. El estudio de este número se lo realiza tanto en superficies lisas como en superficies rugosas, por tanto, para que los vórtices formados fluctúen tienen que depender de la variación de velocidades sobre la estructura.

3.3.1.3 Frecuencia de desprendimiento de vórtices (f_s)

La calle de vórtices de Von Karmann se desprende con una frecuencia (f_s), que está relacionada con la frecuencia natural del elemento a prueba. Este fenómeno causa fuerzas laterales que provocan vibraciones de forma periódica [37].

La frecuencia de desprendimiento de vórtices se obtiene con la siguiente ecuación:

Ecuación 3. Frecuencia de desprendimiento de vórtices (f_s).

$$f_s = \frac{S_t * v}{D} \quad (3)$$

Donde:

- v: Velocidad de la corriente libre del flujo $[m/s]$.
- S_t: Diámetro del cilindro externo $[m]$.
- D: Numero de Strouhal.

El estudio de las fuerzas de desprendimiento es esencial ya que esto ayudara a evitar problemas por vórtices inducidos por vorticidad y con esto se pueden diseñar las estructuras para que sus modos naturales de vibración estén fuera del rango de frecuencia de desprendimiento de vórtices, o bien modificar la superficie para alterar el patrón de desprendimiento.

3.3.1.4 Fuerza de arrastre (F_D)

Esta es una fuerza que actúa sobre un objeto en movimiento a través de cualquier tipo de fluido, en este caso de estudio el viento, como se observa en la ecuación 4. Esta fuerza se opone a la alteración de la estructura, la cual es causada por la ficción entre la estructura y el fluido que fluctúa de acuerdo con su velocidad [37].

La fuerza de arrastre viene dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 4. Fuerza de arrastre (F_D).

$$F_D = 0.5 * \rho * v^2 * A * C_D \quad (4)$$

Donde:

- $0.5 * \rho * v^2$: Son Definidos por la presión dinámica del fluido.
- $A * C_D$: Es la eficiencia aerodinámica del Objeto.

El coeficiente de arrastre se puede representar de forma adimensional, como se muestra en la siguiente ecuación:

Ecuación 5. Coeficiente de arrastre C_D.

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 * \rho * v^2 * A} \quad (5)$$

En donde:

- F_D: Es la fuerza de arrastre $[N]$.
- A: Es el área transversa del cuerpo $[m^2]$.
- ρ: Es la densidad del fluido $[Kg/m^3]$.
- v: Es la velocidad de la incidencia del fluido $[m/s]$.

El estudio de esta fuerza es esencial estudiarla para así poder reducir la resistencia aerodinámica para mejorar los resultados del rendimiento y eficacia del sistema.

3.3.1.5 Fuerza de Sustentación (F_L)

La fuerza de sustentación es aquella que incide en una estructura de forma perpendicular al campo del fluido que atraviesa el cuerpo [37].

Esta fuerza está representada por la siguiente expresión matemática.

Ecuación 6. fuerza de sustentación (F_L).

$$F_L = 0.5 * \rho * v^2 * A * C_L \quad (6)$$

La forma adimensional se representa en la siguiente ecuación:

Ecuación 7. Fuerza de arrastre de forma adimensional C_L.

$$C_L = \frac{F_L}{0.5 * \rho * v^2 * A} \quad (7)$$

Donde:

- F_L: Es la fuerza de sustentación $[N]$.
- A: Es el área transversa del cuerpo $[m^2]$.
- ρ: Es la densidad del fluido $[Kg/m^3]$.
- v: Es la velocidad de la incidencia del fluido $[m/s]$.

El estudio de esta fuerza es importante, ya que esto nos ayudará a optimizar el diseño y el rendimiento de aerogenerador eólico basado en resonancia aeroelástica, el cual actúa con el fluido del aire en movimiento.

3.3.1.6 Velocidad reducida (U_r)

La velocidad reducida es un parámetro clave en el estudio del fenómeno de desprendimiento de los vórtices, según (16), esta velocidad relaciona el flujo de campo libre v_s con los diferentes parámetros de la estructura tanto estructural como dinámico [37].

La ecuación de la velocidad reducida viene dada de la siguiente manera:

Ecuación 8. velocidad reducida (U_r).

$$U_r = \frac{v_s}{f_n * \mathrm{D}} \qquad (8)$$

Donde:

- v_s: Es la velocidad $[m/s]$.
- f_n: Es la frecuencia natural del cuerpo $[Hz]$.
- D: Es el diámetro del elemento $[m]$.

La velocidad reducida es fundamental para predecir la frecuencia de desprendimiento de vórtices y sincronizarla con la frecuencia natural de la estructura, de este modo que se pueda aprovechar este fenómeno para generar energía mediante un generador eólico basado en resonancia aeroelástica.

3.3.1.7 Frecuencia Natural (f_n)

La frecuencia natural es la frecuencia a la que un objeto o sistema vibra después de ser perturbado de su posición de equilibrio. Esta frecuencia es intrínseca a la estructura y depende de factores como la geometría, la masa y la rigidez del sistema [37]. Todos los objetos mecánicos tienen una o varias frecuencias naturales, siendo la frecuencia natural fundamental la más baja de estas frecuencias. La frecuencia natural es esencial en el análisis de vibraciones y fenómenos de resonancia en estructuras y sistemas mecánicos [37].

La fórmula de la frecuencia natural viene dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 9. Frecuencia Natural f_n.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9)$$

Donde:

k: Rigidez del cilindro (constante elestica) $[N/m]$.

m: Masa del cuerpo $[kg]$.

π: Constante pi aproximada

El estudio de la frecuencia natural nos ayudará a determinar la frecuencia ala que el generador eólico basado en resonancia aeroelástica vibrará después de ser perturbado, y esto, será esencial para comprender y predecir el comportamiento vibratorio del sistema y adicional a esto, podremos evitar problemas de resonancia o deseados y así garantizar un funcionamiento eficiente y seguro de aerogenerador.

3.3.1.8 Sincronización (Lock-In)

Según (16), el principal objetivo de este fenómeno es la sincronización del fluido y la estructura, esta se produce cuando la frecuencia natural (f_n) de la estructura se sintoniza con la frecuencia de desprendimiento de vórtices (f_s)en estructuras estáticas [39].

Cuando los vórtices se desprenden provocando el movimiento periódico del aerogenerador, la amplitud de dicho movimiento sueles ser limitada, a menos que la frecuencia de desprendimiento de vórtices (f_s) se acerque o coincida con la frecuencia natural intrínseca del cilindro (f_n).

3.3.1.9 Momento de Inercia

El momento de inercia es una propiedad geométrica de cualquier tipo de sección transversal de un objeto estructural en relación con el eje al cual se está trabajando.

La ecuación de este momento de inercia es al siguiente:

Ecuación 10. Momento de Inercia.

$$y = \int y^2 * dA \qquad (10)$$

Donde:

- y: Es la distancia perpendicular desde el momento de área hasta el eje de referencia $[m]$.
- dA: Es un elemento de área infinitesimal a lo largo de la sección transversal.

En el análisis estructural de un aerogenerador basado en resonancia aeroelástica el momento de inercia es un factor muy importante en el análisis de la estructura del aerogenerador, debido a que este relaciona la resistencia de una sección para soportar reflexión y torsión.

3.3.1.10 Masa de una estructura

En un generador eólico basado en resonancia aeroelástica la masa estructural de este es la cantidad de materia que lo compones, y se puede calcular a partir de la densidad y volumen de la estructura.

La expresión para calcular la masa de una estructura viene dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 11. Masa de la estructura

$$M = \rho * V \qquad (11)$$

Donde:

- ρ: Es la densidad de la estructura $[Kg/m^3]$.
- V: Es el volumen de la estructura $[m^3]$.

Con esta expresión podemos medir que densidad o cuanto espacio ocupa el generador eólico basado en resonancia aeroelástica.

3.3.1.11 Rigidez de la estructura

Según [37] la rigidez de una estructura es una propiedad que indica su resistencia a deformarse cuando se lo aplique una fuerza o un esfuerzo. La rigidez depende del material, la forma y las conexiones de los elementos que la componen la estructura. Una estructura es rígida si no puede flexionarse o cambiar su forma sin romperse o perder su función. Una estructura es flexible si puede adaptarse a diferentes formas sin perder su integridad o su función.

3.3.1.12 Potencia extraíble P_v

El cálculo de este parámetro nos ayudara a conocer que potencia podemos obtener con la energía del viento que desprende a diferentes velocidades.

Ecuación 12. Potencia extraíble P_v.

$$P_v = \frac{1}{2} A * \rho * v^3 \qquad (12)$$

Donde

- A: Es el área transversa del cuerpo $[m^2]$.
- ρ: Es la densidad del fluido $[Kg/m^3]$.
- v: Es la velocidad de la incidencia del fluido $[m/s]$.

3.3.2 Ecuaciones eléctricas

3.3.2.1 Fuerza electromotriz

La fuerza electromotriz inducida (fem) la obtendremos a partir de la ley de Faraday [39]

Ecuación 13. Fuerza electromotriz

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = N\frac{d\phi}{dt}[v] \quad (13)$$

Donde:

- e: Fuerza electromotriz inducida [V].
- ϕ: Flujo magnético.
- N: Número de vueltas de una bobina.

El flujo magnético lo expresaremos de la siguiente manera:

Ecuación 14. Flujo magnético.

$$\phi = \int_{r}^{r+A} B * dA \quad (14)$$

Donde:

- B: Densidad de campo magnético [Teslas].
- r: Radio de la bobina.
- A: Amplitud máxima [m].
- $dA = 2\pi r\, dr$

Resolviendo las ecuaciones 12 y 13 tenemos que la expresión para calcular la fuerza electromotriz se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 15. Fuerza electromotriz

$$e = \pi * B * ((r + A)^2 - r^2) * f_s * N\ [V] \quad (15)$$

En donde:

- B: Densidad de campo magnético [Teslas].

- r: Radio de la bobina.
- A: Amplitud máxima [m].
- N: Número de vueltas del bobinado.
- f_s: Frecuencia de desprendimiento [Hz]

3.3.2.2 Corriente

La ecuación 15 muestra la ecuación para el cálculo de la corriente y esta se considera que esta en función de la frecuencia f_s.

Ecuación 16. Corriente eléctrica.

$$i = \frac{e(f)}{z(f)}[A] \qquad (16)$$

Donde:

- $e(f)$: Fuerza electromotriz en función de la frecuencia [V].
- $z(f)$: Impedancia en función de la frecuencia [Ω].
- i: Corriente [A]

La impedancia abarca una parte resistiva y una parte inductiva y viene dada de la siguiente formula:

Ecuación 17. Impedancia $(\boldsymbol{z})$**.**

$$z = R + j\omega L \qquad (17)$$

Donde:

- z: Impedancia [Ω].
- R: Parte real de la impedancia [Ω].
- j: Unidad imaginaria de la impedancia.
- ω: Frecuencia angular de la corriente alterna.

- L: Parte inductancia del inductor presente en el circuito [L].

Reemplazando la ecuación 16 en la ecuación 15 obtenemos la siguiente ecuación:

Ecuación 18. Corriente eléctrica

$$i = \frac{e(f)}{\sqrt{R^2 + w^2 L^2}}[A] \quad (18)$$

Donde:

- $e(f)$: Fuerza electromotriz en función de la frecuencia [V].
- i: Corriente eléctrica [A].
- R: Parte real de la impedancia [Ω].
- ω: Frecuencia angular de la corriente alterna.
- L: Parte inductancia del inductor presente en el circuito [L].

3.3.2.3 Potencia

Para el cálculo de la potencia utilizamos la siguiente formula:

Ecuación 19. Potencia eléctrica

$$P = e * i[w] \quad (19)$$

Donde:

- P: Potencia eléctrica [W].
- e: Fuerza electromotriz [V].
- i: Corriente eléctrica [A].

3.4 Generador eólico basado en resonancia aeroelástica

Este es un innovador aerogenerador vertical en forma cilíndrica como se muestra en la Fig. 13, el cual no cuenta con partes rotativas y se basa en resonancia aeroelástica para generar energía, este consiste en un mástil cilíndrico fijado a una base que esta empotrada al suelo, su funcionamiento consiste en aprovechar las vórtices generado por el viento al pasar por el por el aerogenerador, creando resonancia aeroelástica que provoca oscilaciones perpendiculares al flujo y así atrapando energía mecánica sin ningún elemento rotativo.

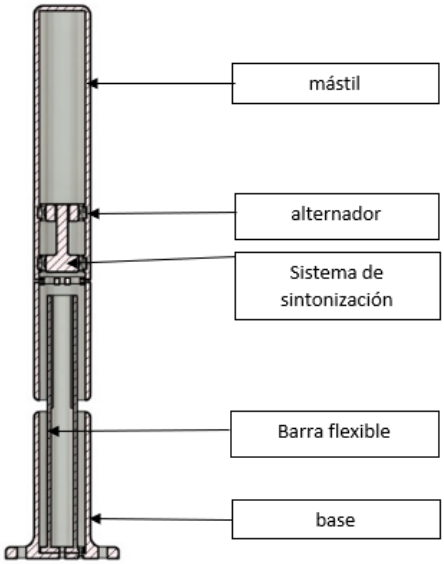


Fig. 13. estructura del aerogenerador basado en resonancia aeroelástica.

Nota. Este dispositivo de generación eólica cuanta con un mástil oscilantes rígido en el exterior y libre en la parte superior para máxima amplitud, un núcleo elástico que es de fibra de vidrio el cual transmite vibraciones a un alternador lineal, una base fija que esta sujeta al suelo y este no debe experimentar ningún movimiento, un sistema de sintonización el cual está conformado por dos anillos de imanes para maximizar la oscilación del aerogenerador y un generador conformado por imanes permanentes de neodimio y una bobina los cuales por inducción electro magnética generan electricidad al oscilar el mástil del aerogenerador. La implementación de este tipo de aerogenerador presenta las ventajas de que se reduce su mantenimiento debido a que no tiene frenos ni rodamiento que pueden deteriorarse por fricción, estos son ligeros, no son perjudiciales para las aves y son adaptables a turbulencias debido a fuertes vientos.

4 CAPITULO IV

DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se enfoca en el diseño, implementación y el análisis los resultados obtenidos en la construcción de un prototipo de generador eólico basado en resonancia aeroelástica, en donde se procedió en primera instancia a realizar el cálculo de los principales parámetros que intervienen en este tipo de aerogeneradores, posterior a esto se analiza las partes del aerogenerador diseñado en Solid Works, luego se indica como se realizó el montaje de las partes que compone el aerogenerador y para finalizar se realizara un análisis de los resultados obtenidos.

4.1 Cálculo de parámetros

4.1.1 Cálculo del número de Reynolds

El cálculo de este parámetro se lo realiza con el objetivo de conocer si el flujo del viento que este alrededor del aerogenerador será ordenado o turbulento, para esto utilizamos la ecuación 1 y con los resultados obtenidos realizamos el siguiente gráfico.

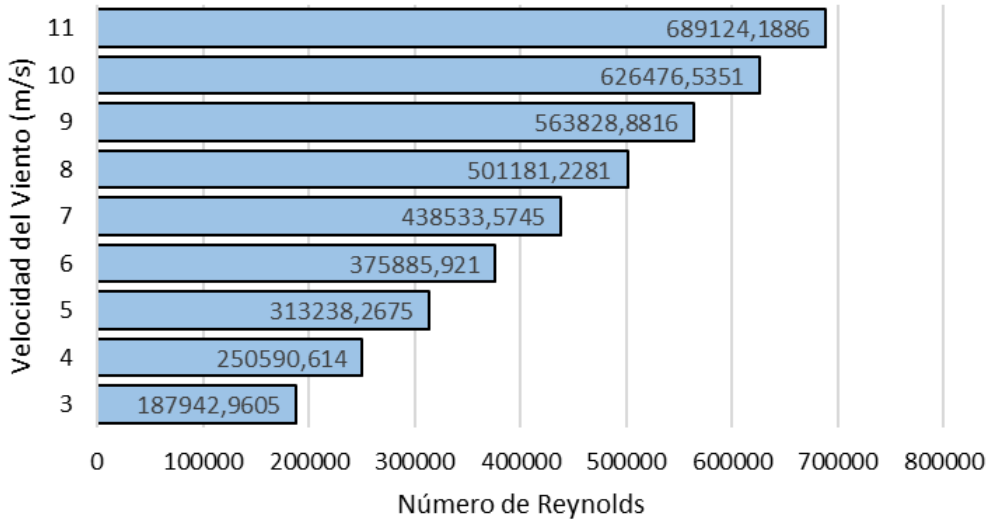


Fig. 14. diagrama de número de Reynolds

Nota: Para el diagrama de la Figura 14 se utilizó la Ecuación 1 en donde los parámetros que se utilizó son: Densidad de aire a temperatura ambiente (ρ), con un valor de 1.18 kg/m^3; Velocidad del viento (u) con un rango de velocidad que va desde los 2

m/s a 6 m/s; Longitud del prototipo el cual es de 1m.; Viscosidad dinámica del aire (μ), la viscosidad dinámica del aire a una altura de 2220 msnm (altitud del lugar donde se realiza el trabajo) es de (1.8 a 2.0) * 10^{-5}. Pa*s(kg/(ms)), por lo que se tomará el valor de 1.81*$10^{-5}(Pa * s/(ms))$.

Analizando la Figura 14 se observa que la altura del aerogenerador es de 1m y tenemos un rango de velocidades del viento que van desde los 3m/s a 11m/s obtenemos un numero de Reynolds de aproximadamente 10^5, esto nos indica que a las velocidades del viento que vamos a trabajar tendremos un flujo del viento óptimo para que el aerogenerador funcione.

4.1.2 Cálculo de la frecuencia de desprendimiento de vórtices

Según [40] nos indica que el flujo alrededor de un cilindro o cuerpos parecidos es de aproximadamente de 0.2 y este valor es común en valores altos del número de Reynolds, conocido el número de Strouhal es necesario proceder con el cálculo de la frecuencia de vibración en nuestro aerogenerador para lo cual utilizamos la ecuación 2, de la cual se despejará la frecuencia y creamos el siguiente diagrama en donde se expones la frecuencia de desprendimiento de vórtices en el aerogenerador.

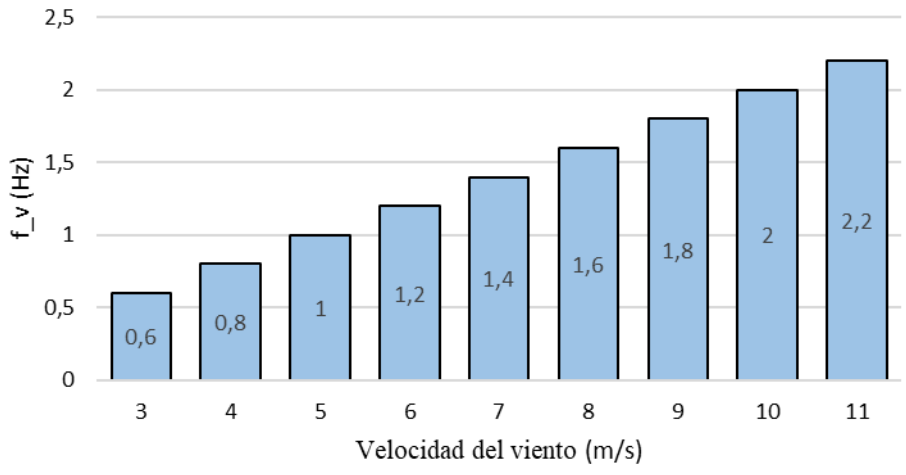


Fig. 15. diagrama de desprendimiento de vórtices.

Nota: Para el diagrama de la Figura 15 se utilizó la Ecuación 2, de la cual se despeja el parámetro f_v y se procedió a calcular utilizando los siguientes parámetros: Velocidad del viento (u), con un rango de velocidad que van desde los 2 m/s a 11 m/s.; Longitud del prototipo (L), 1m de altura y un número de Strouhal (S_t): 0.2.

La Figura 14 nos indica los valores que tiene que tener la frecuencia natural de oscilación del mástil del aerogenerador para generar energía, esto debido a que para que un generador resuene la frecuencia natural de oscilación del aerogenerador debe ser igual o coincidir con la frecuencia de desprendimiento de vórtices

4.1.3 Cálculo de la fuerza de arrastre

El objetivo del cálculo de este parámetro se debe a que con esto determinaremos las cargas estructurales soportara el aerogenerador, ya que esta fuerza impulsa tanto el movimiento oscilatorio y las tenciones que podrían causar fatiga en la estructura del aerogenerador.

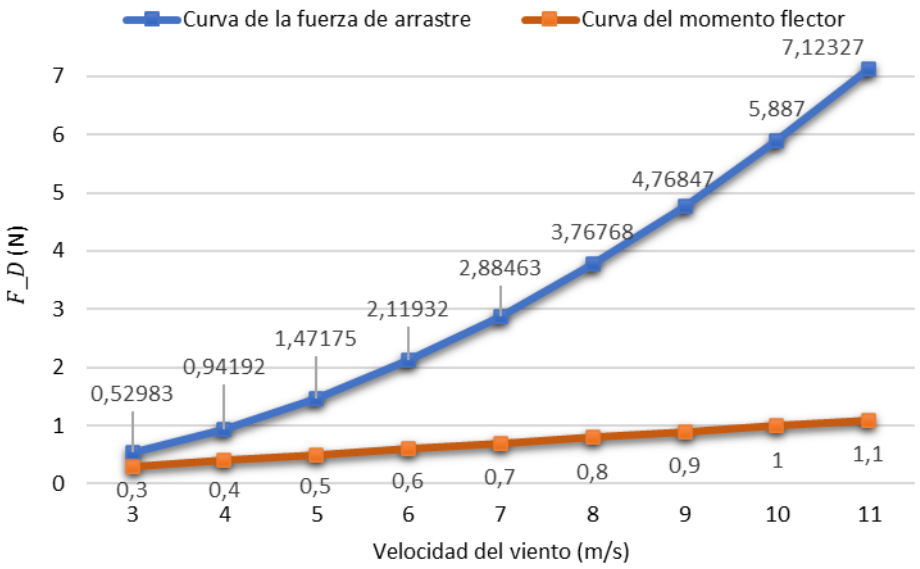


Fig. 16. Diagrama de la fuerza de arrastres y el momento flector.

Nota: Para el diagrama de la Figura 16 se utilizó la ecuación 4 en la cual se utilizaron los siguientes parámetros: El área fontal (A (m^2)), para esto se conoce que la altura del aerogenerador será de 1 m y de 0.1 m de diámetro, entonces el área frontal del aerogenerador (L*d) es de: 0.1 m^2.; el coeficiente de arrastre (C_D), como el mástil del

aerogenerador este impreso en ácido poliláctico (PLA) y este es un cilindro en flujo turbulento el coeficiente de arrastre suele estar entre los 0.7 y 1.2 ya que es similar a un tivo PVC y estos tienen este coeficiente de arrastre, entonces precedemos a tomar un valor intermedio que sería C_D,=1 N.; velocidad del viento (u), en un rango que van desde los 2 m/s a 11 m/s.; densidad de aire (ρ),a una altura de 2220 msnm (altitud del lugar donde se realiza el trabajo) a temperatura ambiente es de aproximadamente 1.18 kg/m^3.

En la figura 16 se visualiza que el momento flector para cada velocidad del viento y su respectiva fuerza de arrastres tiene valores que van desde los (0.3 a 1.1) Nm, y con esto podemos decir si el aerogenerador opera en este rango de velocidades del viento no sufrirá ninguna deformación debido a la fuerza transversales externas.

4.1.4 Cálculo de la velocidad reducida

Con el cálculo de este parámetro se identificará la relación que existe entre la velocidad del viento y la frecuencia natural, para con esto conocer el rango de resonancia en el cual el aerogenerador maximizará las vibraciones.

TABLA VI
VELOCIDAD REDUCIDA

u (m/s)	L (m)	f Hz	U_r
3	1	0,6	5
4	1	0,8	5
5	1	1	5
6	1	1,2	5
7	1	1,4	5
8	1	1,6	5
9	1	1,8	5
10	1	2	5
11	1	2,2	5

Nota: Para construir la Tabla VI se utilizó la Ecuación 8, en la cual se utiliza los siguientes parámetros: Velocidad del viento (u), en un de rango de 2 m/s a 11 m/s.; Longitud del prototipo (L), el cual mide aproximadamente 1m de altura.; Frecuencia de desprendimiento de vórtices (f).

En la Tabla VI se puede observar que la velocidad reducida que necesitamos para la construcción del aerogenerador es de 5 ya que esto indica resonancia optima.

4.1.5 Cálculo de la potencia extraíble

Con el cálculo de este parámetro conoceremos la energía disponible a diferentes velocidades del viento sobre el área frontal del mástil del aerogenerador. Utilizando la ecuación 12 se crea la siguiente tabla en donde se puede apreciar la potencia extraíble a diferentes velocidades del viento que interactúa con la estructura del aerogenerador.

TABLA VII
POTENCIA EXTRAÍBLE ENEL LUGAR DONDE SE REALIZA EL TRABAJO

u (m/s)	A (m)	ρ (kg/m^3)	P_v W
3	0,1	1,18	1,58949
4	0,1	1,18	3,76768
5	0,1	1,18	7,35875
6	0,1	1,18	12,71592
7	0,1	1,18	20,19241
8	0,1	1,18	30,14144
9	0,1	1,18	42,91623
10	0,1	1,18	58,87
11	0,1	1,18	78,35597

Nota. Para realizar la Tabla VII se utilizó la Ecuación 12 la cual está compuesta de los siguientes parámetros: el área fontal (A (m^2)), es de 0.1 m^2.; Velocidad del viento (u), para esto se utilizó un rango de velocidades del viento que van desde los 2 m/s a 11 m/s.; Densidad de aire (ρ), la cual en el lugar donde se realiza el trabajo es de aproximadamente de 1.18 kg/m^3.

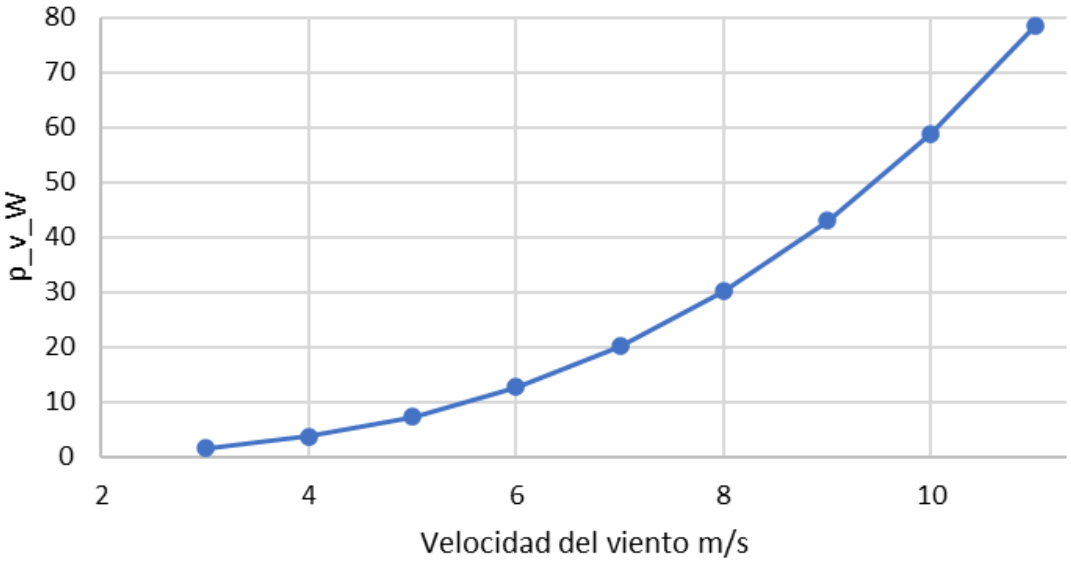


Fig. 17. Diagrama de potencia extraíble con un aerogenerador convencional

La Figura 17 muestra la variación de la potencia generada en función de la velocidad del viento. Se observa un comportamiento creciente no lineal, donde la potencia aumenta de manera progresiva conforme se incrementa la velocidad del viento. Esta tendencia es coherente con el principio aerodinámico que establece que la potencia disponible en el viento es proporcional al cubo de la velocidad, lo que explica el crecimiento acelerado de la curva a velocidades mayores.

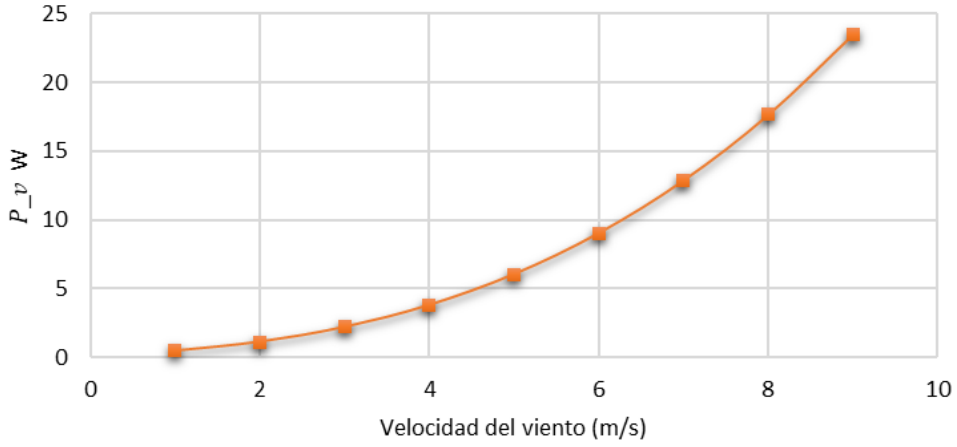


Fig. 18. Diagrama de potencia extraíble con un aerogenerador basado en resonancia aeroelástica

Según [41] El rendimiento de conversión de un aerogenerador eólico basado en resonancia aeroelástica suele rondar el 30%, para lo cual se ha elaborado la figura13 en

donde se puede evidenciar la potencia extraíble normal con un aerogenerador basado en resonancia aeroelástica, en donde se observa que la potencia es mucho menor en comparación a la potencia extraíble en aerogeneradores convencionales.

4.2 Proceso de diseño y construcción estructural

El proceso de fabricación está comprendido por una serie de etapas, entre las que se incluyen la selección de materiales (imanes, alambre de cobre y el número de vueltas de la bobina del alternador), el diseño de las partes del prototipo del aerogenerador, el diseño de los sistemas de resonancia y el sistema de generación de energía el cual comprende el diseño del alternador, el montaje y armado de las partes del aerogenerador.

4.2.1 Cálculo de bobina y selección de imanes

4.2.1.1 Elección de imanes

Para el desarrollo de esta trabajose ha seleccionado 2 tipo des imanes de neodimio, debido a que se necesitaba unos imanes para; el sistema de resonancia dispuestos en forma de anillo y otro tipo de imanes en forma de cilindros los cuales forman un cilindro el cual esta acoplado al mástil, enfrentados a las bobinas para la generación del flujo magnético en las bobinas, los cuales son 108 imanes S-10-1.5-N52N con una inducción magnética de aproximadamente 0.5 T (teslas) y 74 imanes S-05-25-N con una inducción magnética de aproximadamente 1.4 (teslas), de los cuales la especificaciones me muestran en la siguiente tabla. [42]

TABLA VIII
ESPECIFICACIONES DE LOS IMANES DE NEODIMIO UTILIZADOS PARA EL TRABAJO

Características	Especificaciones imán 1 (S-05-25-N)	Especificaciones imán 2 (S-10-1.5-N52N)
Categoría	Imán de neodimio en bruto	Imán de neodimio en bruto
Forma	Cilindro magnético	Disco magnético
Diámetro	5 mm	10 mm
Alto	25 mm	1,5 mm
Grado magnético	N45	N52
Fuerza de sujeción	Aproximadamente 1,1 kg.	Aproximadamente 1.2 kg.

Color	Plateado	Plateado
Revestimiento	Níquel, cobre, níquel	Níquel, cobre, níquel
Peso	3,7 gramos	0.9 gramos
Temperatura máxima de servicio	80°C	80°C

4.2.1.2 Cálculo de bobinas y numero de vueltas.

Para el cálculo de este parámetro es esencial saber la cantidad de voltaje que se pretende obtener, para este trabajo el voltaje deseado a obtener es alrededor de 5 voltios o más, adicional a esto se pretende utilizar:

- Bobinas con un diámetro interno de 1,5 cm y externo de 3 cm, entonces el área de la bobina seria aproximadamente 0,00141 m^2.
- Imanes de neodimio(S-05-25-N) los cuales tienen un campo magnético de 1.4 T (14000 guaus).
- Velocidad de rotación (f) de 10 Hz. A velocidad de viento correspondiente a 6 m/s.

Para conocer el número de vueltas que se necesita tener en cada bobina utilizamos la ecuación 14, de la cual despejamos la variable número de vueltas, luego del cálculo se tiene que se necesita alrededor de 1000 vueltas de alambre de cobre en cada bobina.

4.3 Diseño de las distintas partes del aerogenerador

El diseño del aerogenerador basado en resonancia aeroelástica consistió en escoger un modelo de prototipo del aerogenerador y diseñar cada una de las distintas partes de la que está compuesta este, tomando en cuenta que el aerogenerador debe diseñado para soportar las distintas fuerzas que interactuaran con este.

4.3.1 Diseño del anillo de imanes

Esten es una parte del aerogenerador en donde se instalarán imanes de neodimio para que este con otro anillo de imanes que se encuentra en el interior del mástil generen repulsión magnética para ajustar la frecuencia natural del prototipo la cual debe estar en unos 10 Hz aproximadamente.

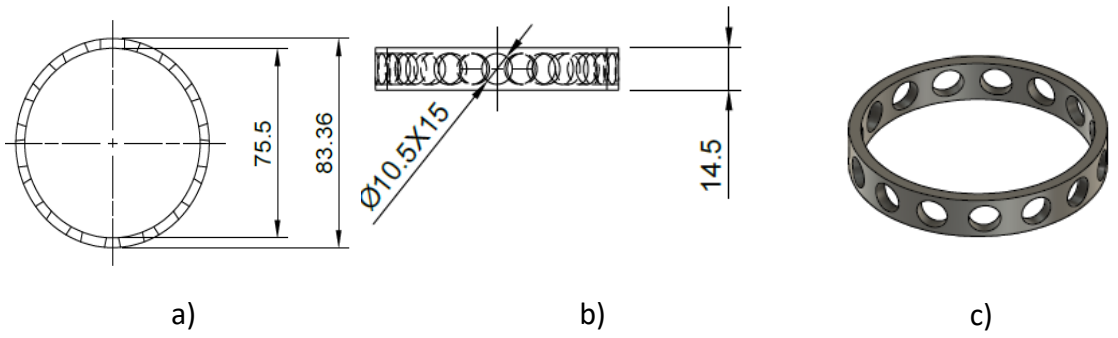


Fig. 19. Diseño de anillo de imanes para la repulsión magnética, a) vista superior del anillo, b) vista lateral del anillo, c) solido del anillo.

4.3.2 Diseño de la base del aerogenerador

Parte del aerogenerador la cual actuará como soporte estructural (soporte para el sistema de sintonización y soporte para el sistema de generación de energía), en esta se ancla el mástil al suelo y con esto evitar los momentos flectores debido al arrastre producido por la fuerza del viento que chocaran con el aerogenerador.

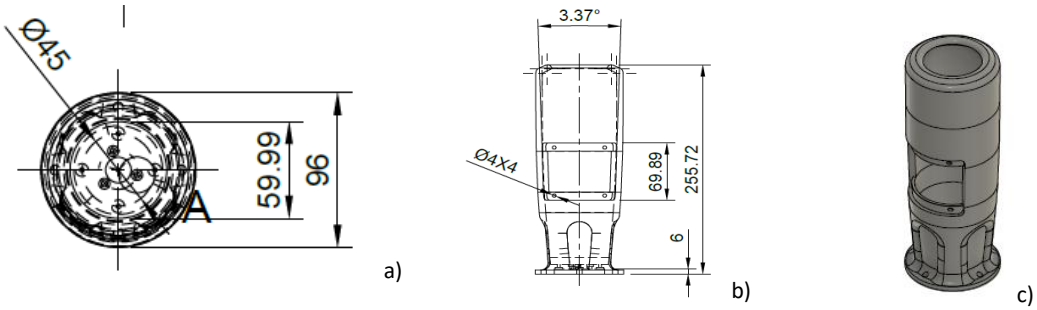


Fig. 20. Diseño de la base el aerogenerador, a) vista superior de la base, b) vista lateral de la base, c) solido de la base.

4.3.3 Diseño del eje flexible del aerogenerador

El mástil de aerogenerador que se muestra en la Fig. se acoplará a una varilla suficientemente flexible que le permita deformarse ciertos grados respecto a su posición de equilibrio y no ofrezca resistencia a fletarse, de acuerdo con estudios acerca de los aerogeneradores basados en resonancia el material adecuado para fabricar la varilla flexible es de fibra de vidrio ya que una varilla de este material llega a tener deflexiones hasta de 0.3 cm sometidos a una corriente de viento de 5m/s.

Esta es una varilla la cual es de fibra de vidrio, esta empotrada en la base y en el mástil del aerogenerador, con esta varilla obtenemos la elasticidad necesaria para que el aerogenerador oscile con los vórtices del viento. Está diseñado para que soporte cargas de fatiga sin que exista ficción con algún otro elemento, adicional a esto, esta varilla deberá mantener una frecuencia natural que coincida con el desprendimiento de vórtices y con esto maximizar la amplitud de oscilación

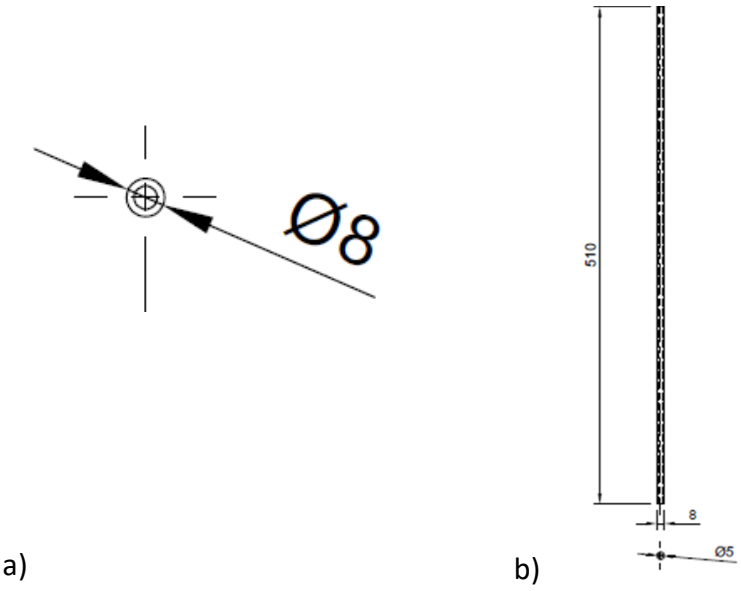


Fig. 21. Diseño del eje flexible del aerogenerador, a) vista superior del eje flexible del aerogenerador, b) vista lateral del eje flexible del aerogenerador

4.3.4 Diseño del JACK DC del aerogenerador

Esta es una compuerta en donde se encuentra la salida de la energía generada en el aerogenerador, además a esto, esta compuerta está diseñada albergaren su interior un integrado HW-106.

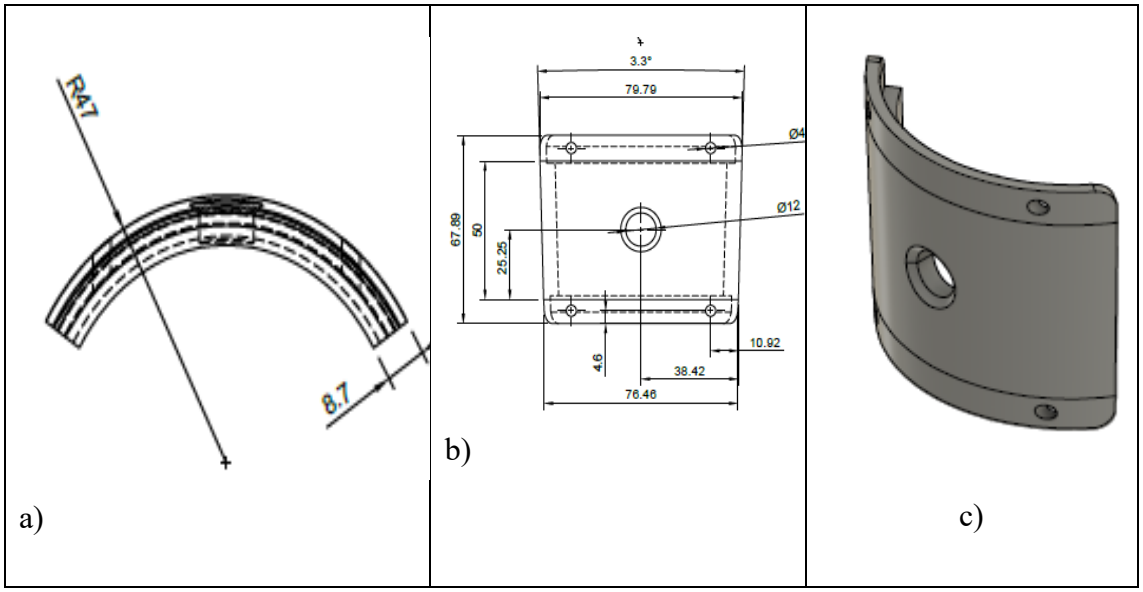


Fig. 22. Diseño de la compuerta JACK DC, a) vista superior de la compuerta JACK DC, b) vista lateral de la compuerta JACK DC, c) solido de la compuerta JACK DC.

4.3.5 Diseño del mástil

Es un elemento diseñado para que gracias al desprendimiento de vórtices osciles libremente perpendicular al viento, este elemento será el encargado de convertir la energía cinética del viento en un movimiento resonante, esto gracias al sistema de resonancia que estará en su interior. Este elemento este compuesto de cuatro partes.

En cuanto lo que se refiere al diseño del mástil del aerogenerador, este está diseñado para maximizar las oscilaciones que experimenta el prototipo, existen diferencias en la formación de vórtices según la forma geométrica que tienen el mástil. De acuerdo con la bibliografía para mástil solidos cilíndricos la formación de vórtices es del modo 2S, y para mástiles cónicos la formación de vórtices es manera a híbrida y así cada una de las formaciones de vórtices afecta de manera distinta a las vibraciones que describen los mástiles.

De acuerdo a estudios realizados a los generadores basados en resonancia aeroelástica indican que los mástiles cilindros cónicos con una conicidad adecuada proporcionan mayores oscilaciones en comparación a mástil cilíndricos uniformes. adicional a esto exponen que conforme el radio de conicidad disminuye, el rango de velocidades del viento para que el aerogenerador genere energía aumenta a velocidades

superiores y así afectando al rendimiento del aerogenerador, el material en que se imprimió estas partes son en ácido poliláctico.

4.3.5.1 Parte inferior del mástil

Esta es una sección basal del mástil cilindro oscilante, está unido al eje flexible el cual está a su vez anclado a la base del aerogenerador.

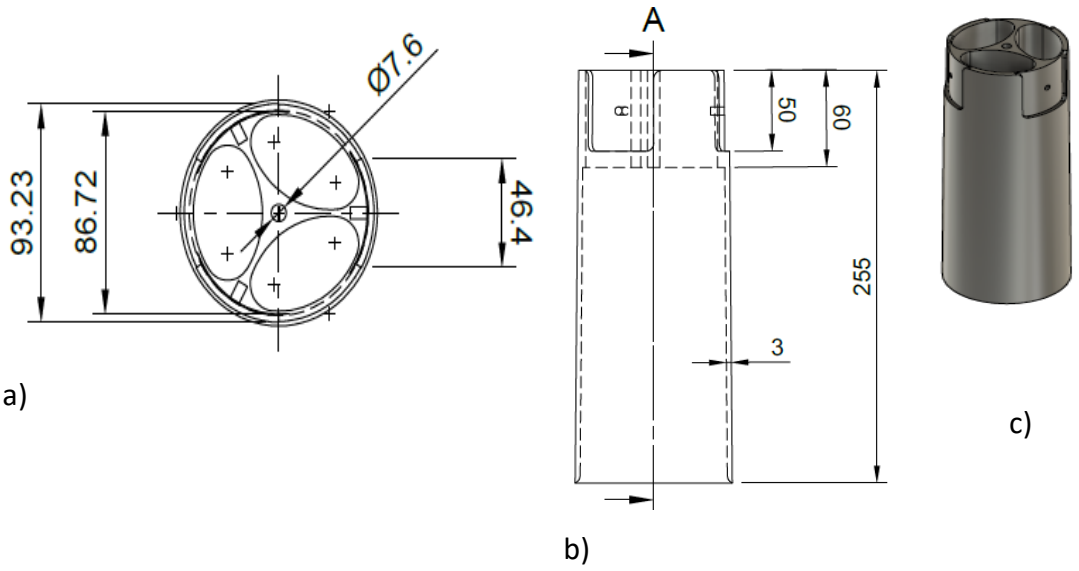


Fig. 23. Diseño de la parte inferior del mástil, a) vista superior de la parte inferior del mástil, b) vista lateral de la parte inferior del mástil, c) solido de la parte inferior del mástil.

4.3.5.2 Parte superior del mástil

Esta es una sección intermedia del aerogenerador, en su interior está el sistema de oscilación (dos anillos de imanes que se repelen) y el sistema de generación (bobina de cobre y un anillo de imanes), la función de esta es anclar algunos de los elementos de estos sistemas.

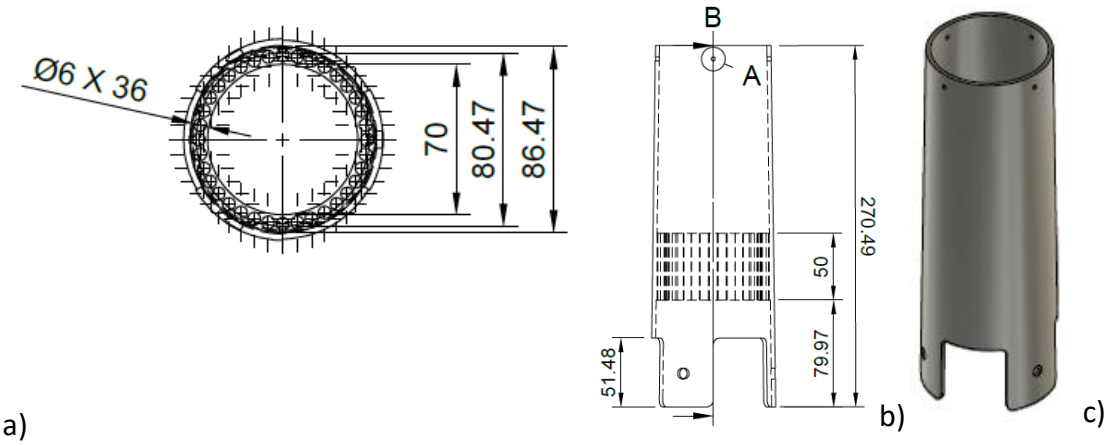


Fig. 24. Diseño de la parte superior del mástil, a) vista superior de la parte superior del mástil, b) vista lateral de la parte superior del mástil, c) solido de la parte superior del mástil.

4.3.5.3 Punta del mástil

Es un elemento diseñado para que sea la cúspide del mástil del aerogenerador, su principal función es cubrir para que no exista ingreso de agua en caso de climas lluviosos o impedir el ingreso de cualquier elemento que pueda ingresar por la parte superior del aerogenerador al interior de este.

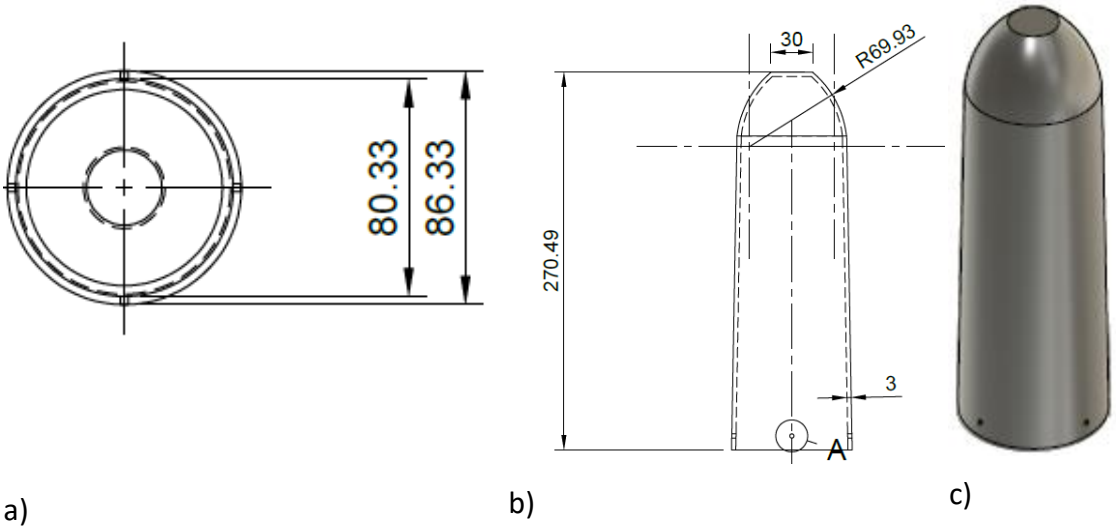


Fig. 25. Diseño de la punta del mástil, a) vista superior de la punta del mástil, b) vista lateral de la punta del mástil, c) solido de la punta del mástil.

4.3.5.4 Soporte del mástil.

Esta es una parte del aerogenerador diseñada y utilizada para la unión de la parte superior del mástil con la punta del mástil.

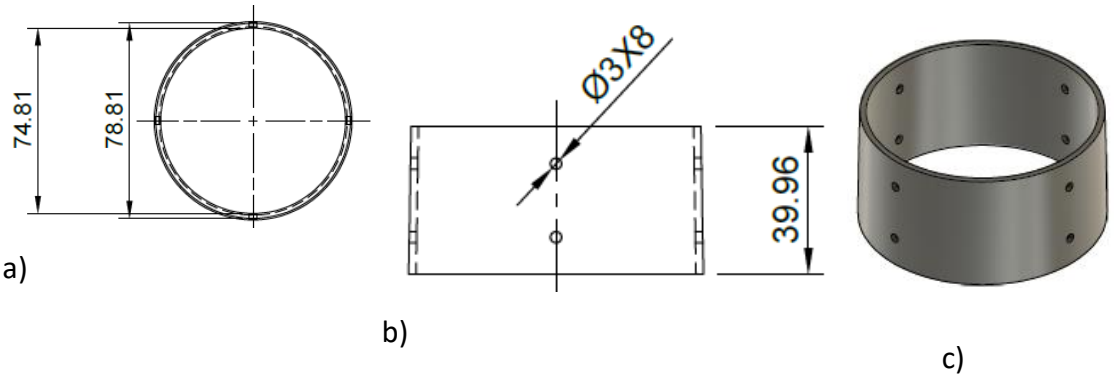


Fig. 26. Diseño del soporte del mástil, a) vista superior del soporte del mástil, b) vista lateral del soporte del mástil, c) solido del soporte del mástil.

4.3.6 Diseño del núcleo del alternador del aerogenerador

Esta es una parte fija del estator en a cuál se alberga bobinas que interactúan con el anillo de imanes anclado al mástil para generar inducción electromagnética. Este núcleo está anclado al soporte fijo del aerogenerador.

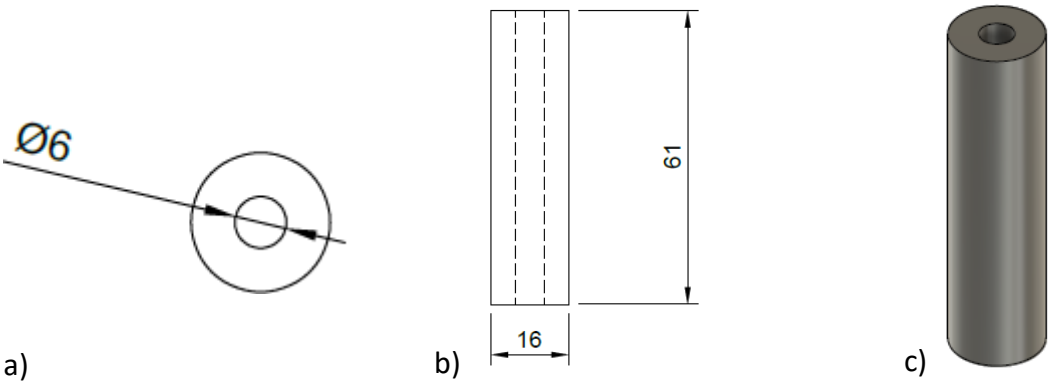


Fig. 27. Diseño del núcleo del alternador, a) vista superior del núcleo del alternador, b) vista lateral del núcleo del alternador, c) solido del núcleo del alternador.

4.3.7 Diseño del soporte del alternador del aerogenerador

Es una parte fija del aerogenerador la cual alberga bobinas, imanes de sintonización y núcleo de la bobina, está anclada la base del aerogenerador y está diseñada para absorber amortiguamiento electromagnético y repulsión magnética del sistema de sintonización.

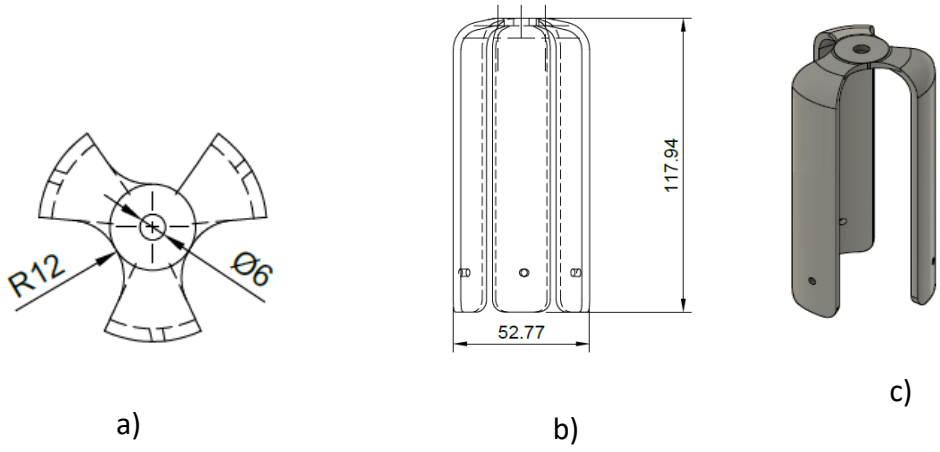


Fig. 28. Diseño del soporte del alternador, a) vista superior del soporte del alternador, b) vista lateral del soporte del alternador, c) solido del soporte del alternador, d) soporte del alternador impreso.

4.3.8 Diseño del soporte del eje flexible del aerogenerador

Este es un elemento que empotra la varilla flexible en la base del aerogenerador, ya que esta varilla estar conectada al mástil y esta debe soporta oscilaciones sin fricción.

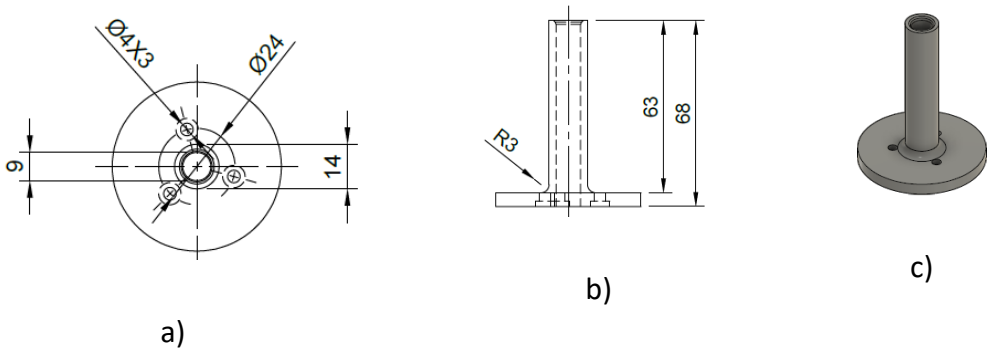


Fig. 29. Diseño del soporte del eje flexible, a) vista superior del soporte del eje flexible, b) vista lateral del soporte del eje flexible, c) solido del soporte del eje flexible.

4.3.9 Diseño del soporte de imanes del aerogenerador

Este es un soporte de imanes del sistema de oscilación, el cual se encuentra en la parte superior de la bobina, en este soporte se insertarán imanes con polaridad contraria a los imanes que se encuentran en el anillo de imanes que está anclado al mástil.

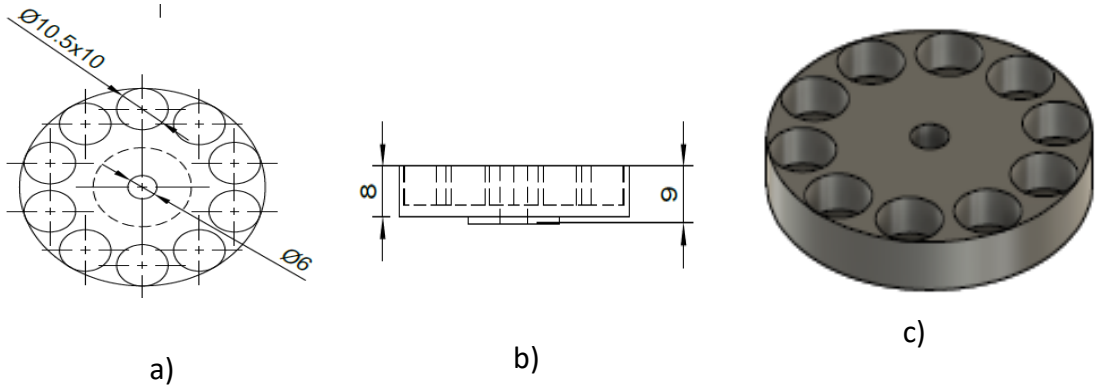


Fig. 30. Diseño del soporte de imanes, a) vista superior del soporte de imanes, b) vista lateral del soporte de imanes, c) solido del soporte de imanes, d) soporte de imanes impreso.

4.3.10 Diseño del soporte fijo del aerogenerador

Esta es una parte fija del aerogenerador la cual está anclada al suelo, este está diseñado para no tener ningún movimiento debido a la oscilación y debe sostener al estator del alternador, al soporte de imanes que esta sobre la bobina, y al eje flexible.

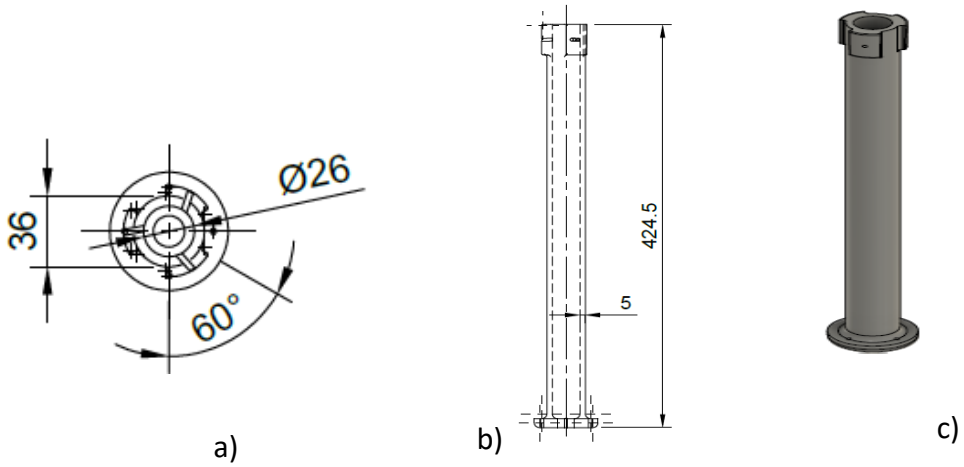


Fig. 31. Diseño del soporte fijo del aerogenerador, a) vista superior del soporte fijo del aerogenerador, b) vista lateral del soporte fijo del aerogenerador, c) solido del soporte fijo del aerogenerador.

4.4 Sistema de sintonización

Este sistema está diseñado para aprovechar los vórtices alternos generados por el viento alrededor del mástil cilíndrico vertical de aerogenerador mediante repulsión magnética entre dos anillos de imanes de neodimio, para con esto crear fuerzas perpendiculares que inducen oscilaciones cuando coincide con la frecuencia natural de la estructura. Este sistema amplificará las vibraciones del aerogenerador, convirtiendo la energía cinética eólica en mecánica oscilatoria.

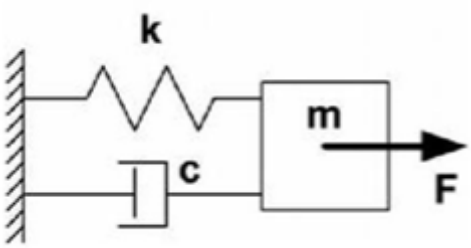


Fig. 32. Sistema de sintonizado

Este se sistema se describe como en la figura 33, en donde a m es un cuerpo que oscila por la acción de una fuerza y este está conectada un muelle por una constante de elasticidad y constante de amortiguamiento.

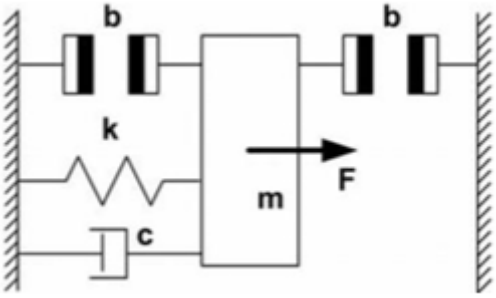


Fig. 33. Sistema de sintonizado con un sistema magnético

Al sistema de sintonizado de la Figura 33 se le aumenta un sistema magnético conformado por dos imanes, los cuales esta colocados aponiendo las caras del mismo polo. Un imán esta fijo y el otro imán este sujeto a un cuerpo m los cuales oscilan por motivo de aplicarle una fuerza.



a) b) c)

Fig. 34. Diseño del sistema de sintonización, a) Diseño del anillo exterior de imanes, b) Diseño del anillo interior de imanes, c) colocación de los dos anillos de imanes dentro del mástil del aerogenerador

En la Figura 34 se muestra como está compuesto el sistema de sintonización, en la figura 34a muestra el anillo exterior el cual está compuesto de 36 imanes de neodimio (S-10-1.5-N52N) que están adheridos al mástil y este será quien se mueva al contorno del anillo interior, en la figura 34b) se aprecia el anillo de imanes de neodimio los cuales son del mismo tipo de imanes del anillo exterior, en esta parte del sistema se encuentran 40 imanes, los cuales se encuentran apilados en colunas de 4 imanes en cada orificio del disco de imanes, y finalmente en la figura 34 c) se expone como está ubicado los anillo, como se mencionó antes uno está pegado al mástil (parte del aerogenerador que vibrara por la repulsión de los dos anillos de imanes) y otro está ubicado sobre la bobina y este es fijo y no se mueven.

4.5 Diseño del sistema de generación de energía

Este sistema convierte las oscilaciones mecánicas del mástil en energía eléctrica mediante inducción electromagnética en un alternador lineal, este está compuesto por tres partes esenciales las cuales son los imanes permanentes móviles, la bovina (estator) y la barra flexible de fibra de vidrio.

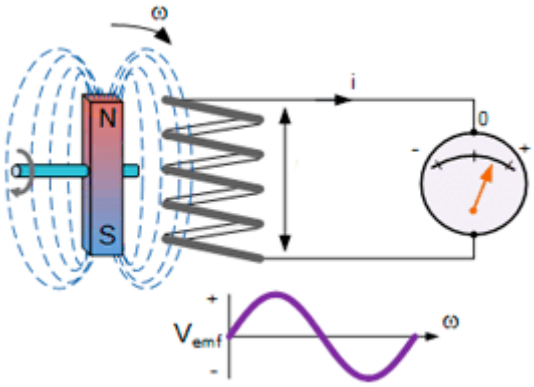


Fig. 35. circuito eléctrico del aerogenerador basado en resonancia aeroelástica

Nota. La Figura 35 ilustra el principio de inducción electromagnética aplicado al sistema generador. Cuando el imán permanente gira o se desplaza frente a la bobina, se produce una variación del flujo magnético que atraviesa sus espiras. De acuerdo con la ley de Faraday, esta variación induce una fuerza electromotriz (V_emf) de carácter alterno, generando una corriente eléctrica en el circuito. La señal obtenida presenta un comportamiento sinusoidal, cuya frecuencia depende de la velocidad angular del imán y cuya amplitud está relacionada con la intensidad del campo magnético y el número de espiras de la bobina.



a) b) c)

Fig. 36. Diseño del sistema de generación de energía, a) Diseño de la bobina, b) Diseño del anillo interior de imanes, c) colocación de la bobina y el anillo de imanes en el interior del mástil.

En la figura 34 se muestra el diseño del sistema de generación de energía, para cumplir los requisitos del alternador en la turbina eólica basado en resonancia Aeroelástica, se colocó una bobina de 800 vueltas de alambre de cobre esmaltado número 28, adicional a esto para generar una pequeña tensión eléctrica mediante la inducción

electromagnética fue necesario colocar un anillo de imanes solidario al mástil, este anillo contiene 72 imanes de neodimio (S-05-25-N), los cuales son movidos conforme el mástil oscila y con esto se genera un campo magnético el cual a su vez genera una corriente eléctrica y enciente un led.

4.6 Montaje del aerogenerador

El proceso de montaje de las distintas partes del aerogenerador empleó el método de colocación manual, este método de colocación manual permitió ir colocando pieza por pieza hasta lograr colocar todas las partes y sistemas (sistema de oscilación y sistema de generación de energía) en el lugar de funcionamiento.



a) b) c)

Fig. 37. Armado del aerogenerador, a) Instalación de las partes fijas del aerogenerador, b) Instalación de las partes móviles del aerogenerador, c) aerogenerador en funcionamiento.

En la figura 37 a) se muestra la instalación de lo que corresponde a las partes fijas de aerogenerador (bobina, anillo interior del sistema de resonancia, instalación de la barra flexible), en la figura 37 b) se ilustra la colocación de las tres partes del mástil (parte inferior, parte superior y la punta del mástil), además dentro del mástil se encuentran adheridos a este dos anillos de imanes (anillo exterior del sistema resonancia y el anillo para la inducción electromagnética), estos anillos son solidarios con el mástil, es decir, estos se mueven conforme se mueve el mástil,, en la figura 37 c) se expone el generador eólico basado en resonancia aeroelástica armado y funcionamiento.

4.7 Recolección de datos de generación

En el siguiente cuadro se muestra los resultados obtenidos en el funcionamiento del prototipo del aerogenerador basado en resonancia aeroelástica.

TABLA IX
POTENCIA OBTENIDA EN EL PROTOTIPO DEL AEROGENERADOR BASADO EN RESONANCIA AEROELÁSTICA

Velocidad del viento (m/s)	Probabilidad (%)	Potencia (W)
0-2	25	0
2-3	15	0.1
3-4	12	0.3
4-5	11	0.5
5-6	18	0.7
6-7	8	0.8
>7	19	0.4

Nota: en el cuadro VXI se aprecia los resultados obtenidos al momento de realizar las pruebas de funcionamiento del prototipo de aerogenerador, aquí se aprecia que cuando tenemos velocidades del viento entre 4 m/s a 7 m/s se tiene la mayor capacidad de generación de energía, así mismo si la velocidad del viento es mayor a los 9 m/s la generación de energía cae a 0 W, esto debido a que el aerogenerador experimentara una fuerza mayor a la de repulsión del sistema de sintonización. Esta energía esta generada a un factor de capacidad del aerogenerador de 20 a 30 %.

4.8 Análisis de resultados

Con el propósito de evaluar el desempeño del prototipo de aerogenerador basado en resonancia aeroelástica, se realizaron 20 mediciones experimentales bajo tres condiciones de velocidad de viento: 4 m/s, 5 m/s y 6 m/s. Las pruebas permitieron analizar el comportamiento del voltaje generado en función de la intensidad del flujo de aire, observando la estabilidad y variación del sistema en cada condición operativa.

Los resultados obtenidos evidencian una tendencia creciente del voltaje conforme aumenta la velocidad del viento, aunque con fluctuaciones propias de un sistema

experimental a escala, atribuibles a variaciones en la resonancia, pérdidas mecánicas y pequeñas inestabilidades en el flujo de aire.

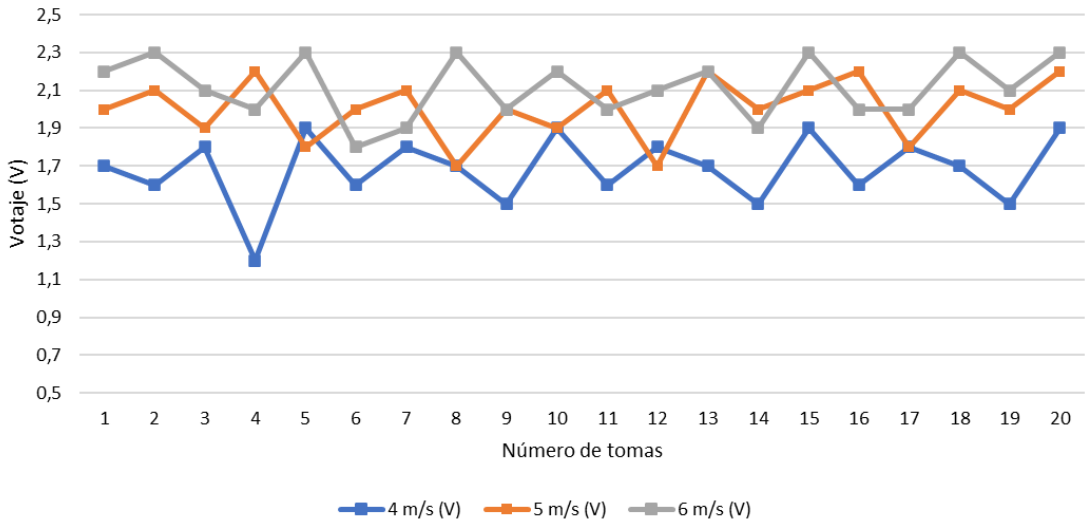


Fig. 38. Comportamiento del voltaje generado a diferentes velocidades del viento.

Nota. La Figura 38 muestra el registro de 20 mediciones experimentales del voltaje generado por el prototipo a 4 m/s, 5 m/s y 6 m/s. Se observa que a 6 m/s se alcanzan los valores más altos de generación, mientras que a 4 m/s se presentan mayores fluctuaciones y valores mínimos, evidenciando la influencia directa de la velocidad del viento en el rendimiento del sistema.

Con el fin de analizar la distribución estadística del voltaje generado por el prototipo, se elaboró un histograma a partir de las 100 mediciones experimentales registradas. Este análisis permite evaluar la frecuencia de los valores obtenidos y determinar la tendencia central del sistema bajo condiciones de operación controladas.

La representación gráfica facilita la visualización del comportamiento general del voltaje y permite identificar la concentración de datos alrededor del valor medio de generación.

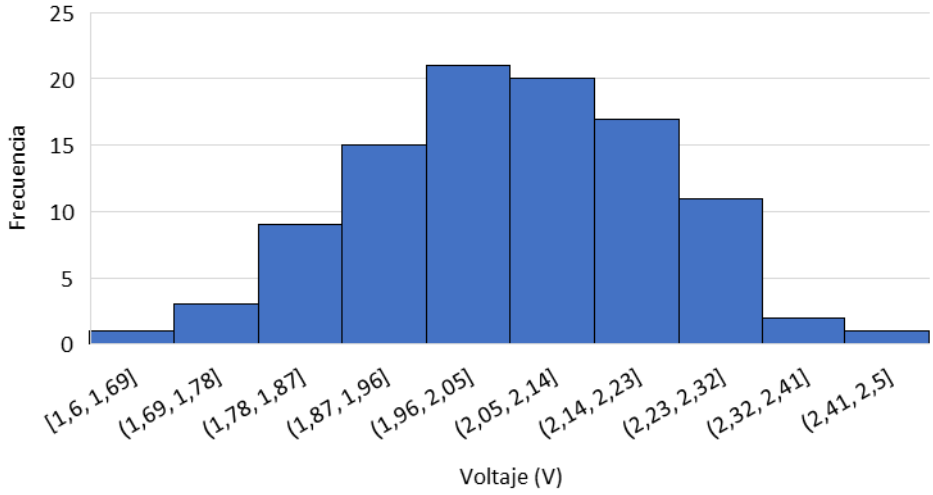


Fig. 39. Histograma de la distribución del voltaje generado por el prototipo

Nota. En la Figura 39 se presenta el histograma muestra la frecuencia de los valores de voltaje obtenidos experimentalmente. Se observa una mayor concentración de datos en el intervalo aproximado de 1,96 V a 2,14 V, evidenciando un comportamiento cercano a una distribución normal y una tendencia central alrededor de 2,0 V, lo que indica estabilidad en la generación del prototipo.

En síntesis, los resultados experimentales obtenidos demuestran que el prototipo de aerogenerador basado en resonancia aeroelástica es capaz de generar voltaje de manera estable dentro del rango analizado. Se evidenció una relación directa entre la velocidad del viento y el incremento del voltaje generado, alcanzando los valores más altos bajo condiciones de 6 m/s. Asimismo, el análisis estadístico mediante el histograma permitió verificar una distribución aproximadamente normal de los datos, con una tendencia central cercana a 2,0 V, lo que confirma la estabilidad operativa del sistema dentro de sus condiciones de diseño.

Las variaciones observadas en las mediciones son propias de un modelo experimental a escala y pueden atribuirse a factores como fluctuaciones en el flujo de aire, pérdidas mecánicas y ligeros desajustes en la frecuencia de resonancia. No obstante, el comportamiento general del prototipo valida el principio de conversión de energía mecánica vibratoria en energía eléctrica mediante inducción electromagnética.

CONCLUSIONES

- ✓ Los principales parámetros que influyen en la generación de energía mediante resonancia aeroelástica, tales como la velocidad del viento, la frecuencia natural del sistema, el fenómeno de desprendimiento de vórtices, la masa estructural, el amortiguamiento y el acoplamiento electromagnético entre el imán y la bobina. Se determinó que la correcta sintonización entre la frecuencia de excitación aerodinámica y la frecuencia natural del sistema es fundamental para maximizar la amplitud de oscilación y, por ende, la generación de voltaje.

- ✓ Se desarrolló el diseño estructural y electromagnético del prototipo, considerando criterios de estabilidad, resonancia y eficiencia en la conversión de energía. El modelo integró un mástil flexible, un sistema de imanes permanentes y bobinas de cobre, además de elementos de control y amortiguamiento. El diseño permitió garantizar condiciones adecuadas para la inducción electromagnética, asegurando la generación de voltaje dentro del rango previsto para un sistema experimental a escala.

- ✓ Se construyó exitosamente el prototipo funcional, validando experimentalmente el principio de conversión de energía mecánica vibratoria en energía eléctrica. Las pruebas realizadas demostraron que el sistema genera voltaje estable bajo diferentes velocidades de viento, confirmando la viabilidad técnica del concepto de resonancia aeroelástica como alternativa de microgeneración eólica. Asimismo, se identificaron oportunidades de mejora relacionadas con la optimización estructural y el incremento de la eficiencia energética.

RECOMENDACIONES

La implementación de un aerogenerador eólico basado en resonancia aeroelástica es una opción viable que contribuye al cambio de la matriz energética, sin embargo, como forma de generar energía está en desarrollo, es fundamental realizar nuevos diseños para el alternador de estos aerogeneradores con el objetivo de optimizar el rendimiento y generar mayor cantidad de energía a menores velocidades de viento.

Referencias

[1] ARCERNNR, 2021. [En línea]. Available: https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/.

[2] K. Sampio y V. Batista , «El escenario actual de la producción de energía eólica en Brasil: Una revisión de la literatura,» *Investigación, Sociedad y Desarrollo,* vol. 10, nº 1, 2021.

[3] D. Magaju, A. Cattapan y M. Franca, «Identification of run-of-river hydropower investments in data scarce regions using global data,» *Energy for Sustainable Development,* vol. 58, pp. 30-41, 2020.

[4] C. Zarfl , A. Lumsdon, J. Berlekamp, L. Tydecks y K. Tokner , «Un auge mundial en la construcción de represas hidroeléctricas,» *Ciencias Acuáticas volumen 77,* pp. 161-170, 2015.

[5] A. Tummala, D. Sinha, R. Velamati, V. Indraja y V. Krishna, «A review on small scale wind turbines,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* pp. 1351-1371, 2016.

[6] E. García, A. Correcher, E. Quiles y F. Morant, «Recursos y sistemas energéticos renovables del entorno marino y sus requerimientos de control,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI,* vol. 13, pp. 141-161, 2016.

[7] M. Y. Recalde, D. H. Bouille y L. O. Girardin, «LIMITACIO PARA EL DESARROLLO DE ENERGÍAS RENOVABLES EN ARGENTINA,» *Problemas del Desarrollo,* vol. 46, nº 183, pp. 89-115, 2015.

[8] . Á. G. Palacios, S. Rodríguez, E. Fuentes, V. Quinto, N. Párraga y F. Gavilanez, «Producción de energía eólica en Ecuador,» *Ciencia Digital,* pp. 22-32, 2019.

[9] L. H. Álvarez Játiva, J. V. Andrade Villarreal, P. F. Puente Ponce y J. A. Maldonado Tituaña, «Energia eolica en zonas rurales del Ecuador,» *AlfaPublicaciones,* vol. 4, nº 3.1, pp. 351-364, 2022.

[10] D. Pérez, Energía eolica Fundamentos, tecnologias y aplicaciones, España: Marcombo, 2023.

[11] González, Luisa;, 16 11 2018. [En línea]. Available: https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10784/T08408.pdf;jsessionid=AD41FDB7.

[12] A. Mejía , Artist, *ÓPTIMA UBICACIÓN DE AEROGENERADORES BASADO EN EL ATLAS EÓLICO PARA MAXIMIZAR LA POTENCIA GENERADA [Trabajo de titulación previo a la obtención del título, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA].* [Art]. Repositorio digital, 2018.

[13] M. Escalona Reyes, «La formación práctica del ingeniero eléctrico en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí,» *Revista Electrónica Formación y Calidad Educativa,* p. 78, 2016.

[14] U.S. Departament of Energy , «Wind Energy Basics,» 2026. [En línea]. Available: https://www.energy.gov/eere/wind/wind-energy-basics.

[15] K. Chalindu, D. Herath y M. Sudesh, «Wind Energy Technologies: A Complete review of the Wind energy technologies,» *Energy,* 2024.

[16] kimerius, «DISEÑO DE AEROGENERADORES,» 2021. [En línea]. Available: https://www.kimerius.com/app/download/5780377015/Dise%C3%B1o+de+Aerogeneradores.pdf.

[17] J. Morales y J. Toapanta, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL PARA SU UTILIZACIÓN EN EQUIPOS DE BAJA POTENCIA HASTA 20W,» Quito, 2024.

[18] B. Desalegn, D. Gebeyehu y B. Tamrat, «Wind energy conversion technologies and engineering approaches to enhancing wind power generation: A review,» *Heliyon,* vol. 8, nº 1, 2022.

[19] M. A. Hannan, A. Q. Al-Shetwi y M. S. Mollik, «Wind Energy Conversions, Controls, and Applications: A Review for Sustainable Technologies and Directions,» *Sustainability,* vol. 15, nº 5, 2023.

[20] B. Pavan y V. Indragandhi, «Analysis of Back To Back (BTB) Converter Control Strategies in Different Power System Applications,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* 2020.

[21] P. Denissenko y S. Tucker, «An aeroelastic wind energy harvester with continuous orbiting motion and no friction components,» *Scientific Reports,* vol. 15, nº 34432, 2025.

[22] Vortex Bladeless, «Eolica sin palas,» 09 01 2023. [En línea]. Available: https://vortexbladeless.com/es/tecnologia/.

[23] D. J. Yáñez Villarreal, «Aerogeneradores resonantes por VIV,» *Vortex Bladeless S.L.,* 2018.

[24] I. Bahadur, «Dynamic Modeling and Investigation of a Tunable Vortex Bladeless Wind Turbine,» *Energias,* vol. 15(18), pp. 6773-6773, 16 09 2022.

[25] L. Yovera, K. Cristobal y S. Ramirez , «Aplicación de generadores eólicos de eje vertical como solución sostenible para el suministro eléctrico en mercados urbanos vulnerables,» *Alpha Centauri,* vol. 6, nº 3, 2025.

[26] A. Uvidia, U. Masaquiza y M. Paladines, «Revisión documental de la energía eólica para la generación de energía eléctrica en el Ecuado,» *Revista Multidisciplinar,* vol. 7, nº 6, 2023.

[27] A. Younis, Z. Dong y M. ElBadawy, «Design and Development of Bladeless Vibration-Based Piezoelectric Energy–Harvesting Wind Turbine,» *Applied Science,* vol. 12, nº 15, 2022.

[28] «Integrated finite element models for aeroelastic analysis and piezoelectric energy harvesting in bladeless wind turbines,» *IJIRSS,* vol. 8, nº 1, pp. 2582-2598, 2025.

[29] G. Litak, J. Caban y . S. Sadasiavan, «Wind induced energy harvesting with an aero-elastic resonator: Effect of the bluff body diameter,» *Journal of Ecological Engineering,* vol. 26, nº 9, p. 197–204, 2025.

[30] L. Liu, Q. Shi y C. Lee, «A novel hybridized blue energy harvester aiming at all-weather IoT applications,,» *Nano Energy,* vol. 76, 2020.

[31] . J. Jerry, I. Tchiguirinskaia y D. Schertzer, «Multifractal analysis of wind turbine power and rainfall from an operational wind farm – Part 2: Joint analysis of available wind power and rain intensity,» *Processes Geophys,* vol. 32, nº 4, p. 603–624, 2024.

[32] J. Jose, A. Gires, Y. Roustan y E. Schnorenberger, «Multifractal analysis of wind turbine power and rainfall from an operational wind farm – Part 1: Wind turbine power and the associated biases,» *Processes Geophys,* vol. 4, p. 587–602, 2024.

[33] R. S. Eldawy, A. A. Ghorab y M. M. Sayed, «A State-of-the-Art Review on Vortex Induced Vibrations Phenomenon Bladeless Wind Turbine Technology,» pp. 1045-1056, 2024.

[34] L. O. Ahmad Barata, K. Takahiro y . T. Ueno, «Experimental Investigation of Bladeless Power Generator from Wind-induced Vibration,» *international Journal of Renewable Energy Development,,* vol. 11, nº 3, 2022.

[35] Y. Liu, . Y. Kim y J. Seok, «Enhancing wind energy harvesting performance by leveraging the synergy of rotational and transverse wake galloping mechanisms,,» *Energy,* vol. 339, 2025.

[36] Z. Mohamed, . M. Soliman y M. Feteha, «A novel optimal design approach for bladeless wind turbines considering mechanical properties of composite materials used,» *Scientific Reports,* vol. 15, nº 1355, 2025.

[37] J. Maqui, Fenomenos de resonancia de la vibracion inducida por desprendimiento de vortices del viento sobre una estructura cilindrica por el modelo armónico, 2017, pp. 1-116.

[38] R. Soto, Conversión de energía eólica mediante vibraciones inducidas, 2016, pp. 1-99.

[39] J. Rocano Perez y B. Nieves Panza, Simulación y estimación de la producción energética de un aerogenerador sin aspas mediante análisis computacional., Cuenca, 2024.

[40] F. I. Luna y M. A. Pucheta, «Studiocu,» 05 noviembre 2021. [En línea]. [Último acceso: julio 2025].

[41] R. Esquivel, P. Etchart y C. Para, Artists, *Estudio de un Aerogenerador por Vorticidad Experimental [Proyecto de Grado, Universidad de la República].* [Art]. Repositorio Digital, 2022.

[42] Supermagnete , «Catálogo supermagnete.es,» Webcraft GmbH, [En línea]. Available: www.supermagnete.es.

[43] M. G. Cárdenas Calle, 11 04 2019. [En línea]. Available: http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32326.

[44] J. Roldán Viloria, Energías renovables., Ediciones Paraninfo, S.A., 2012.

[45] M. Villarrubia, Ingeniería de la energía eólica, México: MARCOMBO, S.A., 2013.

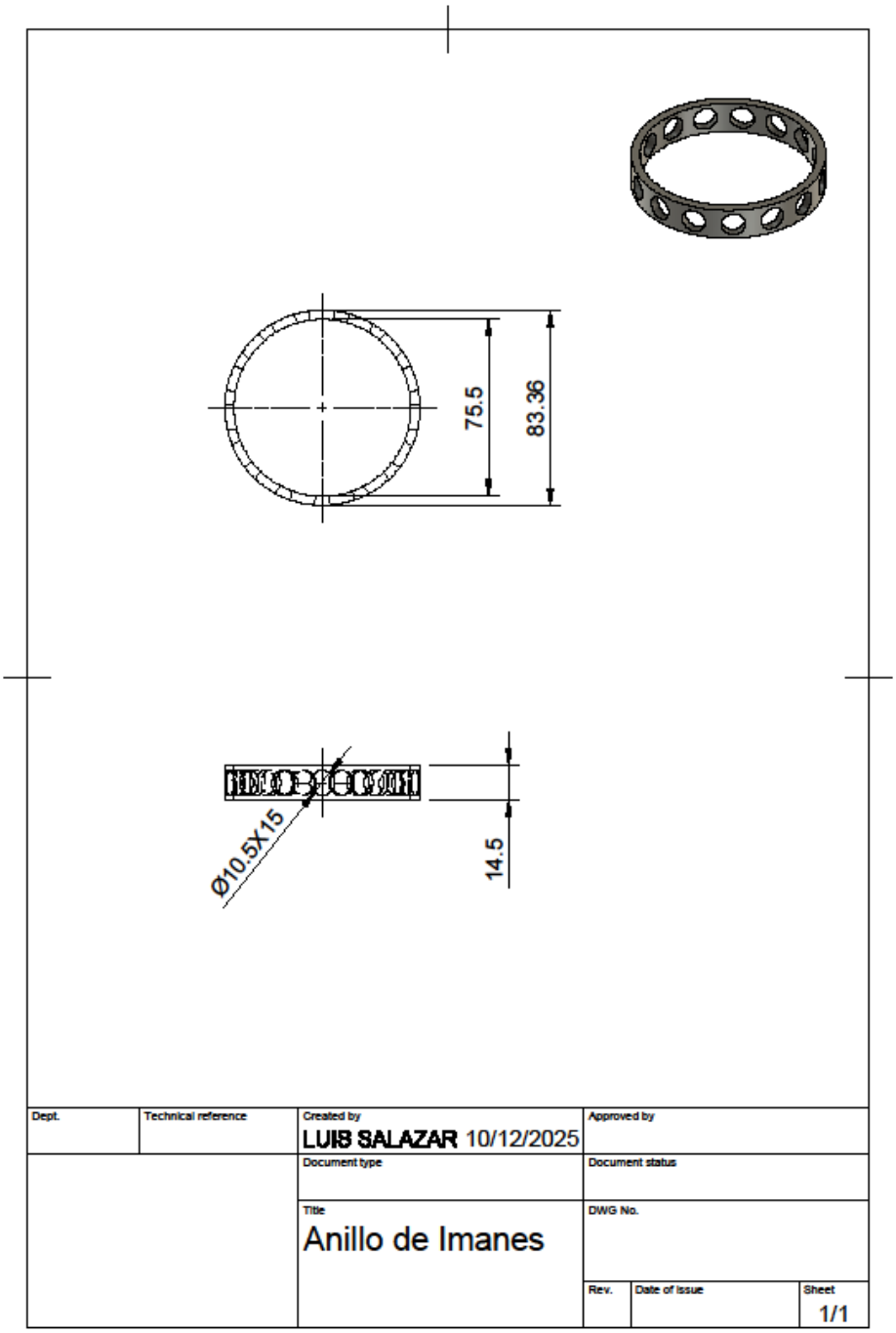
[46] I. Fernández Aldariz, «Greenteach,» 17 08 2022. [En línea]. Available: https://www.greenteach.es/energia-eolica/.

[47] J. C. TOLEDANO GASCA y L. ROMERO LOZANO, Operación y puesta en servicio de instalaciones de energía eólicas, España: Ediciones Paraninfo, S.A., 2013.

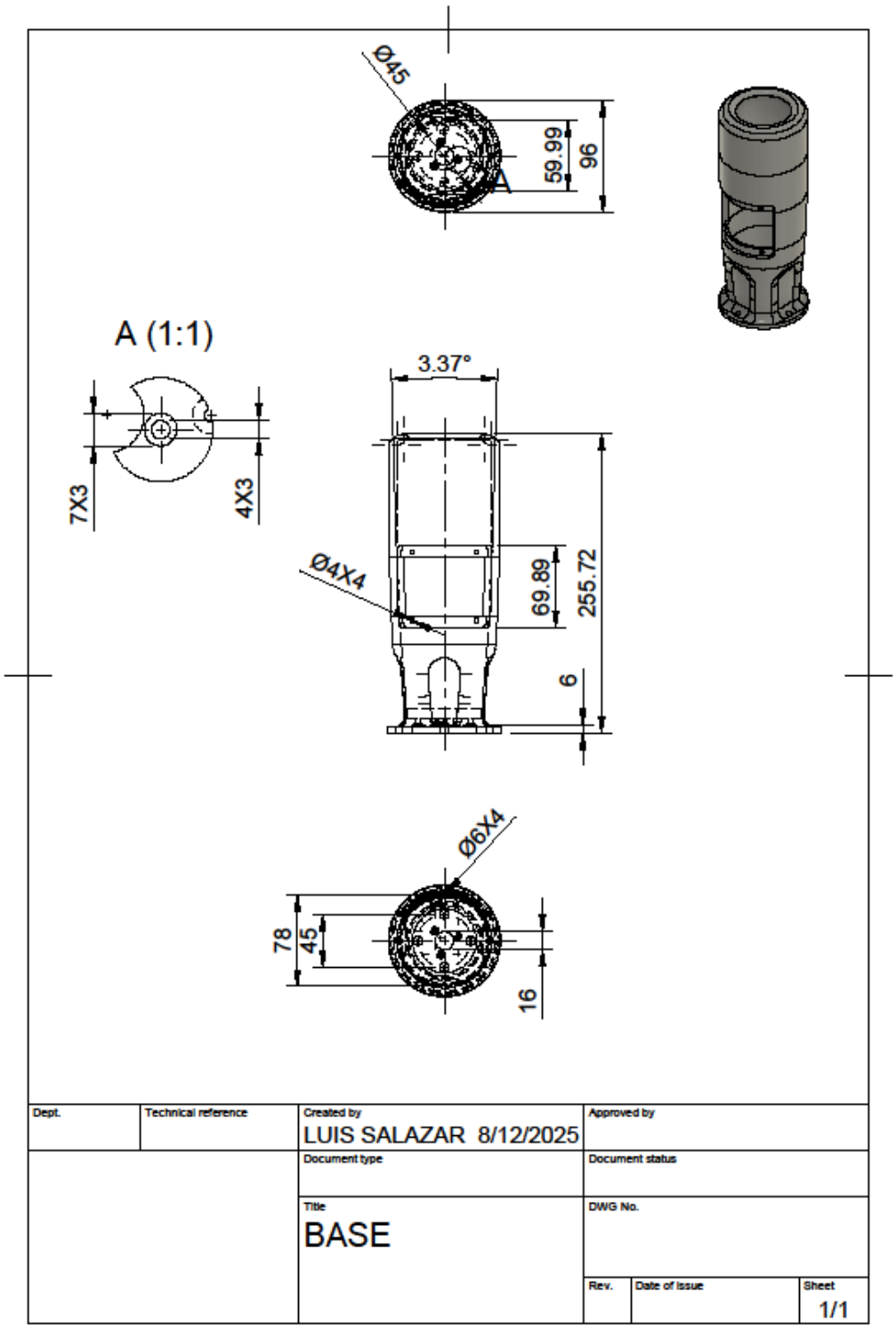
[48] L. Ramírez Monsell, Artist, *Análisis computacional de la generación de potencia en aerogeneradores sin elementos rotatorios [Trabajo de fin de Grado, UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA].* [Art]. UNIVERSITAT POLITECNICA DE VALENCIA, Repositorio Institucional, 2020.

ANEXOS

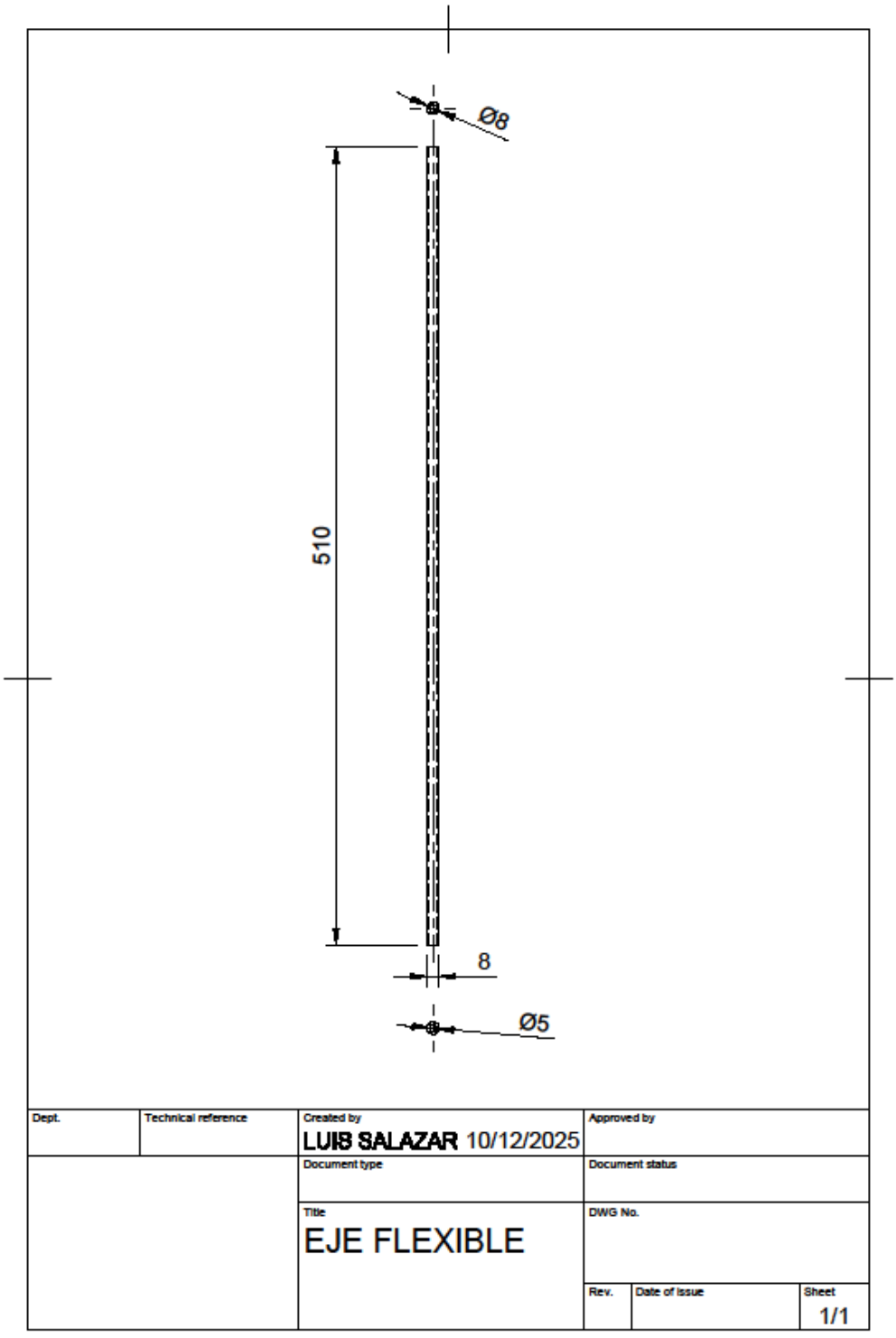
Anexo 1. Diseño del anillo de imanes del aerogenerador.



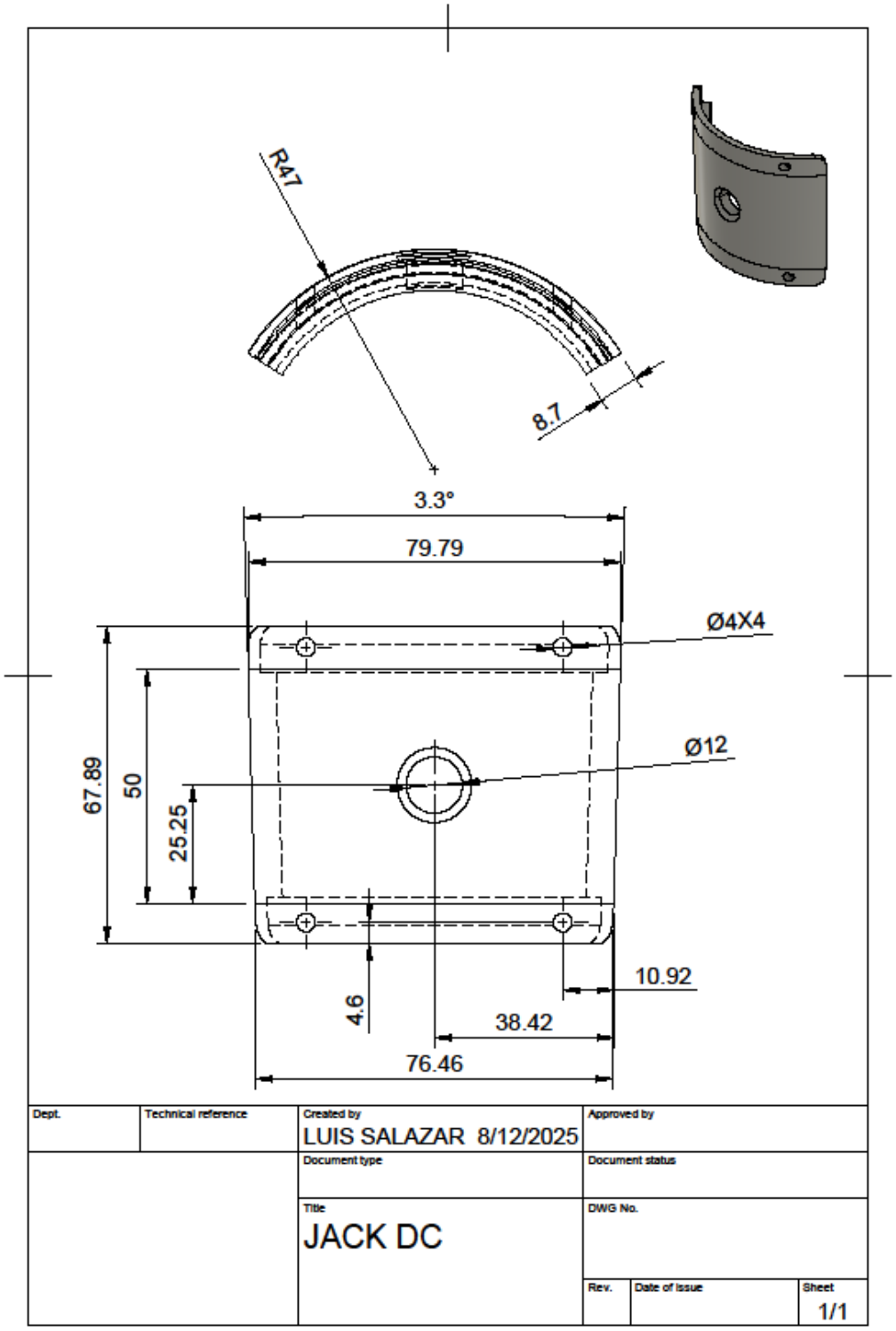
Anexo 2. Diseño de la base del aerogenerador.



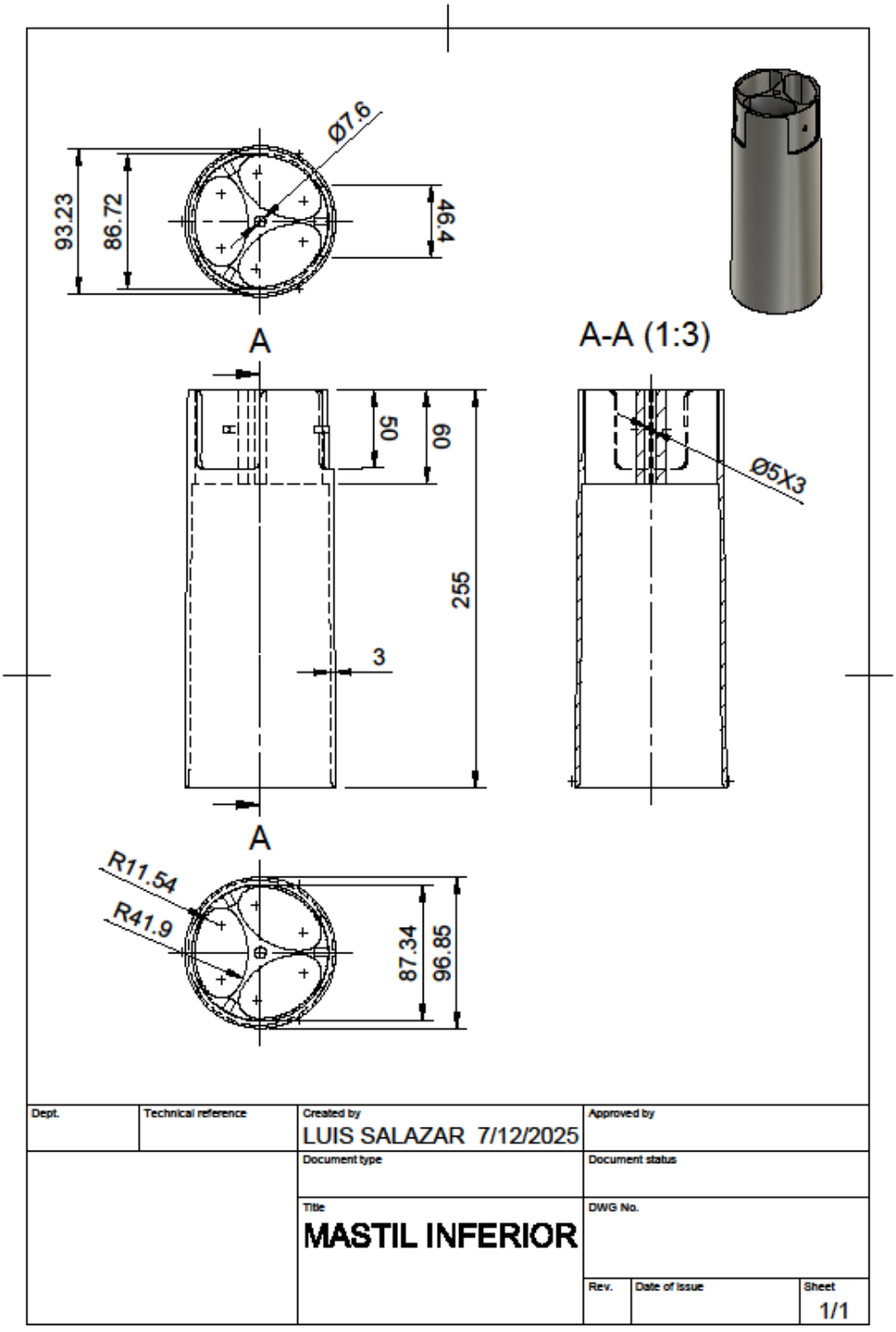
Anexo 3. Diseño del eje flexible del aerogenerador.



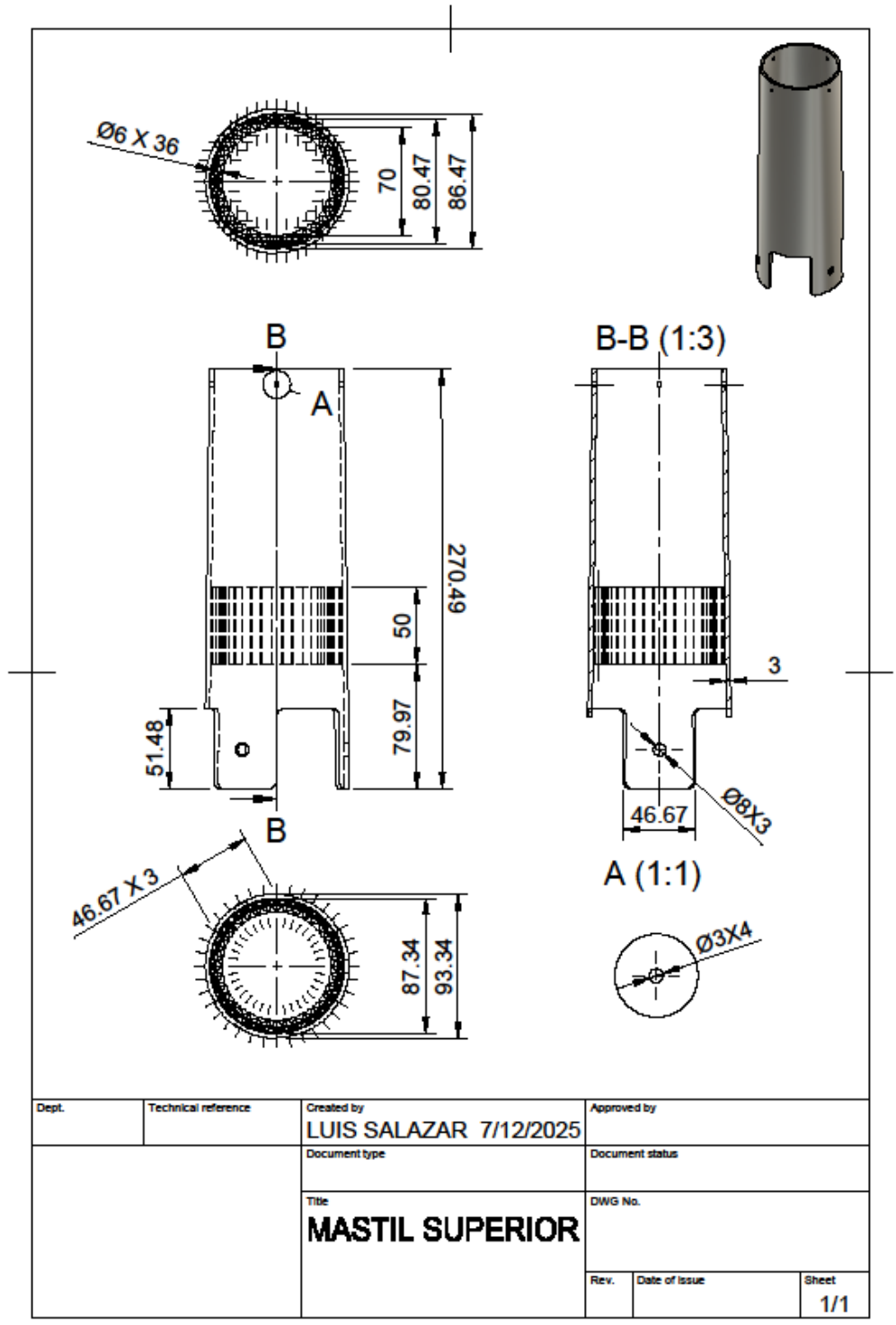
Anexo 4. Diseño de un JACK DC del aerogenerador.



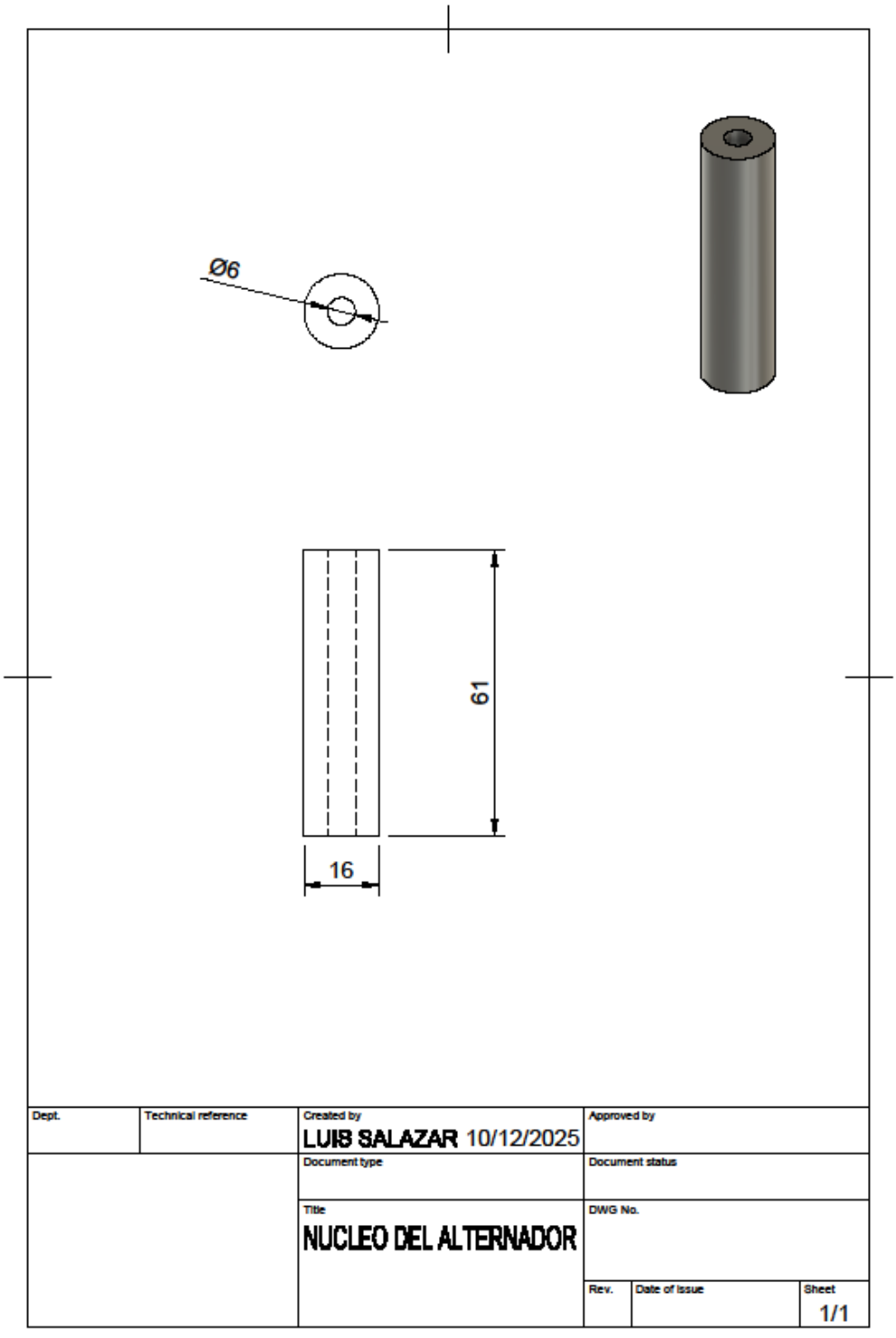
Anexo 5. Diseño del mástil inferior del aerogenerador.



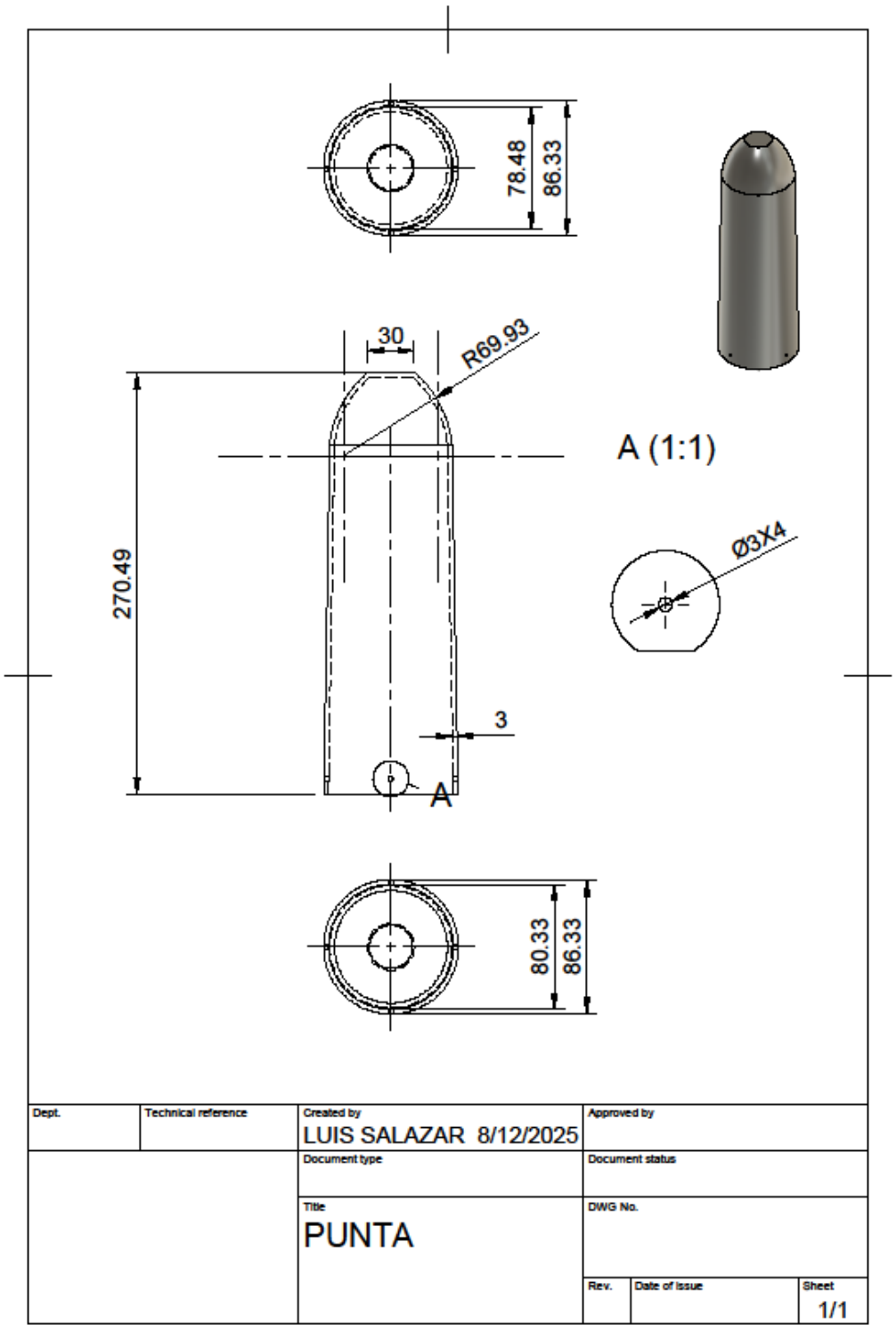
Anexo 6. Diseño del mástil superior del aerogenerador.



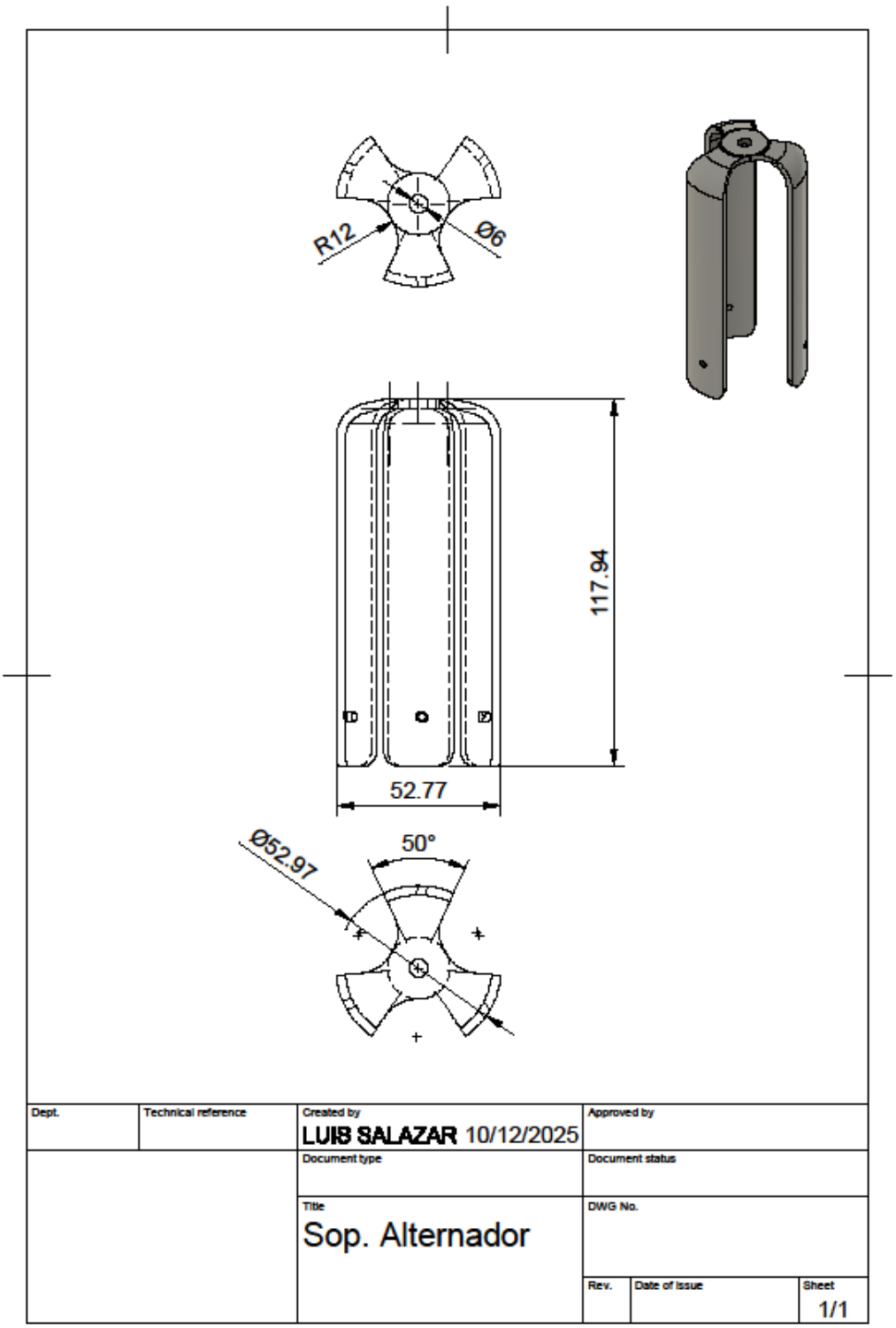
Anexo 7. Diseño del núcleo del alternador del aerogenerador



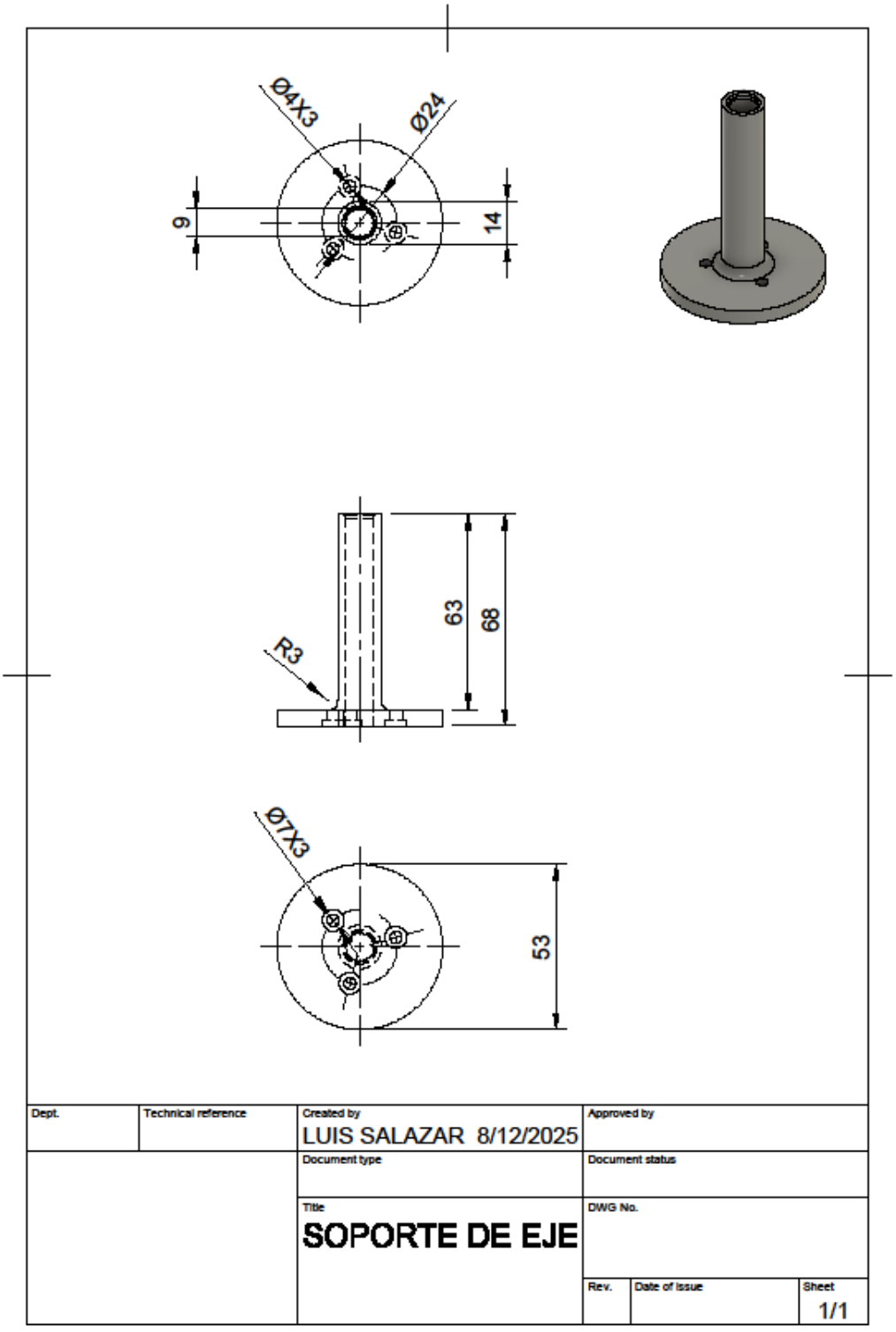
Anexo 8. Diseño de la punta del aerogenerador.



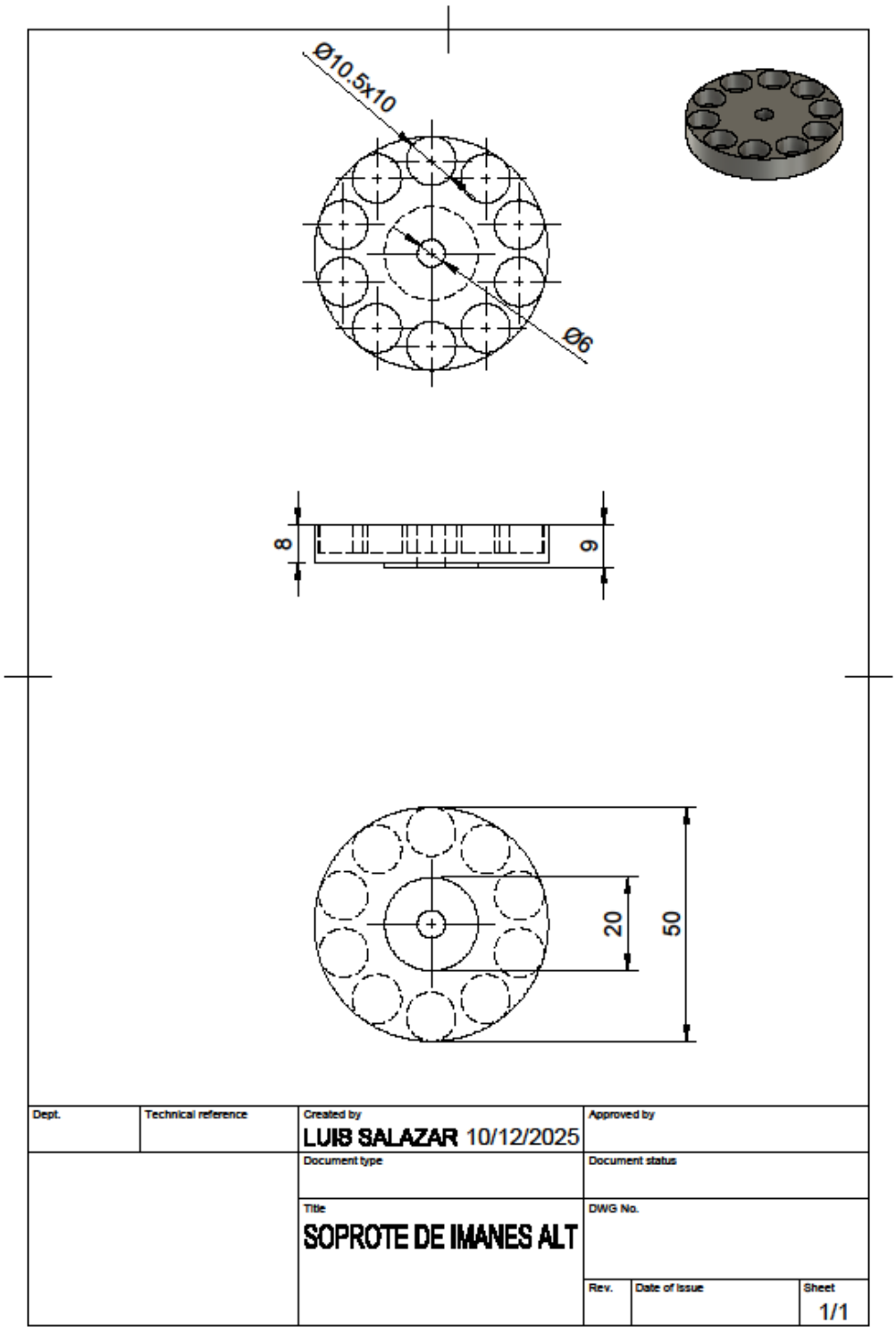
Anexo 9. Diseño del soporte del alternador del aerogenerador.



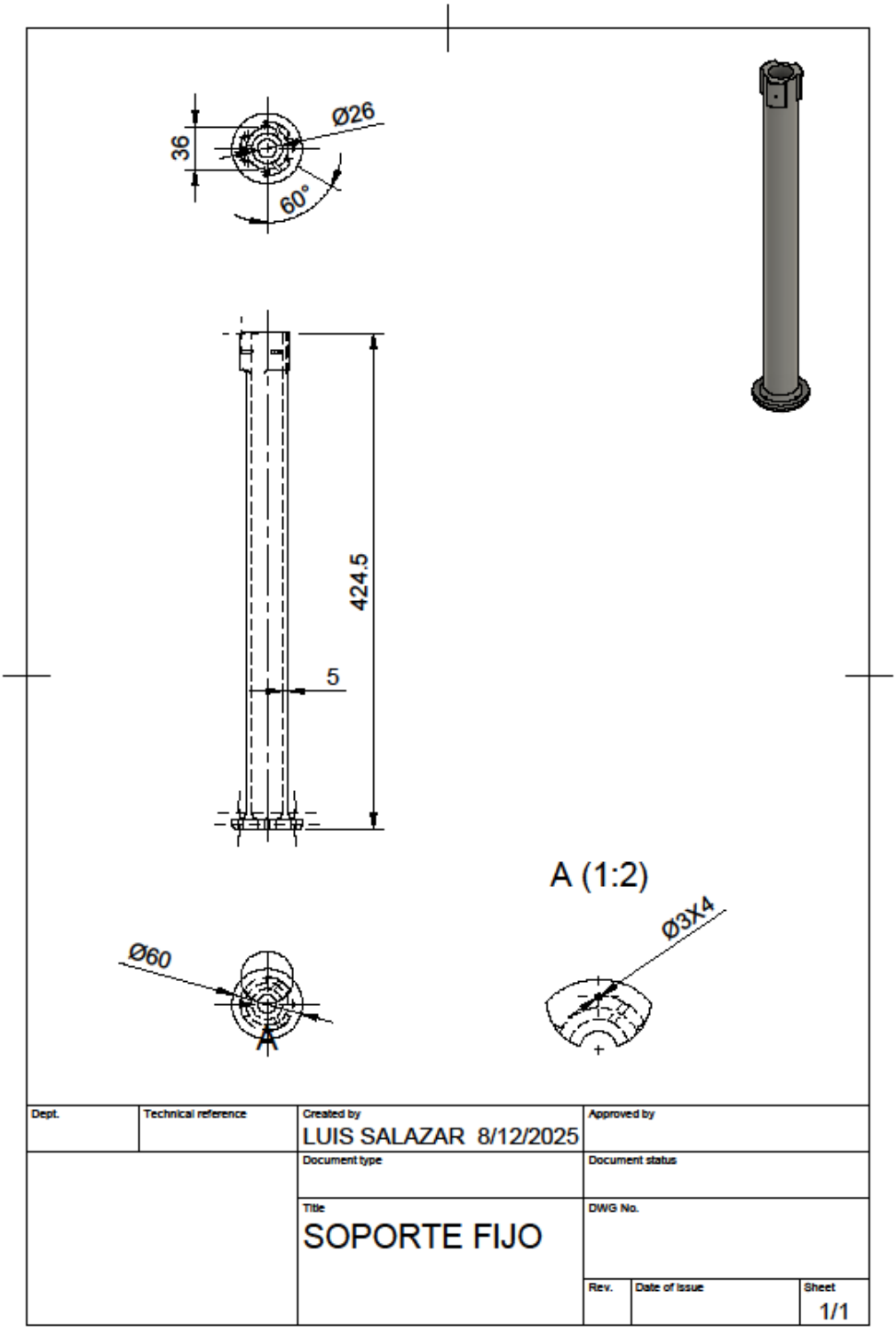
Anexo 10. Diseño del soporte del eje del aerogenerador.



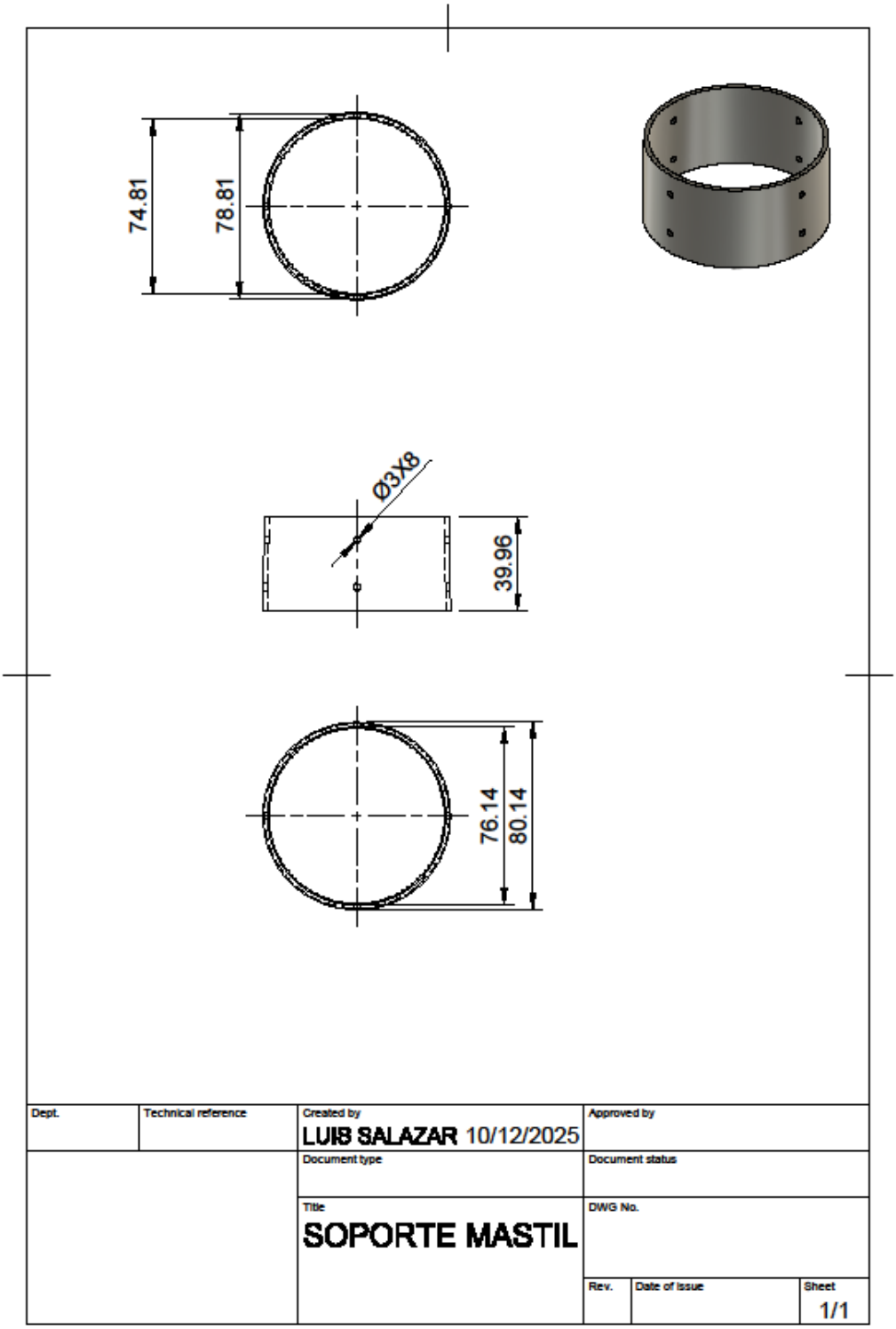
Anexo 11. Diseño del soporte de imanes del alternador del aerogenerador.



Anexo 12. Diseño del soporte fijo del aerogenerador.



Anexo 13. Diseño del soporte del aerogenerador.



Anexo 14. Prototipo de aerogenerador eólico basado en resonancia aeroelástica armado y en funcionamiento.



REPÚBLICA DEL ECUADOR

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

Certificado de análisis
Compilatio Magister+ | UTN-ECU - UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Trabajo_de_Grado_SalazarLuis
ID : ba1ab3fb9d3084864d696c71a7929036c01738e7

4%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : Trabajo_de_Grado_SalazarLuis.txt
Tamaño del archivo original : 2,74 MB
Número de palabras : 20.455

Depositante : Julio Guerra Massón
Fecha de depósito : 6 de julio de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 6 de julio de 2026

Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes — 3%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Detección de IA — <1%

Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.
Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.

Idiomas no reconocidos — 4%

Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua.
Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.



No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas — 2%

Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

Fuentes de similitudes (sección 2/2)

Similitudes

3%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Fuente principal detectada

N°	Descripciones	Similitudes	Uicaciones
1	dspace.ups.edu.ec dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27749/1/UPS-CT011390.pdf	2%	
2	Aerogeneradores sin aspas, innovación eólica | Repsol www.repsol.com/es/energia-avanzar/energia/aerogeneradores-sin-aspas/i...	<1%	
3	vortexbladeless.com vortexbladeless.com/wp-content/uploads/2018/10/VortexGreenPaper_es.p...	<1%	
4	NPG - Multifractal analysis of wind turbine power and rainfall from... npg.copernicus.org/articles/31/587/2024/	<1%	
8	Implementación de un mini Sistema de Generación Eléctrica a trav... repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/8476/3/UTC-PIM-000434.pdf.txt	<1%	

Fuente mencionada (sin similitudes detectadas)

N°	Descripciones
1	https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/
2	https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10784/T08408.pdf;jsessionid=AD41FDB
3	https://www.energy.gov/eere/wind/wind-energy-basics
4	https://vortexbladeless.com/es/tecnologia/
5	http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32326
6	https://www.greenteach.es/energia-eolica/