

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**ESTUDIO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE CONVERSIÓN EÓLICA A  
ENERGÍA ELÉCTRICA ENTRE AEROGENERADORES RESONANTES POR  
VIBRACIÓN INDUCIDA POR VORTEX (VIV) CON AEROGENERADORES  
EÓLICOS CON ASPAS**

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

**AUTOR (A):**

Bastidas Villarreal Jean Pierre

**DIRECTOR (A):**

MSc. Guerra Masson Julio Esteban

Ibarra, 2024



## 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			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	0401509088		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Bastidas Villarreal Jean Pierre		
<b>DIRECCIÓN:</b>	La Victoria, Carlos Barahona y José María Larreal Jijón, # 72		
<b>EMAIL:</b>	jpbastidasv1@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>		<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0961598787

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	Estudio comparativo de sistemas de conversión eólica a energía eléctrica entre aerogeneradores resonantes por Vibración Inducida por Vortex (VIV) con aerogeneradores eólicos con aspas.
<b>AUTOR (ES):</b>	Bastidas Villarreal Jean Pierre
<b>FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA</b>	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	<b>Ingeniero(a) Eléctrico(a)</b>
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	PhD. Collaguazo Galeano Gerardo Isaías MSc. Guerra Masson Julio Esteban



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**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 27 días del mes de noviembre de 2024

**EL AUTOR:**

.....

Bastidas Villarreal Jean Pierre

0401509088



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**



**CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN  
CURRICULAR**

Yo, MSc. Guerra Masson Julio Esteban en calidad de director del señor estudiante Bastidas Villarreal Jean Pierre certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: Estudio comparativo de sistemas de conversión eólica a energía eléctrica entre aerogeneradores resonantes por Vibración Inducida por Vortex (VIV) con aerogeneradores eólicos con aspas.

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

MSc. Guerra Masson Julio Esteban

**DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

## **DEDICATORIAS**

Primeramente, quiero dedicarle este trabajo a Dios por llenarme de sabiduría , fortaleza y valor para poder culminar una meta más.

A mis padres, por su apoyo constante y su amor incondicional en cada etapa de mi vida, convirtiéndose en un sostén fundamental para la formación de mi carrera profesional, por su guía constante y por brindar los recursos necesarios a lo largo de estos años de verdad muchas gracias.

A mi hermana por siempre estar a mi lado, y aconsejándome por cada duda compartida, dándome ánimos y por creer siempre en mí, siendo un ejemplo y una fuente de inspiración constante.

A mi hermano y sobrino, por su inquebrantable apoyo en cada circunstancia de mi vida y su confianza en mi potencial y la disposición en ayudarme sin importar las circunstancias.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a la “Universidad Técnica del Norte” por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad para la formación de mi carrera profesional, por los recursos y el entorno académico ofrecido, donde he podido explotar mis habilidades y destrezas.

Un agradecimiento especial a mi tutor MSc. Julio Guerra, por su orientación experta, paciencia y constante estímulo a lo largo de este proceso. Sus consejos y retroalimentación fueron fundamentales para dar forma y mejorar mi investigación.

A mi asesor PhD Gerardo Collaguazo, por sus valiosas contribuciones, comentarios críticos y constructivos que me han ayudado a ver nuevas perspectivas y a mejorar mi trabajo de manera significativa.

Al personal docente de la carrera de electricidad, les agradezco por compartir su conocimiento y experiencia conmigo. Cada uno de ustedes ha dejado una huella indeleble en mi formación académica y profesional.

A mis amigos y compañeros de clase, gracias por su apoyo moral y por estar siempre dispuestos a escuchar mis ideas y preocupaciones. Su ánimo y camaradería fueron una fuente constante de motivación.

Finalmente, quiero agradecer a mi familia por su amor incondicional y por creer en mí en cada paso del camino. Su apoyo ha sido fundamental para mí y estoy profundamente agradecido.

## Tabla de contenido

RESUMEN .....	XIV
ABSTRACT .....	XV
<b>CAPITULO I .....</b>	<b>1</b>
INTRODUCCIÓN .....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
OBJETIVO GENERAL .....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
ALCANCE.....	2
JUSTIFICACIÓN.....	3
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>4</b>
MARCO TEÓRICO .....	4
CONTEXTUALIZACIÓN .....	4
2. 1. AEROGENERADORES EÓLICOS .....	6
2.1.1 TIPOS DE AEROGENERADORES.....	7
2.1.2 AEROGENERADOR EÓLICO RESONANTE CON VIBRACIÓN INDUCIDA POR VORTEX (VIV) .....	9
2.2 PRINCIPIO DE LA RESONANCIA INDUCIDA POR EL VIENTO .....	10
2. 3 GENERACIÓN RESONANTE.....	11
2.3.1 TIPOS DE GENERACIÓN RESONANTE .....	12
2.3.2 COMPONENTES DEL AEROGENERADOR RESONANTE CON VIV .....	14
2.4 AEROGENERADOR CON ASPAS CONVENCIONALES .....	17

2.4.1 PRINCIPIO DE ACCIÓN Y REACCIÓN .....	18
2.4.2 COMPONENTES DEL AEROGENERADOR CONVENCIONAL CON ASPAS .....	19
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>23</b>
MÉTODOS Y MATERIALES.....	23
3. 1. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO .....	23
3.1.1 PARQUE EÓLICO VILLONACO .....	23
3.1.2 PARQUE EÓLICO SAN CRISTÓBAL .....	24
3. 2. METODOLOGÍA. ....	25
3.2.1 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
3.2.3 HERRAMIENTAS DE INVESTIGACIÓN .....	27
3.3. PROCEDIMIENTO .....	28
3.4 MATERIALES .....	31
3.4.1 SOLIDWORKS .....	31
3.4.2 MATLAB.....	32
3.4.3 VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DE VIENTO .....	33
3.4.4 ECUACIONES DE LOS AEROGENERADORES CON ASPAS Y VIV .....	33
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>36</b>
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1 DATOS DE VELOCIDAD DE VIENTO .....	36
4.2 SIMULACIÓN DE LOS GENERADORES EÓLICOS .....	39
4.2.1 MECÁNICA SOLIDWORKS .....	39
4.2.2 MODELADO MATLAB .....	41
4.3 COMPARACIÓN.....	42

4.3.1 VILLONACO ENERO AEROGENERADOR CON ASPAS .....	43
4.3.2 VILLONACO JUNIO AEROGENERADOR CON ASPAS.....	46
4.3.3 SAN CRISTÓBAL ABRIL AEROGENERADOR CON ASPAS.....	49
4.3.4 SAN CRISTÓBAL DICIEMBRE AEROGENERADOR CON ASPAS.....	52
4.3.5 VILLONACO ENERO AEROGENERADOR RESONANTE POR VIV .....	55
4.3.6 VILLONACO JUNIO AEROGENERADOR RESONANTE POR VIV .....	58
4.3.7 SAN CRISTÓBAL ABRIL AEROGENERADOR RESONANTE POR VIV .....	60
4.3.8 SAN CRISTÓBAL DICIEMBRE AEROGENERADOR RESONANTE POR VIV .....	62
4.3.9 VILLONACO .....	64
4.3.10 SAN CRISTÓBAL.....	66
4.4 ANÁLISIS DE VENTAJA Y DESVENTAJA .....	68
4.4.1 COMPARATIVA ENTRE AMBAS TECNOLOGÍAS .....	70
4.4.2 PROPUESTA VILLONACO .....	72
4.4.3 PROPUESTA SAN CRISTÓBAL.....	75
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>96</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Aerogeneradores sin aspas-Esquema de estructura de un aerogenerador de vórtice. ....	14
<b>Figura 2.</b> Aerogeneradores resonantes con VIV-Esquema de estructura de un sistema de conversión de energía .....	15
<b>Figura 3.</b> Aerogeneradores resonantes con VIV Disposición del alternador y el sistema de sintonizado. ....	17
<b>Figura 4.</b> Banco Mundial- Climate Smart Mining.....	20
<b>Figura 5.</b> Structuralia- Aerogenerador El rotor.....	20
<b>Figura 6.</b> Impacto del generador asíncrono doblemente alimentado en la protección de distancia.....	21
<b>Figura 7.</b> Sistema de transmisión .....	22
<b>Figura 8.</b> Imagen de georreferencia Central eólica Villonaco. ....	23
<b>Figura 9.</b> Imagen de georreferencia Central eólica tropezón.....	25
<b>Figura 10.</b> Diagrama del procedimiento del trabajo de grado .....	29
<b>Figura 11.</b> Diseño del aerogenerador eólico con aspas SolidWorks .....	40
<b>Figura 12.</b> Diseño aerogenerador resonante por VIV SolidWorks .....	41
<b>Figura 13.</b> Código cálculo de potencia eléctrica aerogenerador con aspas .....	42
<b>Figura 14.</b> Simulación aerogenerador con aspas Villonaco mes de Enero .....	44
<b>Figura 15.</b> Simulación aerogenerador con aspas Villonaco mes de Junio .....	47
<b>Figura 16.</b> Simulación aerogenerador con aspas San Cristóbal mes de Abril .....	50
<b>Figura 17.</b> Simulación aerogenerador con aspas San Cristóbal mes de Diciembre .....	53
<b>Figura 18.</b> Simulación aerogenerador resonante por VIV Villonaco mes de Enero .....	56

<b>Figura 19.</b> Simulación aerogenerador resonante por VIV Villonaco mes de Junio .....	59
<b>Figura 20.</b> Simulación aerogenerador resonante por VIV San Cristóbal mes de Abril	61
<b>Figura 21.</b> Simulación aerogenerador resonante por VIV San Cristóbal mes de Diciembre.....	63
<b>Figura 22.</b> Diagrama de la potencia eléctrica aerogenerador con aspas Villonaco del año 2023.....	73
<b>Figura 23.</b> Diagrama de la potencia eléctrica aerogenerador resonante por VIV Villonaco del año 2023 .....	74
<b>Figura. 24.</b> Diagrama de la potencia eléctrica aerogeneradores resonantes por VIV Villonaco del año 2023 .....	74
<b>Figura 25.</b> Diagrama de la potencia eléctrica aerogenerador con aspas San Cristóbal del año 2023 .....	76
<b>Figura 26.</b> Diagrama de la potencia eléctrica aerogenerador resonante por VIV San Cristóbal del año 2023 .....	77
<b>Figura 27.</b> Diagrama de la potencia eléctrica aerogenerador resonante por VIV San Cristóbal del año 2023 .....	77
<b>Figura 28.</b> Diagrama de colocación de los aerogeneradores resonantes por VIV .....	78

## Índice de tablas

<b>TABLA 1.</b> TIPOS DE AEROGENERADORES.....	7
<b>TABLA 2.</b> TIPOS DE GENERADORES RESONANTES. ....	13
<b>TABLA 3.</b> DIRECCIÓN DEL VIENTO.....	37
<b>TABLA 4.</b> CONDICIÓN DE VIENTO VILLONACO .....	38
<b>TABLA 5.</b> CONDICIÓN DE VIENTO SAN CRISTÓBAL .....	39
<b>TABLA 6.</b> RESULTADOS AEROGENERADOR CON ASPAS VILLONACO MES DE ENERO.....	45
<b>TABLA 7.</b> RESULTADOS AEROGENERADOR CON ASPAS VILLONACO MES DE JUNIO.....	48
<b>TABLA 8 .</b> RESULTADOS AEROGENERADOR CON ASPAS SAN CRISTÓBAL MES DE ABRIL .....	51
<b>TABLA 9.</b> RESULTADOS AEROGENERADOR CON ASPAS SAN CRISTÓBAL MES DE DICIEMBRE.....	54
<b>TABLA 10.</b> RESULTADOS AEROGENERADOR RESONANTE POR VIV VILLONACO MES DE ENERO.....	57
<b>TABLA 11.</b> .RESULTADOS AEROGENERADOR RESONANTE POR VIV VILLONACO MES DE JUNIO.....	59
<b>TABLA 12.</b> RESULTADOS AEROGENERADOR RESONANTE POR VIV SAN CRISTÓBAL MES DE ABRIL.....	62
<b>TABLA 13.</b> RESULTADOS AEROGENERADOR RESONANTE POR VIV SAN CRISTÓBAL MES DE DICIEMBRE.....	64
<b>TABLA 14.</b> POTENCIA ELÉCTRICA VILLONACO .....	66

<b>TABLA 15. POTENCIA ELÉCTRICA SAN CRISTÓBAL .....</b>	<b>68</b>
<b>TABLA 16. RESUMEN POTENCIA ELÉCTRICA .....</b>	<b>69</b>
<b>TABLA 17. VENTAJA Y DESVENTAJA AEROGENERADORES .....</b>	<b>71</b>
<b>TABLA 18. RENDIMIENTO AEROGENERADORES .....</b>	<b>79</b>

## RESUMEN

La adopción de energías renovables y tecnologías emergentes en generación eólica enfrenta retos económicos y constructivos. El concepto de Vibración Inducida por Vortex trata de incorporarse al sistema, para la diferenciación de los mecanismos se realizó un estudio comparativo de sistemas de conversión eólica a energía eléctrica entre aerogeneradores resonantes por VIV con aerogeneradores eólicos con aspas, mediante una investigación sistemática. El siguiente estudio analiza una comparación entre estos aerogeneradores con los datos de Villonaco y San Cristóbal, Ecuador, valorando cuál es más sustentable en términos de generación eléctrica proponiendo un análisis comparativo. Se investigó la nueva tecnología en diversas bases de datos, se documentó el principio y mecanismos de ambos aerogeneradores, se describieron los lugares donde se evaluaron estas tecnologías, y se detalló el procedimiento realizado para obtener los resultados. Evaluando los modelos diseñados en SolidWorks con los parámetros descritos y se apoyó en ecuaciones matemáticas modeladas en un código de programación en Matlab. Dando como resultado que los generadores con aspas tienen una potencia de salida de 348.52 kWh respecto a los 0.355 kWh de la nueva tecnología. Agrupando un estimado de 45 unidades del aerogenerador por VIV se obtuvo un total de 15.99 kWh representando una diferencia de un 50.1% por cada unidad y de un 54.86% con varias unidades. Esto refleja la superioridad de los generadores tradicionales respecto al generador resonante por VIV a la hora de generación eléctrica, dado que la nueva tecnología induce oscilaciones produciendo energía eléctrica a través de inducción electromagnética.

**Palabras clave:** energía eólica, aerogeneradores resonantes, Vibración Inducida por Vortex (VIV), aerogeneradores eólicos, producción de energía, rendimiento.

## ABSTRACT

The adoption of renewable energy and emerging technologies in wind power generation faces economic and construction challenges. The concept of Vortex Induced Vibration is being incorporated into the system. To differentiate the mechanisms, a comparative study of wind to power conversion systems was conducted, comparing VIV resonant wind turbines with conventional blade wind turbines through a systematic investigation. The following study analyses a comparison between these wind turbines with data from Villonaco and San Cristobal, Ecuador, assessing which is more sustainable in terms of electricity generation and proposing a comparative analysis. The new technology was researched in various databases, the principle and mechanisms of both wind turbines were documented, the locations where these technologies were evaluated were described, and the procedure carried out to obtain the results was detailed. Evaluating the models designed in SolidWorks with the described parameters and supported by mathematical equations modelled in a MATLAB programming code. The result is that the generators with blades have a power output of 348.52 kWh compared to 0.355 kWh for the new technology. Grouping an estimated 45 wind turbine units per VIV yielded a total of 15.99 kWh representing a difference of 50.1% per unit and 54.86% with multiple units. This reflects the superiority of traditional generators over the VIV resonant generator in power generation, since the new technology induces oscillations by producing electrical energy through electromagnetic induction.

**Keywords:** wind energy, resonant wind turbines, Vortex Induced Vibration (VIV), wind turbines, energy production, performance.

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

Estudio comparativo de sistemas de conversión eólica a energía eléctrica entre aerogeneradores resonantes por Vibración Inducida por Vortex (VIV) con aerogeneradores con aspas.

### **Planteamiento del problema**

En la actualidad, la creciente importancia de las fuentes de energía renovables, como la energía eólica, está impulsada por abordar los efectos del cambio climático a nivel mundial. Aunque la tecnología de los generadores eólicos ha logrado avances significativos en los últimos años, los desafíos continúan limitando su eficiencia y rentabilidad. Estos desafíos incluyen, entre otros: los altos costos y la naturaleza compleja de la construcción de turbinas, la necesidad de mantenimiento regular, la dependencia de las condiciones climáticas y la falta de eficiencia en la conversión de energía eólica en energía eléctrica.

La frecuencia y la intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos, como los vientos fuertes y las tormentas, están aumentando debido al cambio climático, lo que puede afectar la eficiencia y la rentabilidad de los generadores eólicos.

Dado los beneficios potenciales de las energías renovables, como una mayor accesibilidad, a la hora del proceso de generación y la utilización de nuevos conceptos que se incorporen al sistema, todavía hay una falta de comprensión, a la hora de diferenciar los nuevos mecanismos tanto en las tecnologías nacientes como en los sistemas tradicionales.

### **Formulación del problema**

¿Cuál aerogenerador de conversión eólica a energía eléctrica, es más sustentable en términos de capacidad energética, con diferentes condiciones de viento?

## **Objetivo General**

Realizar un estudio comparativo de sistemas de conversión eólica a energía eléctrica entre aerogeneradores resonantes por VIV con aerogeneradores eólicos con aspas, mediante una investigación sistemática.

## **Objetivos Específicos**

1. Describir los principios y mecanismos del aerogenerador eólico resonante con VIV y el aerogenerador con aspas.
2. Analizar mediante una simulación los principales factores que influyen en la capacidad energética de ambas tecnologías.
3. Determinar, las ventajas y desventajas de cada tecnología en función de las características, en diferentes condiciones de viento en el Ecuador.

## **Alcance**

Para la ejecución del estudio comparativo de sistemas de conversión eólica a energía eléctrica entre aerogeneradores resonantes por VIV con aerogeneradores eólicos con aspas, se realizará una metodología de investigación explicativa y correlacional apoyándose con una simulación de las áreas seleccionadas. Se investigará acerca de los principios de funcionamiento del tema, así como los mecanismos que acompañan a estas tecnologías, tomando como referencias artículos científicos de alto impacto indexados en bases de datos científicas.

Después, con la información recolectada se procederá a analizar los principales factores de funcionamiento de los aerogeneradores eólicos por resonancia con VIV y los aerogeneradores con aspas, mediante una simulación con el programa SolidWorks, conteniendo esta misma un entorno con afluencia de viento, soleado, con lluvia y con escases. Además, se recolectará información sobre las condiciones de viento en dos zonas diferentes del Ecuador.

Finalmente, se procederá, a presentar un análisis de ventajas y desventajas de cada uno de los aerogeneradores descritos anteriormente, con una metodología de comparación

en cada uno de los aspectos vistos para la generación eléctrica, dando una conjetura sobre cual se adapta mejor a las zonas descritas.

### **Justificación**

Actualmente, la energía eólica se genera a través de diversas tecnologías que presentan características únicas, tanto en términos de ventajas como de limitaciones. Entre ellas, los generadores eólicos resonantes por VIV y las turbinas con aspas destacan como opciones relevantes. Analizar estas alternativas resulta crucial, ya que cada una ofrece niveles distintos de eficiencia, costos operativos y capacidad de adaptación a diferentes condiciones climáticas y geográficas.

La innovación en la generación de energía eólica avanza rápidamente, con desarrollos que incrementan su eficiencia y rentabilidad. Por ello, los estudios comparativos son esenciales para identificar tendencias y evaluar los avances en esta área tecnológica. Estas investigaciones no solo ayudan a entender las mejoras recientes, sino también a optimizar el uso de las tecnologías disponibles en función de las necesidades específicas de cada contexto.

La selección de una tecnología adecuada depende de factores como las características del viento, la geografía del terreno, el alcance del proyecto y las exigencias de la red eléctrica. Evaluaciones comparativas enfocadas en condiciones locales permiten determinar qué tecnología se ajusta mejor a las particularidades de cada proyecto, maximizando así su rendimiento y sostenibilidad.

El análisis de tecnologías eólicas también resulta fundamental para quienes toman decisiones en el sector energético, incluidos inversores, desarrolladores y responsables de políticas. Estudios rigurosos pueden ofrecer información clave sobre la viabilidad económica y técnica de distintas opciones, facilitando decisiones más informadas en la planificación de proyectos eólicos.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

En el siguiente capítulo se describen los principios y mecanismos de dos tipos de aerogeneradores usados para generar energía eléctrica a partir del viento: los aerogeneradores eólicos resonantes con VIV (Vibración Inducida por el Viento) y los con aspas. A través de una revisión exhaustiva de la literatura científica y técnica.

#### **Contextualización**

El acogimiento de las energías renovables se ha incrementado en el último tiempo, por ende, nuevas formas de generación renovable han surgido, pero también la modernización de los sistemas tradicionales se ha ido fortaleciendo.

Las formas de obtener energía eléctrica se han mantenido en dos puntos, la renovable y no renovable, según datos de la OLADE (Organización Latinoamericana de Energía), [1] el 63% ocupa la combustión fósil y el 27% las energías limpias.

Para el año 2020 de acuerdo con IRENA (Agencia Internacional de las Energías Renovables) [2], se han producido un total de 7468 TWh (tera vatios hora), siendo con el 59% generadas por hidroeléctricas y en segundo puesto tenemos a la energía eólica con un 21% aproximadamente 1589 TWh.

En el 2022 se notó un incremento en la generación eólica datos reportados por IRENA [3], en la región de Sud-América se registró una capacidad de 29754 MW en el año 2021.

En Ecuador, este tipo de generación es muy bajo, así lo demuestra el INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censo), en su balance energético se puede visualizar que en 2021 se generó un 0,1 % de la energía registrada ese año [4], un porcentaje muy bajo a comparación de sus similares, por las dificultades de ubicación y disponibilidad.

Un aerogenerador es una impresionante muestra de ingeniería, que puede parecer simple a simple vista, pero su diseño y construcción son complejos. Para la empresa Enel Green Power [5], el modelo más extendido es el aerogenerador de eje horizontal, que consta de una torre, una góndola y un rotor con tres palas en el extremo. Por otro lado, los aerogeneradores de eje vertical son menos comunes debido a su problema de resistencia al aire.

El concepto de Vibración Inducida por Vortex (VIV) se conoce desde hace varias décadas, y es un fenómeno que ocurre cuando un objeto contundente, como un cilindro o una esfera, se coloca en un flujo de fluido. VIV puede hacer que el objeto vibre a su frecuencia natural, lo que puede causar fatiga y fallas si no se aborda adecuadamente.

Para aprovechar el aire se requieren nuevas tecnologías adaptadas a las necesidades obtenidas y para ello se debe investigar nuevos temas, como indica Villarreal [6], los nuevos instrumentos tienen características diferentes a los generadores convencionales, al retractar una sinopsis resumida, donde se enfoca en el uso de mecanismos sin ejes mecánicos, con campos magnéticos para la inducción de electromagnetismos como estrategia.

La tecnología busca aprovechar el máximo la energía del viento, teniendo en cuenta que al ser una energía renovable tendrá menor capacidad que las fuentes más usadas. Para Graciano [7], quien evaluó cómo la estela de vórtices afecta el movimiento de dos aerogeneradores VIV que estaban colocados en una configuración en serie arrojando como resultado que el primer aerogenerador (colocado aguas arriba) no se ve afectados por la distancia entre los dos, pero el movimiento del segundo aerogenerador (el que está aguas abajo) disminuye cuando la distancia entre los cuerpos se reduce.

La generación eólica tradicional trabaja con aerogeneradores con grandes aspas. Los molinos de viento, también conocidos como aerogeneradores, son una alternativa muy efectiva y rentable para producir energía eléctrica en lugares donde la velocidad del viento

es adecuada. Los modelos de turbinas eólicas horizontales están diseñados con una cola de dirección y aspas tipo molino, lo que les permite girar y aprovechar los vientos que soplan en diferentes direcciones [8].

A primera vista, el funcionamiento de un aerogenerador puede parecer sencillo: las palas del rotor capturan el viento, lo que causa su rotación y transfiere ese movimiento a través de un eje a alta velocidad hacia un generador eléctrico. Según lo mencionado por Enel Green Power, los sistemas de orientación son esenciales ya que ajustan la góndola del aerogenerador en función de los cambios en la dirección del viento. Es relevante mencionar que el rotor comienza a funcionar cuando la velocidad del viento supera los 10 km/h. Por otro lado, para proteger la estructura, el aerogenerador se apaga automáticamente cuando la velocidad del viento asciende a 90 km/h o más, como parte de sus protocolos de seguridad.

## **2. 1. Aerogeneradores eólicos**

Un aerogenerador transforma la energía cinética del viento en electricidad. Estas máquinas representan una alternativa renovable y ecológica que está ganando popularidad globalmente. De acuerdo con un informe de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA)[36], la energía eólica ocupa el segundo lugar en términos de uso a nivel mundial entre las fuentes renovables, solo superada por la energía hidroeléctrica la energía eólica es la segunda fuente de energía renovable más utilizada en todo el mundo, después de la energía hidroeléctrica.

Los aerogeneradores eólicos se han desarrollado significativamente desde que se inventaron en la década de 1880. Los primeros aerogeneradores eran pequeños y se utilizaban principalmente para cargar baterías. Sin embargo, a medida que la tecnología ha avanzado, los aerogeneradores se han vuelto más grandes y eficientes. Los aerogeneradores modernos pueden tener una altura de hasta 200 metros y pueden generar suficiente energía para abastecer a miles de hogares.

La capacidad de generación de los aerogeneradores eólicos ha mejorado significativamente en las últimas décadas. De acuerdo con Johnson y Brown [37], los desarrollos tecnológicos en el diseño de palas, sistemas de control y generadores han jugado un papel crucial en el aumento de la eficiencia y capacidad de los aerogeneradores. Además, la reducción significativa en los costos asociados con la energía eólica ha mejorado su posición competitiva en comparación con las fuentes de energía tradicionales.

### 2.1.1 Tipos de aerogeneradores

Los aerogeneradores son dispositivos que aprovechan la energía cinética del viento para generar electricidad. Existen diferentes tipos de aerogeneradores según su diseño, tamaño, potencia y ubicación. A continuación, se presenta los más conocidos.

En la tabla 1 se puede notar un cuadro comparativo, el cual resume la información presentada anteriormente y lo clasifica según su tipo, estructura y característica.

**TABLA 1.** TIPOS DE AEROGENERADORES.

Tipo	Estructura	Característica	Referencias bibliográficas
Aerogeneradores de eje horizontal	Las aspas giran alrededor de un eje horizontal, capturando el viento para generar energía eficientemente. Se utiliza una torre alta y resistente para elevar el rotor y aprovechar vientos más fuertes y estables.	Se utilizan ampliamente en la industria, empleándolos en parques eólicos terrestres y marinos, por su alta eficiencia.	T. Hansen, et al., <i>Aerodynamics of Wind Turbines</i> , 2nd ed. Routledge, 2019.
Aerogeneradores de eje vertical	Las aspas giran alrededor de un eje vertical, paralelas al suelo. El rotor tiene forma de cilindro o "S" y es más compacto ya que las aspas giran en un eje	Tiene un impacto visual reducido y ofrecen mayor facilidad para el mantenimiento, aunque presentan una eficiencia inferior.	I. Paraschivoiu, <i>Wind Turbine Design: With Emphasis on Darrieus Concept</i> . Springer, 2019.

vertical, sin necesidad de una torre alta.

Aerogenerador offshore	Tiene 3 aspas y un generador síncrono montado en una cimentación submarina, como una cimentación de gravedad, monopolito o jacket. La cimentación brinda estabilidad y permite generar energía eólica en aguas profundas y lejos de la costa..	Se aprovecha de los vientos más fuertes y consistentes, su ubicación cerca del mar reduce el impacto visual y sonoro, se propone la utilización de superconductores para los generadores síncronos.	W. Musial, et al., <i>Offshore Wind Technologies Market Report</i> , NREL Technical Report, NREL/TP-5000-66599, 2016.
Aerogenerador flotante	Tiene 3 aspas y un generador síncrono montado en una estructura flotante que puede ser anclada o auto elevable. Se utiliza en aguas profundas donde no se puede utilizar una cimentación tradicional en el fondo marino.	Están específicamente diseñados para flotar en el agua, lo que permite su instalación en aguas profundas y maximiza el potencial de producción de energía eólica offshore	L. Xu, et al., “Study on Electrical Design of Large-Capacity Fully,” 2021.
Aerogenerador de torre baja	Contiene aspas montadas de manera horizontal o vertical con estructuras más bajas.	Estos dispositivos pueden instalarse en áreas con velocidades de viento bajas, lo que los hace adecuados para sitios con restricciones en cuanto a altura.	J. Jonkman, et al., <i>Definition of a 10-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development</i> , NREL Technical Report, NREL/TP-5000-76497, 2020.

Aerogenerador de torre alta	Contiene aspas montadas de manera horizontal o vertical más altas, lo mismo pasa con su estructura.	Se incorpora a una altura considerable donde la estructura permite aprovechar vientos más fuertes y estables, lo que aumenta mucho la eficiencia de generación de energía.	X. Chen, et al., “Assessment of Wind Energy Potential for Low Wind Speed Sites Based on Kriging Method,” <i>Energies</i> , vol. 12, no. 13, p. 2602, 2019.
-----------------------------	---	--	--

### 2.1.2 Aerogenerador eólico resonante con Vibración Inducida por Vortex (VIV)

La tecnología de aerogeneradores por resonancia de vibración inducida por desprendimiento de vórtices (VIV) representa un enfoque innovador en la generación de energía eólica. Estos dispositivos operan sin la necesidad de usar álabes o ejes mecánicos tradicionales. Funcionan mediante un cilindro que entra en resonancia con el viento, vibrando cuando su frecuencia natural se alinea con la de los vórtices generados en su estela. Tradicionalmente, la VIV se ha considerado un desafío en la ingeniería debido a que puede causar fatiga o incluso la rotura de estructuras expuestas a este fenómeno. Sin embargo, se los utilizan como fuente de energía, transformando el movimiento oscilatorio en electricidad mediante un sistema de alternadores con bobinas e imanes [10], los aerogeneradores por resonancia por (VIV) presentan varias ventajas frente a los aerogeneradores convencionales con palas. Por un lado, al no tener elementos mecánicos móviles, reducen el mantenimiento, el ruido y el impacto ambiental. Por otro lado, al tener una forma cilíndrica, pueden captar el viento desde cualquier dirección y no necesitan orientarse hacia él. Además, al tener una menor altura y masa, pueden instalarse en lugares donde los aerogeneradores tradicionales no son viables, como zonas urbanas o marinas [10]. Sin embargo, los aerogeneradores por resonancia por (VIV) también enfrentan algunos desafíos para su desarrollo y comercialización. Uno de ellos es el rango de velocidades del viento en el que pueden entrar en resonancia y producir energía de forma eficiente.

Este rango depende de la rigidez y la forma de la estructura, así como de la frecuencia de los vórtices. Para ampliar este rango y aumentar el número de horas de trabajo al año, se pueden emplear sistemas pasivos o activos que modifiquen la rigidez o

la geometría del cilindro según las condiciones del viento [10]. Otro desafío es el diseño óptimo del sistema de alternadores para maximizar la conversión de energía mecánica en eléctrica sin afectar a la dinámica del equipo. Además, se deben considerar aspectos como la estabilidad, la seguridad y la integración con la red eléctrica [10]. Estos son una tecnología prometedora que puede contribuir a diversificar y democratizar el aprovechamiento de la energía eólica.

Sin embargo, todavía se encuentran en una fase experimental y requieren más investigación y desarrollo para demostrar su viabilidad técnica y económica. Algunas empresas y centros de investigación están trabajando en este campo, como Vortex Bladeless [10], una empresa emergente española que ha recibido el apoyo de entidades como Equinor o la Fundación Repsol [11], que ha realizado estudios sobre el efecto de la estela de vórtices en la oscilación de los cilindros.

## **2.2 Principio de la resonancia inducida por el viento**

El principio de la resonancia inducida por el viento es un fenómeno crucial en el campo de la ingeniería de aerogeneradores. Conforme a Holmes [15], este principio se refiere a la interacción entre el flujo de viento y una estructura, lo que resulta en la excitación de frecuencias naturales de la estructura. En otras palabras, cuando el viento incide sobre una estructura, puede generar vibraciones que coinciden con las frecuencias naturales de la misma, lo que puede provocar una resonancia y aumentar la amplitud de las vibraciones.

Este principio se basa en el concepto de fuerzas aerodinámicas no lineales, que pueden ser especialmente significativas en estructuras flexibles o de gran tamaño, como las aspas de un aerogenerador. Las vibraciones inducidas por el viento pueden generar cargas dinámicas que afectan el rendimiento y la vida útil del aerogenerador. Por lo tanto, es esencial comprender y controlar este fenómeno para el diseño y operación eficiente de los aerogeneradores.

La resonancia inducida por el viento ha sido objeto de estudios y se ha investigado ampliamente en la ingeniería estructural y la dinámica de fluidos. Estos estudios han demostrado que las vibraciones generadas por el viento pueden tener efectos significativos en las estructuras, incluyendo daños estructurales, disminución de la eficiencia y mayor fatiga de materiales.

Una investigación realizada por Vickery [16], se centró en el análisis y la predicción de la resonancia inducida por el viento en un aerogenerador. Utilizando modelos numéricos y pruebas de campo, el estudio investigó los efectos de la velocidad y dirección del viento, así como las características estructurales del aerogenerador. Los resultados proporcionaron información valiosa para comprender los mecanismos de resonancia y desarrollar estrategias de diseño y control que minimicen los efectos adversos.

El principio de resonancia inducida por el viento implica importantes en la seguridad y el diseño de estructuras. En aplicaciones como puentes, torres de comunicación y edificios altos, las vibraciones inducidas por el viento pueden ser un factor crítico para considerar. Por lo tanto, los ingenieros deben tener en cuenta este fenómeno en el diseño y la evaluación de la resistencia y estabilidad de estas estructuras.

### **2.3 Generación resonante**

La generación resonante es un fenómeno que ocurre en sistemas eléctricos cuando la frecuencia de la fuente de energía se acerca o coincide con la frecuencia natural de resonancia del sistema. Investigadores de la ingeniería eléctrica estudiaron este concepto.

Para Rodríguez [40], la generación resonante puede ocurrir en diferentes tipos de sistemas, como sistemas de transmisión de energía eléctrica, sistemas de distribución de energía y sistemas de generación de energía renovable. Cuando ocurre la generación resonante, se produce un incremento significativo de las corrientes y las tensiones en el sistema, lo que puede afectar su estabilidad y provocar daños en los equipos eléctricos.

En el caso de los sistemas de generación de energía renovable, como los parques eólicos y solares, la generación resonante puede ser un problema particularmente relevante. De acuerdo con Zheng [41], la incorporación de fuentes de energía renovable intermitentes en la red eléctrica puede generar condiciones propicias para la generación resonante, especialmente cuando hay una alta penetración de estas fuentes de energía en el sistema.

Los efectos de la generación resonante en los sistemas eléctricos son diversos. Uno de los efectos más comunes es el aumento de las corrientes y las tensiones en los elementos del sistema, lo que puede sobrecargar los transformadores y los cables de transmisión. Además, la generación resonante puede provocar oscilaciones y fluctuaciones en el sistema, lo que afecta la calidad del suministro eléctrico.

La detección y mitigación de la generación resonante es un tema de investigación activo en la ingeniería eléctrica. Hu [39] señala que, se han propuesto diversas técnicas y estrategias para prevenir y controlar la generación resonante en los sistemas eléctricos. Estas técnicas incluyen el ajuste de los parámetros del sistema, el diseño de filtros de resonancia y el uso de dispositivos de compensación de potencia reactiva.

### **2.3.1 Tipos de generación resonante**

La generación eléctrica resonante se perfila como un método prometedor para producir energía eléctrica a partir de vibraciones mecánicas, energía térmica y energía mecánica. Los tipos más habituales de generación eléctrica resonante abarcan la piezoeléctrica, la magnetoeléctrica, la termoelectrónica y la electrostática. En la tabla 2 se refleja un resumen de los tipos de generación resonante, se denota las más importantes y se los clasifica en tipos, Forma de generación y elementos.

**TABLA 2. TIPOS DE GENERADORES RESONANTES.**

Tipos	Forma de generación	Elementos	Referencias bibliográficas
Generación piezoeléctrica	Los materiales piezoeléctricos permiten la conversión de la energía mecánica en energía eléctrica al utilizar vibraciones mecánicas en la generación de electricidad.	El cuarzo, el titanato de bario y el titanato de plomo.	H. Liu, et al., “Resonant piezoelectric power generation technology and its application in ocean energy harvesting,” <i>Journal of Renewable and Sustainable Energy</i> , vol. 11, no. 1, p. 013301, 2019.
Generación termoeléctrica resonante	Los materiales termoeléctricos desempeñan un papel importante al convertir la energía térmica en energía eléctrica en la generación de electricidad a partir del calor de los objetos.	El bismuto-telurio y el antimonio-telurio.	Y. Zhang, et al., “Resonant energy harvesting technologies and applications,” <i>Journal of Renewable and Sustainable Energy</i> , vol. 12, no. 1, p. 013301, 2020.
Generación magnetoeléctrica resonante	Se emplean materiales magnetoeléctricos para transformar la energía mecánica en energía eléctrica en la generación de electricidad a partir de vibraciones mecánicas, como las producidas por las olas o el viento en el océano.	El ferrimagnético y el ferromagnético.	Y. Zhang, et al., “Resonant energy harvesting technologies and applications,” <i>Journal of Renewable and Sustainable Energy</i> , vol. 12, no. 1, p. 013301, 2020.

Generación electrostática resonante	Se emplea la resonancia electrostática para mejorar la eficiencia en la generación de energía eléctrica a partir de la energía mecánica de los objetos.	El poliéster y el polipropileno.	Y. Zhang, et al., "Resonant energy harvesting technologies and applications," <i>Journal of Renewable and Sustainable Energy</i> , vol. 12, no. 1, p. 013301, 2020.
-------------------------------------	---	----------------------------------	---

### 2.3.2 Componentes del aerogenerador resonante con VIV

Este tipo de aerogenerador tiene varios componentes clave fundamentales para su funcionamiento eficiente y confiable.

Uno de los componentes clave es el cilindro flexible. Para Koo [32], el cilindro flexible es una estructura que puede deformarse y vibrar en respuesta a las vibraciones inducidas por vórtices generadas por el flujo del viento. Esta flexibilidad permite al aerogenerador capturar y convertir eficientemente la energía del viento en energía mecánica. En la figura 1 se puede notar la forma de un cilindro flexible y en la parte inferior se denota una flecha el cual indica la forma del movimiento de este componente.

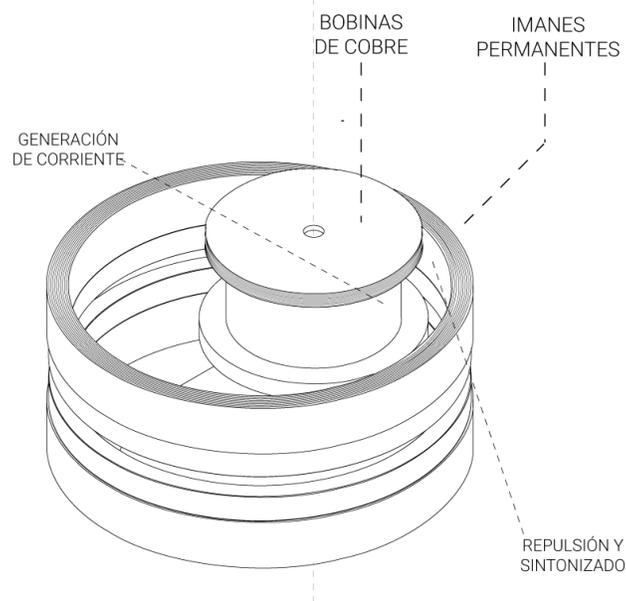


**Figura 1.** Aerogeneradores sin aspas-Esquema de estructura de un aerogenerador de vórtice [1].

Otro componente es el sistema de conversión de energía. El cilindro flexible está conectado a un sistema de conversión de energía que transforma la energía mecánica en

energía eléctrica utilizable. De acuerdo con Zhou [34], este sistema puede incluir mecanismos como generadores eléctricos o sistemas de transmisión para transferir la energía a través del aerogenerador. Para la empresa Vortex Bladeless [1], el dispositivo opera de manera similar a un alternador convencional, donde las bobinas y los campos magnéticos se combinan para generar electricidad mediante el proceso de inducción electromagnética. Sin embargo, a diferencia de los alternadores tradicionales, nuestro dispositivo prescinde de la necesidad de rotación alrededor de un eje para su funcionamiento.

Además de su función generadora de electricidad. Conforme a la empresa Vortex Bladeless [1], los imanes presentes en su dispositivo también desempeñan el papel de un "Sistema de Sintonización". Estos imanes pueden alterar la constante de elasticidad aparente del mástil, lo que amplía el rango de velocidades de viento en las que oscila el dispositivo. Este ajuste proporciona una mayor adaptabilidad y eficiencia en la captura de energía del viento, ya que el dispositivo puede aprovechar una variedad más amplia de velocidades de viento para su operación óptima. En la figura 2 se puede notar el movimiento de la bobina de cobre con los imanes permanentes.



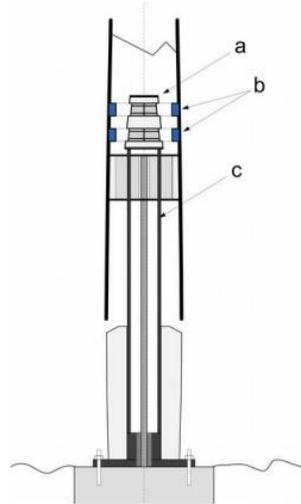
**Figura 2.** Aerogeneradores resonantes con VIV-Esquema de estructura de un sistema de conversión de energía [1].

Además, el sistema de control es un componente crítico en el aerogenerador resonante con VIV. El control preciso de la respuesta del cilindro flexible es necesario para maximizar la producción de energía y garantizar la estabilidad estructural. Para Gu [17], los algoritmos de control se utilizan para monitorear y ajustar la frecuencia y amplitud de las vibraciones del cilindro en tiempo real, lo que optimiza la conversión de energía y protege la integridad del aerogenerador.

El último componente es el sistema de monitoreo y detección. Se utilizan sensores y dispositivos de monitoreo para recopilar datos sobre las condiciones del viento, las vibraciones y el rendimiento del aerogenerador. Estos datos son fundamentales para evaluar la eficiencia del aerogenerador, identificar posibles problemas y realizar ajustes en el sistema de control. Como menciona Han [18], el uso de tecnologías de monitoreo avanzadas, como la monitorización remota y la inteligencia artificial, puede mejorar la confiabilidad y el rendimiento del aerogenerador resonante con VIV. Yáñez [10], expresa en su trabajo Aerogeneradores resonantes por VIV:

Los anillos de imanes permanentes están firmemente unidos al mástil. A medida que el mástil se flexiona, ocurre una interacción entre estos imanes y las bobinas, así como con los imanes de sintonización que se encuentran en el estátor. Este último está apoyado en un soporte que, a su vez, se ancla al suelo en su parte inferior. c. (p.4)

En la figura 3 podemos apreciar un esquema sobre la disposición de los diferentes elementos del generador eléctrico.



**Figura 3.** Aerogeneradores resonantes con VIV Disposición del alternador y el sistema de sintonizado [1].

## 2.4 Aerogenerador con aspas convencionales

Este tipo de aerogenerador tiene varios componentes clave fundamentales para su funcionamiento eficiente y confiable.

El componente principal son las aspas. Para Hansen [30], las aspas convencionales de los aerogeneradores están diseñadas para maximizar la captura de la energía cinética del viento y transformarla en energía mecánica a través de su rotación. Estas aspas se fabrican con materiales tanto ligeros como robustos, tales como la fibra de vidrio o compuestos avanzados, y poseen un diseño aerodinámico que busca optimizar la captura de energía mientras se minimiza la resistencia al viento.

Otro componente clave es el generador eléctrico. El generador está conectado al eje de rotación de las aspas y se encarga de convertir la energía mecánica en energía eléctrica utilizable. Conforme a Sutherland [31], los generadores más comúnmente utilizados en aerogeneradores son los generadores síncronos de imanes permanentes o los generadores asíncronos de jaula de ardilla. Estos generadores funcionan mediante la inducción electromagnética, aprovechando la rotación del eje para generar corriente eléctrica.

Además, el sistema de control es un componente crítico en el aerogenerador con aspas convencionales. El control se encarga de regular la velocidad de rotación de las aspas para maximizar la producción de energía y garantizar la estabilidad del aerogenerador. Para Blaabjerg [19], los sistemas de control utilizan algoritmos y sensores para monitorear constantemente las condiciones del viento y ajustar la orientación de las aspas en consecuencia, optimizando el rendimiento del aerogenerador.

El último componente clave es el sistema de transmisión y almacenamiento de energía. El sistema de transmisión transfiere la energía eléctrica generada por el aerogenerador a la red eléctrica o al sistema de almacenamiento, mientras que el sistema permite almacenar la energía en momentos de baja demanda o con condiciones favorables del viento. Chauhan [27] enmarca que, las tecnologías de almacenamiento más utilizadas incluyen baterías de iones de litio y sistemas de almacenamiento hidráulico o térmico.

#### **2.4.1 Principio de acción y reacción**

El principio de acción y reacción, también conocido como la tercera ley de Newton, es uno de los principios fundamentales de la física que describe la relación entre las fuerzas que actúan en un sistema. Para Newton [21], este principio establece que "para cada acción, hay una reacción igual y opuesta".

Este principio es fundamental en diversas áreas de la física, como la mecánica clásica, la dinámica de fluidos y la propulsión de cohetes. De acuerdo a Halliday [20], el principio de acción y reacción es esencial para comprender cómo los objetos interactúan entre sí y cómo se conserva el momento lineal en un sistema.

En el campo de la propulsión de cohetes, el principio de acción y reacción se aplica en la ley del impulso y la conservación del momento. De acuerdo con White [22], cuando un cohete expulsa gases hacia atrás a alta velocidad, los gases ejercen una fuerza de reacción hacia adelante sobre el cohete, lo que provoca su movimiento hacia arriba. Este principio explica el funcionamiento de los cohetes y es la base de la exploración espacial.

En términos más generales, el principio de acción y reacción es aplicable en todos los sistemas físicos donde hay interacción entre dos cuerpos. Cada acción genera una reacción de igual magnitud y en dirección opuesta, lo que asegura el equilibrio en el sistema.

Este principio es fundamental en la comprensión del movimiento y las interacciones en los sistemas físicos. Desde el impulso de cohetes hasta las interacciones diarias entre objetos, el principio de acción y reacción proporciona una base sólida para entender cómo las fuerzas interactúan en el mundo que nos rodea.

#### **2.4.2 Componentes del aerogenerador convencional con aspas**

Los aerogeneradores con aspas son una tecnología clave en la generación de energía eólica. Estos sistemas se componen de varios componentes clave que son fundamentales para su funcionamiento eficiente y confiable. A continuación, se presentan los principales componentes y su importancia en los aerogeneradores con aspas.

Las aspas son el componente más visible y reconocible de un aerogenerador. Hansen [30], manifiesta que, las aspas están diseñadas para capturar la energía cinética del viento y convertirla en energía mecánica mediante su rotación. Están construidas con materiales ligeros y resistentes, como fibra de vidrio o materiales compuestos, y tienen una forma aerodinámica para maximizar la captura de energía. En la figura 4 se aprecian los materiales con los que se están construyendo los actuales aerogeneradores con esta información del Banco Mundial [2], que indica que, se espera un aumento en la demanda de metales por el pronóstico de un aumento del 63 % en la capacidad de generación eólica para el año 2023, en el caso específico del cobre, se estima que en los próximos 25 años habrá que extraer más de este metal que en los últimos 5.000 años, para satisfacer la demanda mundial de unos 550 millones de toneladas.



Figura 4. Banco Mundial- Climate Smart Mining [2].

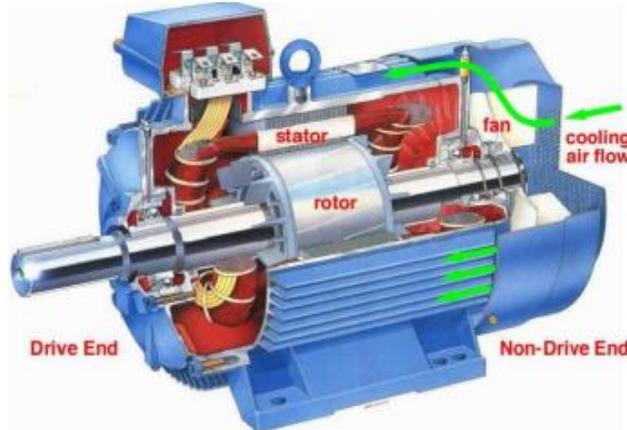
El buje es el componente que conecta las aspas al rotor del aerogenerador. Para Ackermann [29], el buje es responsable de transferir el movimiento de las aspas al rotor y, a su vez, al generador. Debe ser robusto y capaz de soportar las fuerzas generadas por las aspas. En la figura 5 se puede apreciar de mejor manera la unión del rotor y las aspas.



Figura 5. Structuralia- Aerogenerador El rotor [3].

El generador es otro componente clave en un aerogenerador con aspas. Hansen [30], nos dice que, el generador convierte la energía mecánica generada por el rotor en energía eléctrica utilizable. Los tipos de generadores más frecuentemente utilizados en estas instalaciones son los generadores síncronos con imanes permanentes y los generadores asíncronos de jaula de ardilla. Ambos sistemas transforman la rotación del

rotor en electricidad, aprovechando eficazmente el movimiento para producir energía. En la figura 6 se puede apreciar las partes de un generador asíncrono jaula de ardilla para aerogeneradores donde las flechas indican el nombre y la ubicación de sus componentes.



**Figura 6.** Impacto del generador asíncrono doblemente alimentado en la protección de distancia [4].

El sistema de control es esencial para garantizar el funcionamiento eficiente del aerogenerador. De acuerdo con Sutherland [31], el sistema de control monitorea y ajusta continuamente la velocidad y orientación de las aspas para optimizar la producción de energía y garantizar la seguridad del sistema. Utiliza algoritmos y sensores para medir la velocidad y dirección del viento, así como otros parámetros del aerogenerador.

El sistema de transmisión es responsable de transferir la energía mecánica desde el rotor del aerogenerador hasta el generador. De acuerdo con Hansen [30], el sistema de transmisión consta de una caja de cambios y un eje de transmisión que amplifica la velocidad de rotación del rotor y la transmite al generador. Este componente debe ser eficiente y confiable para maximizar la producción de energía. En la figura 7 se puede denotar las partes de un sistema de transmisión de un aerogenerador señalando con una flecha el componente y la ubicación dentro de este sistema.

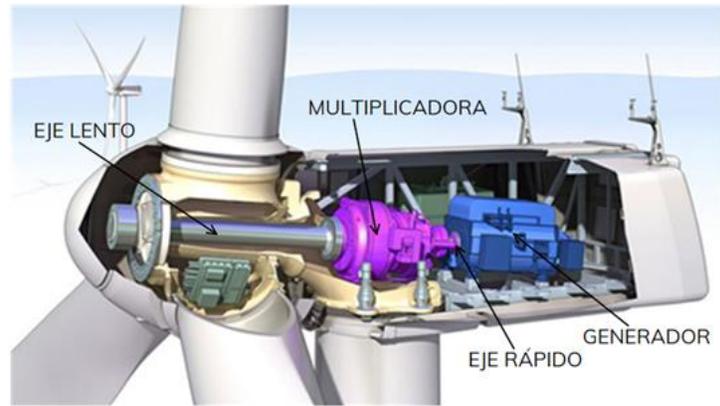


Figura 7. Sistema de transmisión [5]

Además de estos componentes principales, los aerogeneradores con aspas también incluyen otros sistemas auxiliares, como sistemas de frenado, sistemas de lubricación y sistemas de monitorización y control remoto. Todos estos componentes trabajan juntos para garantizar el funcionamiento seguro y eficiente del aerogenerador.

Estos componentes son esenciales para capturar, convertir y entregar la energía eólica de manera eficiente. La investigación y el desarrollo continuos en estos componentes buscan mejorar la eficiencia, la confiabilidad y la capacidad de generación de energía de estos generadores.

## CAPÍTULO III

### MÉTODOS Y MATERIALES

Este capítulo contiene la información pertinente a los métodos, los recursos y el procedimiento que se emplearon para realizar el trabajo curricular integrado. La información se organiza en tres partes fundamentales: el contexto donde se llevó a cabo el estudio, las metodologías de investigación que se utilizaron y los materiales que se emplearon. Cada parte ofrece una explicación detallada de cómo se implementaron en el desarrollo del proyecto de grado.

#### 3. 1. Descripción del lugar de estudio

A continuación, se describen los lugares donde se obtuvieron datos meteorológicos, estos mismos describieron información relacionada con la dirección del viento, que fueron los factores base para la simulación.

##### 3.1.1 Parque eólico Villonaco

El sitio elegido para este estudio fue el parque eólico Villonaco por su ubicación estratégica en la provincia, las condiciones favorables para captar el viento y los datos históricos proveniente de este, en la parroquia El Arenal de Ecuador, concretamente en la provincia de Loja. Se trata de una zona céntrica de la provincia, con coordenadas aproximadas de 4°S de latitud y 79°O de longitud, donde se muestra en la figura 8 [42].



Figura 8. Imagen de georreferencia Central eólica Villonaco.

La Central se sitúa a lo largo de la cresta del cerro Villonaco, extendiéndose aproximadamente por dos kilómetros. En este sitio se encuentra la subestación de elevación Villonaco, que opera con voltajes de 34.5 kV y 69 kV. Esta subestación tiene una capacidad de 25 megavatios (MW) y está diseñada con un sistema de conexión de barra única con capacidad de transferencia.

La Central Eólica inició su construcción en agosto de 2011 y empezó su operación continua el 2 de enero de 2013, según las demandas del sistema eléctrico ecuatoriano. Hasta julio de 2022, ha generado un total de 676,20 (GWh) de energía neta para el Sistema Nacional Integrado (SNI)

Villonaco alberga 11 aerogeneradores modelo GW70/1500, cada uno con una capacidad de 1,5 MW. Estos operan a una velocidad media anual del viento de 12,7 metros por segundo (m/s), y están situados a una altitud de 2700 metros sobre el nivel del mar (msnm) [43].

### **3.1.2 Parque eólico San Cristóbal**

La ubicación seleccionada para realizar esta investigación fue el complejo de generación de energía eólica San Cristóbal ya que nos proporciona una disponibilidad de datos como generación eléctrica, afluencia de viento y el acceso a la infraestructura necesaria para realizar la recopilación de estos, situado en la cima del cerro Tropezón en Ecuador, dentro de la provincia de Galápagos. Esta es una región central de la provincia, cuyas coordenadas geográficas aproximadas son 0°S de latitud y 89°O de longitud. El parque eólico San Cristóbal es el primer proyecto de este tipo en el país y tiene como objetivo reducir la dependencia de los combustibles fósiles y contribuir a la conservación del medio ambiente [42].



**Figura 9.** Imagen de georreferencia Central eólica tropezón.

El Parque Eólico San Cristóbal, inaugurado en el año 2007, es un proyecto pionero en el país que aprovecha la energía del viento para generar electricidad. Consta de tres aerogeneradores que están en el cerro el Tropezón, una zona elevada de la isla, y con capacidad instalada de 2.4 MW.

Este parque eólico contribuye a satisfacer el 21.50 % de la demanda eléctrica anual de la isla, reduciendo así la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero, cuenta con una gran variedad de datos históricos que abarcan aspectos como el viento, la producción de energía y el clima. Estos datos permiten realizar una simulación precisa de las condiciones y el rendimiento del parque eólico [44].

### **3. 2. Metodología.**

En la fase inicial de esta investigación, el análisis bibliométrico desempeñó un papel fundamental, esta metodología implicó la evaluación cuantitativa de la literatura científica disponible relacionada con las tecnologías en cuestión y los factores que afectan su capacidad energética.

El análisis bibliométrico permitió identificar y evaluar la relevancia de los estudios previos, los autores más influyentes y las fuentes de información más citadas referente a lo solicitado en este estudio. Donde se analizó varias fuentes de información contemplando en el tema de aerogeneradores con aspas, sacado de trabajos de grado de

varias universidades y de los generadores resonantes por VIV, obteniéndolos de varios trabajos de investigación. Finalmente, seleccionando las fuentes de información según lo establecido en el marco teórico.

Esta investigación se basa en un enfoque metodológico documental, lo que implica una revisión exhaustiva de la literatura existente, la recopilación de información relevante y la posterior síntesis y análisis de los datos obtenidos. El estudio apunta a dar una visión global de las ventajas y desventajas de los aerogeneradores con aspas para ayudar a tomar decisiones más informadas en la generación de energía eólica.

Este enfoque proporcionará a aquellos interesados en la generación de energía eólica la capacidad de tomar decisiones informadas respaldadas por evidencia científica al seleccionar sistemas de conversión más eficientes y sostenibles. Esto les permitirá contribuir de manera más efectiva a la transición hacia fuentes de energía renovable.

Para explicar este tema, se realizó un estudio comparativo en el que se enfatizó la confrontación directa de los sistemas, señalando sus contrastes en aspectos como la eficiencia, la sostenibilidad y otros factores relevantes, y procediendo a un análisis pormenorizado de los datos para presentar conclusiones sobre cuál de los dos sistemas es más apropiado en contextos o aplicaciones específicas, para ofrecer una orientación informativa sobre cuál de estas tecnologías se ajusta mejor a las condiciones exigidas.

### **3.2.1 Alcance de la investigación**

El propósito de este trabajo de grado es presentar una descripción general de los sistemas que permiten convertir la energía eólica en energía eléctrica, enfocándose en dos tecnologías específicas: los aerogeneradores VIV y los aerogeneradores con aspas. Para ello, se utilizó un enfoque exploratorio que busca obtener una perspectiva general de estas tecnologías, identificando sus características generales, sus principios de funcionamiento y sus ventajas, sin entrar en detalles técnicos complejos o comparaciones exhaustivas entre ambas opciones.

Con un alcance descriptivo, se descubrió una forma de describir las propiedades técnicas y el funcionamiento de los aerogeneradores. Para ello, se examinaron los datos

técnicos, las especificaciones de diseño y otros elementos importantes de ambos sistemas. De esta forma, se ofreció una información completa y detallada sobre las dos tecnologías, facilitando una comprensión profunda de lo que pueden hacer y lo que no pueden hacer.

### **3.2.3 Herramientas de investigación**

En el desarrollo del trabajo integrado curricular se aplicaron diversos métodos de investigación que se mencionaron previamente para la obtención de información, lo cual facilitó que la redacción fuera precisa y coherente.

El análisis estadístico fue crucial para analizar los factores que afectan la capacidad energética de dos tecnologías mediante simulaciones, para evaluar y cuantificar las relaciones entre las variables independientes, que representan los factores influyentes, y la variable dependiente, que es la capacidad energética de las tecnologías.

Un análisis de regresión permitió determinar la magnitud y la dirección de la influencia de cada factor sobre la capacidad energética. Los coeficientes de regresión y sus valores indicaron el significado estadístico de estas relaciones. Esto contribuyó, a priorizar y comprender qué factores son los más relevantes en la capacidad energética de las tecnologías. Donde se brindó una comprensión profunda y cuantitativa de cómo los factores influyen en la capacidad energética de las tecnologías, lo que a su vez permitió tomar decisiones informadas para la elección de estos.

En este trabajo de grado, la simulación tuvo un papel fundamental en la estrategia para lograr el objetivo planteado. La simulación consistió en el desarrollo de modelos computarizados que replican el comportamiento de estas tecnologías en un ambiente virtual. Estos modelos incorporaron relaciones matemáticas e interacciones entre variables clave, como la temperatura, la eficiencia de los componentes, y otros factores de interés.

La simulación brindó una plataforma segura y eficiente que evaluó la influencia relativa de cada factor en la capacidad energética. Asimismo, permitió la observación de resultados detallados.

Donde la misma fue esencial para comprender a fondo los factores determinantes y sus efectos en las tecnologías, lo que facilitó la toma de decisiones basadas en datos y la optimización del desempeño.

Se realizó un análisis de sensibilidad que consistió en la alteración controlada de las direcciones de viento para la observación de cómo afectaban el rendimiento de las tecnologías en diversos escenarios. Esto permitió conocer la relevancia relativa de cada factor y su incidencia en la capacidad energética, asimismo, este análisis de sensibilidad permitió detectar puntos críticos, donde cambios pequeños en un factor produjeron un efecto desmedido en la capacidad energética. Estos resultados fueron fundamentales para comprender la estabilidad y la solidez de las tecnologías en distintas condiciones.

La simulación numérica se utilizó como una herramienta esencial, donde se aplicaron métodos y técnicas computacionales que recrearon y modelaron el comportamiento de estas tecnologías en un ambiente virtual. En este contexto, la simulación numérica implicó una traducción de características físicas y operativas de estos sistemas en ecuaciones matemáticas. Estos modelos representaron una forma precisa de cómo los factores clave influyen en la capacidad energética. En esta simulación numérica se llevaron a cabo experimentos virtuales, donde se pudieron modificar sistemáticamente estos factores para la visualización de cómo inciden en la capacidad energética en un amplio rango de condiciones.

### **3.3. Procedimiento**

En este segmento, se expone con meticulosidad y estructura los pasos seguidos durante la ejecución del trabajo de grado. Se enfatizó en una metodología sistemática que se aplicó para garantizar la congruencia con los objetivos previamente definidos, asegurando que cada paso del proceso contribuyera de manera coherente a la satisfacción de las necesidades y metas específicas del proyecto de investigación.

En la figura 10 se representan ordenadamente los pasos seguidos para el proyecto de grado, desde la definición del Tema hasta la presentación de los resultados, tratándose

como un proceso lineal.

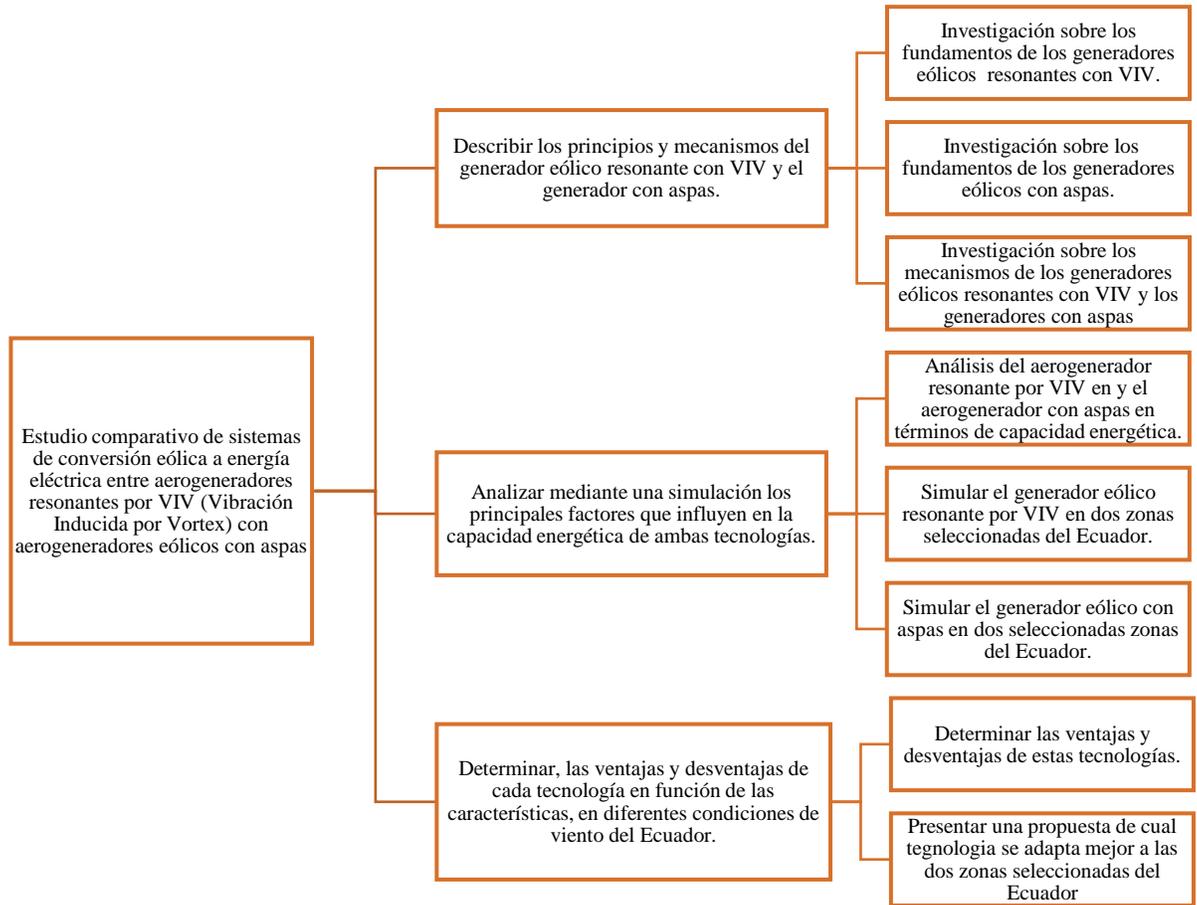


Figura 10. Diagrama del procedimiento del trabajo de grado

Se llevó a cabo una exhaustiva investigación sobre los aerogeneradores con aspas y sin aspas. En primer lugar, se realizó un análisis bibliométrico, donde se recopiló una amplia gama de literatura científica y técnica relacionada con este tema. Se revisaron estudios anteriores, artículos académicos y documentos especializados para conocer los principios de funcionamiento.

Tras la revisión bibliográfica, se documentó la información, con base en la metodología documental y, según la disposición correspondiente, se obtuvo el capítulo dos, siendo el marco teórico.

Se prosiguió a la tarea de analizar ambos sistemas en cuanto a su capacidad energética utilizando un alcance exploratorio y uno descriptivo. Para ello, se recabó

información exhaustiva sobre las características técnicas, el historial de funcionamiento y la estructura de ambos sistemas.

También se revisó la literatura científica existente sobre el tema, tomando en cuenta los resultados de estudios previos sobre aerogeneradores resonantes y con aspas, y se los utilizó como marco de referencia para su análisis.

El proceso de simulación consistió en recolectar datos minuciosos, obteniéndolos de la información recolectada a través de las fuentes primarias, siendo estas el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) y la Corporación Eléctrica (CELEC) obteniendo datos sobre el clima y los patrones de viento de cada zona elegida para el estudio.

Luego, se empleó el software especializado SolidWorks para modelar el comportamiento del aerogenerador con aspas, según las características particulares de cada lugar y con el sistema computacional Matlab, para acoplar los parámetros según los modelos, reflejando con fidelidad las condiciones específicas de viento para cada zona.

Durante la simulación, se consideraron factores como la variabilidad estacional y diaria en los patrones de viento, así como posibles eventos climáticos extremos que pudieran influir en el desempeño del generador eólico resonante.

Al finalizar las simulaciones, se analizaron los resultados, evaluando la eficiencia y la producción de energía eléctrica de estos sistemas en cada zona. Se compararon los datos obtenidos en Villonaco y San Cristóbal.

Tras obtener los datos iniciales como la velocidad de viento y la energía generada, se realizó un estudio estadístico con técnicas cuantitativas y cualitativas.

Luego de recopilar la información inicial, se organizó los datos de manera sistemática para facilitar la comparación de estos, donde se realizó un análisis de ventajas y desventajas.

Se utilizó análisis, estadístico, de sensibilidad y herramientas de evaluación específicas para medir y cuantificar los diferentes aspectos de cada tecnología.

Durante el proceso se revisó casos prácticos y ejemplos de implementación para ilustrar las aplicaciones reales de cada tecnología y sus resultados.

A continuación, se identificaron y clasificaron las ventajas y desventajas de cada tecnología en relación con los objetivos específicos del análisis.

Este análisis proporcionó una base sólida para la toma de decisiones con el fin de seleccionar la tecnología apropiada para cada zona, permitiendo a los interesados comprender mejor las implicaciones y consideraciones asociadas con cada tecnología.

### **3.4 Materiales**

Mediante el presente estudio se evaluó los factores que afectan la producción de energía eólica, incluyendo la velocidad y dirección del viento, la interacción con el terreno circundante y las variaciones climáticas. Para ello, se analizaron datos de generación eléctrica y mediciones climatológicas en dos áreas específicas, lo que permitió comparar el rendimiento de los aerogeneradores en estos sitios seleccionados.

#### **3.4.1 SolidWorks**

Para el estudio comparativo, se empleó la simulación como herramienta de investigación, que consiste en recrear las condiciones reales de un fenómeno o proceso mediante un modelo matemático. La simulación se realizó con el software SolidWorks, cabe aclarar que este programa esta licenciada por la Universidad Técnica del Norte (UTN), con el cual se facilitó el desarrollo con todos los componentes disponibles, es una herramienta de diseño e ingeniería que permite crear modelos 3D de forma intuitiva y precisa, así como dibujar y esbozar las piezas y los ensamblajes que las componen. [45].

Los datos de salida como: velocidad de viento, la máxima deflexión, la desviación del mástil respecto a su posición de equilibrio en el caso del aerogenerador por VIV y el radio de la circunferencia barrida caso del aerogenerador con aspas estas simulaciones de SolidWorks fueron extremadamente detallados y registraron variables como la velocidad del generador y el par en pequeños intervalos de tiempo. Sin embargo, para analizar las métricas de rendimiento y comparar los dos diseños de turbinas, era necesario procesar los datos. Aquí es donde Matlab se volvió invaluable.

Una vez completado el diseño de cada componente, la base, el housing, el rotor, las aspas, el lower mast, el shaft, el upper mast y el washer en el caso del aerogenerador con aspas y para el aerogenerador sin aspas tenemos: la maseta, la base fija, el mástil, el anclaje, varilla flexible, alternador de cada generador eólico en SolidWorks, el siguiente paso fue simular el rendimiento de los aerogeneradores en diferentes condiciones, estos fueron modelados operando en los dos tipos de terreno durante períodos de una hora.

Los resultados de la simulación se importaron al entorno Matlab. Se utilizaron funciones integradas y scripts personalizados para calcular indicadores clave de rendimiento a partir de los datos sin procesar

Se ingresaron datos de velocidad y dirección del viento para simular patrones climáticos del mundo real. Luego, SolidWorks calculó las fuerzas aerodinámicas sobre las palas y otras piezas móviles durante el tiempo de simulación.

### **3.4.2 Matlab**

Para complementar y respaldar la investigación realizada, se utilizó el programa Matlab, un entorno de programación y desarrollo numérico popular en ingeniería, matemáticas y ciencias. Este programa permite la creación y ejecución de algoritmos, análisis de datos, visualización y modelado numérico. Además, cuenta con una amplia gama de funciones incorporadas y herramientas de simulación que lo hacen esencial para la resolución de problemas complejos en áreas como procesamiento de señales, análisis financiero, diseño de sistemas de control y más [46].

Ahora se pueden determinar parámetros como la potencia media de salida, la generación de energía durante una hora, la relación máxima de velocidad de punta y las cargas mecánicas de los componentes.

Las herramientas de análisis estadístico y visualización de datos en Matlab también ayudaron a identificar tendencias y diferencias entre los escenarios. Con los resultados procesados, se realizó una evaluación integral de cómo se desempeñó cada diseño de generador eólico en las diversas condiciones.

### **3.4.3 Velocidad y dirección de Viento**

Los datos de velocidad y dirección del viento utilizados en las simulaciones se obtuvieron de estadísticas meteorológicas reales registradas por la Agencia Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA) para las ubicaciones geográficas en 2023. Esto aseguró que el modelado capturara las condiciones ambientales realistas que las turbinas podrían experimentar cuando se implementen.

La NASA es la institución que realiza actividades de investigación y recolección de datos sobre los vientos del planeta usando satélites y tecnologías avanzadas. Estos esfuerzos son cruciales para mejorar la comprensión de los patrones atmosféricos, predecir fenómenos meteorológicos y estudiar el clima de la Tierra [47].

Para una mayor validación, los cálculos de Matlab se compararon con datos de generación de energía del mundo real publicados por el CENACE.

El CENACE supervisa la red eléctrica nacional de Ecuador y compila cifras de producción a escala de servicios públicos. Comparar los resultados de la simulación con estos puntos de referencia de la industria ayudaran a validar la metodología de modelado [48].

### **3.4.4 Ecuaciones de los aerogeneradores con aspas y VIV**

Para modelar el proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica en el aerogenerador con aspas y la conversión de energía resonante a eléctrica en el aerogenerador VIV, se utilizaron ecuaciones investigadas previamente, tomando como referencia para los generadores VIV el trabajo de Hamdam et al, [49]. Se consultaron artículos de revistas, informes técnicos de expertos en el campo de la energía eólica para determinar las fórmulas más precisas.

Este enfoque riguroso permitió la obtención de mejores resultados fortaleciendo la credibilidad y aplicabilidad práctica, lo cual significó que las simulaciones generaron valores de producción de energía realistas en lugar de estimaciones simplistas.

Para la deducción matemática se procedió a utilizar las fórmulas que se muestran a continuación, enfocándose netamente en un análisis lineal, utilizando la potencia de salida aerogenerador por VIV, como lo muestra la ecuación 1.

$$P_{out} = F_{wind} * (V_{mast}) \quad (1)$$

Donde

$P_f$ : es la potencia de salida del generador por VIV.

$F_{wind}$ : es la fuerza aplicada directamente por el viento sobre la superficie del mástil frente a la entrada.

$V_{mast}$ : es la velocidad del mástil, promediada en el tiempo.

La fuerza que se aplique en el aerogenerador es un factor clave para el cálculo de la potencia de salida por ende se deben tomar parámetros para conseguir el resultado usando la fuerza aplicada en el mástil, como se denota en la ecuación 2 .

$$F_{wind} = P_{app} * (A_s) \quad (2)$$

Donde

$F_{wind}$ : es la fuerza aplicada directamente por el viento sobre la superficie del mástil frente a la entrada.

$P_{app}$ : es la presión del viento aplicada sobre la superficie del mástil.

$A_s$ : es el área de la superficie del mástil.

Una variable clave para la obtención de la potencia de salida recae en la presión del viento aplicada en el mástil donde se utilizó la ecuación 3.

$$P_{app} = 0.5 * P_{wind} * (V_{Flow})^2 \quad (3)$$

Donde

$P_{app}$ : es la presión del viento aplicada sobre la superficie del mástil.

$P_{wind}$ : es la densidad del aire.

$V_{Flow}$ : velocidad del flujo.

Finalmente se utiliza la expresión matemática estándar para el cálculo de la potencia eléctrica de un generador con aspas, como se denota en la ecuación 4.

$$P = n * \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (4)$$

Donde

$n$  : será siempre constante para cada aerogenerador, dependiente de las características técnicas del mismo.

$\rho$ : densidad del aire.

$A$ : se trata del radio del área de barrido.

$v$ : la velocidad del viento.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En las ciudades de Loja y San Cristóbal, Ecuador, la búsqueda de fuentes de energía sostenible y renovable se ha convertido en una prioridad para abordar los desafíos ambientales y satisfacer las crecientes demandas energéticas. En este contexto, los aerogeneradores son una opción atractiva para la generación de energía eléctrica a partir del viento. Dos tipos principales de aerogeneradores son relevantes para este análisis: los aerogeneradores con aspas tradicionales y los aerogeneradores resonantes por VIV.

El objetivo de este análisis es evaluar las tecnologías consideradas, desglosando sus ventajas y desventajas en varios aspectos. Esta investigación busca arrojar a la luz las implicaciones energéticas de las tecnologías estudiadas, ofreciendo una visión equilibrada que servirá como fundamento para futuras decisiones y desarrollos en este campo específico. A continuación, se presentan los resultados obtenidos y se inicia una discusión detallada que destaca los hallazgos significativos y sus posibles implicaciones para el avance en esta área.

#### **4.1 Datos de velocidad de viento**

En este punto, se exhiben los datos correspondientes a las ubicaciones previamente designadas. Estos datos fueron empleados en las simulaciones tanto del aerogenerador equipado con aspas como del aerogenerador por (VIV), desglosados a lo largo del año 2023. Estos datos se encuentran categorizados según los parámetros requeridos.

Para organizar la información recolectada, se inició con la descarga de los datos desde la plataforma indicada, optando por el formato CSV que facilita su manejo. Se seleccionaron registros horarios para mantener una consistencia temporal.

Posteriormente, se utilizó Excel para abrir estos archivos, lo que permitió aplicar un filtro a la información. Este proceso de filtrado se centró en clasificar los datos mensuales. Una vez organizada la información por meses, se procedió a calcular el

promedio mensual. Este paso es crucial para simplificar los cálculos posteriores de potencia relacionados con las dos tecnologías evaluadas, se puede observar en la tabla 3, el desglose de las distintas direcciones de viento de acuerdo con la dirección de donde provienen estos fluidos de aire representada en grados.

**TABLA 3. DIRECCIÓN DEL VIENTO [50]**

Rumbo	Grados
NE (Norte-Este) Noreste	45°
SE (Sur-Este) Sudeste	135°
SO (Sur-Oeste) Sudoeste	225°
NO (Norte-Oeste) Noroeste	315°
NNE( Norte-Norte-Este) Norte Noreste	22.5°
ENE (Este-Norte-Este) Este Noreste	67.5°
ESE (Este-Sur-Este) Este Sudeste	112.5°
SSE (Sur-Sur-Este) Sur Sudeste	157°
SSO (Sur-Sur-Oeste) Sur Sudoeste	202.5°
(OSO (Oeste-Sur-Oeste) Oeste Sudoeste	247.5°
ONO (Oeste-Norte-Oeste) Oeste Noroeste	292.5°
NNO (Norte-Norte-Oeste) Norte Noroeste	337.5°

Este método estructurado asegura una manipulación eficiente de los datos y contribuye a una interpretación más clara de los resultados, facilitando así el análisis comparativo entre las tecnologías y la toma de decisiones basada en datos concretos.

La tabla 4 ofrece una visión detallada de la variabilidad del viento en Villonaco, Azuay, organizando meticulosamente la información en tres categorías esenciales: el mes en curso, la velocidad del viento a 50 metros de altura y la temperatura en un radio de 2 metros estos datos se obtuvieron de la página de la NASA.

Cada fila de la tabla está dedicada a un mes específico, se muestran los valores correspondientes que reflejan las condiciones climáticas de ese periodo. Este estudio

minucioso permitió entender de manera integral las fluctuaciones estacionales del viento y la temperatura, proporcionando datos valiosos para la aplicación del estudio.

La estructura de la tabla facilita la comparación entre los meses, destacando las tendencias y patrones que fueron ser cruciales para esta investigación.

La altura específica a la que se miden estos parámetros fue esencial, ya que la velocidad del viento y la temperatura pueden variar significativamente con la altitud, y estos datos permitió comprender el comportamiento del viento y su interacción con el entorno.

**TABLA 4. CONDICIÓN DE VIENTO VILLONACO [51]**

Mes	Velocidad del viento 50 metros (m/s)	Temperatura 2 metros (°C)
ENERO	1.9848	17.37
FEBRERO	2.1425	18.14
MARZO	2.6423	18.01
ABRIL	2.2528	17.69
MAYO	3.3109	18.74
JUNIO	5.1082	17.89
JULIO	4.8801	18.71
AGOSTO	4.1307	19.02
SEPTIEMBRE	3.8225	20.15
OCTUBRE	2.6652	19.58
NOVIEMBRE	2.8639	19.66
DICIEMBRE	2.3767	18.09

En la tabla 5 se representa un análisis detallado de cómo se distribuye el viento en San Cristóbal, una localidad dentro de la provincia de Galápagos, durante el año 2023. Esta tabla organiza meticulosamente los datos para cada mes, dividiéndolos en tres categorías principales: el mes correspondiente, la velocidad del viento medida a una altura de 50 metros y la temperatura registrada en un radio de 2 metros, datos que se proporcionaron por la NASA.

Cada entrada en la tabla proporciona información específica sobre la velocidad del viento y la temperatura para un mes particular del año.

La velocidad del viento medida a 50 metros es crucial para evaluar la posibilidad de proyectos de energía eólica y para comprender el impacto del viento en diversas actividades.

**TABLA 5.** CONDICIÓN DE VIENTO SAN CRISTÓBAL [51]

Mes	Velocidad del viento 50 metros (m/s)	Temperatura 2 metros (°C)
ENERO	3.4378	24.34
FEBRERO	2.8566	26.64
MARZO	3.2864	26.96
ABRIL	2.7610	27.40
MAYO	5.2361	27.04
JUNIO	5.4135	26.51
JULIO	5.6317	26.03
AGOSTO	5.3047	25.15
SEPTIEMBRE	5.6589	24.55
OCTUBRE	5.6185	24.85
NOVIEMBRE	5.3454	25.31
DICIEMBRE	5.8203	25.20

## 4.2 Simulación de los generadores eólicos

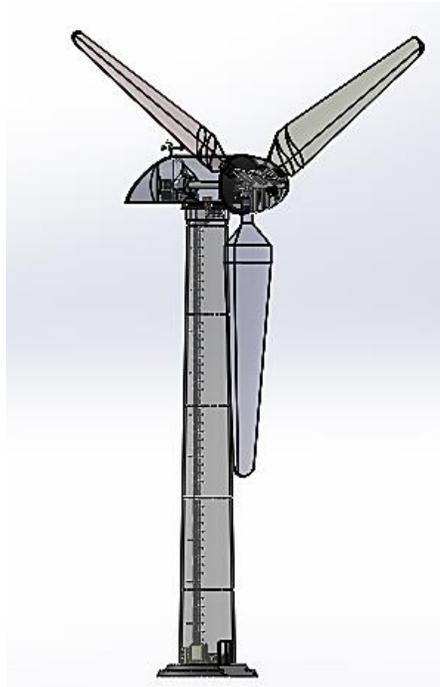
A continuación, se proporciona antecedentes en los que se basan las simulaciones del aerogenerador convencional con palas y el aerogenerador resonante por VIV. Describiendo las condiciones ambientales con las que se realizaron las pruebas, donde se incluyó la velocidad y dirección del viento, la presión barométrica y la temperatura, dando a conocer los modelos de estas tecnologías con los que se basó para la realización del estudio y el código para calcular las ecuaciones mencionadas.

### 4.2.1 Mecánica SolidWorks

En el proceso para la simulación de un generador eólico dotado de aspas, se seleccionó un prototipo específico de la marca Goldwind GW 70-1500, tal y como se

ilustra en la figura 11. Esta simulación se ensambló siguiendo las especificaciones detalladas en la ficha técnica proporcionada por el fabricante. Además, se tomaron en cuenta las medidas exactas de los componentes del modelo original, garantizando así una mayor precisión y fiabilidad en los resultados obtenidos durante la fase de simulación, esta misma se realizó usando los parámetros correspondientes a las ubicaciones descritas en el capítulo tres, asegurando que el comportamiento del generador en las pruebas virtuales refleje su desempeño en condiciones reales.

La fidelidad de este enfoque es crucial, ya que permite anticipar con mayor exactitud el rendimiento del generador eólico en diferentes entornos y situaciones.



**Figura 11.** Diseño del aerogenerador eólico con aspas SolidWorks

En el proceso de creación de la simulación para un aerogenerador resonante por VIV, se utilizó como modelo base la investigación de Ahmed M [52].

Este estudio proporcionó detalles cruciales que se consideraron en cada etapa del diseño. La construcción del modelo se llevó a cabo con un enfoque detallista,

asegurándose de replicar las dimensiones especificadas de la investigación original, como se denota en la figura 12.

Esta construcción rigurosa fue esencial para lograr resultados de alta precisión. Al adherirse a las medidas exactas del modelo de referencia, se garantizó que la simulación reflejara de manera fidedigna comportamiento del aerogenerador bajo las condiciones de VIV.



Figura 12. Diseño aerogenerador resonante por VIV SolidWorks

#### **4.2.2 Modelado Matlab**

Para complementar los hallazgos de este estudio, se desarrolló un código utilizando Matlab. Este código usa las ecuaciones ilustradas en el tercer capítulo y se creó para calcular la potencia eléctrica.

Además, se añadió un campo que permite mostrar los resultados a través de un gráfico de barras, facilitando así la interpretación visual de los datos.

Este modelo no solo optimiza la precisión de los cálculos de potencia eléctrica, sino que también mejora la presentación de los resultados, permitiendo una comparación clara y directa entre las diferentes tecnologías analizadas.

```
%{
Universidad Técnica del Norte
Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Electricidad
Tema:: Estudio comparativo de sistemas de conversión eólica a energía eléctrica entre
aerogeneradores resonantes por Vibración Inducida por Vortex (VIV) con aerogeneradores
eólicos con aspas.
Autor: Bastidas Villarreal Jean Pierre
%}

%{
Aerogenerador con Aspas Goldwind GW 70-1500
Potencia mes enero
Datos
%}
n= 0.4; |
A= 3882;
v= 2.0124938025172;
p= 0.9;
%Aplicamos la Ecuacion
P= n*0.5*A*p*(v^3);
disp(['El valor de P es: ', num2str(P)]);
```

Figura 13. Código cálculo de potencia eléctrica aerogenerador con aspas

### 4.3 Comparación

En esta sección, se podrán examinar las operaciones y las respuestas de los aerogeneradores en las condiciones ambientales propuestas .

Se incluye una evaluación exhaustiva de las variables meteorológicas y las métricas relacionadas con la velocidad y dirección del viento. Además, se describió meticulosamente el método implementado durante las fases de simulación y cálculo de la capacidad de generación eléctrica.

Este análisis se fundamentó en datos recopilados durante los periodos de mayor y menor incidencia de viento, tomados en función de los meses del año, estos mismos se mostraran como prueba del procedimiento realizado para cada uno, seleccionándolos por

medio de un análisis estadístico de varianza, desviación estándar y coeficiente de variación, utilizando las dirección de viento, teniendo como coeficiente en Villonaco del 33.65% y en San Cristóbal del 25.70%, dando como resultado unos datos heterogéneos, procediendo a seleccionar los meses de enero y junio en Villonaco y abril, diciembre en San Cristóbal, siendo estos los antecedentes con mayor variación. Los hallazgos fueron agrupados y presentados en una tabla comprensiva que reflejará los datos correspondientes a cada localización analizada, permitiendo una interpretación clara y directa de los resultados obtenidos en la investigación.

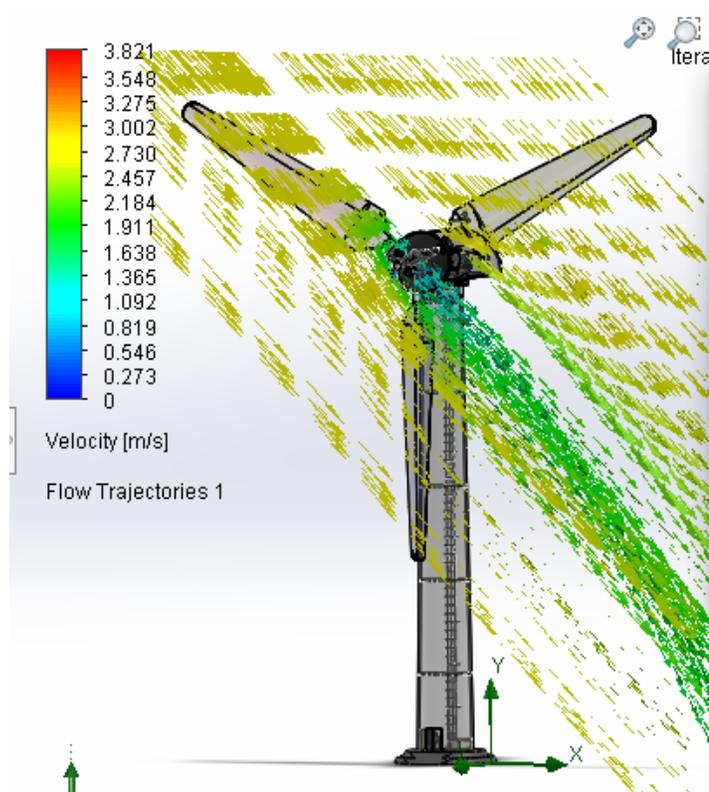
#### **4.3.1 Villonaco Enero aerogenerador con aspas**

A continuación, se detalla los datos recolectados y aplicados en la estimación del potencial eléctrico, enfocándose específicamente en el periodo de menor actividad eólica registrado en Villonaco, se simuló el funcionamiento de un aerogenerador de aspas, considerando las condiciones ambientales de la región mencionada. Para ello, se empleó la ecuación 4, la cual se adaptó e implementó en un lenguaje de programación para su análisis y procesamiento.

Este procedimiento permitió una interpretación más precisa de la capacidad energética del generador bajo las circunstancias de viento más desfavorables, proporcionando así una visión del rendimiento del sistema en condiciones subóptimas. Para este mes, se ha tomado en cuenta una velocidad de viento promedio de 1.9848 m/s (metros por segundo), acompañada de una temperatura ambiental de 17.37 °C (grados Celsius), tal como se muestra en la tabla 4. Además, se ha registrado una dirección predominante del viento desde el sudeste, también referenciada en la tabla 3.

Con respecto a la presión atmosférica, se ha considerado un valor de 81485.3094 Pa (Pascuales). Estos parámetros han sido suministrados por CELEC y la NASA, estos datos se introdujeron en la opción de la simulación de fluidos en el programa SolidWorks, una vez introducidos los datos se inició la simulación teniendo en cuenta el tiempo de duración, siendo este 3600 segundos, dejando por defecto la primera vez y las siguientes seleccionando la opción de nuevo cálculo para no alterar nuestros resultados.

Con base en estos datos, se llevó a cabo la simulación del comportamiento del aerogenerador con aspas operando bajo estas condiciones y seleccionando parámetros como: velocidad, velocidad circunferencial, velocidad RRF, fuerza normal, fuerza, torque X, Y & Z, ilustrado en la figura 14.



**Figura 14.** Simulación aerogenerador con aspas Villonaco mes de Enero

Como resultado se obtiene los valores de los parámetros seleccionados, se realizó la exportación de datos a un archivo de Excel para simplificar su manejo, estos mismos se pueden observar en la tabla 6.

**TABLA 6. RESULTADOS AEROGENERADOR CON ASPAS VILLONACO MES DE ENERO**

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
Velocidad	[m/s]	2.676598814	2.679375156	2.676516112	2.691231156	100	Yes	0.014715044	0.015156384
Velocidad de circunferencia	[m/s]	-2.00990636	-2.012493803	-2.022992457	-2.009842761	100	Yes	0.013149696	0.014690147
Velocidad RFF	[m/s]	2.676598814	2.679375156	2.676516112	2.691231156	100	Yes	0.014715044	0.015156384
Fuerza Normal	[N]	711.3563641	711.7711888	708.2983975	726.5273916	100	Yes	18.22899407	431.9251291
Fuerza	[N]	716.6276133	717.9945703	713.9409108	734.5532445	100	Yes	20.6123337	433.4190616
Torque X	[N*m]	4965.517078	5291.233481	4965.517078	5924.37541	100	Yes	958.8583326	6810.291736
Torque y	[N*m]	24065.20354	23808.26105	23609.58551	24065.20354	100	Yes	455.6180307	13196.98392
Torque Z	[N*m]	-25199.4186	-25258.97593	-25738.42967	-25147.21069	100	Yes	591.2189855	13280.29635

Una vez obtenidos los resultados pertinentes, se desarrolló un código en Matlab. Este código incorporó variables como la velocidad circunferencial, que se extrajo directamente de la simulación, así como el rendimiento de un aerogenerador con aspas, el área de barrido y la densidad del aire correspondiente. Es importante mencionar que, aunque otras variables resultantes de la simulación no se aplicaron en el estudio actual, se las consideró cuidadosamente para su inclusión en futuras aplicaciones prácticas.

Para el cálculo de la potencia eléctrica, se utilizó la ecuación 4 considerando el valor del rendimiento aproximado del 40 %, el valor del área de barrido para este aerogenerador es de 3882 m<sup>2</sup>, la velocidad de viento de 2.0124 m/s y la densidad del aire de 1.2 kg/m<sup>3</sup> (kilogramos por metro cubico), obteniendo la potencia eléctrica de 5.696 kW (kilowatts), procediendo a utilizar el mismo procedimiento para los meses restantes.

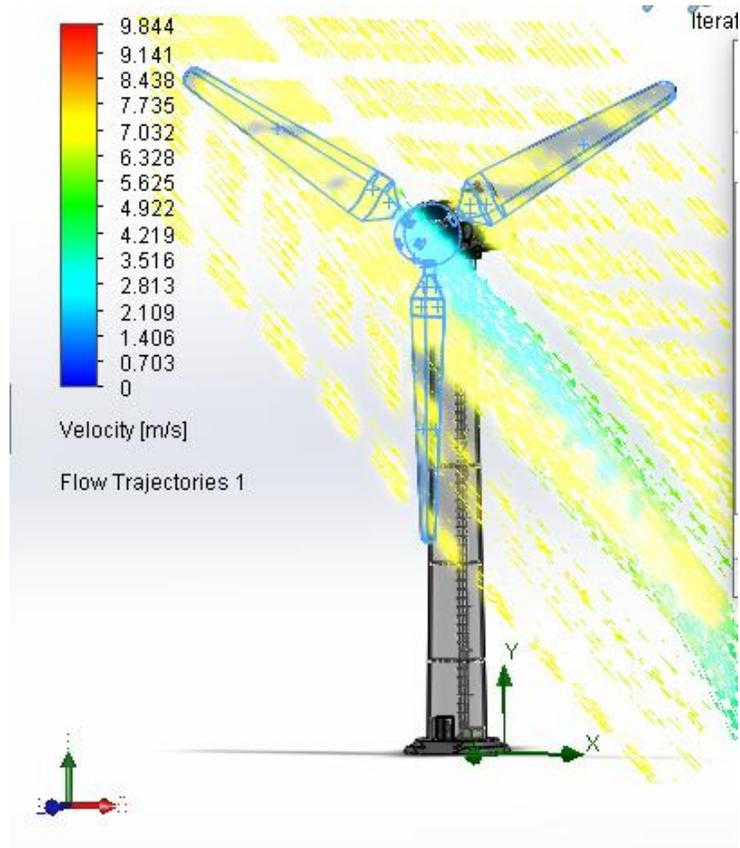
#### **4.3.2 Villonaco Junio aerogenerador con aspas**

En este apartado, se puntualiza los datos recopilados y utilizados en la estimación del potencial eléctrico, centrándose en el mes de mayor actividad eólica registrado en Villonaco.

Se realizó una simulación de un aerogenerador de aspas, teniendo en cuenta las condiciones ambientales de la región. Para este caso, se ha tomado en cuenta una velocidad de viento promedio de 5.1082 m/s, acompañada de una temperatura ambiental de 17.89 °C tal como se muestra en la tabla 4. Además, se ha registrado una dirección predominante del viento desde el sudeste.

Con respecto a la presión atmosférica, se ha considerado un valor de 81485.3094 Pa, estos datos se introdujeron en la opción de la simulación de fluidos en el programa SolidWorks, una vez introducidos los datos se procede a iniciar la simulación con un tiempo de 3600 segundos.

A partir de estos datos, se determinó el comportamiento del aerogenerador con aspas implementando estas condiciones y seleccionando parámetros como: velocidad, velocidad circunferencial, velocidad RRF, fuerza normal, fuerza, torque X, Y & Z, ilustrado en la figura 15.



**Figura 15.** Simulación aerogenerador con aspas Villonaco mes de Junio

Luego, se exportaron los datos a un archivo de Excel para simplificar su manejo, obteniendo valores de las variables seleccionadas. Estos resultados se pueden observar en la tabla 7.

**TABLA 7. RESULTADOS AEROGENERADOR CON ASPAS VILLONACO MES DE JUNIO**

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
Velocidad	[m/s]	6.884647356	6.892422285	6.884647356	6.918253261	100	Yes	0.033605905	0.039379693
Velocidad de circunferencia	[m/s]	-5.16842851	-5.176000598	-5.199058188	-5.16842851	100	Yes	0.030629678	0.038225496
Velocidad RFF	[m/s]	6.884647356	6.892422285	6.884647356	6.918253261	100	Yes	0.033605905	0.039379693
Fuerza Normal	[N]	4734.208944	4723.445795	4695.110656	4803.401495	100	Yes	108.2908388	2850.48646
Fuerza	[N]	4772.673217	4765.948689	4736.206054	4852.168479	100	Yes	115.9624244	2857.394494
Torque X	[N*m]	32889.63462	35032.68397	32889.63462	38326.64945	100	Yes	5437.014831	45004.76573
Torque y	[N*m]	160396.1244	158260.083	156934.9491	160396.1244	100	Yes	3461.175374	86888.84267
Torque Z	[N*m]	-168072.197	-168022.89	-170486.3515	-167204.8157	100	Yes	3281.535824	87284.33921

A través de los resultados, se realizó un código en Matlab. Este mismo logro incorporar variables como la velocidad circunferencial, que se extrajo directamente de la simulación, así como el rendimiento de un aerogenerador con aspas, el área de barrido y la densidad del aire correspondiente.

Para el cálculo de la potencia eléctrica, se utilizó la ecuación mencionada anteriormente, considerando el valor del rendimiento aproximado del 40 %, el valor del área de barrido para este aerogenerador es de 3882 m<sup>2</sup>, la velocidad de viento de 5.1760 m/s y la densidad del aire de 1.2 kg/m<sup>3</sup>, obteniendo la potencia eléctrica de un valor de 96.897 kW , procediendo a utilizar el mismo procedimiento para los meses restantes.

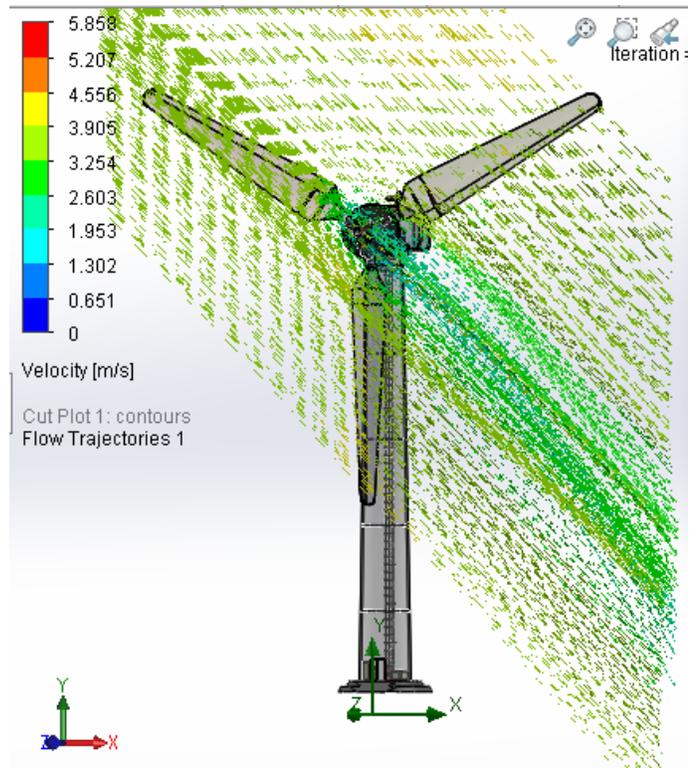
#### **4.3.3 San Cristóbal Abril aerogenerador con aspas**

En este apartado, se exponen los datos recopilados y utilizados en la estimación del potencial eléctrico, centrándose en el mes de menor cantidad de viento registrado en San Cristóbal.

Se realizó una simulación de un aerogenerador de aspas, teniendo en cuenta las condiciones ambientales de la región mencionada. Para este mes, se ha tomado en cuenta una velocidad de viento promedio de 2.761 m/s, acompañada de una temperatura ambiental de 27.40 °C tal como se muestra en la tabla 4. Además, se ha registrado una dirección predominante del viento desde el sudeste, también referenciada en la tabla 3.

Para la presión atmosférica, se ha considerado un valor de 1009888.95 Pa, estos datos se introdujeron en la opción de la simulación de fluidos en el programa SolidWorks, una vez introducidos los datos se inicia la simulación considerando el tiempo de duración, desde 3600 segundos.

Donde a partir de estos datos, se determinó la conducta del aerogenerador. colocando estas condiciones y seleccionando parámetros como: velocidad, velocidad circunferencial, velocidad RRF, fuerza normal, fuerza, torque X, Y & Z denotando los mismos nombres, ilustrado en la figura 16.



**Figura 16.** Simulación aerogenerador con aspas San Cristóbal mes de Abril

Tras obtener los valores de las variables seleccionadas, se realizó la exportación de datos a un archivo de Excel, para simplificar su manejo, estos mismos se reflejan en la tabla 8.

**TABLA 8 . RESULTADOS AEROGENERADOR CON ASPAS SAN CRISTÓBAL MES DE ABRIL**

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
Velocidad	[m/s]	3.814468708	3.815795389	3.814374139	3.822252451	100	Yes	0.007878312	0.009048535
Velocidad	[m/s]	-2.70935949	-2.710520158	-2.715736438	-2.709270537	100	Yes	0.006465901	0.007418523
Circunferencial									
Velocidad RRF	[m/s]	3.814468708	3.815795389	3.814374139	3.822252451	100	Yes	0.007878312	0.009048535
Fuerza Normal	[N]	17662.62167	17614.66447	17525.73124	17790.54157	100	Yes	264.8103352	7405.373249
Fuerza	[N]	17838.53172	17793.44811	17703.16495	17975.07414	100	Yes	271.9091917	7412.917701
Torque X	[N*m]	119896.8951	128618.1225	119846.0624	153056.1042	100	Yes	33210.04179	121685.1624
Torque Y	[N*m]	600202.0242	592364.2809	585446.6556	600202.0242	100	Yes	14755.36853	226466.844
Torque Z	[N*m]	-595545.184	-596230.8677	-601903.3561	-593870.7231	100	Yes	8032.63302	229723.0511

Con estos resultados, se creó un código en Matlab, incorporando variables como la velocidad circunferencial, extraída directamente de la simulación, y el rendimiento de un aerogenerador con aspas, el área de barrido correspondiente y la densidad del aire.

Para obtener el cálculo de la potencia eléctrica, se utilizó la ecuación 4 considerando el valor del rendimiento aproximado del 40 %, el valor del área de barrido para este aerogenerador es de 3882 m<sup>2</sup>, la velocidad de viento de 3.874 m/s y la densidad del aire con un 1.2 kg/m<sup>3</sup>, obteniendo la potencia eléctrica de 31.290 kW.

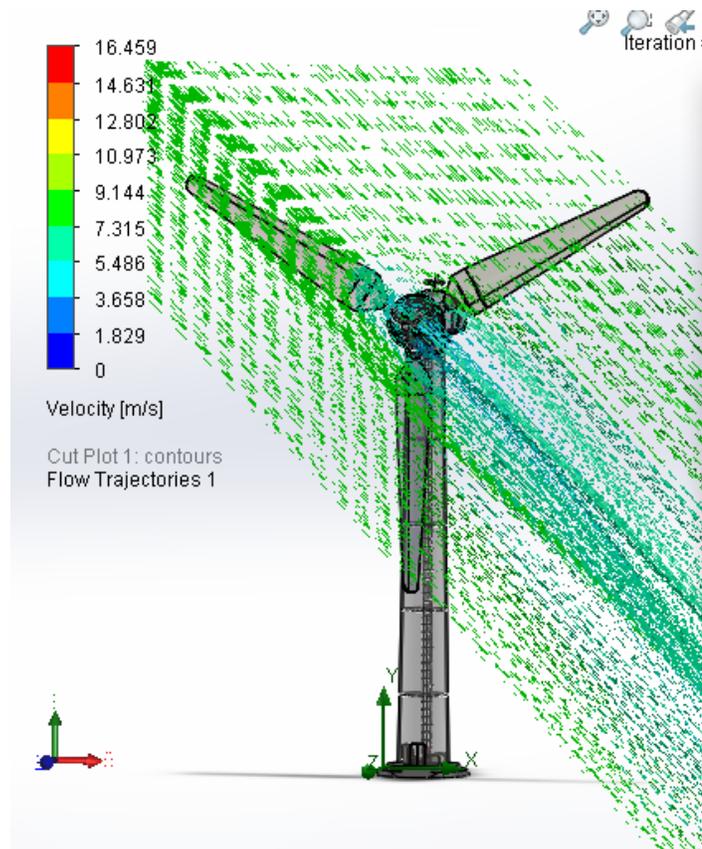
#### **4.3.4 San Cristóbal Diciembre aerogenerador con aspas**

A continuación, se describen los datos recopilados y utilizados en la evaluación del potencial eléctrico, centrándose en el periodo de mayor cantidad de viento registrado en San Cristóbal.

Se implementó una simulación de un aerogenerador de aspas, teniendo en cuenta las condiciones ambientales de la región mencionada. En este mes, se ha tomado en cuenta una velocidad de viento promedio de 5.8203 m/s, acompañada de una temperatura ambiental de 25.20 °C tal como se muestra en la tabla 4. Además, se ha registrado una dirección del viento desde el sudeste, también referenciada en la tabla 3.

Se mantuvo el valor de la presión atmosférica y se modificando los parámetros de velocidad de viento y temperatura, estos mismos se introdujeron en la opción de la simulación de fluidos en el programa SolidWorks, con una duración de 3600 segundos.

A partir de estos datos, se determinó el comportamiento del aerogenerador con estas condiciones y seleccionando parámetros como: velocidad, velocidad circunferencial, velocidad RRF, fuerza normal, fuerza, torque X, Y & Z, esta simulación se observan en la figura 17.



**Figura 17.** Simulación aerogenerador con aspas San Cristóbal mes de Diciembre

Estos valores se exportaron hacia un archivo de Excel para simplificar su manejo, estos resultados se pueden observar en la tabla 9.

**TABLA 9.** RESULTADOS AEROGENERADOR CON ASPAS SAN CRISTÓBAL MES DE DICIEMBRE

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
Velocidad	[m/s]	8.041420563	8.043991	8.041050037	8.057439543	100	Yes	0.016389506	0.019052149
Velocidad Circunferencial	[m/s]	-5.71158459	-5.714016468	-5.72494273	-5.711448771	100	Yes	0.013493959	0.015623242
Velocidad RRF	[m/s]	8.041420563	8.043991	8.041050037	8.057439543	100	Yes	0.016389506	0.019052149
Fuerza Normal	[N]	79037.52769	78861.67663	78507.44886	79512.45895	100	Yes	1005.01009	33351.64821
Fuerza	[N]	79744.0781	79579.2818	79219.99615	80252.23212	100	Yes	1032.235973	33381.85909
Torque X	[N*m]	528638.4846	571754.3417	528638.4846	678451.0432	100	Yes	149812.5587	557973.5828
Torque Y	[N*m]	2684435.722	2649516.324	2618115.188	2684435.722	100	Yes	66320.53346	1015246.158
Torque Z	[N*m]	-2665289.38	-2666874.071	-2686276.059	-2657647.55	100	Yes	28628.50874	1034189.217

Con estos resultados, se hizo un código en Matlab, incorporando variables como la velocidad circunferencial, extraída directamente de la simulación, y el rendimiento de un aerogenerador con aspas aproximadamente del 40%, el área de barrido correspondiente y la densidad del aire.

Para el resultado del cálculo de la potencia eléctrica, se utilizó la ecuación 4 considerando los valores del anterior caso modificando la velocidad de viento en 5.7140 m/s, obteniendo la potencia eléctrica dando un valor de 173.812 kW.

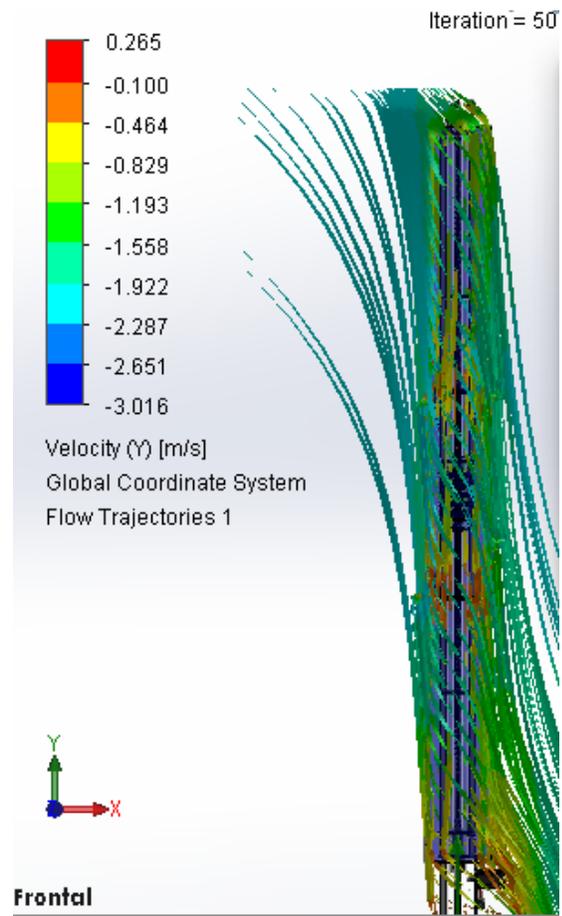
#### **4.3.5 Villonaco Enero aerogenerador resonante por VIV**

A continuación, se detalla los datos recolectados y aplicados en la estimación del potencial eléctrico, enfocándose específicamente en el lapso de menor actividad eólica registrado en Villonaco.

Se realizó una simulación del funcionamiento de un aerogenerador resonante por VIV, considerando las condiciones ambientales de esta región. Para ello, se utilizaron las ecuaciones 1,2 y 3, estas mismas se adaptaron e implementaron en un lenguaje de programación para su análisis y procesamiento. Para este mes, se ha tomado en cuenta una velocidad de viento promedio de 1.9848 m/s, acompañada de una temperatura ambiental de 17.37 °C, tal como se muestra en la tabla 4. Además, se ha registrado una dirección predominante del viento desde el sudeste, también referenciada en la tabla 3.

Con respecto a la presión atmosférica, se ha considerado un valor de 81485.3094 Pa, estos datos se introdujeron en la opción de la simulación de fluidos en el programa SolidWorks, una vez introducidos los datos se inició la simulación teniendo en cuenta el tiempo de duración, siendo este 3600 segundos, cabe mencionar que para este tipo de aerogenerador se realizó un análisis lineal para facilitar los cálculos y encontrar variables más accesibles disponibles en el programa, dejando por defecto la primera vez y las siguientes seleccionando la opción de nuevo cálculo para no alterar nuestros resultados.

Con base en estos datos, se simula el comportamiento del generador VIV, este mismo operó bajo estas condiciones, seleccionando parámetros como velocidad media, fuerza normal, fuerza, torque, Y & Z, como se ilustra en la figura 18.



**Figura 18.** Simulación aerogenerador resonante por VIV Villonaco mes de Enero

Como resultado valores de los parámetros seleccionados, se realizó la exportación de datos a un archivo de Excel para simplificar su manejo, estos resultados se pueden visualizar en la tabla 10.

**TABLA 10. RESULTADOS AEROGENERADOR RESONANTE POR VIV VILLONACO MES DE ENERO**

Goal Nam	Unit	Value	Averaged Val	Minimum Val	Maximum Val	Progre ss [%]	Use In Converge nce	Delta	Criteria
Velocida d media	[m/s ]	2.734305 604	2.73504077 2	2.7343056 04	2.73584096 1	100	Yes	0.001535 357	0.001538 103
Fuerza Normal	[N] ]	1.716712 308	1.81673753 5	1.6405205	1.94680218 8	100	Yes	0.127276 519	56.04618 491
Fuerza Torque Y	[N* m]	1.474063 028	1.47489742 2	1.4711327 96	1.47791332 9	100	Yes	0.001137 282	0.478580 402
Fuerza Torque Z	[N* m]	0.929880 97	0.84740926 6	0.7276647 06	0.94366294 5	100	Yes	0.208610 59	153.6054 482

Una vez obtenidos los resultados pertinentes, se desarrolló un código en Matlab. Este código incorporó variables como la velocidad del mástil, que se extrajo directamente de la simulación, así como la velocidad del lugar y la densidad del aire, la dimensión del aerogenerador. Es importante mencionar que, aunque otras variables resultantes de la simulación no se aplicaron en el estudio actual, se las consideró cuidadosamente para su inclusión en futuros estudios.

Para la presión del viento aplicada sobre la superficie del mástil, se utilizó la ecuación 3 considerando el valor de la velocidad del viento de 1.9848 m/s, el valor del área de la densidad del aire de 0.9 kg/m<sup>3</sup>, obteniendo la presión del viento aplicada sobre la superficie del mástil, consiguiendo un valor de 0.8038 Pa.

Con el valor de 0.8038 Pa, se procedió a utilizar la ecuación 2, para el cálculo de la fuerza aplicada directamente por el viento sobre la superficie del mástil frente a la entrada multiplicando por el área de 4.68m<sup>2</sup>, obteniendo un valor de 3.7620 N (Newtons).

Para el resultado del cálculo de la potencia eléctrica, se utilizó la ecuación 1 considerando el valor de la fuerza aplicada directamente por el viento sobre la superficie del mástil de 3.7620 N, el valor del viento aplicado en el mástil de 2.7350 m/s, obteniendo la potencia eléctrica de 0.010 kW, procediendo a utilizar el mismo procedimiento para los meses restantes.

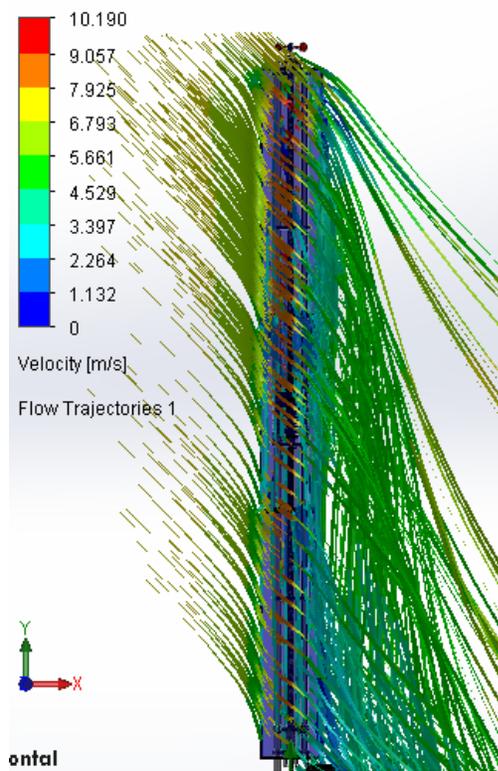
#### 4.3.6 Villonaco Junio aerogenerador resonante por VIV

En este apartado, se puntualiza los datos recopilados y utilizados en la evaluación del potencial eléctrico, centrándose en el periodo de mayor actividad eólica registrado en Villonaco.

Se realizó una simulación de este un aerogenerador, teniendo en cuenta las condiciones ambientales de la región. Para ello, se adaptó las fórmulas matemáticas descritas anteriormente, adaptándolas e implementándolas en un lenguaje de programación para su análisis. Para este mes, se ha tomado en cuenta una velocidad de viento promedio de 5.1082 m/s, acompañada de una temperatura ambiental de 17.89 °C tal como se muestra en la tabla 4. Además, se ha registrado una dirección predominante del viento desde el sudeste, también referenciada en la tabla 3.

Se utiliza la misma presión atmosférica que el caso anterior modificando la temperatura y velocidad del viento con los datos anteriormente mencionados con la ayuda de la simulación de fluidos del programa SolidWorks, realizando un análisis lineal con los parámetros disponibles en el programa, una vez introducidos los datos se procede a iniciar la simulación teniendo en cuenta el tiempo de duración, siendo desde 3600 segundos.

A partir de estos datos, se determinó el comportamiento de esta tecnología, donde se implementó condiciones y se seleccionó parámetros como: velocidad media, fuerza normal, fuerza, torque, Y & Z denotando los mismos nombres, como se observa en la figura 19.



**Figura 19.** Simulación aerogenerador resonante por VIV Villonaco mes de Junio

Luego, se exportaron los datos a un archivo de Excel para simplificar su manejo, obteniendo valores de las variables mencionadas anteriormente, estos resultados se pueden visualizar en la tabla 11.

**TABLA 11.** RESULTADOS AEROGENERADOR RESONANTE POR VIV VILLONACO MES DE JUNIO

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
Velocidad media	[m/s]	7.143330177	7.145012692	7.143330177	7.146011198	100	Yes	0.001550533	0.001813749
Fuerza Normal	[N]	11.36166166	11.39585218	11.35967908	11.42362148	100	Yes	0.025462163	3.024013898
Fuerza Torque Y	[N*m]	0.06534856	0.065504157	0.065334318	0.06562807	100	Yes	0.000293753	0.024919936
Fuerza Torque Z	[N*m]	-25.07978063	-25.14146223	-25.19638655	-25.069885	100	Yes	0.041676487	7.170788813

A través de los resultados, se realizó un código en Matlab. Este mismo logro incorporar variables como la velocidad del mástil, que se extrajo directamente de la simulación, así como la velocidad del lugar, la densidad del aire y el área del aerogenerador.

Para de la presión del viento aplicada sobre la superficie del mástil, se utilizó la ecuación 3, dado que este estudio se encuentra en el mismo lugar se utilizó el valor de densidad del aire, modificando la velocidad de viento de 5.1082 m/s, obteniendo la presión del viento aplicada sobre la superficie del mástil con un valor de 2.0688 Pa.

Con el valor de 2.0688 Pa, se procedió a utilizar la ecuación 2, para el cálculo de la fuerza aplicada directamente por el viento sobre la superficie del mástil frente a la entrada multiplicando por el área de  $4.68\text{m}^2$ , obteniendo un valor de 9.6821 N

Para el resultado del cálculo de la potencia eléctrica, se utilizó la ecuación 1 considerando el valor de la fuerza aplicada directamente por el viento sobre la superficie del mástil de 9.6821 N, el valor del viento aplicado en el mástil de 7.1450 m/s, obteniendo la potencia eléctrica de un valor de 0.069 kW.

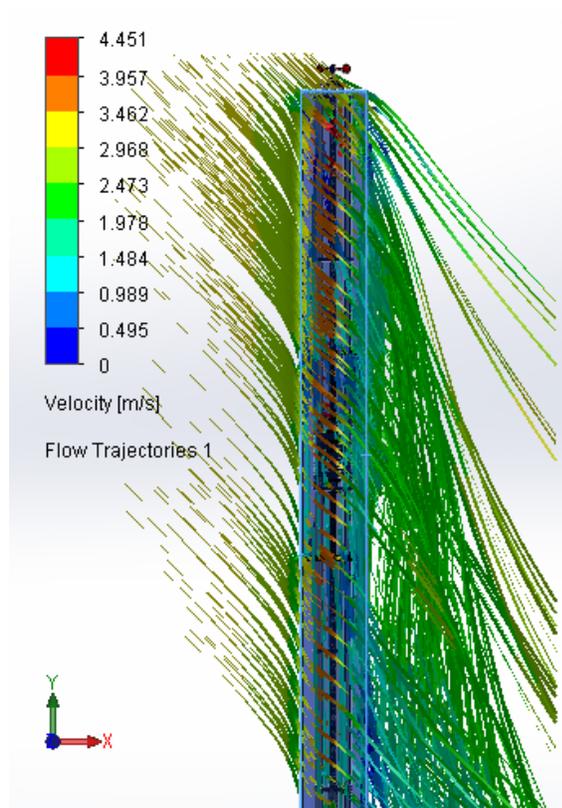
#### **4.3.7 San Cristóbal Abril aerogenerador resonante por VIV**

A continuación, se exponen los datos recolectados y utilizados en la estimación del potencial eléctrico, centrándose en el pasaje de menor cantidad de viento registrado en San Cristóbal.

Se realizó una simulación de esta tecnología, teniendo en cuenta las condiciones ambientales de la región. Para ello, se adaptó las fórmulas matemáticas señaladas para este generador, donde se adaptó e implemento en un lenguaje de programación.

Para este mes, se ha tomado en cuenta una velocidad de viento promedio de 2.761 m/s, acompañada de una temperatura ambiental de  $27.40\text{ }^{\circ}\text{C}$  tal como se muestra en la tabla 4. Además, se ha registrado una dirección del viento desde el sudeste, para la presión atmosférica, se ha considerado un valor de 1009888.95 Pa, estos datos se introdujeron en la opción de la simulación de fluidos en el programa SolidWorks, cabe mencionar que para este tipo de aerogenerador se realizó un análisis lineal para facilitar los cálculos y encontrar variables más accesibles disponibles en el programa, una vez introducidos los datos se procede a iniciar la simulación con un tiempo de duración de 3600 segundos.

Donde a partir de estos datos, se determinó la conducta del aerogenerador, donde se seleccionó parámetros como: velocidad media, fuerza normal, fuerza, torque, Y & Z, denotando los mismos nombres, como se visualiza en la figura 20.



**Figura 20.** Simulación aerogenerador resonante por VIV San Cristóbal mes de Abril

Tras obtener valores de las variables seleccionadas, se realizó la exportación de datos a un archivo de Excel, para simplificar su manejo, estos resultados se pueden observar en la tabla 12.

**TABLA 12. RESULTADOS AEROGENERADOR RESONANTE POR VIV SAN CRISTÓBAL MES DE ABRIL.**

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
Velocidad Media	[m/s]	3.86419507	3.864379036	3.863904359	3.86554896	100	Yes	0.000803836	0.000844039
Fuerza Normal	[N]	42.36060779	41.55423063	41.1461369	42.36060779	100	Yes	0.893670511	10.465888
Fuerza Torque Y	[N*m]	0.275175574	0.268129041	0.264526249	0.275175574	100	Yes	0.006479776	0.088454191
Fuerza Torque Z	[N*m]	-90.1331029	-89.35021857	-90.13310285	-88.73336528	100	Yes	1.399737576	25.78109939

Con estos resultados, se procedió a crear un código en Matlab, logrando incorporar variables como la velocidad media, que se extrajo directamente de la simulación, así como la velocidad del lugar, la densidad del aire y la dimensión del aerogenerador,

Para de la presión del viento aplicada sobre la superficie del mástil, se utilizó la ecuación 3 considerando el valor de la velocidad del viento de 2.7610 m/s, el valor del área de la densidad del aire de 1.2 kg/m<sup>3</sup>, obteniendo la presión del viento aplicada sobre la superficie del mástil, consiguiendo un valor de 1.9879 Pa,

Con este parámetro de 1.9879 Pa, se procedió a utilizar la ecuación 2, para el cálculo de la fuerza aplicada directamente por el viento sobre la superficie del mástil frente a la entrada multiplicando por el área de 4.68m<sup>2</sup>, obteniendo un valor de 9.3035 N

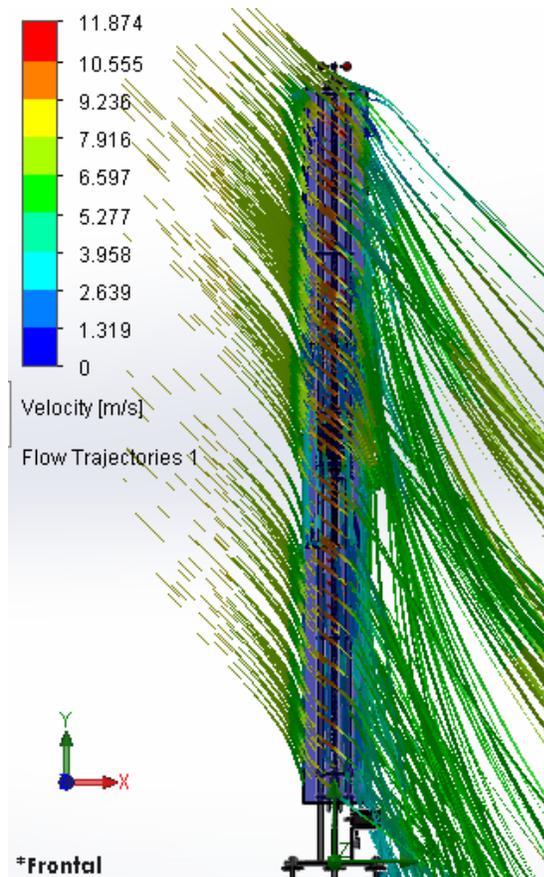
Para el resultado del cálculo de la potencia eléctrica, se utilizó la ecuación 1 considerando el valor de la fuerza aplicada directamente por el viento sobre la superficie del mástil de 9.3035 N, el valor del viento aplicado en el mástil de 3.8644 m/s, obteniendo la potencia eléctrica 0.036 kW.

#### **4.3.8 San Cristóbal Diciembre aerogenerador resonante por VIV**

En este contexto, se describen los datos recopilados y utilizados en la estimación del potencial eléctrico, centrándose en el mes de mayor cantidad de viento registrado en San Cristóbal.

Se implementó una simulación de un generador resonante por VIV, teniendo en cuenta las condiciones ambientales de esta región. Para ello, se utilizó las ecuaciones 1,2 y 3, señaladas anteriormente, estas mismas se modificaron en un lenguaje de programación.

En este mes, se ha tomado en cuenta una velocidad de viento promedio de 5.8203 m/s, acompañada de una temperatura ambiental de 25.20 °C tal como se muestra en la tabla 4, donde se ha registrado una dirección del viento desde el sudeste. Respecto al presión atmosférica, se ha considerado el mismo valor de la condición anterior, estos datos se colocaron en la parte de simulación de fluidos, acotando que para esta condición se realizó un estudio lineal, simplificando el análisis, una vez introducidos los datos se procede a iniciar la simulación considerando el tiempo de duración, de 3600 segundos. A partir de estos datos, se determinó la conducta del aerogenerador colocando estas condiciones y seleccionando parámetros como: velocidad media, fuerza normal, fuerza, torque, Y & Z, denotando los mismos nombres, como se muestra en la figura 21



**Figura 21.** Simulación aerogenerador resonante por VIV San Cristóbal mes de Diciembre

Estos valores se exportaron en un archivo de Excel para simplificar su manejo, estos resultados se pueden observar en la tabla 13.

**TABLA 13. RESULTADOS AEROGENERADOR RESONANTE POR VIV SAN CRISTÓBAL MES DE DICIEMBRE.**

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
Velocidad Media	[m/s]	8.156145512	8.156676431	8.155890514	8.157245613	100	Yes	0.001355099	0.001414424
Fuerza Normal	[N]	193.4031318	191.6092864	190.1947094	193.4031318	100	Yes	3.20842242	46.70814998
Fuerza Torque Y	[N*m]	1.250188147	1.241624966	1.231691266	1.250188147	100	Yes	0.018496881	0.394306502
Fuerza Torque Z	[N*m]	-379.06717	-378.1795418	-379.0671702	-377.4054478	100	Yes	1.661722368	114.6978456

Con estos resultados, se hizo un código en Matlab, incorporando variables como la velocidad media, extraída directamente de la simulación, la velocidad del lugar, la densidad del aire y la dimensión del aerogenerador.

Para de la presión del viento aplicada sobre la superficie del mástil, se utilizó la ecuación 3 considerando el valor de la velocidad del viento de 5.8203 m/s, el valor del área de la densidad del aire de 1.2 kg/m<sup>3</sup>, obteniendo la presión del viento aplicada sobre la superficie del mástil, consiguiendo un valor de 4.1906 Pa.

Con este parámetro de 4.1906 Pa, se procedió a utilizar la ecuación 2, para el cálculo de la fuerza aplicada directamente por el viento sobre la superficie del mástil frente a la entrada multiplicando por el área de 4.68m<sup>2</sup>, obteniendo un valor de 19.6121 N.

Para el resultado del cálculo de la potencia eléctrica, se utilizó la ecuación 1 considerando el valor de la fuerza aplicada directamente por el viento sobre la superficie del mástil de 19.6121 N, el valor del viento aplicado en el mástil de 8.1567 m/s, obteniendo la potencia eléctrica de un valor de 0.156 kW.

#### 4.3.9 Villonaco

Tras recopilar y analizar la información proporcionada por las entidades mencionadas y de simular las dos tecnologías, y completar el código de programación necesario, se organizan los resultados obtenidos.

Esta organización implica tabular los datos según el mes correspondiente en la ubicación de Villonaco, convirtiéndolos en unidades de potencia eléctrica expresadas en kilowatts. La representación final de estos resultados se presenta en la tabla 14.

Se realizó una observación complementaria para el estudio comparativo de estas tecnologías, donde se evaluó el número de unidades VIV en un campo que alberga un único generador de aspas.

Al examinar esta novedosa tecnología, sometiéndola en un área compuesta por varios generadores de este tipo, se refleja una comparativa a la hora de la producción de la potencia eléctrica, aprovechando el tamaño de estos y situándolos en un espacio en específico, mejorando el rendimiento de producción.

Para este estudio se realizó un análisis que comprendió el uso de generadores resonantes por VIV en un área del aerogenerador con aspas, recordando que el modelo nos dictamina un diámetro de 70.3 y escogiendo una separación de 3m obteniendo un área de 210.9 m<sup>2</sup> y un área de un solo generador VIV de 4.68m<sup>2</sup>.

Con estos valores procedemos a dividir el área más grande con el área más pequeña, obteniendo que en este campo se ocuparía con un aproximado de 45 unidades, para finalmente multiplicar este valor con cada una de la potencia eléctrica del aerogenerador VIV obtenida en los dos lugares.

Este proceso implica una etapa clave en el estudio, ya que permite visualizar de manera clara y ordenada la producción de energía en el área evaluada. Además, facilita la comparación entre los distintos meses y el análisis de tendencias o variaciones a lo largo del tiempo. La tabla resultante da una visión comprehensiva de la eficacia y el rendimiento de las tecnologías estudiadas, y una posibilidad al utilizar unidades de generadores resonantes por VIV en un campo de estudio específico en el contexto de Villonaco, ofreciendo una base sólida para el análisis que se mostrara en el punto 4.4.

**TABLA 14. POTENCIA ELÉCTRICA VILLONACO**

Mes	Potencia aerogenerador con aspas (kW)	Potencia aerogenerador por VIV (kW)	Potencia Aerogenerador resonante por VIV en un área de 210.9 m <sup>2</sup> (kW)
ENERO	5.696	0.010	0.463
FEBRERO	7.163	0.012	0.547
MARZO	13.413	0.019	0.833
ABRIL	8.328	0.013	0.605
MAYO	26.380	0.029	1.31
JUNIO	96.897	0.069	3.11
JULIO	84.494	0.063	2.84
AGOSTO	51.276	0.045	2.04
SEPTIEMBRE	40.636	0.039	1.74
OCTUBRE	13.765	0.019	0.846
NOVIEMBRE	17.078	0.022	0.978
DICIEMBRE	9.778	0.015	0.673

Luego de culminar los cálculos se puede notar que en los meses de enero, febrero, marzo y abril existe una menor cantidad de potencia con un intervalo de (5 a 13) kW con los generadores con aspas, de un (0.010 a 0.018) kW en los aerogeneradores por VIV y con varias unidades del generador VIV, de un (0.42 a 0.83) kW, donde se refleja la poca velocidad del viento que albergan estos meses, por otro lado en los meses mayo, junio, julio y agosto se puede notar una mejoría en la generación de potencia con un rango de (26.38 a 96.89) kW con el generador con aspas, de un (0.029 a 0.069) kW con aerogenerador resonante por VIV y con las 45 unidades tenemos un intervalo de ( 1.31 a 3.11) kW y por ultimo tenemos la generación de los últimos meses septiembre, octubre, noviembre y diciembre, donde se tuvo una potencia alrededor de (9.77 a 40.63) kW del aerogenerador con aspas, un (0.014 a 0.038) kW del generador VIV y finalmente un (0.67 a 1.74) kW con varios generadores resonantes, se puede apreciar la disminución de generación comparado con los meses anteriores pero superior con los inicios del año,

#### 4.3.10 San Cristóbal

Después de recolectar y analizar la información proporcionada por las entidades mencionadas, y tras la simulación de estas tecnologías junto con la finalización del código necesario, se organizan los resultados encontrados.

Esta organización consiste en la tabulación de los datos por mes específico en la localización concreta de San Cristóbal, transformándolos en unidades de potencia eléctrica expresadas en kilowatts. La presentación definitiva de estos resultados se efectúa en la tabla 15.

Este proceso es una fase esencial en el análisis, permitiendo una visualización clara y estructurada de la producción de energía de esta zona. Asimismo, facilita la comparación entre los diferentes meses y la observación de variaciones a lo largo del tiempo.

La tabla resultante ofrece una visión integral de la eficacia y el rendimiento de las tecnologías investigadas en el contexto de San Cristóbal, donde se determinó el modelo más sustentable en el campo de producción de energía eléctrica.

Con la información obtenida se puede notar en la tabla 15 decir que los meses de menor generación comprenden desde enero, febrero, marzo y abril con un rango de (18.53 a 35 .81) kW con el generador con aspas, un (0.035 a 0.055) kW con el aerogenerador resonante por VIV y de un (1.62 a 2.51) kW con 45 unidades del aerogenerador resonante, para los meses de mayo, junio, julio y agosto tenemos un intervalo de (126.55 a 157.46) kW con el aerogenerador con aspas, un ( 0.129 a 0.149) kW con el generador VIV y con varias unidades del generador resonante tenemos un ( 5.83 a 6.74) kW, finalmente tenemos el periodo de mayor generación comprendiendo los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre con un intervalo de (134.64 a 173.8) kW con el generador con aspas, un ( 0.134 a 0.159) con el generador VIV y un (6.07 a 7.2) con 45 unidades del generador resonante, se puede notar que en esta región la mayor generación se produce a finales del año, mientras que la menor está a principios del año .

**TABLA 15. POTENCIA ELÉCTRICA SAN CRISTÓBAL**

Mes	Potencia aerogenerador con aspas (kW)	Potencia aerogenerador por VIV(kW)	Potencia Aerogenerador resonante por VIV en un área de 210.9 m <sup>2</sup> (kW)
ENERO	35.816	0.056	2.51
FEBRERO	20.548	0.0385	1.73
MARZO	31.290	0.051	2.29
ABRIL	18.553	0.036	1.62
MAYO	126.555	0.129	5.83
JUNIO	139.858	0.138	6.23
JULIO	157.461	0.150	6.74
AGOSTO	131.593	0.133	5.98
SEPTIEMBRE	159.755	0.151	6.80
OCTUBRE	156.357	0.149	6.71
NOVIEMBRE	134.645	0.135	6.07
DICIEMBRE	173.817	0.160	7.20

Para finalizar se presenta una tabla general que contiene los resultados obtenidos de las dos zonas de estudios, presentando los tres parámetros a los fueron sometidos, conteniendo esta misma la potencia obtenida para cada mes del año, como se ilustra en la tabla 16.

**TABLA 16. RESUMEN POTENCIA ELÉCTRICA**

Mes	Villonaco			San Cristóbal		
	Potencia aerogenerador con aspas (kW)	Potencia aerogenerador por VIV(kW)	Potencia Aerogenerador resonante por VIV en un área de 210.9 m <sup>2</sup> (kW)	Potencia aerogenerador con aspas (kW)	Potencia aerogenerador por VIV(kW)	Potencia Aerogenerador resonante por VIV en un área de 210.9 m <sup>2</sup> (kW)
ENERO	5.695	0.010	0.463	35.816	0.056	2.51
FEBRERO	7.163	0.012	0.547	20.548	0.0385	1.73
MARZO	13.413	0.019	0.833	31.290	0.051	2.29
ABRIL	8.327	0.013	0.605	18.553	0.036	1.62
MAYO	26.380	0.029	1.31	126.555	0.129	5.83
JUNIO	96.897	0.069	3.11	139.858	0.138	6.23
JULIO	84.494	0.063	2.84	157.461	0.150	6.74
AGOSTO	51.276	0.045	2.04	131.593	0.133	5.98
SEPTIEMBRE	40.636	0.039	1.74	159.755	0.151	6.80
OCTUBRE	13.765	0.019	0.846	156.357	0.149	6.71
NOVIEMBRE	17.078	0.021	0.978	134.645	0.135	6.07
DICIEMBRE	9.778	0.015	0.674	173.817	0.160	7.20

Se puede apreciar la enorme diferencia en la capacidad de generación eléctrica de ambas tecnologías, esto se explica en la forma de generación, mientras que los aerogeneradores con aspas tienen una conversión mecánica-eléctrica captando la dirección del viento a grandes alturas activando un generador, los generadores VIV contienen una generación oscilatoria, donde su principal ventaja radica en la captación del viento por medio de fluctuaciones las cuales se pueden encontrar con mayor frecuencia y a cualquier altura, dando a entender que su capacidad de generación eléctrica radica en un autoconsumo, con parámetros con mayor afluencia de viento y menor densidad del mismo.

#### **4.4 Análisis de ventaja y desventaja**

En este apartado se presenta un análisis que abarca toda la investigación. Tras examinar detalladamente los resultados tabulados, se lleva a cabo un análisis de las ventajas y desventajas de los dos aerogeneradores.

Finalmente, se presenta una breve propuesta centrada exclusivamente en la adaptación de estas tecnologías para la conversión de energía eólica a energía eléctrica en los sitios de estudio.

Este análisis busca identificar los puntos fuertes y las limitaciones de cada aerogenerador, para dar una visión clara sobre su viabilidad y aplicabilidad en el contexto específico de la investigación.

La propuesta formulada se basa en los hallazgos obtenidos en el estudio y pretende ofrecer recomendaciones concretas para mejorar el uso de energías renovables y una alternativa para aprovechar el recurso eólico.

##### **4.4.1 Comparativa entre ambas tecnologías**

A continuación, se detallan las ventajas y desventajas de los aerogeneradores eólicos con aspas y resonantes por VIV, utilizando como base los modelos específicos empleados en el estudio.

Estos aspectos se organizaron en una tabla que incluye los parámetros del dispositivo, la potencia generada, así como las ventajas y desventajas de cada uno.

El propósito de esta comparación es proporcionar una visión completa y estructurada de las características clave de ambos tipos de aerogeneradores, llegando a comprender mejor sus diferencias y tomar decisiones informadas en cuanto a su implementación.

La inclusión de esta tabla facilitará la evaluación y la comparación directa de las características de los aerogeneradores, lo que contribuirá significativamente a la comprensión de su desempeño, este análisis se encuentra detallado en la tabla 17.

**TABLA 17. VENTAJA Y DESVENTAJA AEROGENERADORES**

	Aerogenerador resonante por VIV	Potencia aerogenerador con aspas
Dispositivo	Atlantis	Goldwind GW 70-1500
Característica	Captar energía eólica mediante un mástil, sin palas y una generación eléctrica mediante inducción electromagnética.	Captación del viento mediante palas horizontales a grandes alturas, generación eléctrica mediante un alternador que capta el movimiento de las palas.
Potencia	Potencia nominal de 10kW	Potencia nominal de 1500kW
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estos contienen un diseño sencillo y fácil de implementar reduciendo el tiempo de instalación, eliminando la necesidad de piezas giratorias.</li> <li>• La sencillas de estos sistemas implican un menor costo de mantenimiento, así mismo se lo puede combinar con dispositivos recolectores piezoeléctricos, adecuándolos para ser recolectores de energía a pequeña escala.</li> <li>• Estos tipos superan restricciones a comparación de los aerogeneradores típicos, disminuyendo las emisiones de ruido y la contaminación visual en su entorno.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contienen un diseño que evita la implementación de una caja de cambios, sustituyéndola por un imán permanente resultando en una alta eficiencia a la hora de generar.</li> <li>• Gastos de mantenimiento mínimos por la presencia de una única pieza móvil en el sistema de transmisión, con confianza alta por su diseño proveniente de fallos habituales, mejorando la fiabilidad del sistema.</li> <li>• Está dotado de un sistema sofisticado de control de ángulo de paso, con el mismo aumenta el rendimiento operativo con la integración a la red eléctrica.</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se destaca la reducción de eficiencia, dado que estas muestran una alta eficiencia únicamente en rangos específicos de velocidad de viento con frecuencias de vórtices alineados directamente al mástil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dado la necesidad de maximizar el rendimiento en otros campos, su operación está limitada a un rendimiento máximo de 1500 kW, bajando su trabajo, en comparación de otros modelos.</li> </ul>

- 
- Las fluctuaciones con las que se trabajan en la formación de los vórtices pueden provocar complicaciones de fatiga en la turbina si el diseño no es adecuado
  - Dado que estos generadores no han sido un objeto de investigación ni desarrollo tan extenso, podría presentar problemas a la hora de implementación y mantenimiento.
  - Dado que en sus componentes incluye un generador con imanes permanentes, esto puede afectar el precio del coste inicial por la característica del modelo.
  - Esta turbina al contener un accionamiento directo presenta góndolas de mayor tamaño y peso, lo que conlleva a una mayor estrategia a la hora de transportarlos.
- 

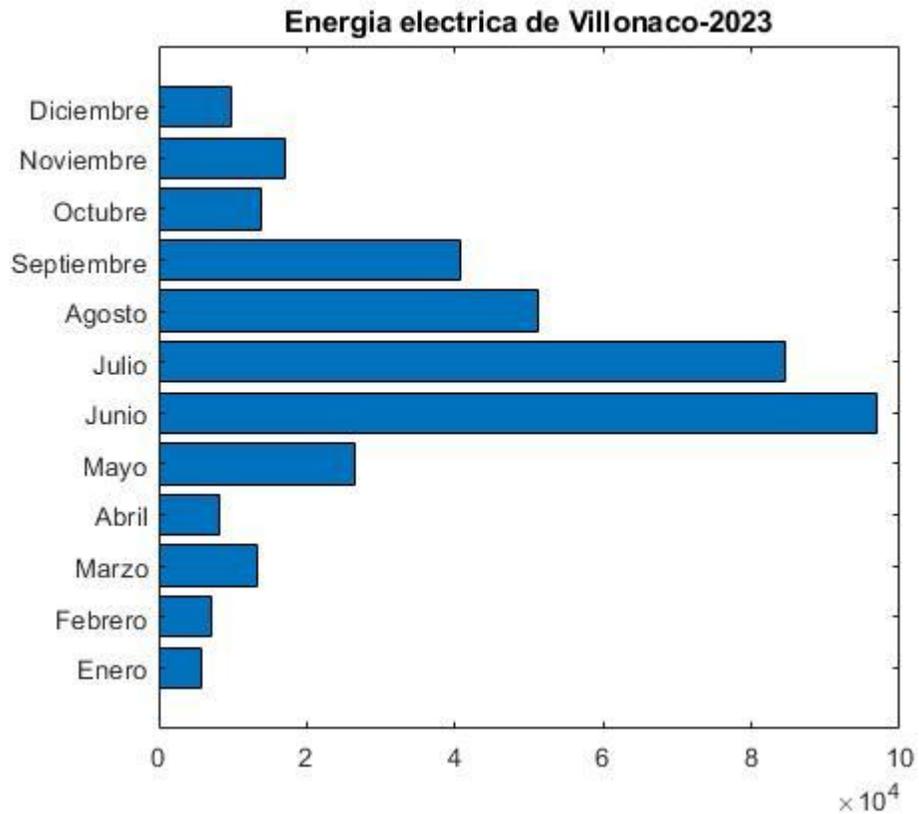
#### **4.4.2 Propuesta Villonaco**

En la región situada en Azuay, se ha observado un aprovechamiento de fuentes de energía renovable. Específicamente, se ha promovido la generación de energía a través de turbinas eólica con aspas.

Los cálculos previos revelan que estas turbinas tienen una alta capacidad de generación de electricidad, lo que es evidente en la figura 22.

Este hallazgo subraya la viabilidad de la energía eólica como una opción sustentable para la producción de electricidad en Villonaco. La implementación de esta tecnología contribuye a la diversificación de la matriz energética. La figura mencionada demuestra la potencialidad de las turbinas eólicas con aspas.

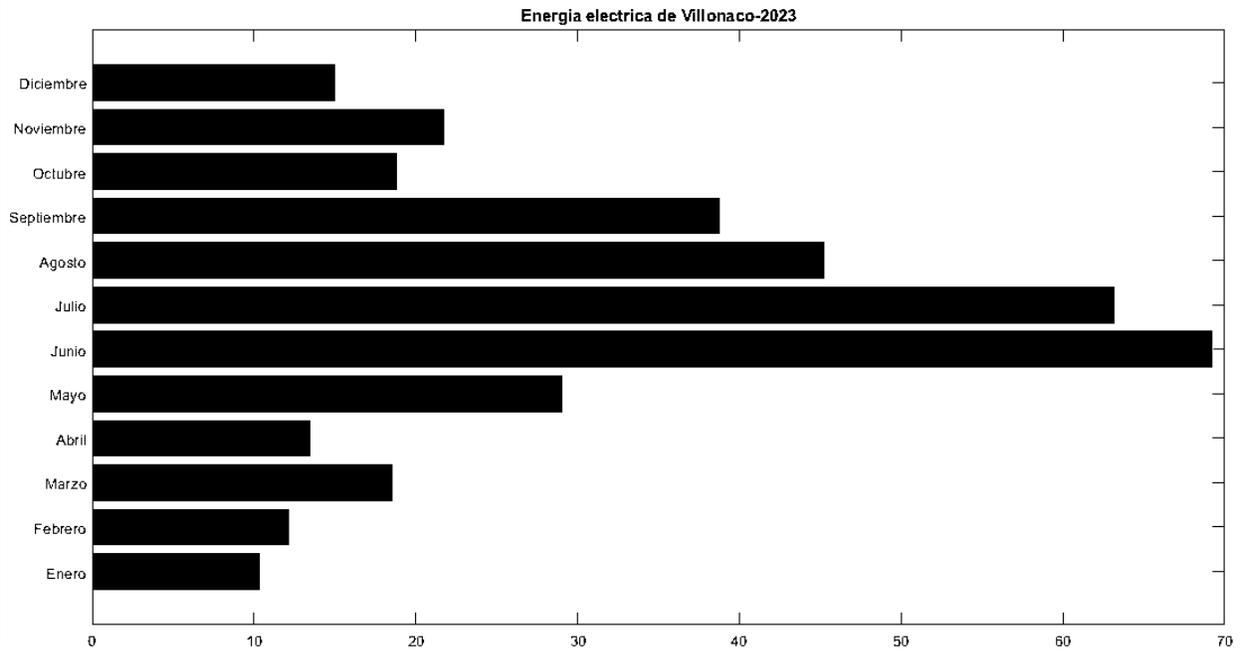
Finalmente se puede notar las diferencias de estos dos generadores, donde los generadores resonantes tienden a ser generadores autónomos debido a sus pocos componentes y su diseño el cual permite captar la mayoría del viento sin importar su altura, además se puede acoplar a otros sistemas de autoabastecimiento como complemento del mismo, siendo un ejemplo un sistema híbrido con un generador solar, incrementando su eficiencia y cumplimentando la falta de generación por baja radiación.



**Figura 22.** Diagrama de la potencia eléctrica aerogenerador con aspas Villonaco del año 2023

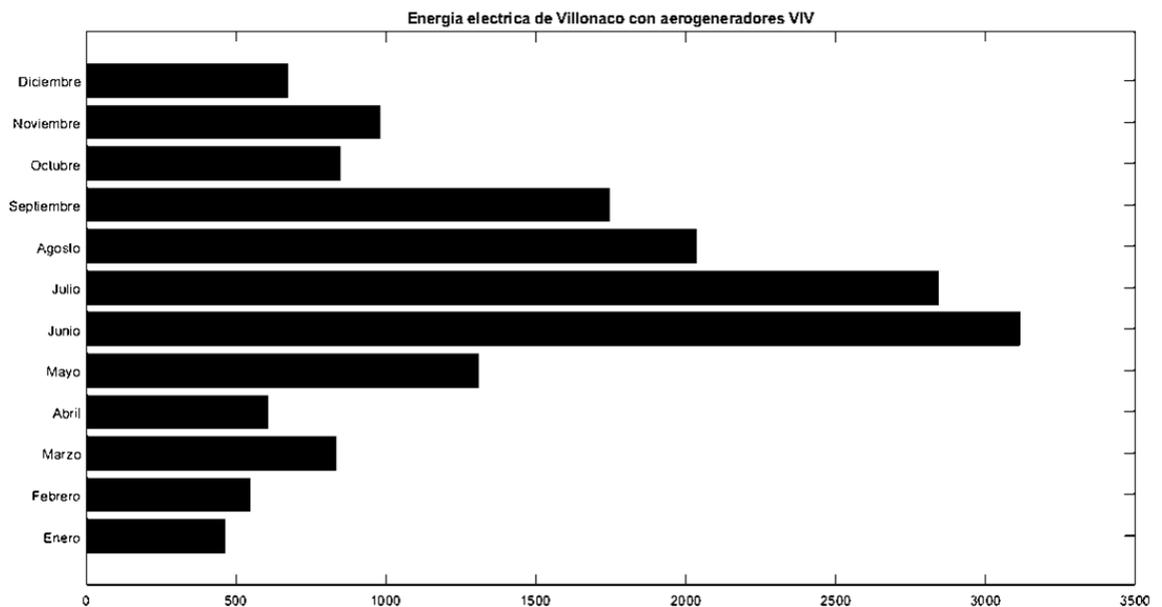
Dado el potencial eólico de esta región se ha simulado una nueva tecnología emergente para evaluar su potencial.

Esta tecnología fue sometida a pruebas en condiciones que replican los parámetros ambientales específicos de Villonaco. Los resultados de la simulación, representados en la figura 23, indicaron que la generación de energía eléctrica fue menor que los resultados del aerogenerador con aspas.



**Figura 23.** Diagrama de la potencia eléctrica aerogenerador resonante por VIV Villonaco del año 2023

Se procedió a realizar un análisis comentario, utilizando los datos obtenidos de potencia eléctrica del sector y multiplicándolos por 45 unidades designadas en el área propuesta.



**Figura. 24.** Diagrama de la potencia eléctrica aerogeneradores resonantes por VIV Villonaco del año 2023

Esta tendencia de baja producción energética es consistente con los datos presentados en la figura 22, aunque los valores obtenidos fueron significativamente inferiores.

Es importante destacar que, durante el estudio, factores como las variaciones de presión atmosférica y la elevación a la que se implementó el aerogenerador resultaron ser elementos decisivos para la precisión de los cálculos realizados.

Estos hallazgos sugieren que, aunque la región posee un potencial eólico, la implementación de esta nueva tecnología en el entorno actual no logra aprovecharlo de manera óptima, lo que señala la necesidad de ajustes en el diseño o en la estrategia de implementación para mejorar la eficiencia de la generación de energía.

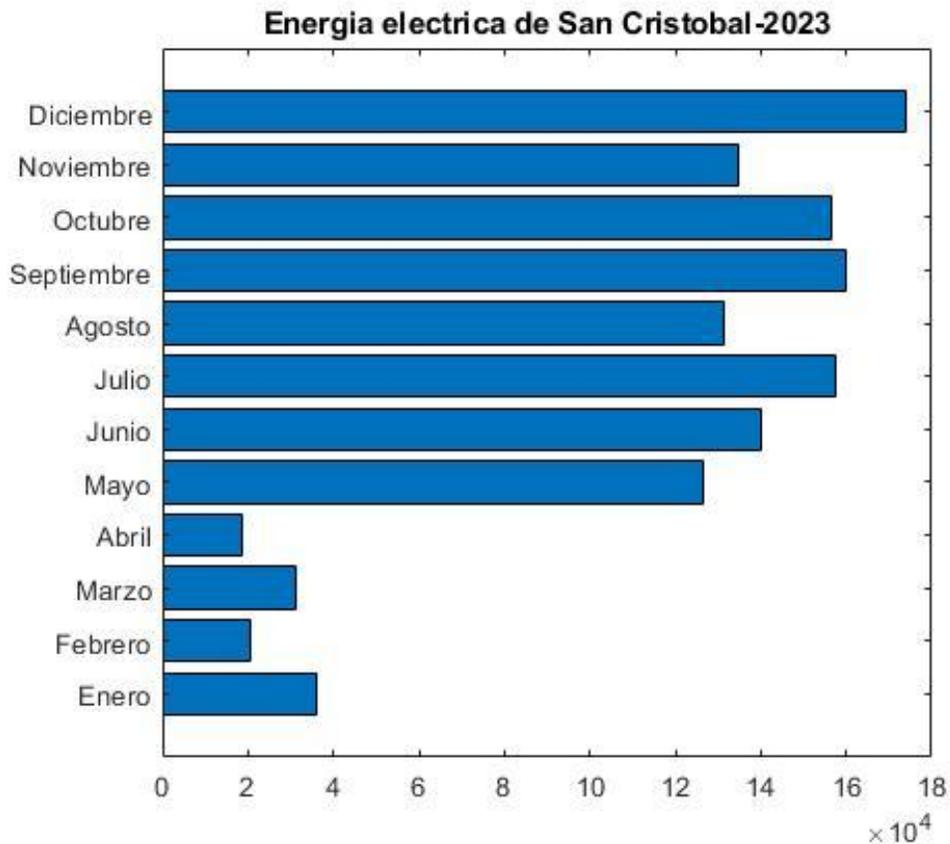
Con la evidencia proporcionada por la figura 22, la figura 23 y la figura 24, se confirma que el uso de aerogeneradores con aspas sigue siendo la tecnología que satisfacer las necesidades energéticas de la provincia.

#### **4.4.3 Propuesta San Cristóbal**

En el archipiélago de Galápagos, la disposición geográfica de sus islas aumenta la posibilidad de que cada una pueda ser autosustentable.

Se destaca que esta región no forma parte del SNI, lo que resalta la importancia de encontrar fuentes de energía alternativas. En este escenario, la energía generada por el viento se presenta como una solución prometedora. Basándose en esta premisa, se llevaron a cabo simulaciones utilizando un aerogenerador con aspas, en la isla de San Cristóbal.

Los estudios ambientales específicos de la zona permitieron concluir que la generación de energía eléctrica mediante esta tecnología resulta ser considerablemente alta, tal como se demuestra en la figura 25.

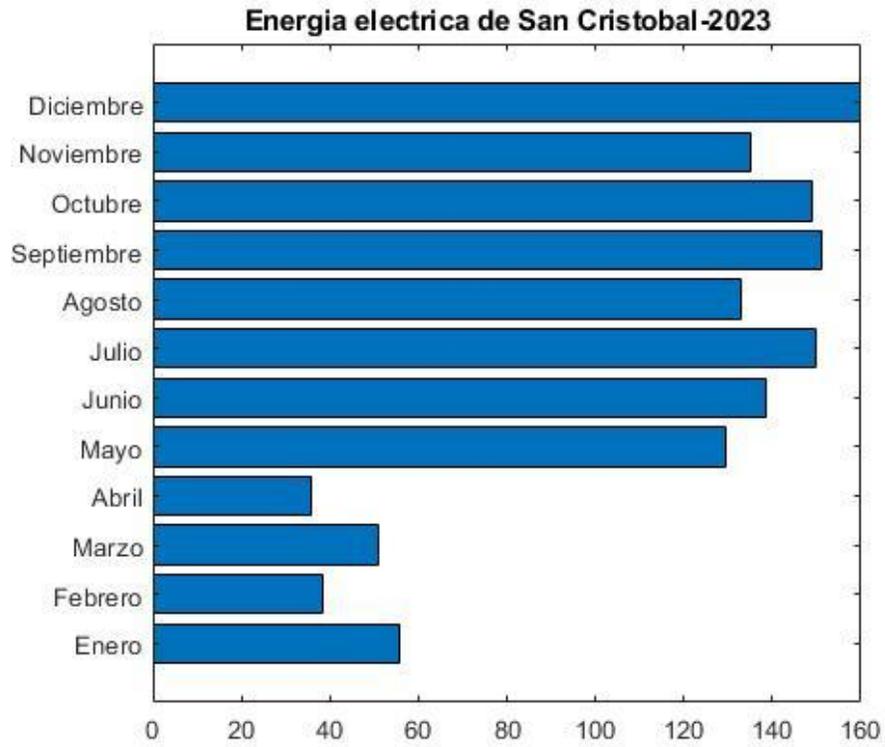


**Figura 25.** Diagrama de la potencia eléctrica aerogenerador con aspas San Cristóbal del año 2023

Basado en la información previa y la evaluación satisfactoria para las energías renovables, se consideró la implementación de un aerogenerador resonante por VIV.

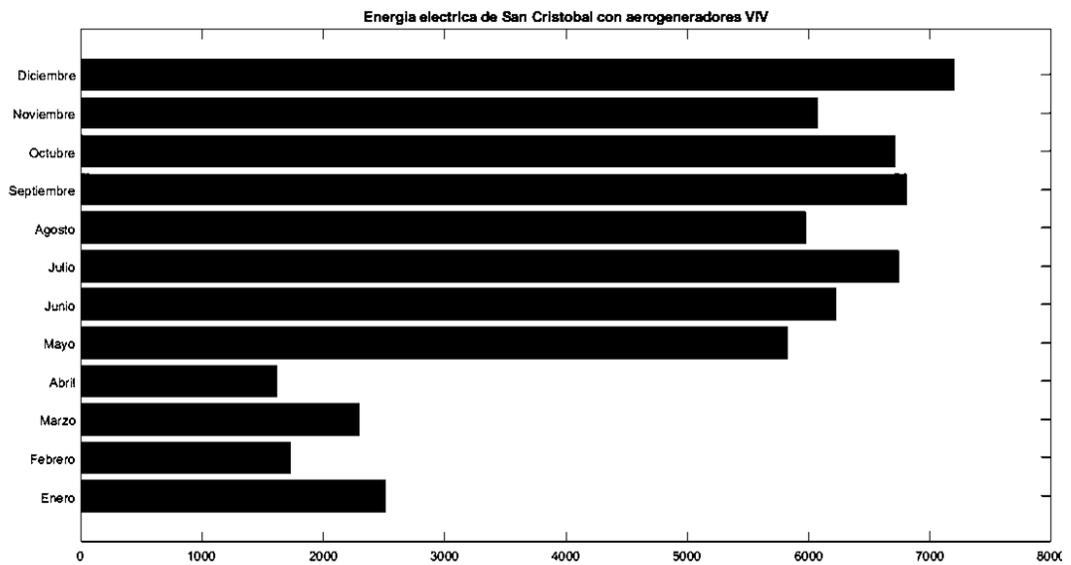
Este proceso se presentó como una opción favorable para la preservación de las especies en el área seleccionada. Se llevó a cabo la simulación de un modelo que integraba los parámetros ambientales del sitio para determinar la producción de energía eléctrica.

Los cálculos revelaron que la eficiencia de generación de este nuevo tipo de aerogenerador era significativamente inferior en comparación con los aerogeneradores tradicionales de aspas. A pesar de esto, se observó una consistencia en el comportamiento mensual, mostrando patrones similares en la generación de energía eléctrica, aunque con variaciones en el potencial eléctrico producido, como se ilustra en la figura 26.



**Figura 26.** Diagrama de la potencia eléctrica aerogenerador resonante por VIV San Cristóbal del año 2023

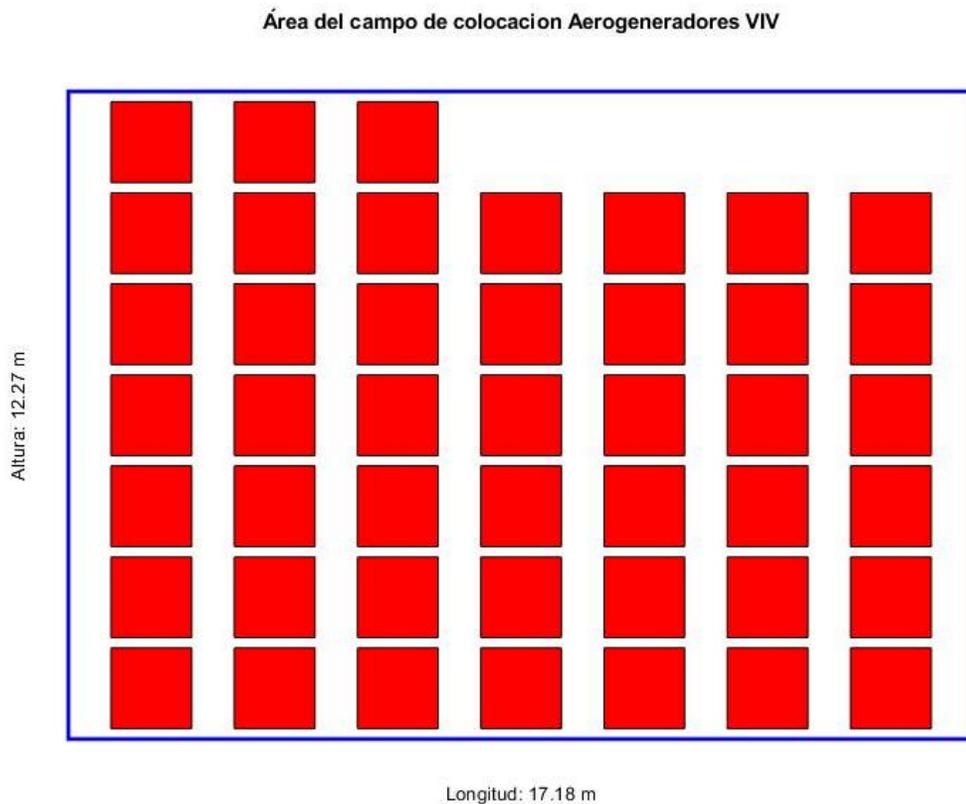
Se procedió a la evaluación de esta tecnología con los datos obtenidos de potencia eléctrica del sector y multiplicándolos por 45 unidades designadas en el área propuesta como se ilustra en la figura 27.



**Figura 27.** Diagrama de la potencia eléctrica aerogenerador resonante por VIV San Cristóbal del año 2023

Con la información presentada en las figuras 25, 26 y 27, se determinó que en esta ubicación un aerogenerador eólico sigue siendo la principal tecnología de conversión eólica a energía eléctrica a gran escala, dado sus altos resultados, por otro lado, desde un punto de vista ambiental se podría decir que el aerogenerador resonante por VIV sale como una alternativa válida para una generación en pequeña escala recordando que, para esta tecnología, varía de acuerdo con su altura y su diámetro.

Para finalizar este análisis se localizó los aerogeneradores resonantes por VIV, considerando el área designada de estudio, con un código se propuso ubicar las 45 unidades, proponiendo un campo de 12.27m de largo y 17.18 de ancho, con 3 columnas de 7 unidades y 4 filas con 6 unidades, como se muestra en la figura 28.



**Figura 28.** Diagrama de colocación de los aerogeneradores resonantes por VIV

Para la obtención del rendimiento se procedió a realizar la sumatoria de cada variable representada, después se calcula la diferencia dependiendo del caso, encontrando el promedio del total con la diferencia se procede a realizar el cálculo de rendimiento dividiendo el total sobre el promedio y multiplicándolo por 100.

Con los datos obtenidos de cada región de estudio se procedió a tabular la diferencia de la potencia generada con cada tecnología dando como resultando los datos de la tabla 18.

**TABLA 18. RENDIMIENTO AEROGENERADORES**

Villonaco	Potencia aerogenerador con aspas (kW)	Potencia aerogenerador por VIV (kW)	Potencia Aerogenerador resonante por VIV en un área de 210.9 m <sup>2</sup> (kW)
Total	374.904	0.355	15.986
Diferencia	374.549		358.918
Promedio	187.630		195.445
Rendimiento	50.095 %		54.454 %
San Cristóbal			
Total	1286.249	1.327	59.71
Diferencia	1284.922		1226.539
Promedio	643.788		672.979
Rendimiento	50.103%		54.868%

Se puede apreciar la enorme diferencia entre ambos tipos de aerogeneradores a la hora de la generación eléctrica. Dado que la nueva tecnología induce oscilaciones produciendo energía eléctrica a través de inducción electromagnética, definiendo que en cada lugar de estudio se mantenga los aerogeneradores tradicionales, optando por el uso de la nueva tecnología en un caso de autoconsumo y en un lugar con una mayor afluencia de viento y menor densidad del mismo.

Se espera que esta propuesta contribuya a optimizar el uso de las tecnologías evaluadas y a promover su implementación exitosa en los lugares requeridos, aprovechando al máximo el potencial de la energía eólica como fuente de energía renovable.

## Conclusiones

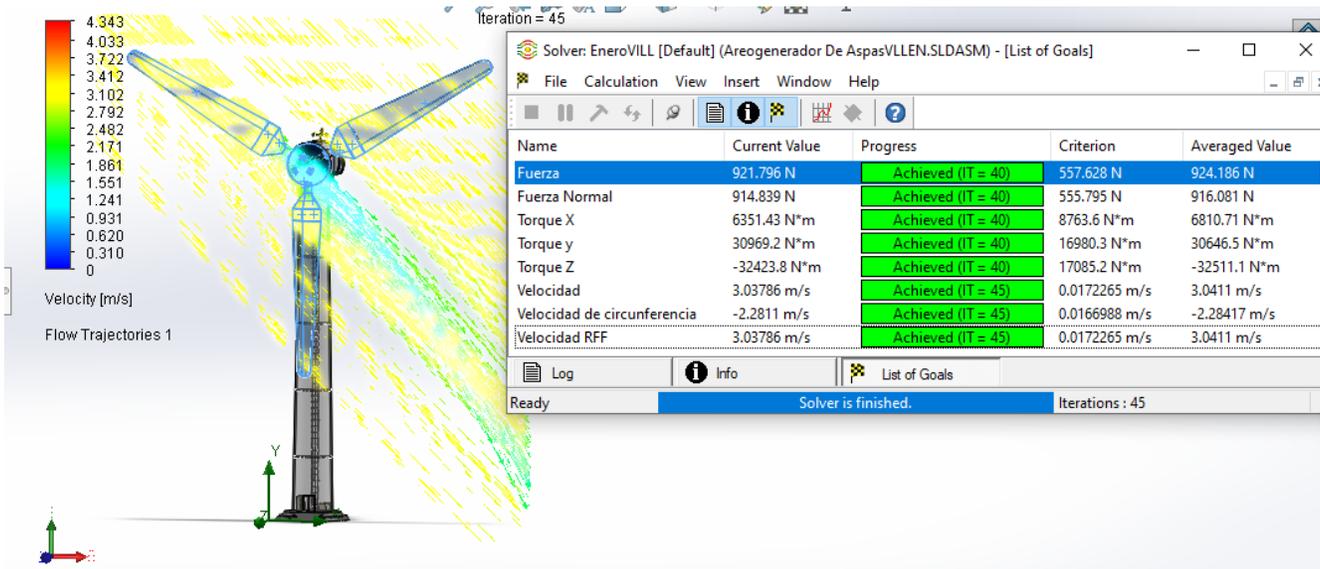
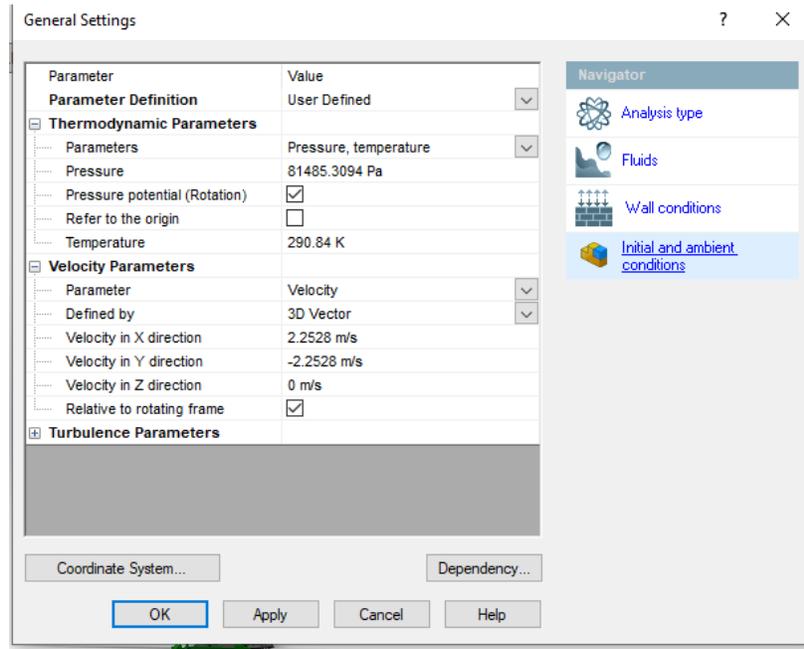
1. La investigación detallada ha revelado que los aerogeneradores eólicos resonantes por VIV se fundamentan en la captura de energía mediante la vibración inducida por el flujo de aire, diseñados de una manera diferente y con menos componentes, mientras que los aerogeneradores convencionales emplean aspas para la conversión directa de la energía del viento en energía eléctrica, aumentando su robustez, agregando más componentes. A pesar de sus diferencias fundamentales, ambos sistemas comparten el objetivo de aprovechar la energía eólica para generar electricidad, si bien sus enfoques y mecanismos de funcionamiento son distintos.
2. Tras analizar diversas simulaciones, se determina que la capacidad energética de ambas tecnologías está influenciada por factores clave como la velocidad del viento, la altura de los aerogeneradores, la densidad del aire. Además, se observó que los aerogeneradores resonantes con VIV muestran una menor capacidad de generación eléctrica alrededor de 0.35 kW, siendo más pequeño que su contraparte, con un dimensionamiento de 4.68m<sup>2</sup>, con la ventaja que se pueden colocar varios generadores en un área amplia, mientras que los aerogeneradores convencionales son más idóneos en la generación eléctrica con una capacidad de 348.52 kW, debido a la geometría y diseño de las aspas con un área de 210.9m<sup>2</sup>. Estos resultados reflejan la capacidad energética de cada tecnología.
3. Al evaluar las ventajas y desventajas de ambas tecnologías en el contexto específico del Ecuador, se concluye que los aerogeneradores resonantes con VIV ofrecen una menor eficiencia en condiciones de presión atmosférica y de baja velocidad de viento, características comunes en muchas regiones ecuatorianas con una capacidad de energía de alrededor de un 50.1% menor que el aerogenerador convencional, mientras tanto, los aerogeneradores convencionales con aspas mantienen una ventaja en los términos de eficiencia y capacidad energética con un rendimiento superior del 50.103%. Además, se identifica que la variabilidad estacional del viento en el Ecuador puede afectar de manera diferencial el rendimiento de cada tecnología, lo que destaca la importancia de adaptar la elección tecnológica a las condiciones específicas de cada ubicación, esta tecnología se puede acoplar a otros sistemas de autoabastecimiento como complemento del mismo, siendo un ejemplo un sistema híbrido con un generador solar, incrementando su eficiencia y cumplimentando la falta de generación por baja radiación.

## **Recomendaciones**

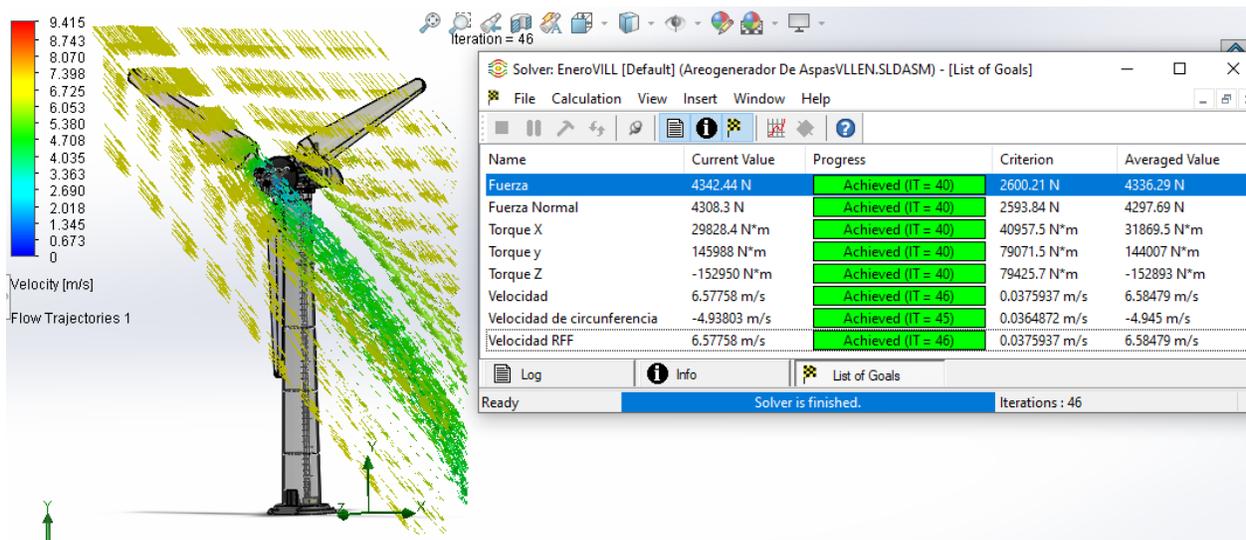
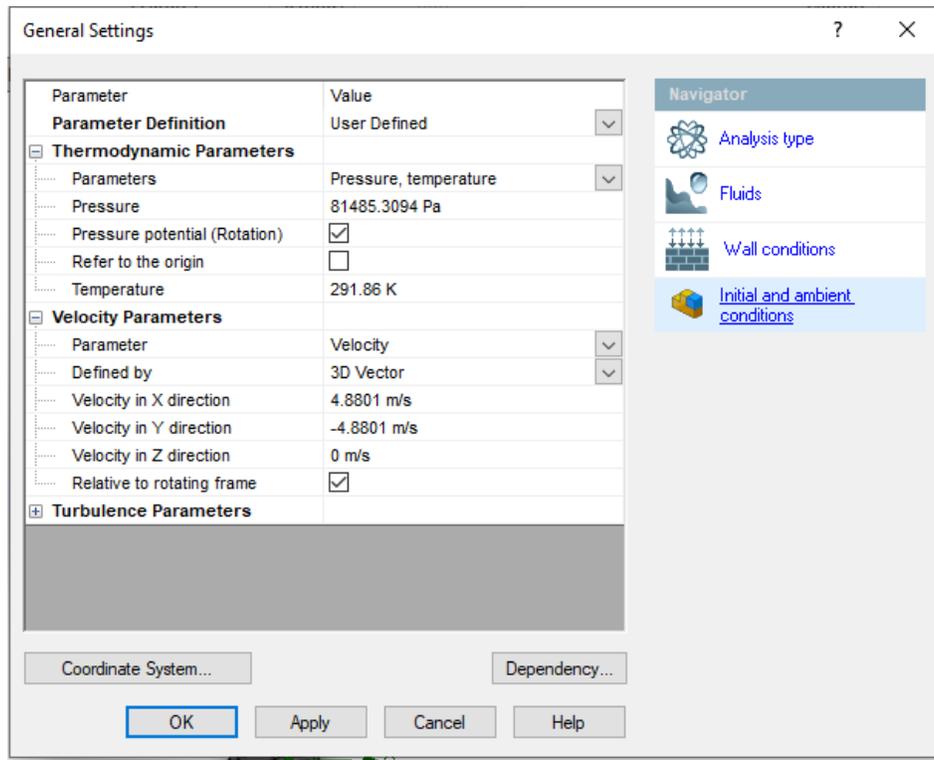
Realizar un análisis detallado de las condiciones climáticas y de viento en diferentes regiones del Ecuador, considerando variables como la velocidad y dirección del viento de la topografía local. Presentar los resultados de manera clara y objetiva, destacando tanto los beneficios como las limitaciones de cada tecnología en diferentes condiciones de viento.

# Anexos

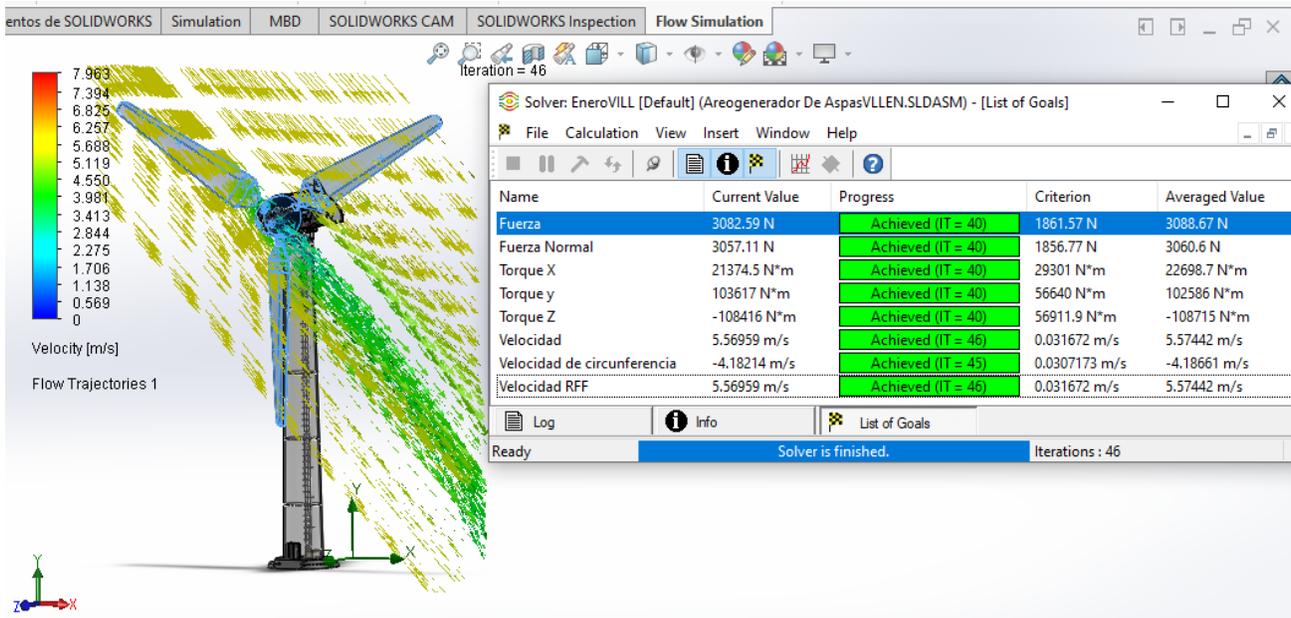
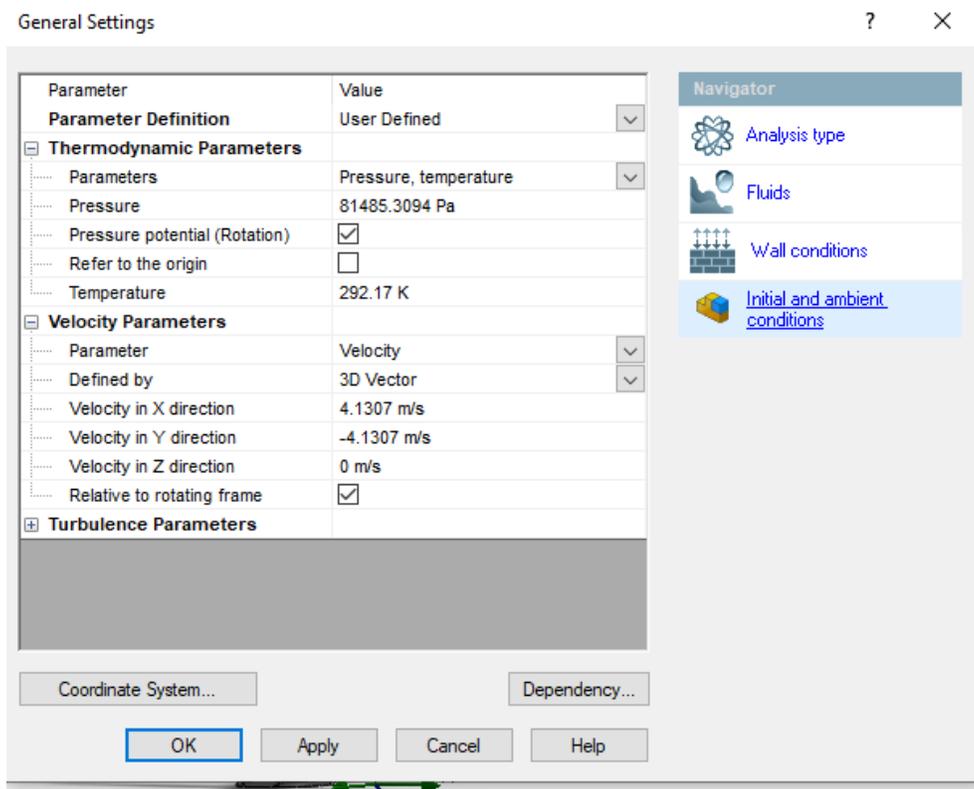
## Anexo 1. Simulación aerogenerador con aspas Villonaco mes de abril



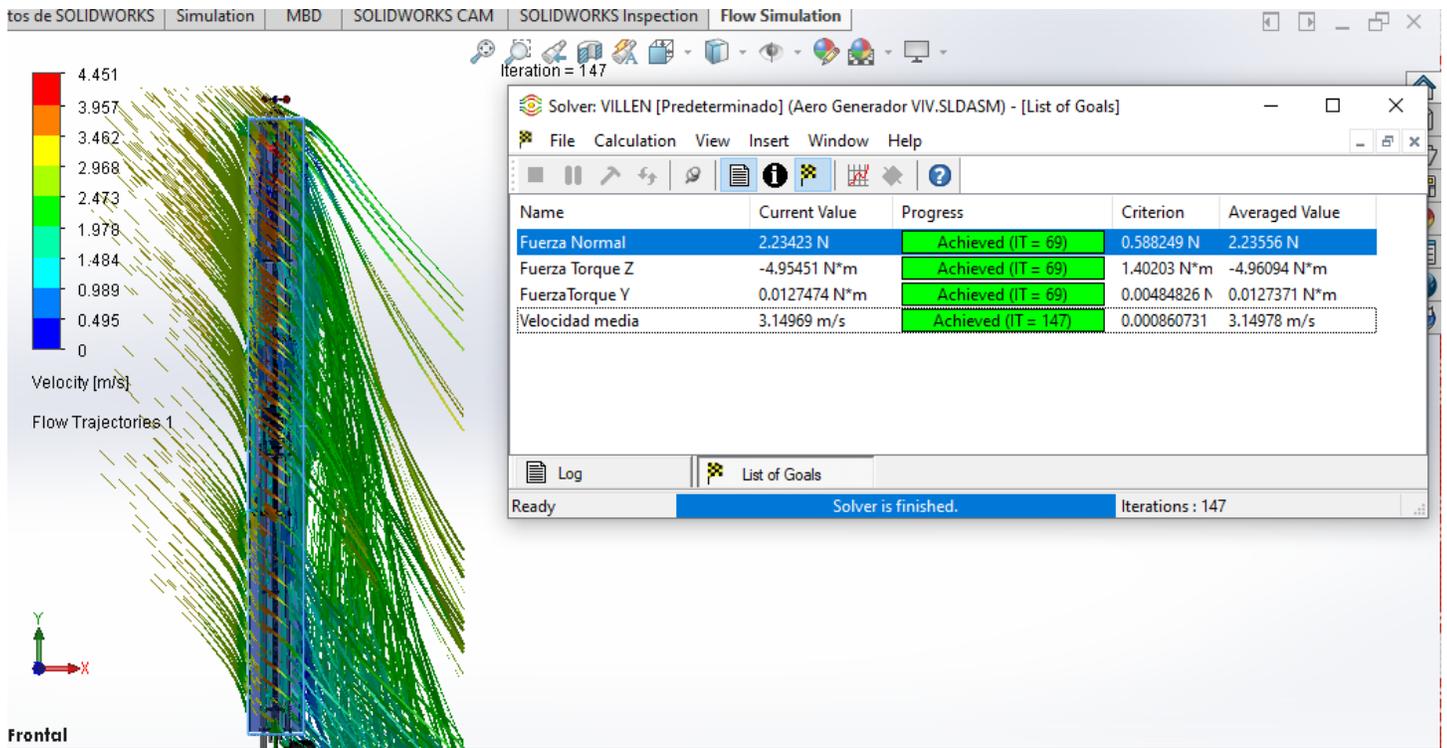
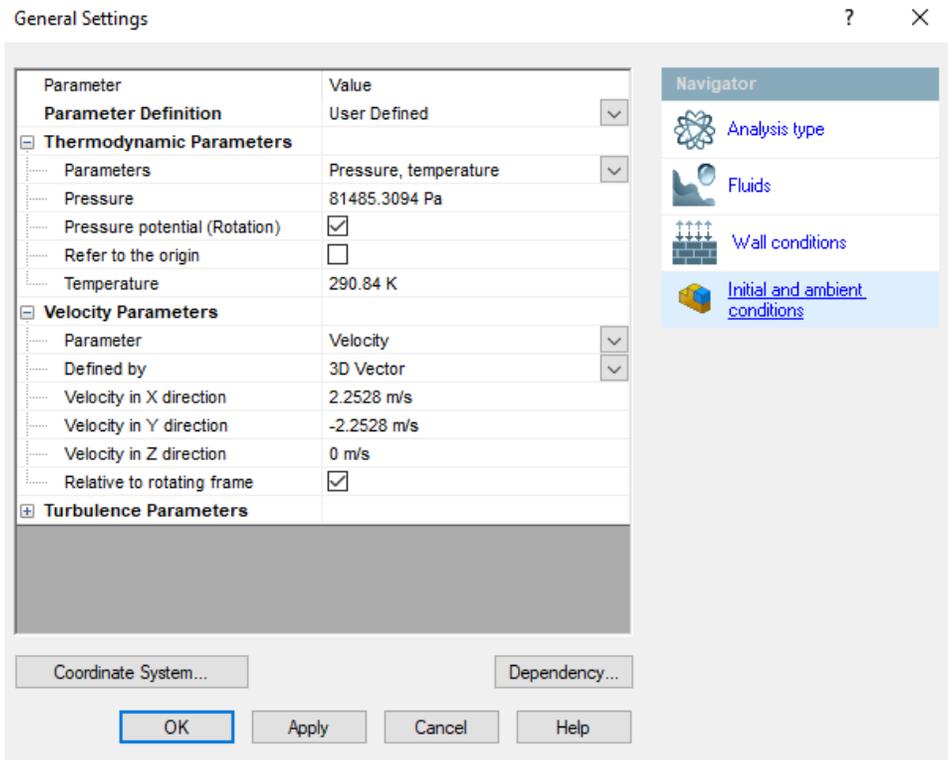
Anexo 2. Simulación aerogenerador con aspas Villonaco mes de julio



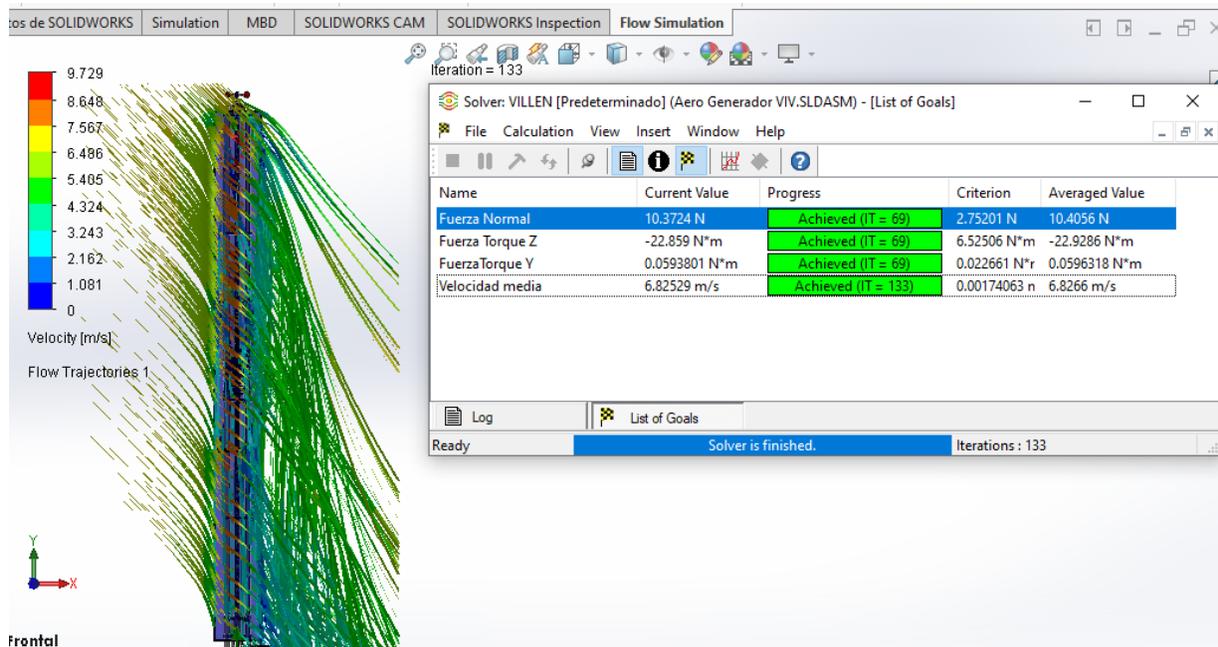
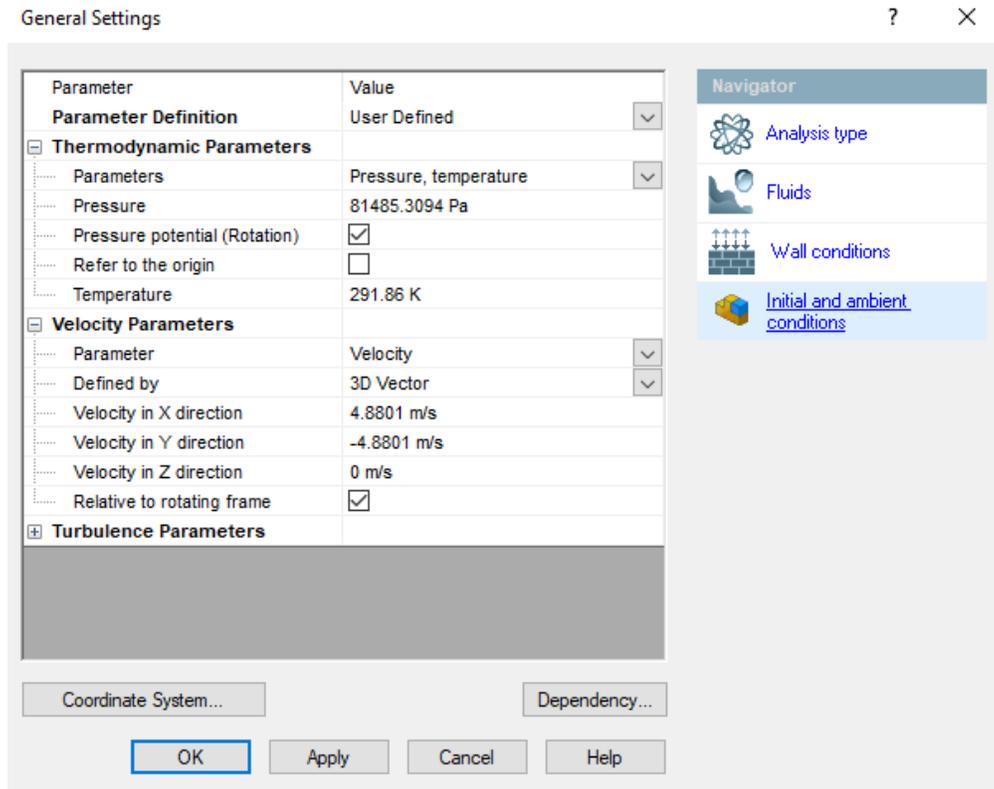
### Anexo 3. Simulación aerogenerador con aspas Villonaco mes de agosto



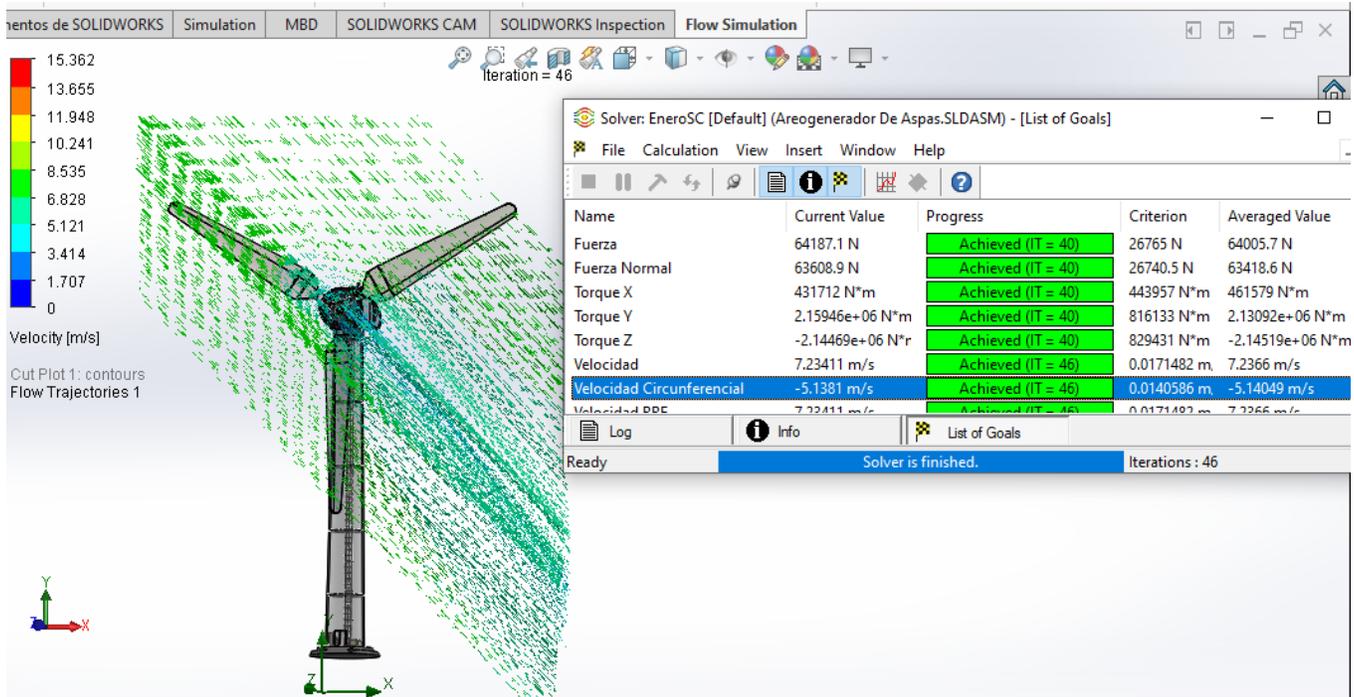
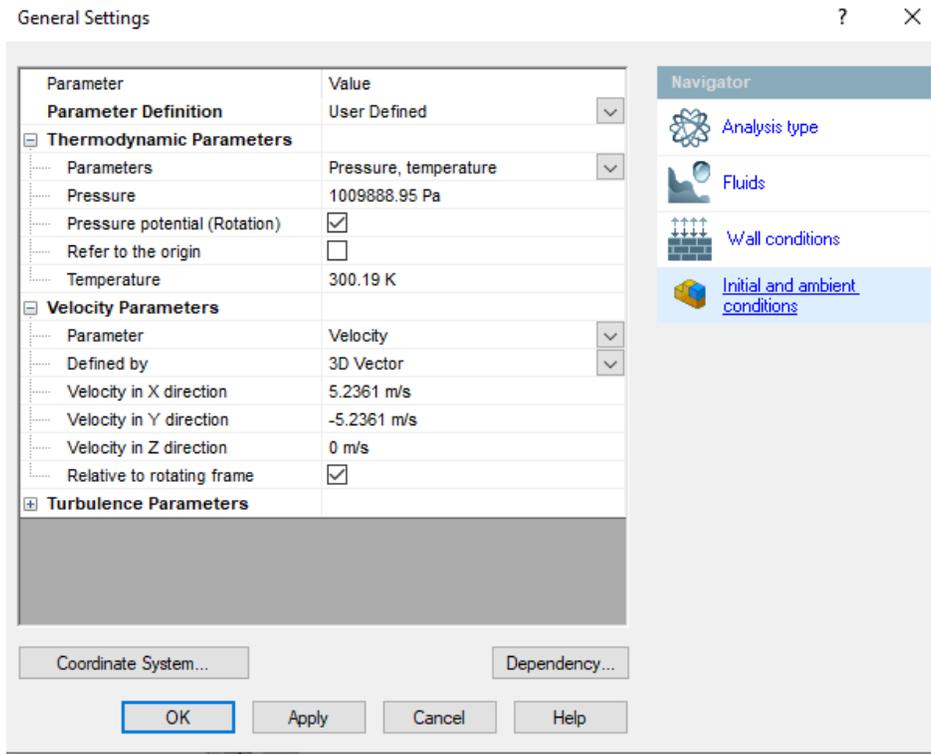
Anexo 4. Simulación aerogenerador resonante por VIV Villonaco mes de abril



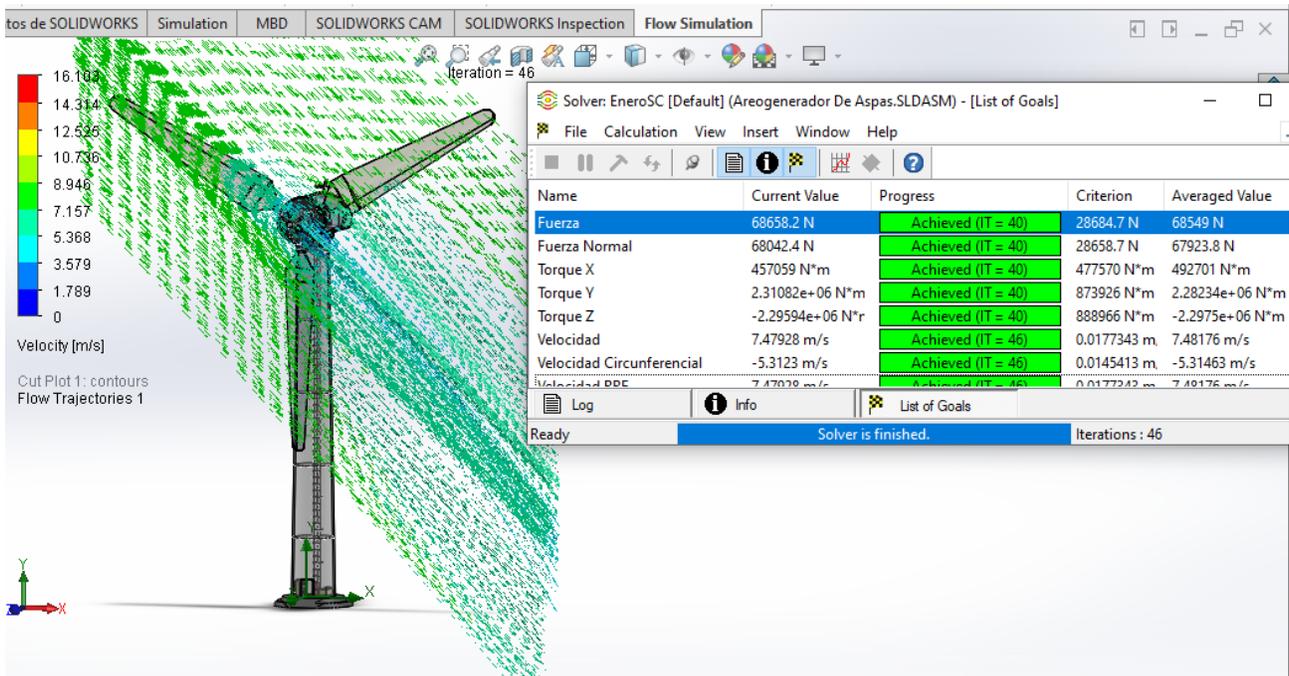
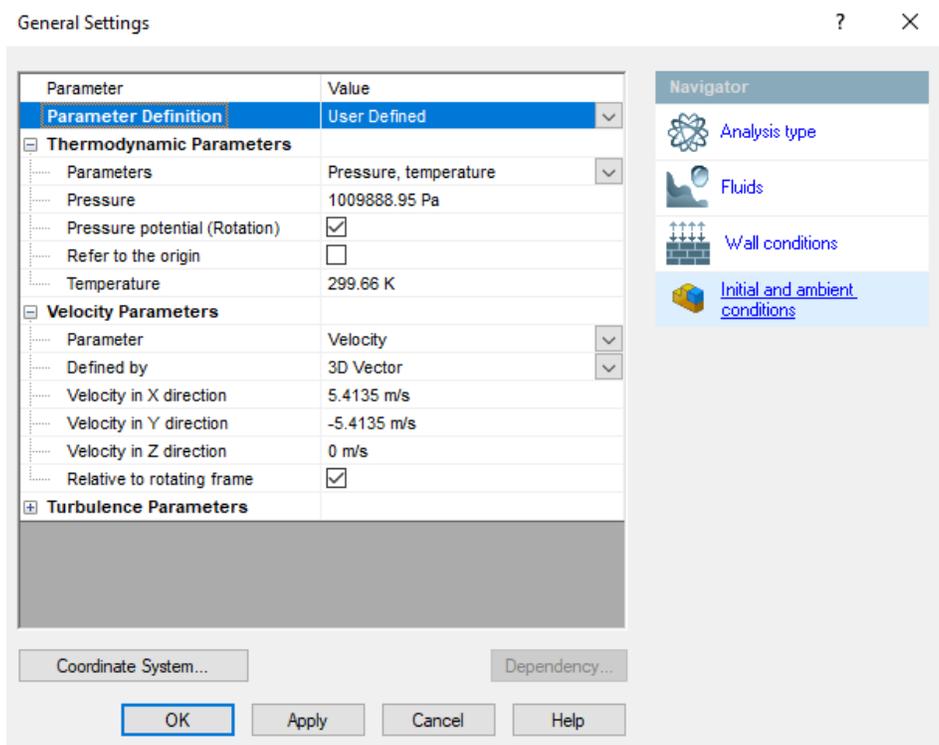
Anexo 5. Simulación aerogenerador resonante por VIV Villonaco mes de julio



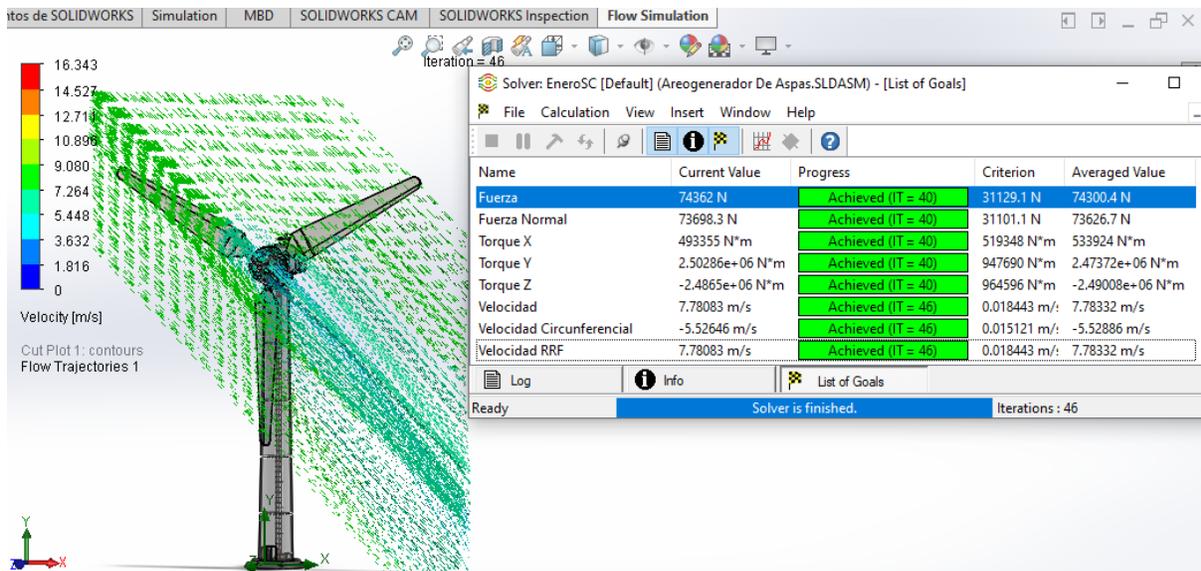
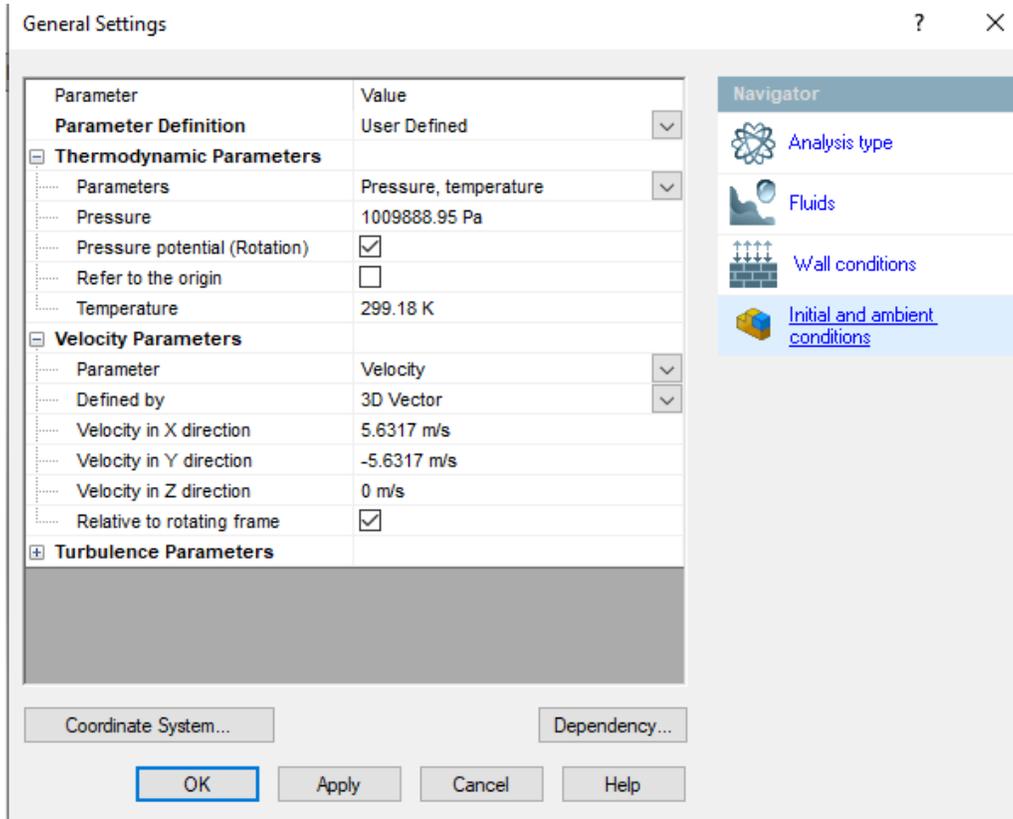
Anexo 6. Simulación aerogenerador con aspas San Cristóbal mes de mayo



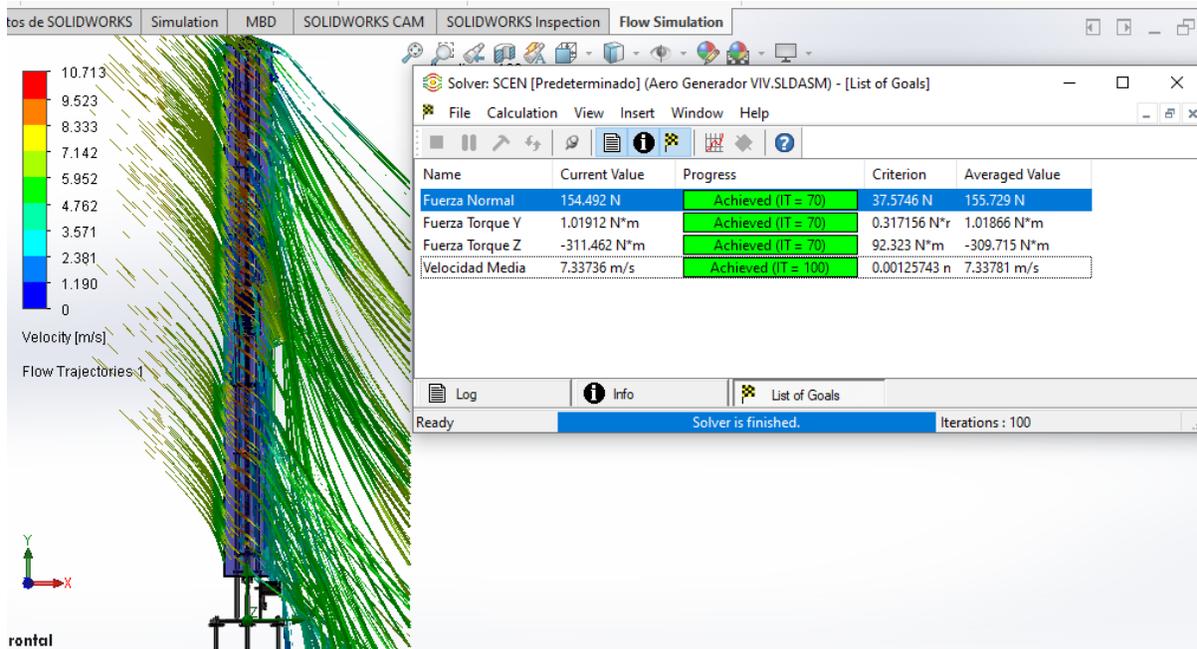
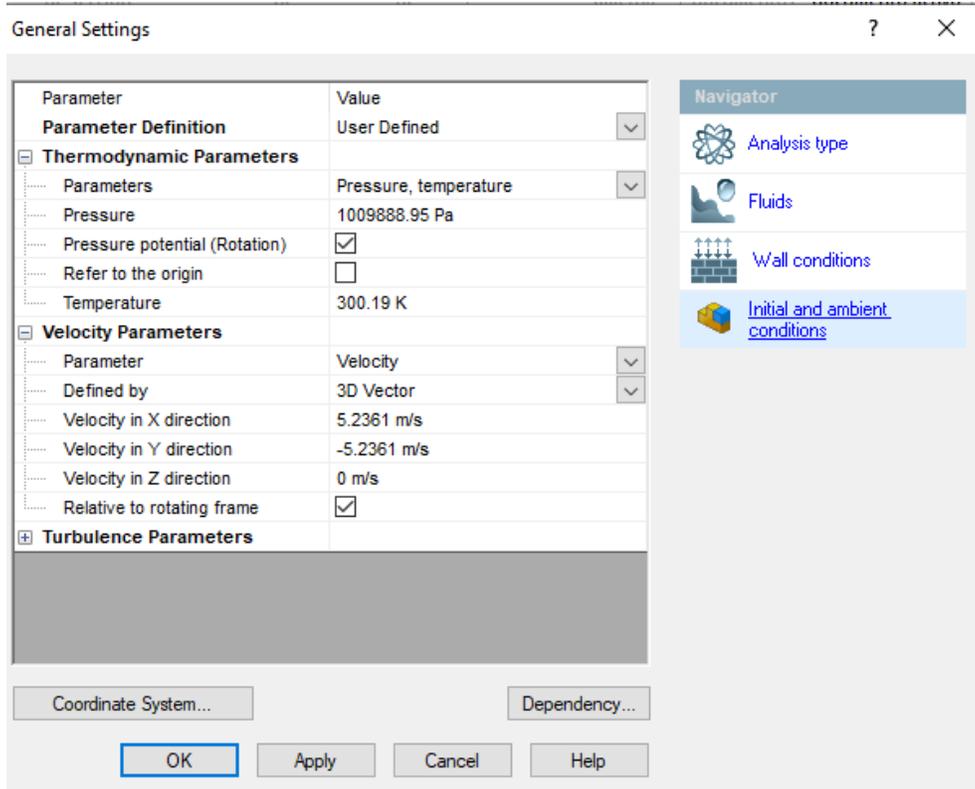
Anexo 7. Simulación aerogenerador con aspas San Cristóbal mes de junio



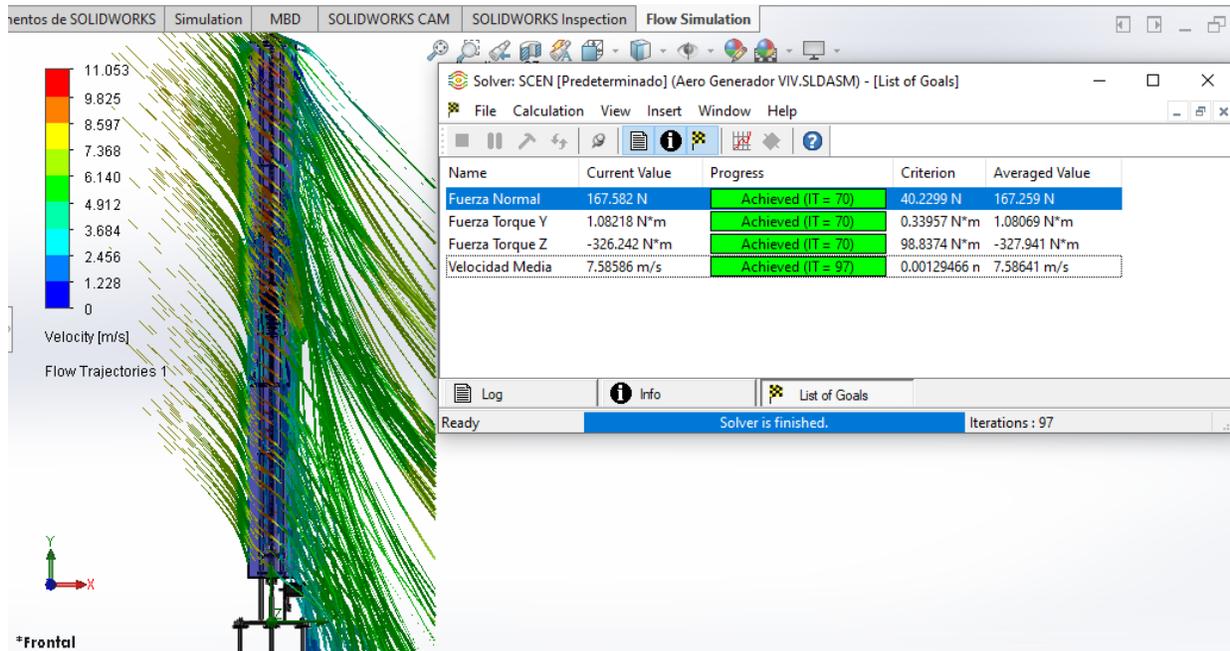
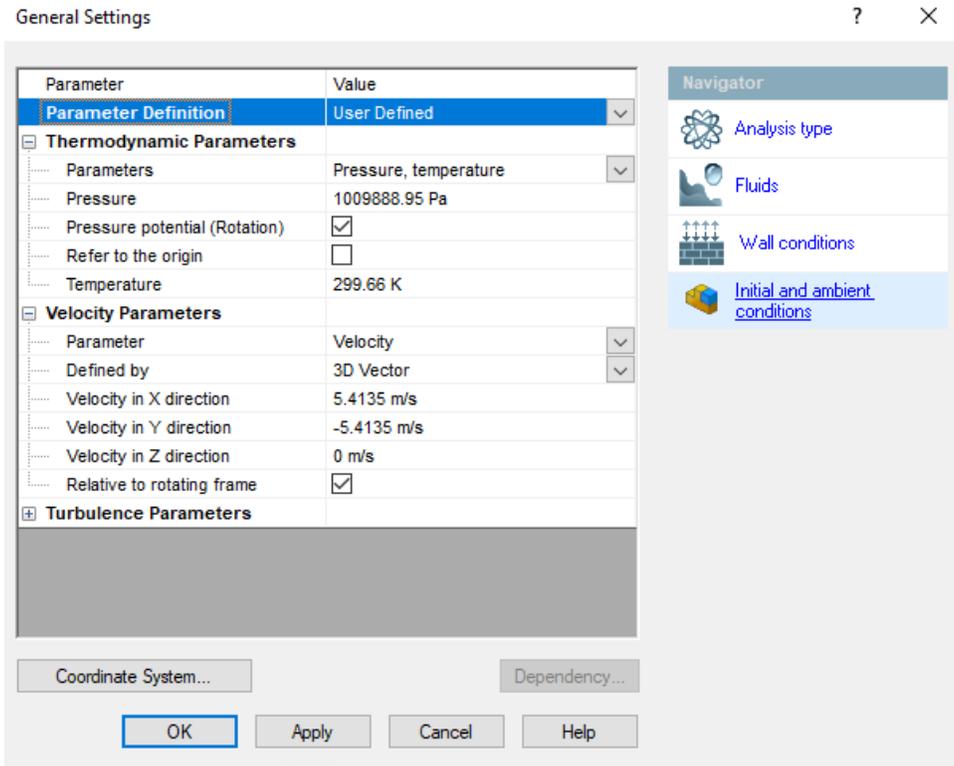
Anexo 8. Simulación aerogenerador con aspas San Cristóbal mes de julio



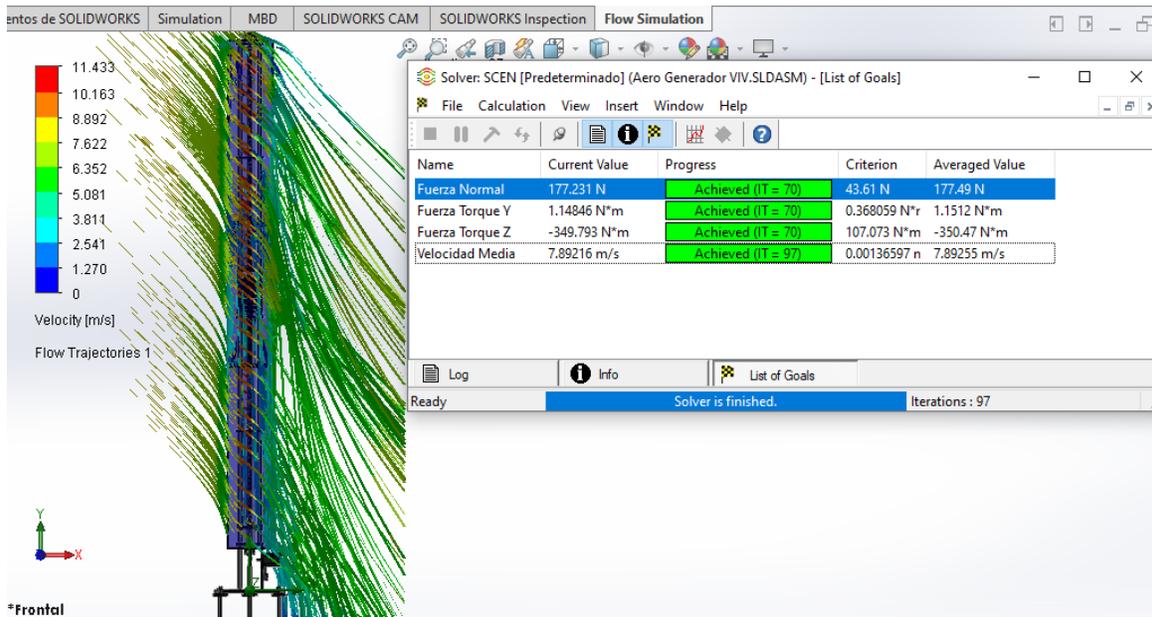
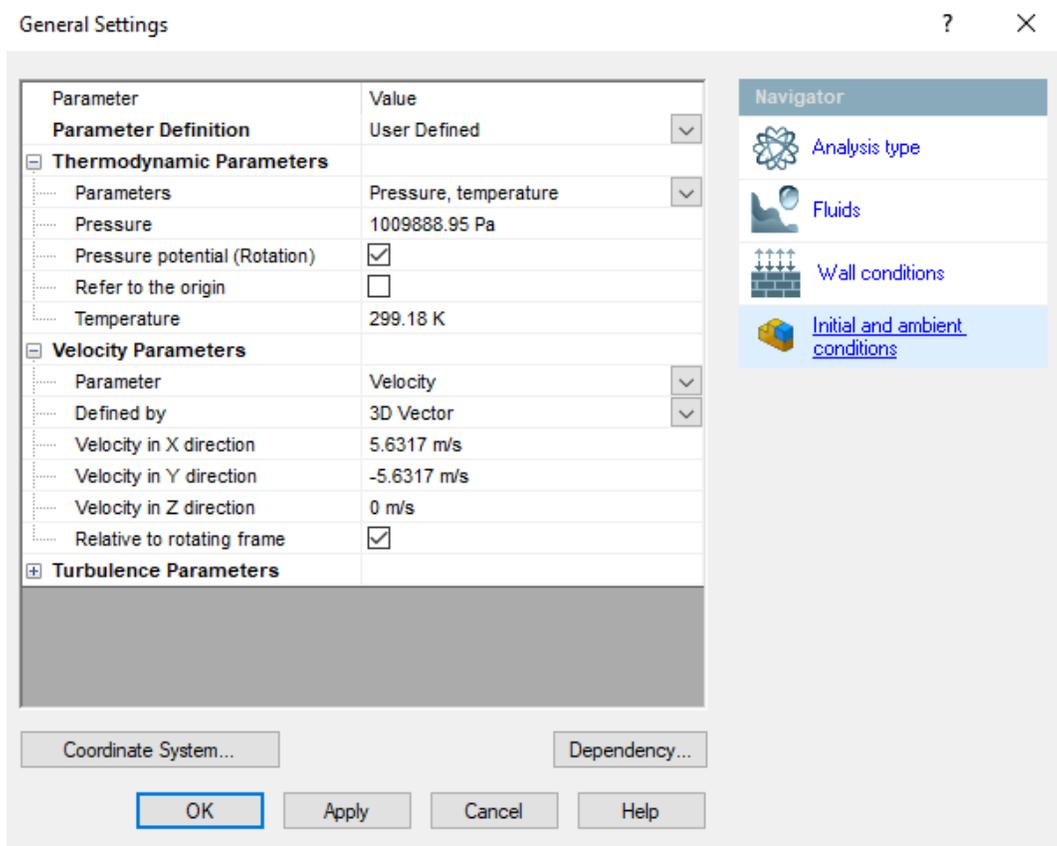
Anexo 9. Simulación aerogenerador resonante por VIV San Cristóbal mes de mayo



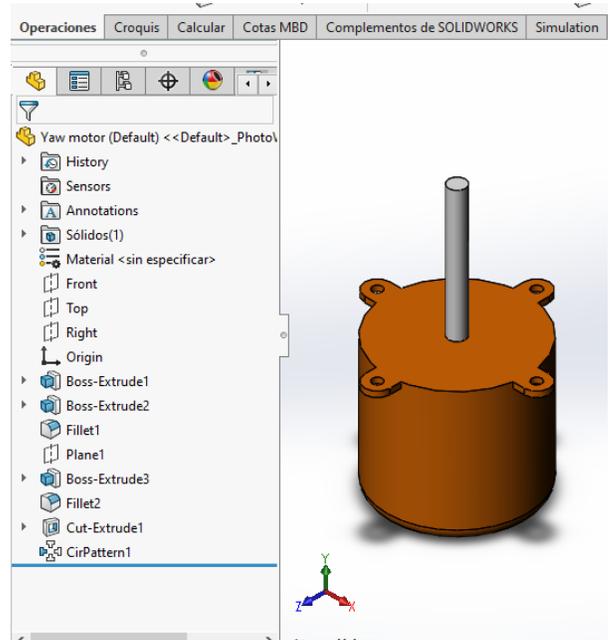
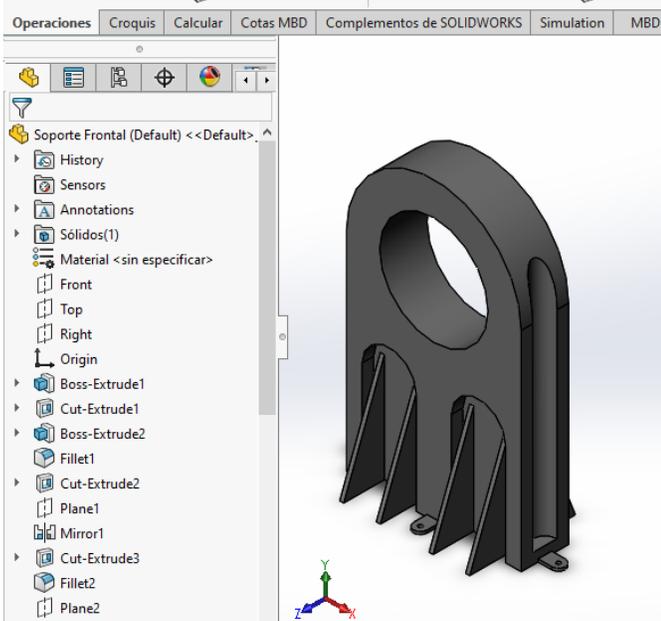
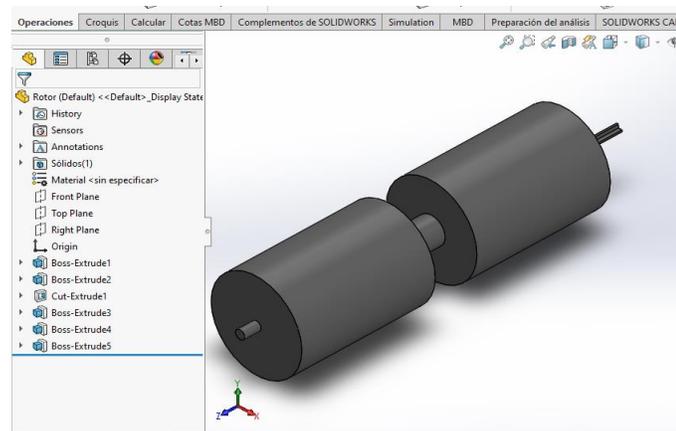
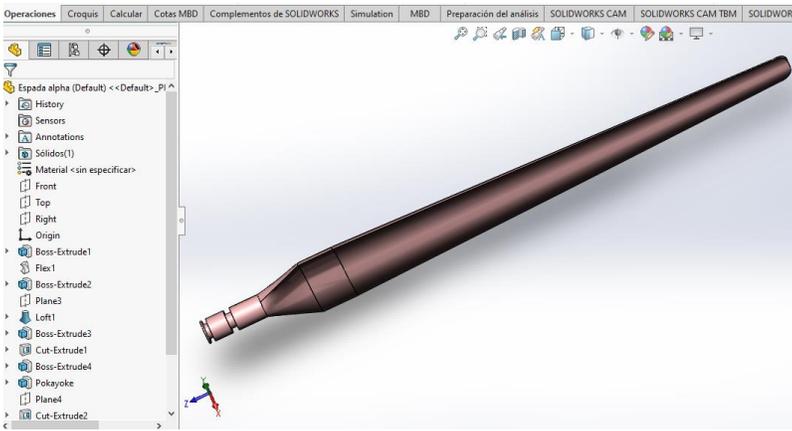
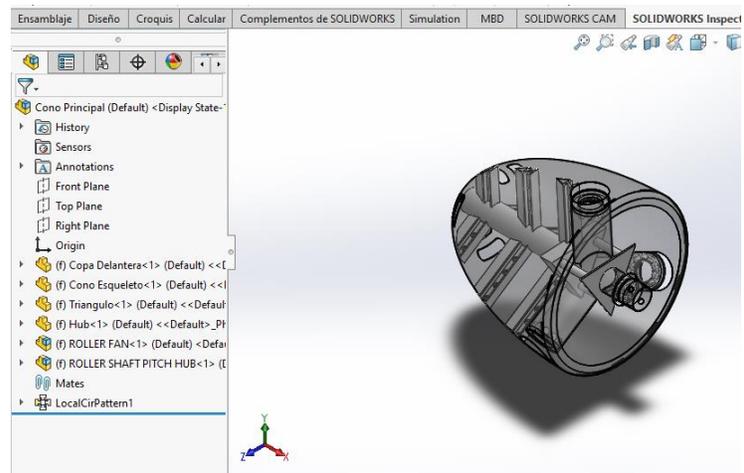
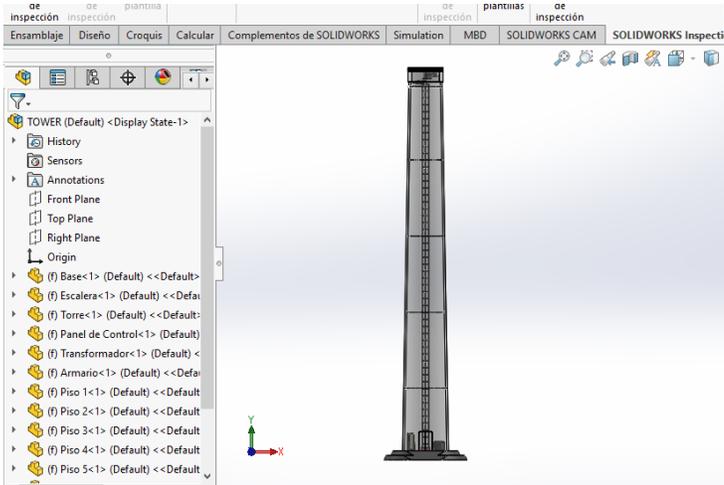
Anexo 10. Simulación aerogenerador resonante por VIV San Cristóbal mes de junio



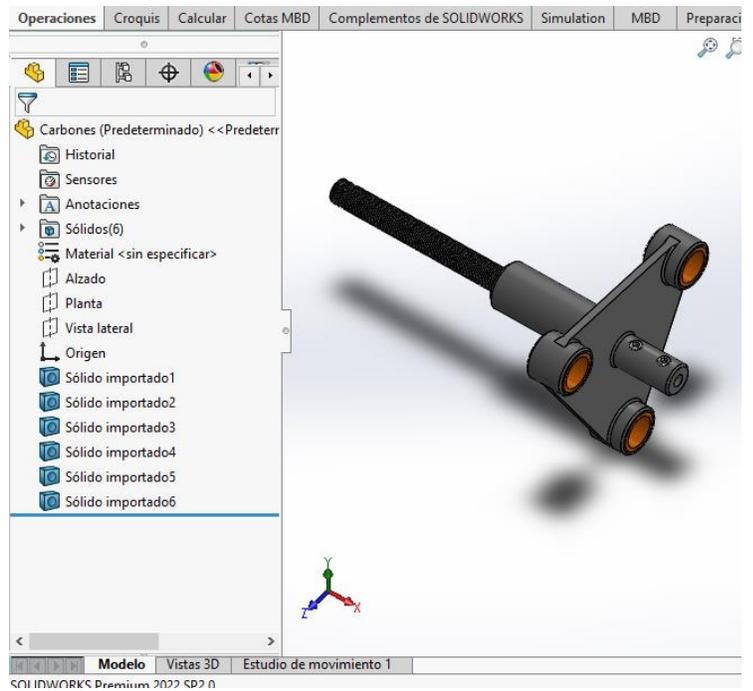
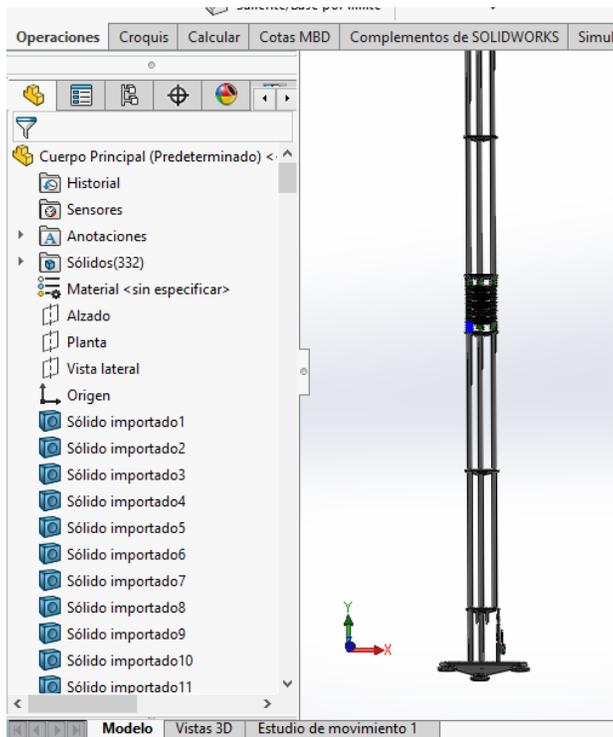
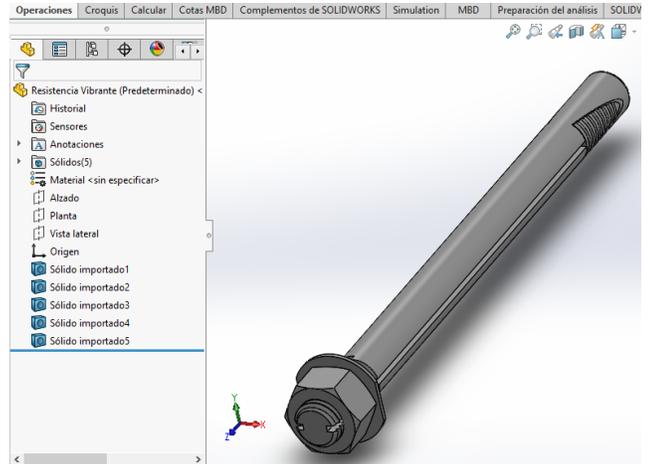
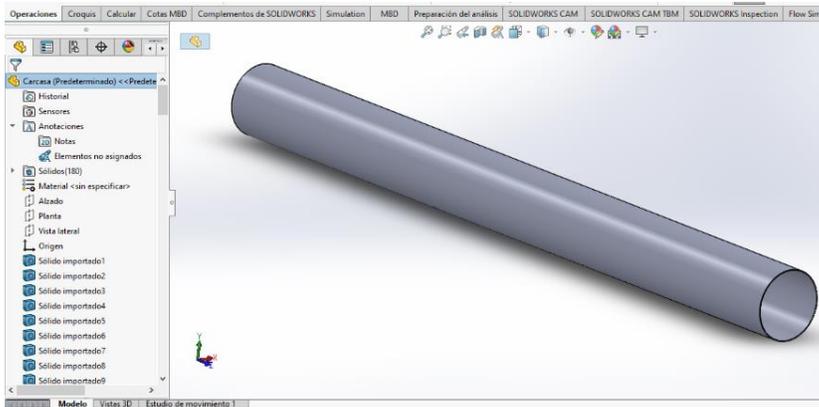
Anexo 11. Simulación aerogenerador resonante por VIV San Cristóbal mes de julio



## Anexo 12. Construcción aerogenerador con aspas



### Anexo 13. Construcción aerogenerador resonante por VIV



**Anexo 14.** Filtración de datos dirección del viento.

Se adjunta en el siguiente link los documentos correspondientes :

<https://utneduec->

[my.sharepoint.com/:f:/g/personal/jpbastidasv1\\_utn\\_edu\\_ec/Eg92Umef9ZhKhwqaxqRG1X0BVFtIuVS  
WLC5P29aOmABpw?e=Mmbf0j](https://my.sharepoint.com/:f:/g/personal/jpbastidasv1_utn_edu_ec/Eg92Umef9ZhKhwqaxqRG1X0BVFtIuVSWLC5P29aOmABpw?e=Mmbf0j)

**Anexo 15.** Códigos cálculos de potencia.

Se adjunta en el siguiente link los códigos del programa Matlab :

<https://utneduec->

[my.sharepoint.com/:f:/g/personal/jpbastidasv1\\_utn\\_edu\\_ec/Eo3ESh0JHIRCgaOPdRJFebsBg5pR7OFfeapc  
QG4Ouf70-Q?e=ifmzYF](https://my.sharepoint.com/:f:/g/personal/jpbastidasv1_utn_edu_ec/Eo3ESh0JHIRCgaOPdRJFebsBg5pR7OFfeapcQG4Ouf70-Q?e=ifmzYF)

# Referencias

- [1] Vortex Bladeless, «<https://vortexbladeless.com/>,» 2020. [En línea]. Available: <https://vortexbladeless.com/es/tecnologia/>.
- [2] Banco Mundial, «[worldbank.org](http://worldbank.org),» Banco Mundial, Marzo 17 2020. [En línea]. Available: <https://www.worldbank.org/en/topic/energy>.
- [3] A. ALCIDES, «[structuralia.com](http://structuralia.com),» Structuralia, 17 Agosto 2021. [En línea]. Available: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-el-rotor>.
- [4] M. H. Sánchez, IMPACTO DEL GENERADOR ASÍNCRONO, Universidad Carlos III de Madrid ed., U. C. I. d. Madrid, Ed., Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2021, p. 60.
- [5] TETRACE, «[tetrace.com](http://tetrace.com),» 15 Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://tetrace.com/es/blog/fundamentos-de-las-inspecciones-y-analisis-de-vibraciones-en-generadores-eolicos>. [Último acceso: 12 Julio 2023].
- [1] “Generacion-electrica-mundial-y-para-America-Latina-y-el-Caribe-ALC\_01-12-2020”.
- [2] I. Renewable Energy Agency, “Renewable energy highlights Renewable electricity generation by energy source”, 2022. [En línea]. Disponible en: [www.irena.org/statistics](http://www.irena.org/statistics)
- [3] I. Renewable Energy Agency, RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2022 STATISTIQUES D'ÉNERGIE RENOUVELABLE 2022 ESTADÍSTICAS DE ENERGÍA RENOVABLE 2022 About IRENA. 2022. [En línea]. Disponible en: [www.irena.org](http://www.irena.org)
- [4] G. L. Mendoza, M. De Energía, Y. Minas, y X. V. Grunauer, “PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA”, 2022. [En línea]. Disponible en: [www.rekursosyenergia.gob.ec](http://www.rekursosyenergia.gob.ec)

- [5] “Aerogenerador | Enel Green Power”. Consultado: el 9 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-eolica/aerogenerador>
- [6] D. Jesús y Y. Villarreal, “Aerogeneradores resonantes por VIV”, 2018. [En línea]. Disponible en: [www.vortexbladeless.com](http://www.vortexbladeless.com)
- [7] GRACIANO GRACIANO DULCE MARIA, “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS”, 2020.
- [8] HISSUMA-SOLAR, “Los aerogeneradores constituyen una excelente forma de generación de energía”, 2013. [En línea]. Disponible en: [www.hissuma-solar.com.ar](http://www.hissuma-solar.com.ar)
- [9] A. Gutiérrez-Delgado, D. González-Rodríguez, y L. Rodríguez-López, "Determinación del efecto de la estela de vórtices en la oscilación de un cilindro circular sometido a flujo transversal mediante simulación numérica", Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial RIAI, vol. 16, núm. 4, págs. 409-418, 2019.
- [10] DJ Yáñez Villarreal, "Aerogeneradores resonantes por VIV. Vortex Bladeless SL", 2018.
- [11] C. Fresneda, "El vibrador del cielo: 'Skybrator', la turbina eólica sin aspas made in Spain", El Mundo, 2021.
- [12] JF Pérez-Benito y B. Pérez-Benito, "Resonancia paramétrica: el péndulo forzado", Revista Española De Física, vol. 24, núm. 4, págs. 47-53, 2010.
- [13] A. García-Collado y R. López-Ruiz, "Resonancia eléctrica: análisis cualitativo y cuantitativo mediante simulaciones por ordenador", Revista Eureka Sobre Enseñanza Y Divulgación De Las Ciencias, vol. 5, núm. 3, págs. 347-359, 2008.
- [14] J. González-González y M. González-González, "Resonancia acústica: experimentos sencillos con tubos sonoros", Revista De Enseñanza De La Física, vol. 28, núm. 1, págs. 67-76, 2016.

- [15] DG Holmes, A. Natarajan, y H. Stensgaard Toft, "Vibración de turbinas eólicas", Wiley-Blackwell, 2010.
- [16] B. Vickery, P. Byrne, R. Harris, y D. Korsmeyer, "Análisis y predicción de la resonancia inducida por el viento en una turbina eólica", Journal of Wind Engineering and Industrial, 2018.
- [17] C. Guo, Q. Wang, J. Yu, X. Chen, y D. Wang, "Control de resonancia adaptativo de la vibración inducida por vórtices para la recolección de energía eólica", Energía renovable, vol. 150, págs. 284-293, 2020.
- [18] R. Han, H. Chen, y S. Zhang, "Optimización estructural y seguimiento de un vórtice", 2021.
- [19] F. Blaabjerg, Y. Yang, y Y. Hu, "Electrónica de potencia para turbinas eólicas: una tecnología habilitadora para la integración de la energía eólica a gran escala", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020.
- [20] D. Halliday, R. Resnick, y J. Walker, "Fundamentos de física", Wiley, 2017.
- [21] I. Newton, "Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica", 1687.
- [22] FM White, "Fluid Mechanics", 8.a ed., McGraw-Hill Education, 2015.
- [23] Comisión Reguladora de Energía (CRE), "Memoria descriptiva. Temporadas abiertas de reserva de capacidad de transmisión y transformación", Diario Oficial de la Federación, 2012. [En línea]. Recuperado de <http://www.cre.gob.mx/documento/2317.pdf>
- [24] HD Vásquez, "Diseño e implementación de método simplificado para estimar el tiempo de vida aspas de aerogenerador con dos tipos de regulación (stall y pitch) a través de la medición de vibraciones", Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo, Perú, 2017. [En línea]. Recuperado de [https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/45904/Vásquez\\_HD-SD.pdf?sequence=1](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/45904/Vásquez_HD-SD.pdf?sequence=1)

- [25] AR Rentería, "Diseño y simulación aerodinámica de un rotor para turbinas de eje horizontal", Tesis de pregrado, Universidad San Sebastián, Chile, 2019. [En línea]. Recuperado de <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/8636/Rentería%20Alvarado%20Renato%20Abel.pdf?sequence=1>
- [26] Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, "Rendimiento de un aerogenerador con alternador de automóvil para generar electricidad", Tesis de pregrado, Perú. [En línea]. Recuperado de [https://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14077/535/FIA\\_129.pdf?sequence=1](https://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14077/535/FIA_129.pdf?sequence=1)
- [27] A. Nadaï y O. Labussière, "Acceptabilité sociale et planification territoriale, elementos de réflexion à partir de l'éolien et du stockage du CO2", en M. Ha-Duong y N. Chaabane (Eds.), *Le captage et le stockage du CO2: enjeux Techniques et sociaux en France*, págs. 45-60, Versailles, Francia: Quae, 2010.
- [28] Universidad Nacional del Centro del Perú, "Diseño y construcción de un mini-aerogenerador de 500 W para la electrificación de comunidades rurales en la provincia de Huancayo", Tesis de pregrado, Perú. [En línea]. Recuperado de [https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6664/T010\\_47424436\\_T.pdf?sequence=1](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/6664/T010_47424436_T.pdf?sequence=1)
- [29] T. Ackermann, G. Andersson, L. Söder, y J. Wang, "Wind Power in Power Systems", 3.<sup>a</sup> ed., Wiley, 2019.
- [30] MOL Hansen, P. Sørensen, y S. Voutsinas, "Aerodynamics of Wind Turbines", 2<sup>a</sup> ed., Routledge, 2019.
- [31] HJ Sutherland, N. Jenkins y R. Barnes, "Sistemas de energía eólica: diseño de ingeniería de control", CRC Press, 2021.
- [32] Y. Xu, L. An, B. Jia, y N. Maki, "Estudio sobre diseño eléctrico de generadores de turbinas eólicas marinas totalmente superconductores de gran capacidad", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, págs. 1-5, 2021.

- [33] L. López Uribarri, "Análisis de ruido en aerogeneradores sin palas", Trabajo fin de máster, Universidade da Coruña, 2022.
- [34] Y. Liu, X. Li, y Y. Wang, "Tecnología de generación de energía piezoeléctrica resonante y su aplicación en la recolección de energía oceánica", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 11, núm. 1, pág. 013301, 2019.
- [35] Y. Zhang, X. Li, y Y. Wang, "Tecnologías y aplicaciones de recolección de energía resonante", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 12, núm. 1, pág. 013301, 2020.
- [36] Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), "Costos de generación de energía renovable en 2020", 2021. [En línea]. Recuperado de <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>
- [37] A. Johnson y R. Brown, "Sistemas de energía eólica: control, optimización y operación", Springer, 2021.
- [38] J. Smith, A. Thompson, y E. Johnson, "Ingeniería de energía eólica: manual para turbinas eólicas terrestres y marinas", Academic Press, 2018.
- [39] Y. Hu, W. Chen, C. Liu, y Y. Zhang, "Revisión de resonancia en sistemas de energía y estrategias de control", *Energías*, vol. 12, núm. 12, pág. 2395, 2019.
- [40] MA Rodríguez, LG Franquelo, S. Kouro, JI Leon, R. Portillo, y B. Wu, "Grid-Connected Photovoltaic Systems: An Overview on Recent Research and Emerging PV Converter Technology", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics de electrónica de potencia*, vol. 4, núm. 1, págs. 414-429, 2016.
- [41] X. Zheng, Y. Li, X. Zhang, y J. Zhang, "Estudio analítico sobre la cuestión de la resonancia en una microrred insular con alta penetración de fuentes de energía renovables", *Energías*, vol. 13, núm. 2, pág. 275, 2020.

- [42] Ministerio de Energía y Minas, «Ministerio de Energía y Minas – Ecuador,» Ministerio de Energía y Minas, 18 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.recursosyenergia.gob.ec/central-eolica-villonaco/>. [Último acceso: 2023 Noviembre 12].
- [43] CELEC EP, «GENSUR CELEC EP Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP,» 23 Junio 2020. [En línea]. Available: <https://www.celec.gob.ec/gensur/informacion-tecnica/central-eolica-villonaco/>.
- [44] ELECGALAPAGOS S.A., «elecgalapagos.com.ec,» elecgalapagos.com.ec, 27 Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.elecgapagos.com.ec/2022/09/27/parque-eolico-san-cristobal-cumple-15-anos-en-operacion/#:~:text=El%20Parque%20E%C3%B3lico%20San%20Crist%C3%B3bal,total%20instalada%20de%202.400%20KW.> [Último acceso: 20 Octubre 2023].
- [45] MathWorks , « MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico,» MathWorks , 22 Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. [Último acceso: 15 Noviembre 15].
- [46] Dassault Systèmes SolidWorks, «SOLIDWORKS,» Dassault Systèmes SolidWorks, 12 Enero 2022. [En línea]. Available: <https://www.solidworks.com/es>. [Último acceso: 15 Noviembre 2023].
- [47] CENACE, «Página oficial del Operador Nacional de Electricidad CENACE,» CENACE, 21 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.cenace.gob.ec/>. [Último acceso: 15 Noviembre 2023].
- [48] NASA, «Acerca de NASA - NASA,» NASA, 16 Febrero 2023. [En línea]. Available: <https://www.nasa.gov/es/acerca-de-nasa/>. [Último acceso: 15 Noviembre 2023].
- [49] H. Hamdan et al., “Experimental and Numerical Study of Novel Vortex Bladeless Wind Turbine with an Economic Feasibility Analysis and Investigation of Environmental Benefits,” *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17010214.

[50] E. Ahmed M y F. Mohamed B, «Theoretical and numerical analysis of vortex bladeless wind turbines,» WindEngineering, vol. 1, n° 1, p. 20, 2022.

[51] NASA, «POWER DATA ACCESS VIEWER,» NASA, 25 Julio 2023. Available:

<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.

[52] T. C. F. Rolando, «Análisis de la turbulencia en la producción energética,» Universidad Nacional de Loja, Loja, 2023.