

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**Propuesta de diseño y construcción del aerogenerador
Savonius modificado para suministrar energía eléctrica
a un usuario residencial del distrito de Ahuac - 2021**

Pool Diego Medina Socualaya

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista

Huancayo, 2023

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



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

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TESIS

A : Ing. Felipe Néstor Gutarra Meza
Decano de la Facultad de Ingeniería

DE : Ing. Carlos Quispe Anccasi
Asesor de tesis

ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de tesis

FECHA : 16 de Agosto de 2023

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para saludarlo y en vista de haber sido designado asesor de la tesis titulada: "PROPUESTA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL AEROGENERADOR SAVONIUS MODIFICADO PARA SUMINISTRAR ENERGÍA ELÉCTRICA A UN USUARIO RESIDENCIAL DEL DISTRITO DE AHUAC – 2021", perteneciente al/la/los/las estudiante(s) POOL DIEGO MEDINA SOCUALAYA, de la E.A.P. de Ingeniería Eléctrica; se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 5 % de similitud (informe adjunto) sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

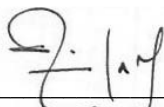
Filtro de exclusión de bibliografía	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
Filtro de exclusión de grupos de palabras menores (Nº de palabras excluidas:)	SI <input checked="" type="checkbox"/>	NO <input type="checkbox"/>
Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante	SI <input type="checkbox"/>	NO <input checked="" type="checkbox"/>

En consecuencia, se determina que la tesis constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad.

Recae toda responsabilidad del contenido de la tesis sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios de legalidad, presunción de veracidad y simplicidad, expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales – RENATI y en la Directiva 003-2016-R/UC.

Esperando la atención a la presente, me despido sin otro particular y sea propicia la ocasión para renovar las muestras de mi especial consideración.

Atentamente,



Dr. Carlos Quispe Anccasi
Asesor de tesis

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD

Yo, Pool Diego Medina Socualaya, identificado(a) con Documento Nacional de Identidad No. 75452563, de la E.A.P. de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería la Universidad Continental, declaro bajo juramento lo siguiente:

1. La tesis titulada: "PROPUESTA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL AEROGENERADOR SAVONIUS MODIFICADO PARA SUMINISTRAR ENERGÍA ELÉCTRICA A UN USUARIO RESIDENCIAL DEL DISTRITO DE AHUAC – 2021", es de mi autoría, la misma que presento para optar el Título Profesional de Ingeniero Electricista.
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas, por lo que no atenta contra derechos de terceros.
3. La tesis es original e inédita, y no ha sido realizado, desarrollado o publicado, parcial ni totalmente, por terceras personas naturales o jurídicas. No incurre en autoplagio; es decir, no fue publicado ni presentado de manera previa para conseguir algún grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, pues no son falsos, duplicados, ni copiados, por consiguiente, constituyen un aporte significativo para la realidad estudiada.

De identificarse fraude, falsificación de datos, plagio, información sin cita de autores, uso ilegal de información ajena, asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a las acciones legales pertinentes.

19 de agosto de 2023.



Pool Diego Medina Socualaya

DNI. No. 75452563

PROPUESTA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL AEROGENERADOR SAVONIUS MODIFICADO PARA SUMINISTRAR ENERGÍA ELÉCTRICA A UN USUARIO RESIDENCIAL DEL DISTRITO DE AHUAC-2021

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

INDICE DE SIMILITUD

6%

FUENTES DE INTERNET

0%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	www.minem.gob.pe Fuente de Internet	1%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
4	anyflip.com Fuente de Internet	1%

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

DEDICATORIA

A mis padres por el apoyo en cada etapa de mi vida universitaria y a mi hijo Valentino por ser el motivo de seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su inquebrantable apoyo al permitirme seguir adelante y a todos los que me ayudaron a seguir el camino adecuado.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal diseñar y construir un aerogenerador tipo Savonius modificado que influya en la energía eléctrica suministrada a un domicilio en el distrito de Ahuac en condiciones de velocidad de viento de 4 m/s. Asimismo, la hipótesis planteada es que el diseño y la construcción del aerogenerador Savonius modificado tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario del distrito de Ahuac, debido a la velocidad del viento propia de la zona, las RPM obtenidas en el eje del generador y el rendimiento del aerogenerador. Además, el método utilizado en esta investigación es la descriptiva correlacional, así como el tipo de investigación es la aplicada con un diseño no experimental de tipo transversal correlacional. La población y muestra será el aerogenerador Savonius modificado y los datos registrados correspondiente al 2021, para el cual se trabajó con datos meteorológicos del 2021 proporcionados por el Senamhi. Para recolectar los datos se ha efectuado un análisis documental, uso de guías de observación en campo y un sistema de monitoreo para la recolección de datos en campo. Para el procesamiento de datos se ha utilizado herramientas estadísticas como el *software* Excel, además de realizar el diseño y simulación en el *software* Solidworks. Se concluye que el diseño y la construcción del aerogenerador Savonius modificado tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario del distrito de Ahuac, la prueba de velocidad de viento y potencia generada muestran que el aerogenerador produce valores de energía muy similares en todos los meses del año, siendo el mes de junio con el nivel más bajo de energía generada.

Palabras clave: aerogenerador Savonius, energías renovables, energía eólica.

ABSTRACT

The main objective of this research work is to design and build a modified Savonius-type wind turbine that influences the electrical energy supplied to a home in the Ahuac district under conditions of wind speed of 4 m/s, the hypothesis is that the The design and construction of the modified Savonius wind turbine has an influence on the electrical energy supplied to a user in the Ahuac district, due to the wind speed of the area, the RPM obtained in the generator shaft and the performance of the wind turbine. The method used in this research is descriptive correlational, of which the type of research is applied with a non-experimental cross-correlational design. The population and sample will be the modified Savonius wind turbine and the registered data corresponding to the year 2021, for which we worked with meteorological data from the year 2021. To collect the data, a documentary analysis has been carried out, the use of field observation guides and a monitoring system for data collection in the field. For data processing, statistical tools such as Excel *software* have been used, in addition to carrying out the design and simulation in Solidworks *software*. It is concluded that the design and construction of the modified Savonius wind turbine has an influence on the electrical energy supplied to a user in the Ahuac district, the wind speed and power generated test show that the wind turbine produces very similar energy values in all months of the year. year being the month of June with the lowest level of energy generated.

Keywords: Savonius wind turbine, renewable energies, wind power.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	v
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
INTRODUCCIÓN	xviii
CAPÍTULO I	19
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	19
1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	19
1.1.1. Problema general	25
1.1.2. Problemas específicos.....	26
1.2. Objetivos.....	26
1.2.1. Objetivo general	26
1.2.2. Objetivos específicos	26
1.3. Justificación	27
1.3.1. Justificación técnica.....	27
1.3.2. Justificación económica.....	27
1.3.3. Justificación teórica	28
1.3.4. Justificación social.....	28
1.3.5. Justificación ambiental	28
1.4. Importancia de la investigación	28
1.5. Limitaciones	29
1.6. Hipótesis	29
1.6.1. Hipótesis general	29
1.6.2. Hipótesis específicas.....	29
1.7. Descripción de variables y operacionalización de variables	30

CAPÍTULO II.....	32
MARCO TEÓRICO.....	32
2.1. Antecedentes del problema.....	32
2.1.1. Artículos Científicos.....	32
2.1.2. Tesis.....	34
2.2. Bases teóricas.	37
2.2.1. Aerogeneradores.....	37
2.2.1.1. Eje vertical (VAWT).....	37
2.2.1.2. Eje horizontal (HAWT).....	38
2.2.2. Energía Eólica.....	39
2.2.2.1. Origen del viento.....	39
2.2.2.2. Instrumentos de medición	40
2.2.2.3. Densidad el aire	41
2.2.2.4. Límite de Betz	42
2.2.2.5. Velocidad Especifica TRS	44
2.2.2.6. Distribución de Weibull.	45
2.2.2.7. Velocidad del viento a diferentes alturas.	47
2.2.3. Aerogenerador Savonius.....	48
2.2.4. Deflector de Viento	52
2.2.5. Engranés	53
2.2.5.1. Engranés rectos	53
2.2.6. Generadores en DC.....	54
2.2.7. Impresión 3D	55
2.2.7.1. Modelado por deposición fundida.....	56
2.2.7.2. Materiales de impresión	56
2.3. Definición de términos básicos.....	57
CAPÍTULO III.....	59
METODOLOGÍA.....	59
3.1. Método de Investigación.	59
3.1.1. Método general.....	59
3.1.2. Método específico.....	59
3.2. Tipo de Investigación.	59

3.3.	Nivel de Investigación.....	60
3.4.	Diseño de la investigación.....	60
3.5.	Población y muestra.....	61
3.5.1.	Población.....	61
3.5.2.	Muestra.....	61
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección y procesamiento de datos.....	61
3.6.1.	Técnicas e Instrumentos utilizados en la investigación.....	61
3.6.2.	Técnica de procesamiento de datos.....	62
3.7.	Diseño de Ingeniería.....	62
3.7.1.	Ubicación del aerogenerador.....	62
3.7.2.	Cálculo de la densidad del viento.....	64
3.7.3.	Velocidad del viento para el funcionamiento.....	65
3.7.4.	Principio del funcionamiento del diseño.....	67
3.7.5.	Diseño de álabes.....	70
3.7.6.	Cálculo del coeficiente de potencia C_p	74
3.7.7.	Cálculo del TRS o velocidad específica.....	75
3.7.8.	Cálculo de la velocidad de rotación.....	75
3.7.9.	Diseño de los deflectores de viento.....	76
3.7.10.	Dimensiones de la turbina.....	77
3.7.11.	Diseño de partes y accesorios.....	80
3.7.11.1.	Bases y tapas.....	80
3.7.11.2.	Refuerzo de deflectores de viento.....	83
3.7.11.3.	Seguros de álabes y deflectores de viento.....	84
3.7.11.4.	Selección de Rodamiento.....	86
3.7.11.5.	Eje de Rotación.....	88
3.7.11.6.	Estructura de soporte.....	88
3.7.11.7.	Anclajes de la estructura.....	90
3.7.12.	Selección del generador CC.....	90
3.7.13.	Diseño del multiplicador de velocidad.....	92
3.7.13.1.	Diseño del tren de engranes.....	93
3.7.14.	Diseño del sistema de monitoreo.....	99
3.8.	Simulaciones.....	103
3.9.	Evaluación Técnica y Económica.....	111

3.9.1.	Presupuesto.....	111
3.9.2.	VAN y TIR.....	113
3.10.	Materiales y Especificaciones Técnicas.....	116
3.10.1.	Objeto.....	116
3.10.2.	Materiales.....	116
3.10.3.	Ejecución.....	117
3.10.4.	Pruebas.....	118
3.11.	Construcción.....	119
3.11.1.	Construcción de la turbina.....	119
3.11.2.	Construcción del multiplicador de velocidad.....	122
3.11.3.	Construcción del sistema de monitoreo.....	127
CAPÍTULO IV.....		129
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		129
4.1.	Resultados e interpretación.....	129
4.1.1.	Velocidad del Viento.....	129
4.1.2.	Datos de la prueba del aerogenerador.....	130
4.1.3.	Velocidad del viento y potencia generada.....	131
4.1.4.	Rendimiento y potencia generada.....	132
4.1.5.	Movimiento de la turbina y potencia generada.....	133
4.2.	Prueba de hipótesis.....	134
4.2.1.	Prueba de la hipótesis general.....	134
4.2.2.	Prueba de hipótesis Específicas.....	135
4.2.2.1.	Prueba de hipótesis específica A.....	135
4.2.2.2.	Prueba de hipótesis específica B.....	137
4.2.2.3.	Prueba de hipótesis específica C.....	139
4.3.	Discusión de resultados.....	140
4.3.1.	Artículos Científicos.....	141
4.3.2.	Tesis.....	143
4.4.	Consecuencias teóricas.....	145
4.5.	Aplicaciones prácticas y Trabajos Futuros.....	145
CONCLUSIONES.....		147
RECOMENDACIONES.....		149

LISTA DE REFERENCIAS	150
ANEXOS.....	
.....	153

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Potencial Eólico (MW) en el Perú (100 metros sobre la superficie).....	20
Tabla 2.	Operacionalización de variables	30
Tabla 3.	Valores típicos de k para distintas morfologías de terreno.....	46
Tabla 4.	Longitud de rugosidades para distintos tipos de paisajes.....	48
Tabla 5.	Recolección de datos del anemómetro	62
Tabla 6.	Recolección de datos del sistema de monitoreo.....	62
Tabla 7.	Distribución de Weibull.....	66
Tabla 8.	Factor c y k.	66
Tabla 9.	Características del rodamiento 6004.....	87
Tabla 10.	Datos de la placa del generador.....	91
Tabla 11.	Resumen de datos del tren de engranes.....	96
Tabla 12.	Presupuesto del proyecto.....	112
Tabla 13.	Estimación del cargo por kWh/año	114
Tabla 14.	Flujo de caja y cálculo del VAN, TIR y PR	115
Tabla 15.	Materiales para el proyecto.....	116
Tabla 16.	Velocidad del viento según Senamhi durante el 2021.....	130
Tabla 17.	Datos aerogenerador Savonius modificado.....	131
Tabla 18.	Velocidad de viento y potencia generada.....	132
Tabla 19.	Potencia generada vs rendimiento.....	133
Tabla 20.	Coeficiente de Pearson para la velocidad del viento vs Energía eléctrica.....	136
Tabla 21.	Velocidad del viento y potencia generada.....	136
Tabla 22.	Coeficiente de Pearson para las RPM vs Energía eléctrica.....	137
Tabla 23.	RPM y potencia generada.....	138
Tabla 24.	Coeficiente de Pearson para el rendimiento vs Energía eléctrica.....	139
Tabla 25.	Rendimiento y potencia generada.....	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Participación de energía en el 2020.....	19
Figura 2. Velocidad media del viento anual a 10 m.....	22
Figura 3. Densidad de potencia media del viento anual a 10 m.....	23
Figura 4. TRS para cada tipo de aerogenerador.....	24
Figura 5. Aerogenerador Tipo Savonius.....	25
Figura 6. Capas de la Atmosfera.....	40
Figura 7. Flujo a través de un disco.....	42
Figura 8. Análisis del tubo de corriente.....	43
Figura 9. Límite de Betz.....	44
Figura 10. Relación TRS y C_p	45
Figura 11. Principio de funcionamiento de un rotor de eje vertical (Savonius).....	49
Figura 12. Valores del coeficiente aerodinámico de resistencia C para una semiesfera y un semicilindro.....	50
Figura 13. Acción del viento sobre un rotor de arrastre diferencial.....	50
Figura 14. Rotor Savonius provisto de álabes difusores.....	52
Figura 15. Ubicación del aerogenerador.....	63
Figura 16. Histograma de duraciones porcentuales de velocidad del viento.....	67
Figura 17. Histograma de frecuencias de velocidad de viento.....	67
Figura 18. Principio de funcionamiento del aerogenerador Savonius.....	68
Figura 19. Principio de funcionamiento de los deflectores de viento.....	69
Figura 20. Principio de funcionamiento del aerogenerador Savonius modificado.....	70
Figura 21. Geometría de los álabes.....	71
Figura 22. Perspectiva isométrica del álabe.....	72
Figura 23. Perspectiva isométrica de tres álabes.....	73
Figura 24. Geometría de los deflectores de viento.....	76
Figura 25. Perspectiva isométrica de los deflectores de viento.....	77

Figura 26. Dimensiones del aerogenerador.....	78
Figura 27. Disposición de los álabes y deflectores de viento	80
Figura 28. Dimensiones de la tapa y base de los álabes.	81
Figura 29. Vista superior de la tapa y base de los álabes.....	81
Figura 30. Dimensiones de la tapa y base de los deflectores de viento.	82
Figura 31. Vista superior de la tapa y base de los deflectores de viento.	83
Figura 32. Refuerzo para los deflectores de viento.....	84
Figura 33. Seguros de los álabes	85
Figura 34. Seguro de los deflectores de viento.	86
Figura 35. Rodamiento 6004.....	87
Figura 36. Eje principal.....	88
Figura 37. Estructura de soporte	89
Figura 38. Cable de acero de 1.6 mm	90
Figura 39. Placa de identificación del generador	91
Figura 40. Cálculo del tren de engranes.....	95
Figura 41. Disposición del tren de engranes.	96
Figura 42. Perspectiva isométrica del tren de engranes.	97
Figura 43. Perspectiva isométrica de la base del tren de engranes.	98
Figura 44. Perspectiva isométrica del tren de engranes y la base.	98
Figura 45. Vista final del diseño del multiplicador de velocidad.	99
Figura 46. Primera etapa sistema de monitoreo.....	100
Figura 47. Segunda etapa sistema de monitoreo.....	101
Figura 48. Tercera etapa sistema de monitoreo.	102
Figura 49. Ensamble final del aerogenerador en SolidWorks	103
Figura 50. Configuración del tipo de análisis.	104
Figura 51. Configuración del fluido.....	105
Figura 52. Configuración de las condiciones iniciales y ambientales	105

Figura 53. Configuración del dominio computacional.	106
Figura 54. Configuración de las condiciones de entorno.....	106
Figura 55. Configuración de los objetivos.....	107
Figura 56. Configuración de la malla.....	108
Figura 57. Trayectorias de fluido de la turbina.	108
Figura 58. Presión en los álabes.....	109
Figura 59. Observación del torque generado.	110
Figura 60. Construcción de la turbina Savonius.	119
Figura 61. Construcción de la base de turbina.....	120
Figura 62. Instalación de la Turbina Savonius modificado.	121
Figura 63. Instalación de la Turbina Savonius modificado con el autor.....	121
Figura 64. Impresión 3D engranes.....	122
Figura 65. Impresión 3D base del tren de engranes.....	123
Figura 66. Impresión de la tapa del tren de engranes.....	123
Figura 67. Piezas del multiplicador de velocidad terminadas.....	124
Figura 68. Ensamble del multiplicador de velocidad 1.....	124
Figura 69. Ensamble del multiplicador de velocidad 2.....	125
Figura 70. Ensamble final del multiplicador de velocidad.	125
Figura 71. Instalación del multiplicador de velocidad a la turbina.	126
Figura 72. Vista completa del multiplicador de velocidad y turbina.....	127
Figura 73. Partes del sistema de monitoreo.	128
Figura 74. Ensamble final del sistema de monitoreo.....	128
Figura 75. Curva de velocidad del viento vs potencia generada.....	131
Figura 76. Movimiento de la turbina y potencia generada.	134

INTRODUCCIÓN

La energía eólica es una gran fuente de energía limpia y renovable, pero su uso se ve limitado por la intermitencia y variabilidad del viento, además que el coeficiente de potencia de los aerogeneradores Savonius, que es objeto de estudio en esta investigación, no supera el 15 %. Por ello, se requiere tener un aerogenerador que pueda funcionar a bajas velocidades de viento y tener un buen rendimiento además que pueda suministrar de energía a un usuario en el distrito de Ahuac. Por lo tanto, la intención de esta investigación es diseñar un aerogenerador Savonius modificado con un buen coeficiente de potencia y que brinde energía a un usuario residencial, para el cual se determinarán las dimensiones del aerogenerador y multiplicador de velocidad además se desarrollará un sistema para medir las variables como voltaje, corriente, RPM y velocidad de viento.

Por lo cual el trabajo de investigación se subdivide en los siguientes capítulos: en el primero se fundamenta el planteamiento del estudio, donde detallaremos el problema general y los objetivos de la presente investigación. Además, el capítulo II está conformado por el marco teórico donde vemos estudios realizados como artículos científicos y tesis similares que nos ayudaran a realizar un mejor diseño, además veremos la teoría y conceptos fundamentales para cumplir con los objetivos planteados.

Asimismo, el capítulo III está conformado por la metodología usada en el estudio, modelos y simulaciones y construcción del aerogenerador. A su vez, el capítulo IV está conformado por los resultados, interpretación de resultados y trabajos futuros. Por último, se dan las conclusiones y recomendaciones que completan nuestra investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y Formulación del Problema

La generación de energía eléctrica en el Perú tiene su origen, en mayor porcentaje, en el uso de las energías renovables el 2020, el 59.6 % de energía fue generada por hidroeléctricas; el 3.67 %, por fuentes eólicas; el 1.58 %, por centrales solares; y el 35.15 %, por generadores termoeléctricos como se observa en la siguiente figura:

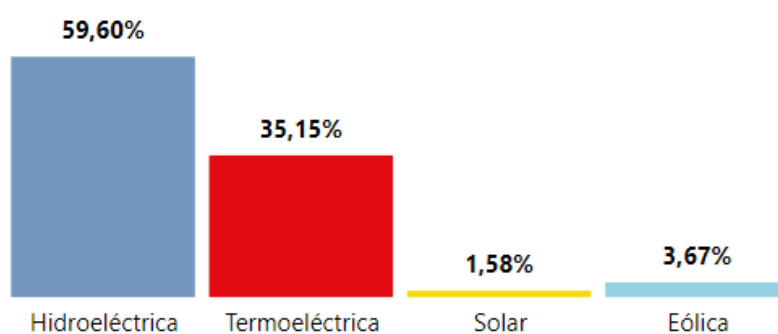


Figura 1. Participación de energía en el 2020.

Fuente: COES

Con estos datos enfocaremos nuestra atención en el uso de la energía eólica y nos preguntaremos ¿qué potencial eólico tiene el departamento de Junín? El Ministerio de Energía y Minas en su publicación Atlas Eólico 2016 nos muestra la siguiente tabla:

Tabla 1. Potencial eólico (MW) en el Perú (100 metros sobre la superficie)

Departamento	Potencial eólico aprovechable (mw)	Potencial eólico excluído (mw)	Potencial eólico total (mw)
Amazonas	129	288	417
Ancash	708	108	816
Apurímac	0	0	0
Arequipa	1020	156	1176
Ayacucho	0	0	0
Cajamarca	891	282	1173
Callao	0	0	0
Cuzco	0	0	0
Huancavelica	0	0	0
Huánuco	0	0	0
Ica	2280	3015	5295
Junín	0	0	0
La Libertad	921	264	1185
Lambayeque	7017	2097	9114
Lima	429	189	618
Loreto	0	0	0
Madre de Dios	0	0	0
Moquegua	0	0	0
Pasco	0	0	0
Piura	7098	1503	8601
Puno	0	0	0
San Martín	0	0	0
Tacna	0	0	0
Tumbes	0	0	0
Ucayali	0	0	0
TOTAL	20493	7902	28395

Fuente: MINEM, Atlas eólico 2016.

En esta tabla podemos observar que potencial eólico total en el departamento de Junín es de 0 MW, esto debido el Minem ha considerado ciertos criterios para poder instalar un parque eólico como son los siguientes:

- A una altura de 100 m, la densidad de potencia oscilara entre moderada y excelente ($P/A > 300 \text{ W/m}^2$).
- La distribución de la frecuencia del viento es favorable.
- La pendiente del terreno debe ser igual o inferior al 20 %.
- Proximidad a vías de acceso concurridos.

- Proximidad a los núcleos de población, líneas de media y alta tensión y subestaciones existentes.
- La presencia de parques eólicos adyacentes son consideraciones importantes.
- La altitud del emplazamiento debe ser inferior a 3500 metros.

Siendo los criterios más importantes, la densidad de potencia y la velocidad media del viento, el cual descarta algunas regiones para instalar parques eólicos y se considera 0 MW de potencial eólico total. A continuación, se muestran las figuras 2 y 3, donde observaremos la densidad de potencia y velocidad media del viento respectivamente.

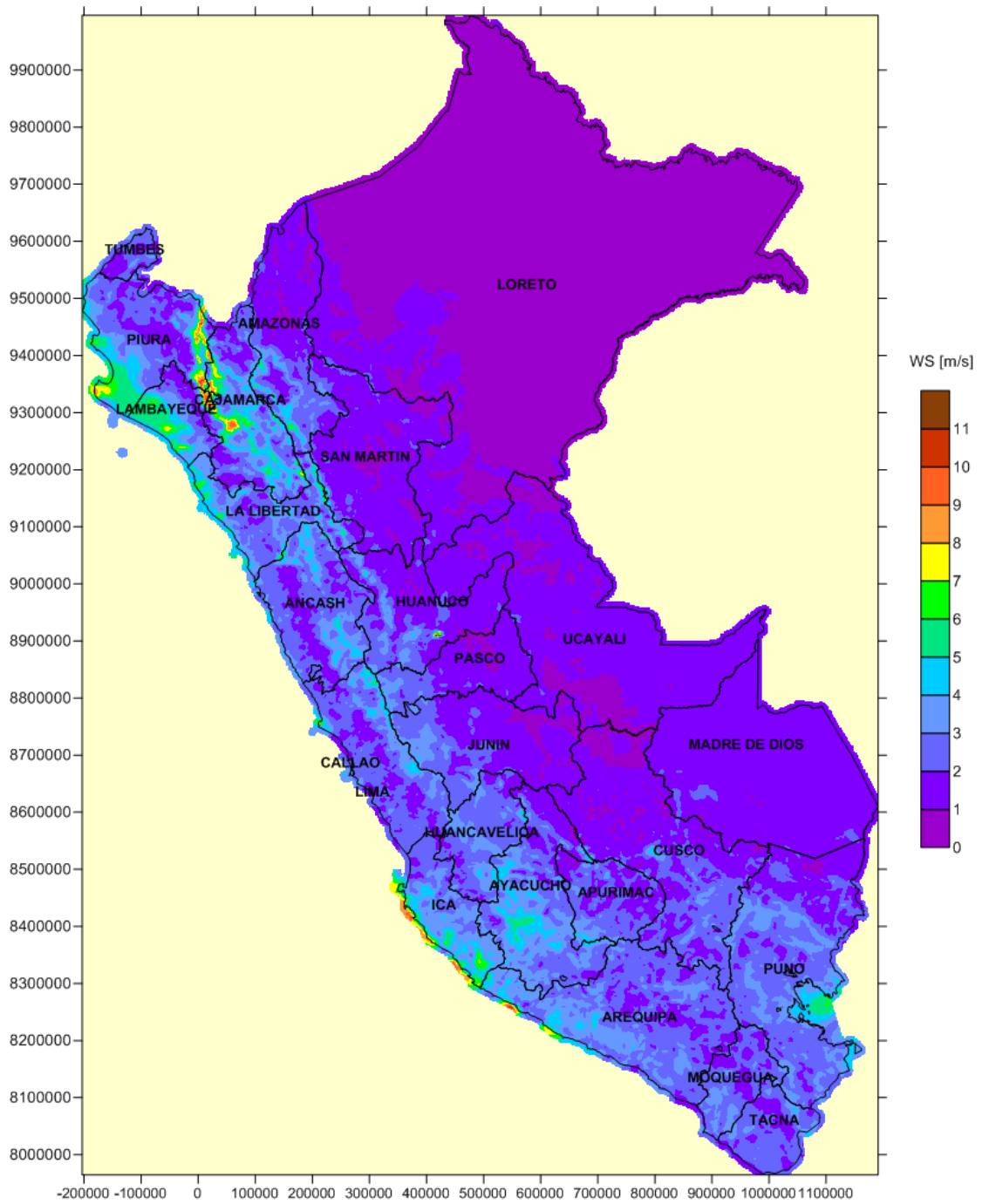


Figura 2. Velocidad media del viento anual a 10 m

Fuente: MINEM, Atlas Eólico del Perú.

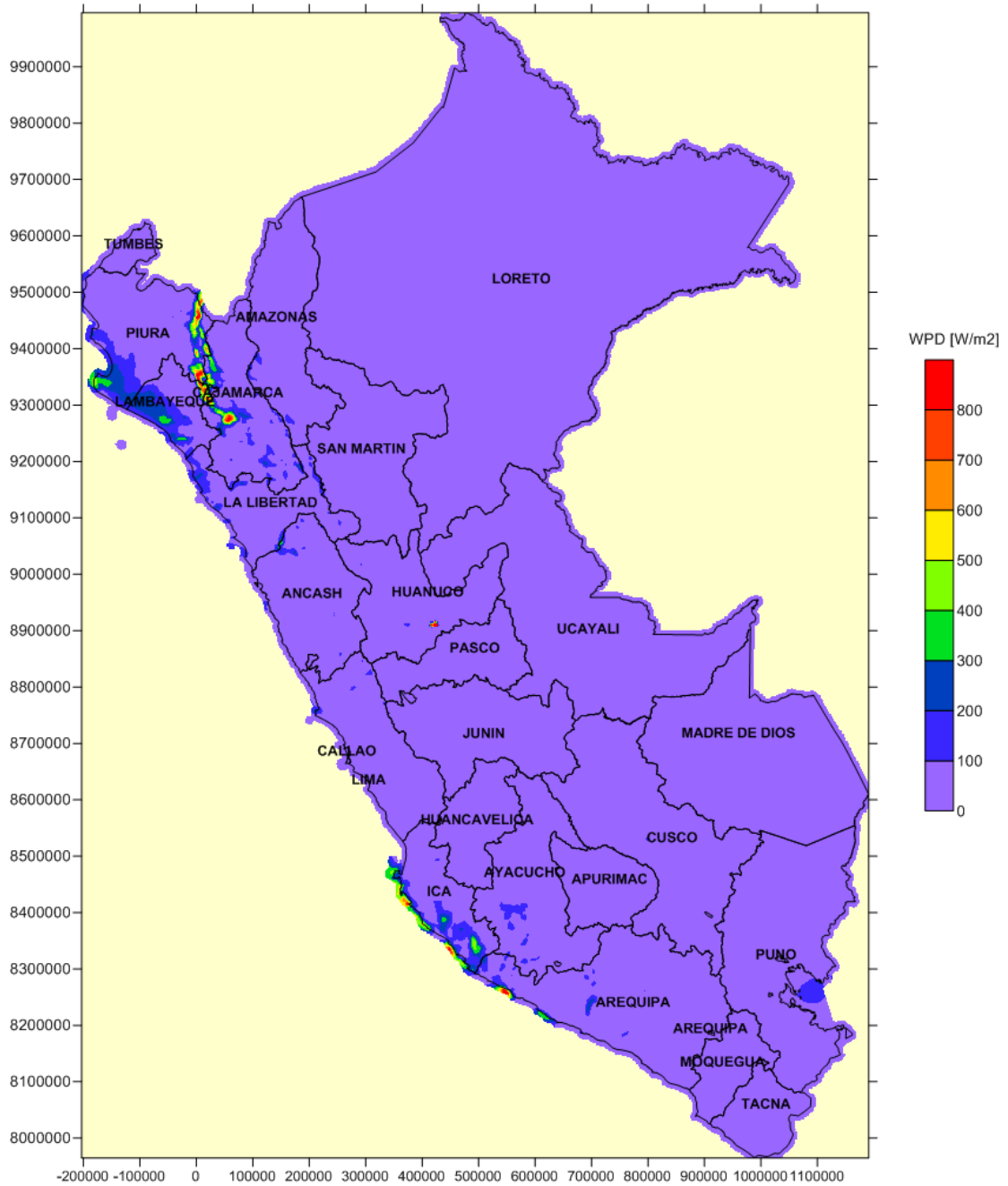


Figura 3. Densidad de potencia media del viento anual a 10 m

Fuente: MINEM, Atlas Eólico del Perú.

Vemos que la velocidad media del viento en Junín es de 0 a 5 m/s y la densidad de potencia media es de 100 W/m² a una altura de 10 m, ante esta limitante nos vemos en la necesidad de poder aprovechar el recurso eólico, ya sea a bajas velocidades de vientos. Por ello, nos realizaremos otra interrogante ¿cómo aprovechar el recurso eólico a bajas

velocidades? Para responder revisaremos el cuaderno de aplicaciones técnicas N.º 12 “Plantas Eólicas” de ABB, el cual nos muestra la siguiente figura.

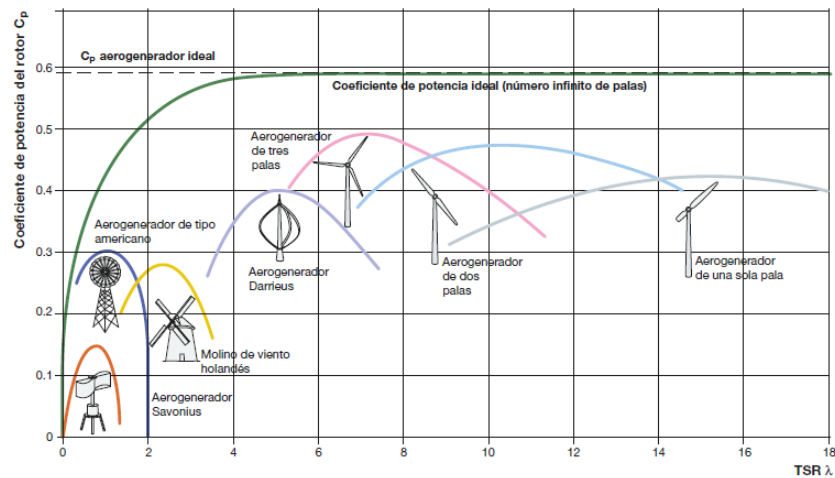


Figura 4. TRS para cada tipo de aerogenerador

Fuente: ABB, Cuaderno de aplicaciones técnicas N.º 12 “Plantas Eólicas”

En la figura 4 observamos el TRS (Tip Speed Ratio), que es la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la pala de un aerogenerador y la velocidad del viento en la entrada del tubo de flujo, además nos muestra el coeficiente potencia del rotor C_p , que se usa para calcular la potencia del aerogenerador. Para nuestro caso utilizaremos el aerogenerador Savonius que es de eje vertical para vientos a bajas velocidades y rango limitado, el modelo es el más fácil de producir, ya que consta de 2 o 4 chapas verticales en forma de semicilindro como se observa a continuación.



Figura 5. Aerogenerador Tipo Savonius

Fuente: ABB, Cuaderno de aplicaciones técnicas N° 12 “Plantas Eólicas”.

Este tipo de aerogenerador presenta algunas desventajas frente a otros, los cuales son la baja eficiencia, velocidad de rotación lenta, recomendado para aplicaciones de baja potencia y requiere una estructura robusta que soporte los vientos fuertes.

Frente a estas condiciones tenemos la necesidad de diseñar un aerogenerador tipo Savonius modificado y brindar energía suficiente a una instalación eléctrica residencial en el distrito de Ahuac-Chupaca-Junín, a partir de ello se plantea la siguiente interrogante.

1.1.1. Problema general

¿Cómo será el diseño y la construcción del aerogenerador Savonius modificado que influya en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Cómo influirá la velocidad del viento del aerogenerador Savonius modificado en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021?
- ¿Cómo influirá las revoluciones por minuto del aerogenerador Savonius modificado en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021?
- ¿Cómo influirá el rendimiento del aerogenerador Savonius modificado en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar cómo será el diseño y la construcción del aerogenerador Savonius modificado que influya en energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar cómo influirá la velocidad del viento del aerogenerador Savonius modificado en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021.
- Determinar cómo influirá las revoluciones por minuto del aerogenerador Savonius modificado en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021.

- Determinar cómo influirá el rendimiento del aerogenerador Savonius modificado en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021.

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación técnica

Se realiza el diseño y la construcción del aerogenerador, ya que los actuales aerogeneradores Savonius tienen un bajo rendimiento, debido a que están sometidos a dos fuerzas de empuje una a favor en la zona cóncava del primer álabe y una fuerza de empuje menor por el lado convexo del segundo álabe. En esta investigación se realiza modificaciones al modelo original y se obtiene un aerogenerador de eje vertical que solo está sometido a la fuerza de empuje a favor, gracias a los deflectores de viento que se implementarán y mejorarán el rendimiento en aproximadamente 4.61 veces en comparación al aerogenerador sin los deflectores.

1.3.2. Justificación económica

Con la inestabilidad económica y el aumento de precios de productos básicos, muchas familias de nuestra sociedad requieren una forma de generar un ahorro económico. Por ello, esta investigación permitirá tener un aerogenerador con buen rendimiento y que pueda suministrar de energía eléctrica suficiente como para generar ahorro económico a las familias que implementen este aerogenerador en un periodo aproximado de 18 años.

1.3.3. Justificación teórica

La investigación permitirá tener mayor conocimiento sobre los aerogeneradores Savonius, ya que su aplicación es muy limitada y veremos todos los cálculos necesarios para el diseño del aerogenerador realizando un aporte al desarrollo de estas, además se abren puertas para que nuevos investigadores continúen con la mejora del diseño.

1.3.4. Justificación social

Cada vez el uso de la energía eléctrica es de vital importancia en nuestra sociedad, ya que sin ella las actividades cotidianas no serían las mismas, con ello la demanda de energía eléctrica va en crecimiento. Por tanto, en esta investigación se propone un diseño de aerogenerador Savonius modificado que pueda suministrar un porcentaje de energía eléctrica requerida por cada familia.

1.3.5. Justificación ambiental

En vista de la creciente contaminación en nuestra sociedad y a nivel mundial, se busca promover el uso de la energía eólica, debido a que se trata de una fuente limpia que no emite gases de efecto invernadero. Además, su impacto ambiental es mínimo, ya que el diseño de los aerogeneradores de eje vertical involucra un área significativamente más pequeña en comparación con los aerogeneradores de eje horizontal. Asimismo, estos aerogeneradores no generan ruido, lo que contribuye a un entorno más silencioso y menos intrusivo.

1.4. Importancia de la investigación

Considero importante este estudio, ya que las familias del distrito de Ahuac-Chupaca no aprovechan el recurso eólico disponible en la zona. Además se requiere

fomentar el uso de la energía eólica para generar beneficio económico y el uso de nuevas tecnologías para poder aprovechar el recurso eólico.

1.5. Limitaciones

Una de las principales limitantes es la accesibilidad de algunos materiales, equipos e instrumentos para realizar nuestro estudio, como la adquisición del generador y anemómetro, lo cual retrasó el avance de la investigación.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

El diseño y la construcción del aerogenerador Savonius modificado tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario del distrito de Ahuac, 2021.

1.6.2. Hipótesis específicas

- A. El rendimiento del aerogenerador Savonius modificado tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021.
- B. Las revoluciones por minuto del aerogenerador Savonius modificado tienen influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021.
- C. La velocidad del viento del aerogenerador Savonius modificado tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021.

1.7. Descripción de Variables y Operacionalización de Variables

Tabla 2. *Operacionalización de variables*

Autor	Pool Diego Medina Socualaya	
Título	Propuesta de diseño y construcción del aerogenerador Savonius modificado para suministrar de energía eléctrica a un usuario residencial Ahuac-2021	
Problema	¿Cómo será el diseño y la construcción del aerogenerador Savonius modificado que influya en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021?	
	Independiente	Dependiente
Variables	Aerogenerador Savonius.	Energía eléctrica
Definición conceptual	Es un generador eléctrico que se alimenta por el movimiento de una turbina que es activada por el desplazamiento del viento.	La energía eléctrica se origina de la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos determinados, que se ponen en contacto a través de un transmisor eléctrico. Este contacto genera una corriente eléctrica basada en la transmisión de cargas negativas hasta su punto de consumo.
Definición operacional	Para evaluar el aerogenerador Savonius se realizará el diseño y la construcción de la misma y posteriormente se medirán las dimensiones de la variable como RPM, velocidad del viento y rendimiento.	Para evaluar la energía eléctrica se medirá en Watts

Variable Independiente		Aerogenerador Savonius.		
Dimensiones o Sub Variables	Indicador	Unidad	Tipo de variable	Instrumento
Generador Eléctrico	Rendimiento	n	Cuantitativa Continua	experimentación
Movimiento de la turbina	revoluciones por minuto	RPM	Cuantitativa Continua	experimentación
Desplazamiento del viento	velocidad del viento	m/s	Cuantitativa Continua	experimentación
Variable Dependiente		Energía eléctrica		
Dimensiones o Subvariables	Indicador	Unidad	Tipo de variable	Instrumento
Energía Eléctrica	Potencia	W	Cuantitativa Continua	experimentación

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del Problema

2.1.1. Artículos científicos

En el artículo “Diseño y construcción de un aerogenerador tipo Savonius Multietapa” (1), se propone la construcción de un aerogenerador no convencional tipo Savonius. Para la construcción se utilizaron materiales reciclados como tableros de dibujo desechados, contenedores cilíndricos de aceite y piezas de acero fabricadas a medida se utilizaron instrumentos como el anemómetro con precisión de $\pm 3\%$, que se utilizó para medir la velocidad del viento. Además, se utilizó un tacómetro para medir las RPM del rotor del aerogenerador, la turbina del aerogenerador fue instalada en condiciones naturales y expuesta a velocidades de viento de 1.2 m/s y 5 m/s temperatura de 25 °C y presión atmosférica de 98171.4 Pa. Finalmente se obtuvieron relaciones de torque estático vs. velocidad del viento, velocidad angular vs. velocidad del viento con lo que se pudieron realizar las curvas de desempeño de la turbina como la relación del coeficiente de potencia vs. radio típico de velocidad, la potencia eléctrica estimada vs. velocidad del viento.

En el artículo “Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador de eje vertical para oxigenar estanques de peces” (2) se realizó un análisis donde se eligieron dos tipos de álabes, el primero con forma semicircular fue construido a partir de un tubo de PVC de 3/4 de pulgada cortados por la mitad con bases de acrílico de 3 mm de espesor; el segundo es recto hecho de láminas galvanizadas de calibre 26 los que se fijaron con tuercas de 1/8 de pulgada. Se construyeron 6 álabes de cada uno y se hicieron pruebas a los 2 tipos de álabes dentro de un túnel de viento marca Armfield, modelo C15-10

usando 2,3,4 y 6 álabes por prueba y a la vez se variaba el ángulo de ataque entre 0, 45, 90 y 135 grados se tomaron 20 mediciones en cada caso y se promediaron para obtener una velocidad de giro promedio. Se obtuvo que la configuración correcta es de 6 álabes semicirculares a 45 grados, el cual muestra un mejor desempeño a bajas velocidades.

El artículo “Estudio de las características cualitativas de aerogeneradores mediante un modelo a escala” (3) presenta un modelo de aerogenerador de doble hélice, una a sotavento y otra a barlovento. El modelo a escala fue probado en un túnel de viento de 600 mm de diámetro y se utilizó un ventilador de 200 W con una turbina de 726 mm de diámetro se utilizó un termo anemómetro DT-619 en un rango de medición de 0.4 m/s a 30 m/s y una precisión de 0.01 m/s. Los resultados muestran que los aerogeneradores con 2 turbinas colocadas a barlovento y sotavento que giran en un solo sentido brindan una potencia adicional mínima de 44 %, además que la disposición de las turbinas a una misma distancia deben ser las mismas, ya que con esta configuración permite reducir la potencia del mecanismo que hace girar las góndolas además evitamos el mecanismo de freno, ya que la variación del rendimiento del aerogenerador y de la velocidad de rotación es posible modificarlo mediante un controlador de orientación de góndola respecto a la velocidad del viento.

En el artículo “Aerogenerador Alisio” (4), se evalúa un generador de eje vertical con la finalidad de dar a conocer la factibilidad del uso de este tipo de generadores. Se establecen los parámetros de funcionamiento como las revoluciones por minuto de la turbina respecto a la velocidad del viento y, conociendo el potencial eólico donde realizan dicho estudio, se pudo calcular la eficiencia del aerogenerador resaltan que, si las pruebas se hubieran realizado en zonas montañosas, los resultados serían mejores, además que el generador Alisio es superior a aerogeneradores de eje horizontal a bajas

velocidades de viento. Se concluye que el aerogenerador Alisio es viable, ya que se obtienen voltajes aceptables a velocidades de viento superiores a 3.88 m/s.

En el artículo “Diseño experimental de aerogenerador tipo Savonius” (5) se describen el diseño y el cálculo de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius. Además, se busca que los resultados obtenidos nos ayuden a dimensionar un aerogenerador, la potencia, velocidad de giro, y el diseño de las palas se realizó utilizando materiales reciclados, como tuberías de PVC y soportes metálicos. Este enfoque de diseño ofrece una mejor comprensión del funcionamiento tanto externo como interno de un aerogenerador tipo Savonius.

2.1.2. Tesis

En la tesis “Diseño de un aerogenerador vertical Savonius-curvado para ensayos experimentales con velocidades de 4 m/s a 8 m/s” (6), se expone la diferencia y los aerogeneradores de eje vertical tipo Savonius y se plantea un diseño distinto al diseño original del aerogenerador Savonius. Además, se destacan las ventajas del rotor Savonius curvado entre las características más relevantes son la mayor cantidad de puntos de contacto entre en viento y el rotor. El autor diseñó el rotor Savonius curvado y realizó el ensayo en un túnel de viento de 50 x 50 y determinó los coeficientes de desempeño del aerogenerador diseñado. Concluye que el rotor Savonius curvado cumple las recomendaciones de diseño según investigaciones que utilizó como referencia.

En la tesis “Perfil de un aerogenerador tipo vertical en el edificio de 15 pisos de la universidad nacional del altiplano Puno-2018” (7), se expone la importancia de los aerogeneradores de eje vertical y lo aplican al edificio de 15 pisos de la UNAP. Además,

se resalta la eficiencia energética que produce este aerogenerador, ya que una problemática principal es el costo de energía eléctrica además de representar una ayuda al medio ambiente, pues es energía limpia. Se concluye que un solo aerogenerador no suministraría la cantidad necesaria de energía para el edificio de 15 pisos y que se requieren 5 aerogeneradores de eje vertical para producir 18.4 kW de energía, con lo que cumplirían la demanda del edificio, un solo aerogenerador cumplirá la demanda de iluminación, pero solo en casos de contingencia cuando no exista servicio eléctrico.

En la tesis “Prototipo experimental turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia” (8), se enfoca su diseño en la construcción de un rotor de eje vertical para aplicación a baja potencia, además su diseño incluye la construcción de un alternador de imanes permanentes el cual nos servirá de referencia para poder convertir la energía mecánica en energía eléctrica en nuestro diseño. Se concluye que el aerogenerador diseñado genera 44 W y la eficiencia es de 7 %, además se enfatiza que estos resultados se debieron a muchos factores que no tomaron en cuenta como las técnicas de construcción y algunas variables que no tomaron en cuenta. Por tanto, se tomará en cuenta estos factores para que nuestro diseño tenga una mejor eficiencia.

En la tesis de maestría “Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico” (9), se realizó un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, donde se propuso dos prototipos. El primero fue realizado con una impresora 3D a escala, el cual fue sometido a variables y poder observar el funcionamiento; el segundo fue fabricado con una altura de 1.7 metros con una capacidad para cargar una batería de 120 Ah, el cual entregó de 3 a 6 W energía equivalente para cargar de 4 a 8 teléfonos celulares al día. Se concluyó que el aerogenerador diseñado no podía competir con los precios de la red eléctrica de España, pero es una buena alternativa para hogares aislados que no

pueden acceder a la red eléctrica. Este trabajo nos ayudará a poder realizar un correcto dimensionamiento, ya que pretendemos realizar un prototipo a escala en una impresora 3D, además de realizar una evaluación económica respecto al impacto del prototipo a escala real.

En la tesis de maestría “Diseño de un generador eólico vertical de $\frac{1}{2}$ kWh para velocidades de 7 m/s” (10), se presentó el diseño de un aerogenerador de eje vertical, ya que se identificó la necesidad de tener un generador eólico eficiente para ambientes urbanos. Se realizaron los cálculos para obtener un generador eólico de $\frac{1}{2}$ kWh y que funcione a velocidades de 7 m/s, se ejecutaron las simulaciones en el *software* SolidWorks y se observaron los esfuerzos mecánicos de los componentes más relevantes como rodamientos y las aspas. Además, el diseño preliminar se realizó para una carga de 25 kWh al día y gracias a este aerogenerador. Se concluyó que se reduciría el consumo en un 20 % en un área de barrido de 1 m^2 con la capacidad de generar 609 W al día, resaltan el uso del *software* SolidWorks, ya que se pueden modelar sistemas complejos y ser analizados intuitivamente además permiten realizar pruebas no consideradas al inicio del estudio como deformaciones térmicas, fatiga de materiales y fallas por vibraciones resonantes.

En la tesis “Diseño y construcción de un sistema de iluminación autosustentable alimentado por un aerogenerador accionado por vientos de baja velocidad” (11), se presentó el diseño y la construcción de un aerogenerador para suministrar energía a un sistema de iluminación LED. Gracias al estudio teórico-bibliográfico, se pudo obtener los criterios ingenieriles para realizar el diseño y la construcción del aerogenerador, este consta de unas toberas o deflectores de viento, el cual es un mecanismo nuevo que cumple la función de dirigir y aumentar la velocidad del viento en cada álabe de la

turbina. En la investigación se concluyó que el aerogenerador Savonius y multipalas pueden ofrecer gran eficiencia a bajo costo además que el diseño que presentaron se puede mejorar optimizando los cálculos teóricos y de diseño y recomiendan que el rotor del aerogenerador debe ser lo más liviano posible, ya que muestra mayor eficiencia.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Aerogeneradores

Un aerogenerador es una máquina que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica, que posteriormente se convierte en energía eléctrica. Se clasifica en función de la dirección de su eje central, que puede ser vertical u horizontal. (12)

2.2.1.1. Eje vertical (VAWT)

Los aerogeneradores de eje vertical giran perpendicularmente al suelo y el eje está orientado de forma vertical. Este tipo de turbina funciona gracias al arrastre, elevación o una combinación de ambos para funcionar, existen dos tipos de aerogeneradores VAWT y ambos modelos funcionan con principios diferentes. El primero es Savonius que usa la fuerza de arrastre del viento, una analogía correcta sería una rueda hidráulica que usa el agua para moverse. El segundo modelo es el Darrieus que usa una pala aerodinámica para generar elevación y así generar una rotación en el eje. Estos aerogeneradores no han recibido tanta atención en el desarrollo e investigación como los HAWT, pero tiene algunas ventajas sobre estas, la primera es que es omnidireccional, es decir no es afectado por los cambios de dirección del viento, la segunda es que no requiere fuertes vientos por ello es posible la instalación de estas en áreas urbanas. (13) El tercero que la estructura es más sencilla y de más fácil

mantenimiento y facilita el control de esta y por último son más silenciosos donde un HAWT produce un nivel de ruido de 95 dB un VAWT produce 38 dB. (14)

2.2.1.2. Eje horizontal (HAWT)

Los molinos de viento tradicionales han sido sustituidos por turbinas eólicas de eje horizontal. Constan de una góndola horizontal al suelo y montada perpendicularmente a una torre de turbina, lo que permite a ésta girar gracias a la sustentación aerodinámica. A continuación, se describen las partes principales de un aerogenerador:

- Eje de rotor principal.
- Generador eléctrico.
- Caja de cambios que aumenta la velocidad de rotación a la salida del rotor.
- Palas de turbina con la rigidez necesaria para evitar el contacto con la torre.
- Veleta que dirige la turbina en la dirección correcta del viento.
- Anemómetro para medir la velocidad del viento.
- Torre, que sirve como soporte de la turbina.

El uso de aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) ofrece varias ventajas. En primer lugar, la posibilidad de variar el ángulo de ataque del viento permite extraer el máximo de energía eólica. Esto es posible gracias al paso variable de las palas. En segundo lugar, como sus palas son perpendiculares a la dirección del viento, las turbinas de eje horizontal son más eficientes porque pueden aprovechar más energía para girar. Por último, en comparación con las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT), estas turbinas ofrecen una gran ventaja. (14)

2.2.2. Energía eólica

ENEL Perú describe la energía eólica como “una fuente renovable de energía obtenida a partir de la energía cinética del viento” (15). Puede transformarse en otro tipo de energía mediante un dispositivo que aprovecha la energía cinética del viento, la transforma en energía mecánica y, finalmente, en energía eléctrica. A diferencia de otras fuentes de energía tradicionales como la hidroeléctrica y la solar, la tecnología eólica está actualmente muy desarrollada hasta el punto de poder crear energía eléctrica a costos razonables, según el Atlas Eólico del Perú 2016 del MINEM. (16)

2.2.2.1. Origen del viento

De acuerdo con el atlas eólico del Perú de 2016 del MINEM, se explica que el viento se origina a partir de la diferencia de temperatura entre los polos y el ecuador, como resultado de la radiación solar recibida en la Tierra. Además, se menciona que la atmósfera se divide verticalmente en varias capas, como se ilustra en la figura 6. Entre estas capas, se destaca la troposfera, que abarca desde la superficie terrestre hasta aproximadamente 10 km de altura. En términos de energía eólica, esta capa es de gran importancia, ya que es en ella donde se instalan los aerogeneradores. (16).

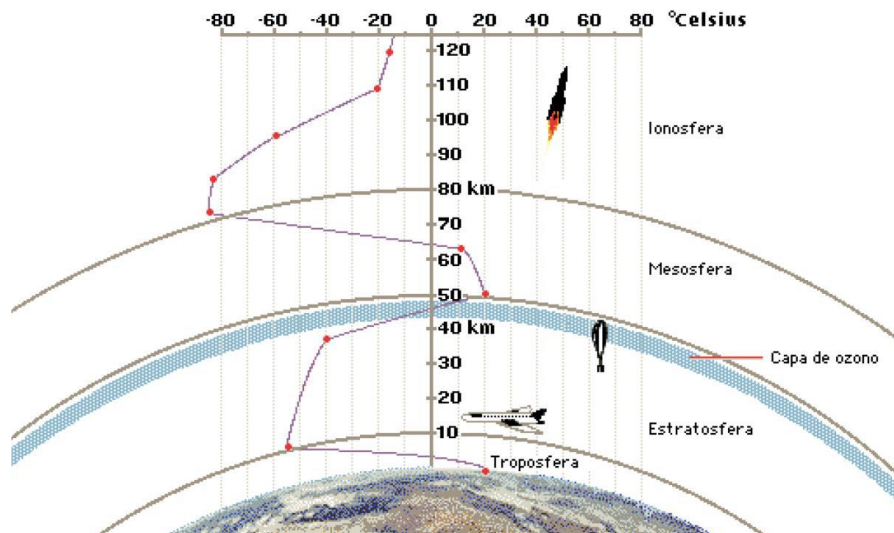


Figura 6. Capas de la atmósfera

Fuente: Atlas eólico del Perú 2016.

2.2.2.2. Instrumentos de medición

Cuando se analiza el desplazamiento del viento, se puede observar que varía en términos de dirección e intensidad. Según el atlas eólico del Perú de 2016 del MINEM, se menciona que el viento es una fuente de energía que es variable y aleatoria. Para poder estudiar las posibilidades de aprovechamiento de esta energía, se requiere el uso de diversos tipos de instrumentos, los cuales son los siguientes (16):

- Anemómetro: se utiliza para medir la velocidad del viento.
- Veletas: se emplean para medir la dirección del viento.
- Termohigrómetros: se utilizan para medir la humedad y temperatura del aire.
- Barómetro: se utiliza para medir la presión atmosférica.

En conclusión, para poder establecer un parque eólico, es necesario llevar a cabo un estudio del recurso eólico disponible. Los datos obtenidos mediante los instrumentos

mencionados anteriormente serán de gran importancia para dimensionar las características del parque eólico.

2.2.2.3. Densidad el aire

La densidad del aire se refiere a la cantidad de masa o sustancia de aire contenida en un determinado volumen. Esta densidad puede variar según la presión atmosférica, la temperatura y la humedad. Por tanto, la densidad del aire es un factor importante para determinar la cantidad de energía que se puede extraer del viento, ya que la energía cinética del viento está directamente relacionada con la densidad del aire. En otras palabras, cuanto más densa sea el aire, mayor será la cantidad de energía que se puede obtener del viento. A continuación, se presentan los cálculos para determinar la densidad del aire en función de la altura. (17)

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

Donde:

P: es la presión atmosférica Pa.

T: es la temperatura absoluta [292.85 °K.]

R: es la constante de los gases en el aire seco [287 J/kg.°K.]

Para calcular la presión atmosférica a la altura deseada se utilizará las siguientes ecuaciones:

$$P = P_0 * e^{-\alpha * h}$$

$$\alpha = \frac{\rho_0 * g}{P_0}$$

Donde:

h: altura sobre el nivel del mar.

ρ_0 : densidad específica [1.22 kg/m³]

P_0 : presión atmosférica a nivel del mar [101325 Pa]

g : gravedad [9.8 m/s²]

2.2.2.4. Límite de Betz

Los aerogeneradores transforman la energía cinética del viento en energía mecánica. Para determinar la cantidad de potencia que puede generar un área específica de viento, se utiliza el siguiente enfoque. Según el atlas eólico del Perú de 2016 del MINEM, se toma como referencia un “tubo de corriente con sección transversal A ” en el campo fluido de un viento uniforme con velocidad V , como se muestra en la figura adjunta. (16)

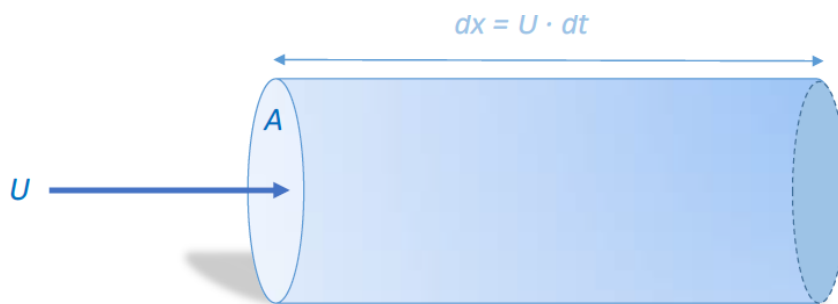


Figura 7. Flujo a través de un disco.

Fuente: Tomado de MINEM.

El fluido atraviesa perpendicular a la sección A el flujo atraviesa el disco por unidad de tiempo. Usaremos la ecuación de la continuidad que es producto de la ley de la conservación de la masa, la cual es (16):

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho * v)}{dt} = \rho * A * \frac{dx}{dt} = \rho * A * U$$

Donde:

ρ : densidad del aire que es constante en el tiempo

De la ecuación anterior se deriva la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{2} * \rho * A * U^3$$

Utilizando la siguiente ecuación, es posible calcular la potencia generada por el viento en un área determinada. Sin embargo, existe una limitación. Según el Atlas Eólico del Perú de 2016 del MINEM, no todo el viento que ingresa al área de un aerogenerador produce energía utilizable. Esto se debe al límite de Betz, que establece restricciones en la máxima cantidad de energía que se puede extraer de los aerogeneradores. Cuando el viento entra en el tubo del rotor, pierde velocidad a medida que sale, ya que el rotor debe frenar el viento para convertir su energía cinética en energía mecánica rotacional. Además, al realizar el estudio a través de un tubo de corriente, la cantidad de aire que ingresa debería ser igual a la cantidad de aire que sale. Sin embargo, debido a la pérdida de presión al atravesar el rotor del aerogenerador, el área transversal a la salida se incrementa, como se ilustra en la figura adjunta. (16)

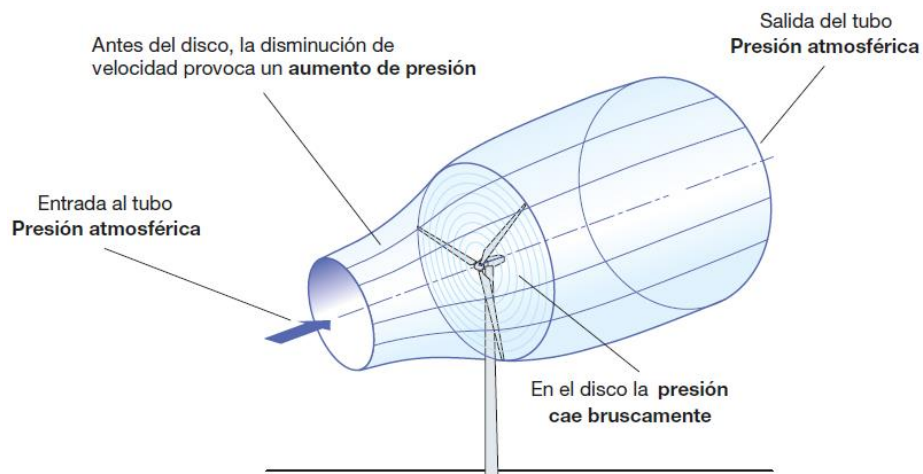


Figura 8. Análisis del tubo de corriente.

Fuente: ABB, Cuaderno Técnico Planta Eólicas.

Además, menciona que el coeficiente de potencia C_p de un aerogenerador viene a ser el rendimiento con el cual funciona el mismo está variable, se encuentra sujeta a condiciones de funcionamiento del aerogenerador además del tipo de generador a

utilizar. En la siguiente figura podemos observar los valores que toma C_p en función a su cociente $U2/U1$ y el límite de Betz nos dice que el valor máximo que puede tomar es de aproximadamente 0.5925 (16).

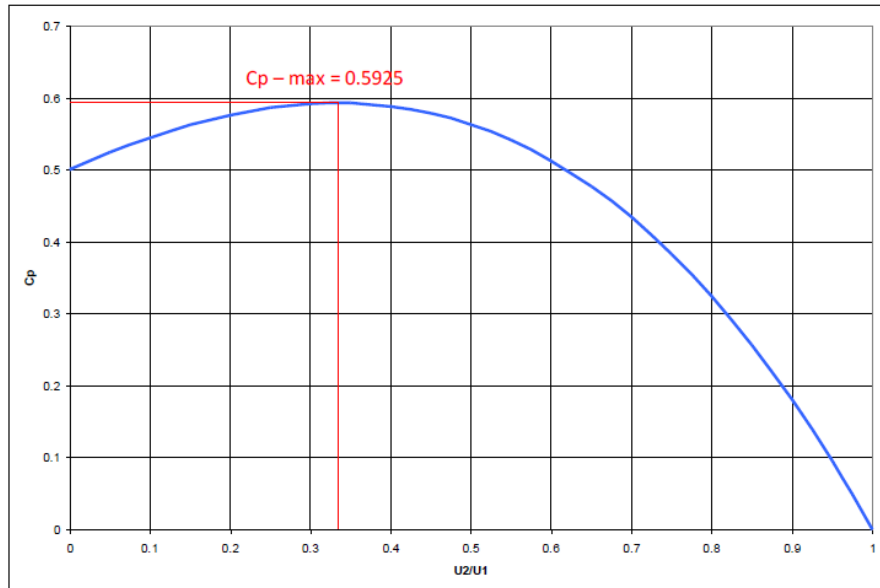


Figura 9. Límite de Betz.

Fuente: MINEM, Atlas Eólico del Perú.

2.2.2.5. Velocidad Específica TRS

Según el Cuaderno de Aplicaciones Técnicas N.º 12 Plantas eólicas de ABB, se menciona que las características aerodinámicas de un aerogenerador se definen mediante la relación TRS y el C_p . El TRS se calcula a partir de la relación entre la velocidad tangencial en los extremos del rotor y la velocidad del viento en la entrada del tubo de corriente. Esta relación se expresa de la siguiente manera: (18)

$$\lambda = \frac{V_t}{V_1} = \frac{\Omega \cdot R}{V_1}$$

Donde:

Ω : la velocidad angular del rotor.

R: radio del rotor.

V1: velocidad del viento a la entrada del tubo de flujo.

A continuación, se muestra la figura 10 donde veremos la relación TRS y C_p para cada tipo de aerogenerador y poder tener una referencia de los coeficientes de potencia para cada tipo de aerogenerador.

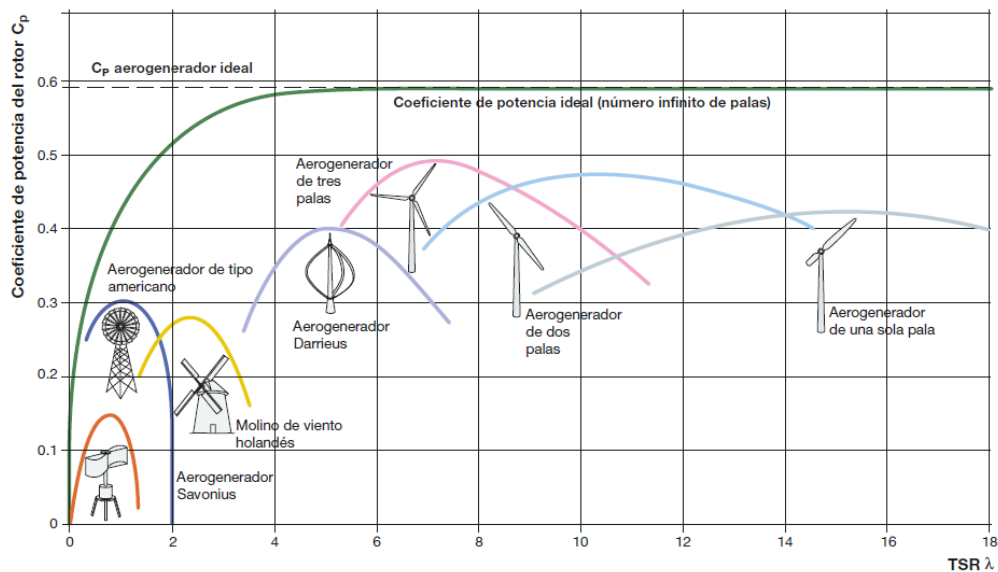


Figura 10. Relación TRS y C_p .

Fuente: ABB, Cuaderno Técnico Planta Eólicas.

2.2.2.6. Distribución de Weibull

Es una distribución de probabilidades que nos indicará qué tan probable es que suceda un evento, en nuestro caso se utilizará para estimar que velocidades de viento que son más probables a suceder y determinar el potencial eólico disponible. (16)

Esta distribución se expresa de la siguiente forma:

$$P(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right]$$

Donde:

P(U): es la probabilidad estadística que ocurra una determinada velocidad.

c: Factor de escala (m/s)

k: Factor de forma

El factor c se relaciona de forma directa con la velocidad media y esta expresado en m/s se calcula con la siguiente expresión:

$$c = \frac{U}{e^{\Gamma(1+\frac{1}{k})}}$$

Donde:

Γ : es la función Gamma de Euler.

El factor k nos indica cómo es la simetría de la distribución donde valores cercanos a 1 nos indicará una distribución muy asimétrica, mientras que para valores de k entre 2 y 3 corresponden distribuciones simétricas parecidas a la distribución de Gauss. Además, el factor k toma distintos valores en función a la morfología del terreno y la velocidad del viento del lugar donde estará nuestro aerogenerador como se muestra a continuación. (18)

Tabla 3. *Valores típicos de k para distintas morfologías de terreno*

Factor de forma k	Morfología del terreno	Régimen de vientos
1.2-1.7	Lugares montañosos	Muy variable
1.8-2.5	Grandes llanuras-colinas	Variable
2.5-3.0	Campo abierto	Bastante regular
3.1-3.5	Zonas costeras	Regular
3.5-4.0	Islas	Muy regular

Fuente: Tomado de ABB, Cuaderno técnico.

2.2.2.7. Velocidad del viento a diferentes alturas

Una de las características del viento en relación con el suelo a una altura específica es que la fricción del suelo tiende a reducir la velocidad del viento. Esta variación está influenciada por la rugosidad del terreno y la presencia de obstáculos. La velocidad registrada por el anemómetro no siempre se encuentra a la misma altura en la que estará el aerogenerador. Por lo tanto, es necesario conocer la velocidad real del viento a la altura de operación en relación con el suelo, lo cual se determina utilizando la siguiente ecuación: (19)

$$v_2 = v_1 * \frac{\ln \frac{h_2}{Z_0}}{\ln \frac{h_1}{Z_0}}$$

Donde:

h1: altura del anemómetro.

h2: altura del aerogenerador.

V1: velocidad registrada.

Z₀: longitud de rugosidad (m).

La longitud de rugosidad se puede clasificar según el tipo de paisaje como se muestra a continuación:

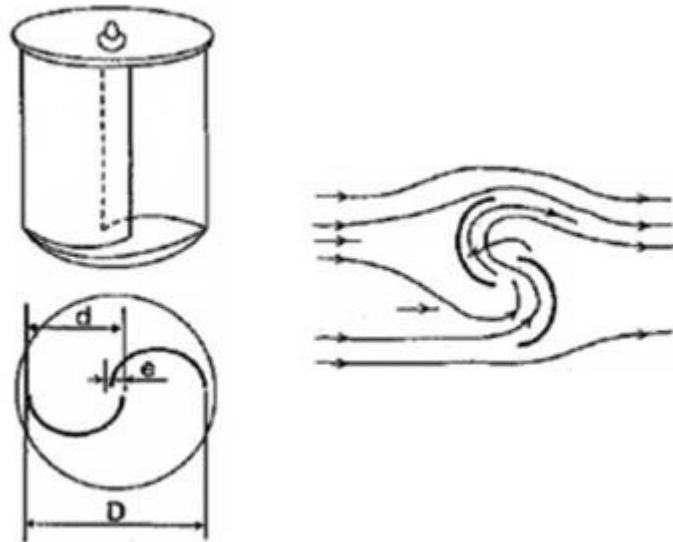
Tabla 4. Longitud de rugosidades para distintos tipos de paisajes

Clases de rugosidades	Longitud de rugosidades Z_0 (m)	Tipo de paisaje
0	0.0002	Superficie del agua
0.5	0.0024	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p.ej., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0.03	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas
1.5	0.055	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1.250 m.
2	0.1	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2.5	0.2	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0.4	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual
3.5	0.8	Ciudades más grandes con edificios altos
4	1.6	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

Fuente: Atlas Eólico Europeo.

2.2.3. Aerogenerador Savonius

Está constituido por dos semicilindros desplazados entre sí, este desplazamiento hace que el cambio en la dirección del fluido sea más fácil, adicionalmente se aprovecha de la cantidad de movimiento del fluido. (20)



*Figura 11. Principio de funcionamiento de un rotor de eje vertical (Savonius).
Fuente: Ingeniería de la Energía Eólica.*

Este aerogenerador funciona gracias a la fuerza aerodinámica que ejerce el flujo del aire sobre distintas superficies, esta fuerza se demuestra con la siguiente ecuación:

$$F = C \left(\frac{1}{2} * \rho * A * w^2 \right)$$

Donde:

En donde:

C: coeficiente aerodinámico que depende de la geometría del objeto.

ρ : densidad del aire.

A: área de la sección transversal que presenta el cuerpo al flujo de aire.

w: velocidad relativa del aire respecto al objeto.

El aerogenerador Savonius se puede analizar con superficies semiesféricas y semicilíndricas, se establece los coeficientes aerodinámicos C para los lados cóncavos y convexos de las superficies como se muestra a continuación.

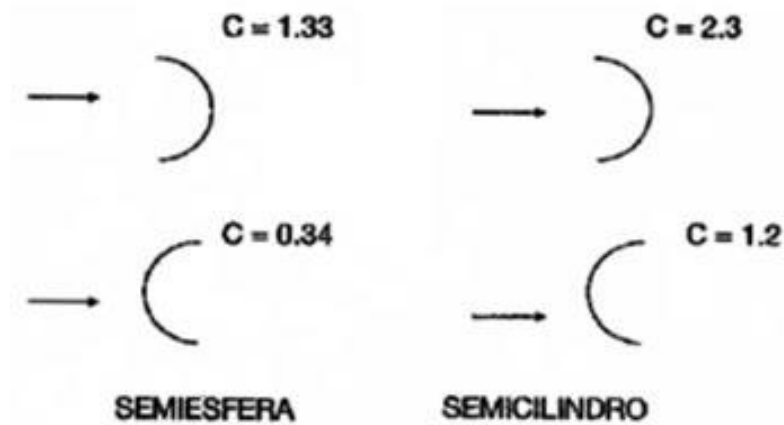


Figura 12. Valores del coeficiente aerodinámico de resistencia C para una semiesfera y un semicilindro.
Fuente: Ingeniería de la Energía Eólica.

El viento ejerce 2 fuerzas en los álabes del aerogenerador los cuales son F y F' , como se observa en la figura 13, ambas fuerzas tienen la misma dirección y sentido, pero distinto módulo. Los álabes al actuar con estas fuerzas generan una rotación en el eje central.

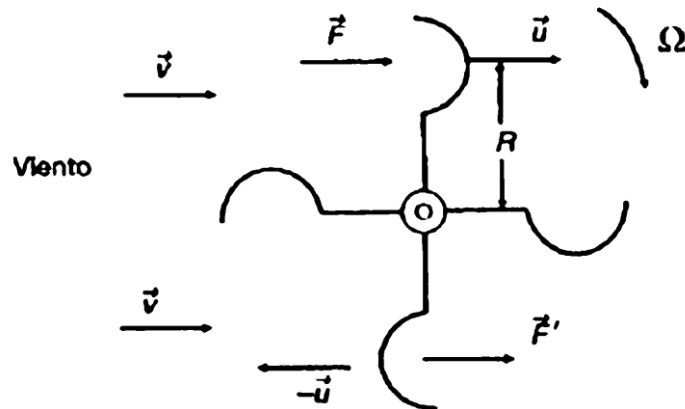


Figura 13. Acción del viento sobre un rotor de arrastre diferencial
Fuente: Ingeniería de la Energía Eólica.

Las fuerzas mencionadas se calculan según las siguientes ecuaciones:

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

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

Donde C es el coeficiente aerodinámico de resistencia que varía en función a la geometría del álabe, para nuestro estudio se utilizara un álabe semicilíndrico, el cual tiene un coeficiente de 2.3 para el área cóncava y 1.2 para el área convexa.

La potencia ejercida por el viento será:

$$P = (F - F')u = \frac{1}{2} \rho A u [C(v - u)^2 - C'(v + u)^2]$$

El valor de la potencia P se hace máximo para una velocidad lineal de los álaves que se obtiene derivando la ecuación anterior e igualando a cero nos da como resultado:

$$u_m = v \frac{2a - \sqrt{4a^2 - 3b^2}}{3b}$$

Siendo:

$$a = C + C'$$

$$b = C - C'$$

Para álaves semicilíndricos usaremos

$$C = 2.3$$

$$C' = 1.2$$

Entonces:

$$a = 3.5$$

$$b = 1.1$$

Obtendremos:

$$u_m = 0.08 v$$

Y concluiremos con la siguiente ecuación:

$$P_m = 0.074 \left[\frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$$

El cual nos da la potencia máxima obtenida por un álabe semicilíndrico.

2.2.4. Deflector de viento

Como se observó anteriormente, la fuerza F' resta potencia al aerogenerador, por ello, se implementa una pantalla orientable o también llamado deflector de viento orientado por un timón o veleta, el cual anula la fuerza F' , el cual también servirá para direccionar el viento a los álabes activos. Como se observa en la siguiente figura. (20)

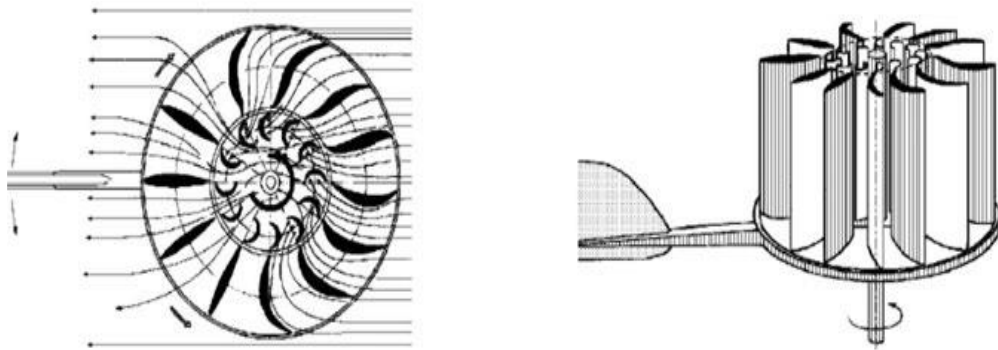


Figura 14. Rotor Savonius provisto de álabes difusores.

Fuente: Ingeniería de la energía eólica.

Entonces, se replantea la ecuación, la potencia máxima para un álabes semicilíndrico donde la fuerza F' desaparece y $u_m=v/3$ debido a que $a=b$. (20)

$$P_m = C * \frac{4}{27} * \left[\frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$$

Donde:

$C= 2.3$ para álabes semicilíndricos.

Y obtendremos:

$$P_m = 0.341 * \left[\frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$$

2.2.5. Engranés

2.2.5.1. Engranés rectos

La función principal de un engranaje es la transmisión de potencia proporcional al par. La relación de transmisión, que es la relación entre el número de dientes del engranaje motriz y el número de dientes del engranaje conducido, se utiliza con frecuencia para el análisis del funcionamiento de los engranajes. Son uno de los tipos más comunes de engranajes con dientes rectos y paralelos al centro del eje que soporta el engranaje. (21).

$$i = \frac{N_e}{N_s} = \frac{W_s}{W_e}$$

Donde:

i : relación de transmisión.

N_e : número de dientes del engrane conductor.

N_s : número de dientes del engrane conducido.

W_e : velocidad del engrane conductor (RPM)

W_s : velocidad del engrane conducido (RPM)

Además, para caracterizar el tamaño físico de los engranes se calcula el módulo o paso diametral que relaciona el número de dientes entre el diámetro primitivo. (21)

$$M = \frac{Dp_1}{N}$$

Donde:

$Dp1$: Diámetro primitivo en el primer engrane.

M = Módulo (el mismo para todo el tren de engranes).

N = Número de dientes.

2.2.6. Generadores en DC

Un generador en DC es una máquina de corriente continua que se utiliza para generar energía eléctrica, se resalta que entre un generador y un motor no hay mucha diferencia a excepción de la dirección del flujo de potencia. Existen cinco tipos de generadores las cuales se diferencian por como generan su flujo de campo. (22)

- Fuente de excitación única. El nombre de este generador proviene del hecho de que una fuente de tensión continua externa independiente proporciona la corriente de campo.
- Generador en derivación. Este generador se caracteriza por suministrar su propia corriente de campo que está conectado a los terminales del generador, es decir en el circuito la corriente del inducido alimenta al circuito de campo y de carga.
- Generador en serie. Este generador tiene conectado el circuito de campo en serie al inducido con la característica que debido a la alta corriente del inducido el circuito de campo tendrá muy pocas vueltas de alambre y de mayor calibre.
- Generador compuesto acumulativo. Este generador tiene dos campos, en serie y en derivación y están instalados de manera que la f.e.m se sumen.

- Generador compuesto diferencial. Este generador tiene dos campos iguales al generador compuesto acumulativo en serie y en derivación con la diferencia de que los campos ahora se restan una a la otra.

2.2.7. Impresión 3D

La impresión 3D es la materialización de objetos a partir de archivos digitales, como resultado podemos obtener procesos rápidos, obtener piezas complejas y reducir costos de producción. En la actualidad existen muchas técnicas de impresión, así como distintos tipos de materiales para la impresión, las impresoras se clasifican en función a la aplicación doméstica o industrial y su uso son diversos y se aplican en máquinas, educación, prótesis, joyería y otros, además permite fabricar productos a medida y que se ajusten a la necesidad de los usuarios sin que esta afecte en el costo final del producto.

(23)

Hoy en día existen muchas técnicas de impresión, las cuales son las siguientes:

- Aditiva que consiste en superponer un material capa a capa hasta terminar la pieza.
- Máquinas que restan a un bloque de material, retirando el material sobrante hasta conseguir la pieza deseada.
- Conformado que consiste en un conjunto de transformaciones sobre un material, este se moldea usando fuerza y moldes.
- Híbridas esta combina dos o más tecnologías ya mencionadas.

2.2.7.1. Modelado por deposición fundida

Consiste en una técnica aditiva, esta comienza desde un filamento metálico o plástico que entra en una boquilla con la temperatura necesaria para fundir el filamento, además está provisto de un mecanismo que controla el flujo del material fundido y lo vierte en los puntos indicados gracias a tres elementos mecánicos que controlan la posición en los ejes X, Y, Z. (23)

Posteriormente, la pieza fabricada será sometida a tratamientos de lijado o pulido y concluir con el acabado.

2.2.7.2. Materiales de impresión

A continuación, se mencionan los materiales que más relevancia tienen en el mercado y son los filamentos de ABS y PLA:

- ABS: está compuesto por acrilonitrilo butadieno estireno, es un termoplástico derivado del petróleo y su principal característica es su rigidez acompañada de un poco de flexibilidad, lo que hace posible su post procesado como el pulido o lijado, comienza a fundirse a los 190 °C y para la extrusión se recomiendan 220 °C a 250 °C. (23)
- PLA: está compuesto de ácido poliláctico derivado del almidón, el mismo que se encuentra en el maíz o la papa, al ser un plástico biodegradable este va ganando popularidad, ya que tiene algunas características que lo diferencia del ABS, tiene una rigidez un poco superior que el ABS y poca flexibilidad y sufre menos deformación en piezas grandes además que la impresión con esta materia es rápido, ya

que no necesita mucha temperatura para fundirse de 180 °C a 230 °C y como se mencionó es un material biodegradable. (23)

2.3. Definición de Términos Básicos

Aerogenerador. Dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica.

Energía. Se define como capacidad que tienen los cuerpos para realizar un trabajo o producir cambios en ellos o en otros cuerpos.

Potencia. Su unidad es el vatio (W) y se utiliza para medir la energía eléctrica en el S.I., es la cantidad de energía eléctrica que un elemento entrega o absorbe en un momento dado.

Fluido. Es un tipo específico de medio continuo formado por partículas de un material que sólo se atraen débilmente entre sí.

Flujo. Se describe cualquier efecto que parece pasar o viajar a través de una superficie o sustancia.

Rendimiento. Se define como la proporción entre el trabajo total producido y el trabajo útil realizado por una máquina en un tiempo determinado.

VAN. El valor actual neto es un indicador de rentabilidad financiera, representa un valor presente del dinero actualizado en el tiempo.

TIR. La tasa interna de retorno es un indicador de rentabilidad financiera expresado de forma porcentual.

SolidWorks. Es un *software* CAD para modelado mecánico en 2D y 3D además ofrece herramientas para el modelado, simulación y análisis de diversos proyectos mecánicos, eléctrico y otros.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método de Investigación

3.1.1. Método general

En la presente investigación se utilizó el método científico, el cual consiste en un grupo de pasos para formular y resolver problemas cognoscitivos mediante la construcción de modelos teóricos y su contrastación con los datos empíricos. (24)

3.1.2. Método específico

En esta investigación se utiliza el método **deductivo**, ya que partiremos de afirmaciones generales y llegaremos a conclusiones más específicas o concretas es decir implica partir de una hipótesis general, formular hipótesis específicas, recolectar datos y evidencias, analizar los datos evaluar las conclusiones y generalizar los resultados. (25)

3.2. Tipo de Investigación

El tipo de investigación por su finalidad será la **aplicada**, ya que esta metodología se centra en aplicar la información científica en algo material modificándolo o cambiándolo, también está orientado a la aplicación rápida más que al desarrollo de teorías científicas. A la vez, es de tipo no experimental, ya que no haremos variar intencionalmente las variables independientes para ver el efecto sobre otras variables solo nos centraremos en observar los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural es decir solo observaremos cómo se comportan las variables del aerogenerador Savonius diseñado. (25)

También, consideraremos que por su profundidad será de tipo **descriptivo**, ya que describe y explica un determinado objeto o fenómeno. (25)

Por último, consideraremos que por el lugar será una **investigación de campo**, porque la investigación se realiza en el lugar geográfico donde ocurren los hechos, además de tener el beneficio de tener el objeto de estudio en su entorno y estudiar mejor los elementos que lo generan o rodean. (25)

3.3. Nivel de Investigación

El nivel del presente estudio será el **descriptivo-correlacional**, ya que se busca describir las características de una población o fenómeno además de establecer la relación entre dos o más variables además que implica observar las variables tal y como se presentan en la realidad. (26)

3.4. Diseño de la Investigación

En esta investigación se utilizó el diseño **no experimental de tipo transversal correlacional**, ya que en esta investigación no se manipulan las variables y así podemos observar el funcionamiento del aerogenerador Savonius, diseñado en el medio donde se realiza el estudio; además que se recolectan los datos en un solo momento, ya que el propósito será describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado. (26)

Utilizaremos como estrategia el uso del *software* Solidworks para realizar el diseño y simulación con el cual observamos el comportamiento del aerogenerador Savonius modificado bajo velocidades de viento registrados por la estación Lamar, ubicada en el centro poblado de Huayao. Posteriormente se realiza la construcción del

aerogenerador para analizar la correlación que existe entre las variables, para realizar los análisis correlacionales se utilizó el método estadístico del coeficiente de Pearson.

Además, se realizó la evaluación económica del aerogenerador Savonius como el VAN, TIR y el periodo de recuperación.

3.5. Población y Muestra

3.5.1. Población

La población en nuestra investigación será el aerogenerador Savonius modificado en el distrito de Ahuac durante el 2021.

3.5.2. Muestra

La muestra serán los datos registrados correspondiente al 2021, para lo cual se trabajó con datos meteorológicos del 2021 de velocidad del viento, los cuales fueron elegidos de forma discrecional por tanto la toma de muestra tiene un criterio no probabilístico.

3.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección y Procesamiento de Datos

3.6.1. Técnicas e Instrumentos utilizados en la investigación

- Análisis documental, A través de la recolección de datos meteorológicos de Senamhi en el 2021.
- Guías de observación en campo, creados por el autor para recolectar datos sobre la velocidad del viento y demás indicadores necesarios en la investigación.

Tabla 5. *Recolección de datos del anemómetro*

Velocidad del viento	Hora anemómetro

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. *Recolección de datos del sistema de monitoreo*

Hora del sistema de monitoreo	RPM	Voltaje	Corriente	Potencia útil final

Fuente: Elaboración propia.

- Sistema de monitoreo, instrumento desarrollado por el autor para recopilar indicadores como tensión, corriente y RPM del aerogenerador Savonius modificado.
- Anemómetro, instrumento usado para recopilar datos en campo de la velocidad del viento.

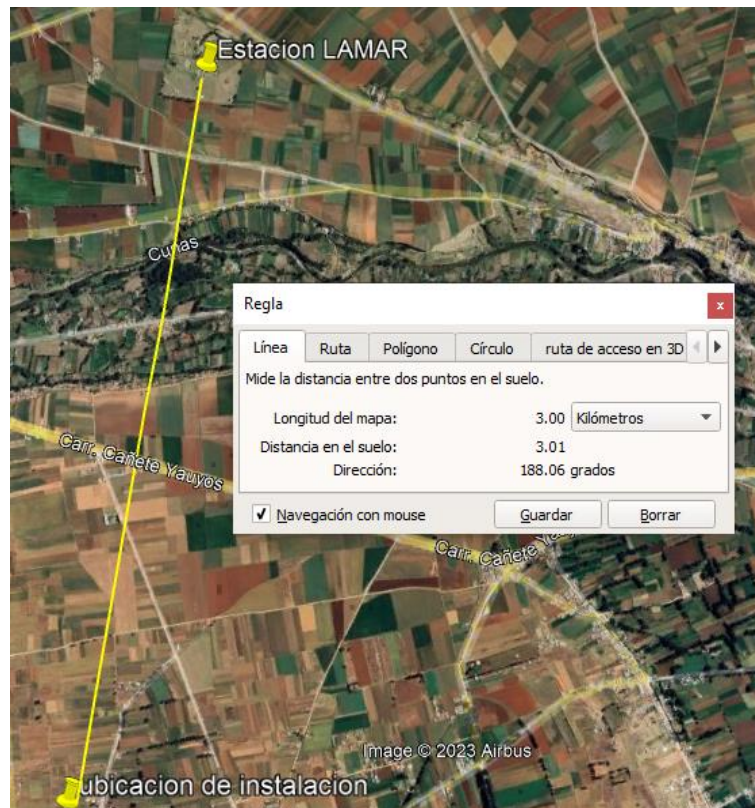
3.6.2. Técnica de procesamiento de datos

Se utilizo el tipo de análisis estadístico, ya que analizaremos datos numéricos, en los cuales para la prueba de la hipótesis se empleó el coeficiente de correlación de Pearson además se utilizó Excel para probar la hipótesis. Asimismo, se usó el *software* Solidworks para realizar la simulación del aerogenerador Savonius, teniendo en cuenta las variables de diseño y evaluar el comportamiento del viento en el aerogenerador.

3.7. Diseño de Ingeniería

3.7.1. Ubicación del aerogenerador

El aerogenerador se ubicará en una vivienda en el distrito de Ahuac, Chupaca, como se observa en la siguiente figura:



*Figura 15. Ubicación del aerogenerador
Fuente: Google Earth*

La ubicación se encuentra en una zona rural libre de estructuras y árboles además de estar a solo 3 km del Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (Lamar) o también conocido como Observatorio Geofísico de Huancayo, ubicado en el centro poblado de Huayao en el distrito de Huachac-Chupaca, el cual será muy útil, ya que podremos utilizar los datos de vientos de dicho laboratorio, pues la ubicación del aerogenerador se encuentra a una altitud muy cercana a la altura de la estación Lamar.

De la ubicación del aerogenerador podemos obtener la siguiente información:

- Altura de la estación Lamar: 3316 m s.n.m.
- Altura ubicación del aerogenerador: 3314 m s.n.m.

Además, de la tabla 4 en la sección 2.2.2.6, determinaremos que la rugosidad aproximada en función al tipo de paisaje es la siguiente:

- Rugosidad Z_0 : 0.4 m.

Este valor corresponde a Pueblos, terreno agrícola con muchos o altos setos resguardantes como se vio en la tabla 4.

3.7.2. Cálculo de la densidad del viento

Calcularemos la densidad del viento en el lugar donde instalaremos el aerogenerador Savonius modificado a una altura de 3314 m s.n.m. en el distrito de Ahuac, para ello utilizaremos la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{P_0 * e^{-\left(\frac{\rho_0 * g}{P_0}\right) * h}}{R * T}$$

Donde:

P_0 : presión atmosférica a nivel del mar [101325 Pa]

ρ_0 : densidad específica del aire [1.22 kg/ m³]

g : gravedad [9.8 m/s²]

h : altura sobre el nivel del mar [3314]

R : constante de los gases [287 J/kg.°K]

T : temperatura absoluta [292.85 °K]

Remplazando obtenemos que la densidad del viento:

$$\rho = \frac{101325 * e^{-\left(\frac{1.22 * 9.8}{101325}\right) * 3314}}{287 * 281.85}$$

$$\rho = 0.815 \text{ kg/m}^3$$

3.7.3. Velocidad del viento para el funcionamiento

Para determinar la velocidad de viento que se utilizará para el dimensionamiento del aerogenerador, emplearemos los datos proporcionados por Senamhi en el anexo 3, que es un registro de la velocidad del viento durante un periodo de 365 días correspondiente al 2021 a 3 metros sobre la superficie. Estos datos fueron medidos a las 7:00 horas, 13:00 horas y 19 horas para efectos de nuestro estudio trabajaremos con los promedios diarios de estas mediciones. Como primer paso, estimaremos la velocidad del viento a 6 metros de altura, ya que los datos de Senamhi fueron registrados a 3 metros de altura, con lo cual obtendremos datos más exactos este cálculo se realiza para cada promedio diario mediante la siguiente ecuación:

$$v_2 = v_1 * \frac{\ln \frac{h_2}{Z_0}}{\ln \frac{h_1}{Z_0}}$$

La rugosidad Z_0 será de 0.4 m y a partir de esta sección utilizaremos los datos generados en el anexo 3. Con estos datos realizaremos la distribución de Weibull con el cual determinaremos las velocidades de viento más frecuentes además de calcular los factores c y k para el cual utilizaremos la herramienta Excel para realizar nuestra distribución de Weibull.

Tabla 7. Distribución de Weibull

n	Velocidad del viento	Frecuencia	% Frecuencia	Distribución de Weibull
365	0	5	1 %	0 %
	1	0	0 %	6 %
	2	20	5 %	18 %
	3	243	67 %	27 %
	4	0	0 %	25 %
	5	62	17 %	16 %
	6	30	8 %	7 %
	7	3	1 %	2 %
	8	0	0 %	0 %
	9	2	1 %	0 %
	10	0	0 %	0 %
	11	0	0 %	0 %
	12	0	0 %	0 %
	13	0	0 %	0 %
	14	0	0 %	0 %
	15	0	0 %	0 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Factor c y k

Factor k	Velocidad promedio (m/s)	Factor c (m/s)
2.77	3.6	4.0

Fuente: Elaboración propia.

El factor de escala c está directamente relacionado con la velocidad media con la cual estimaremos las dimensiones del aerogenerador, el factor k al estar entre los valores de 2.5 y 3 corresponde a una distribución simétrica y según la tabla 3 corresponde una morfología de terreno de campo abierto con un régimen de vientos bastante regular a continuación se muestran los histogramas donde se puede observar las duraciones y frecuencias de la velocidad del viento.

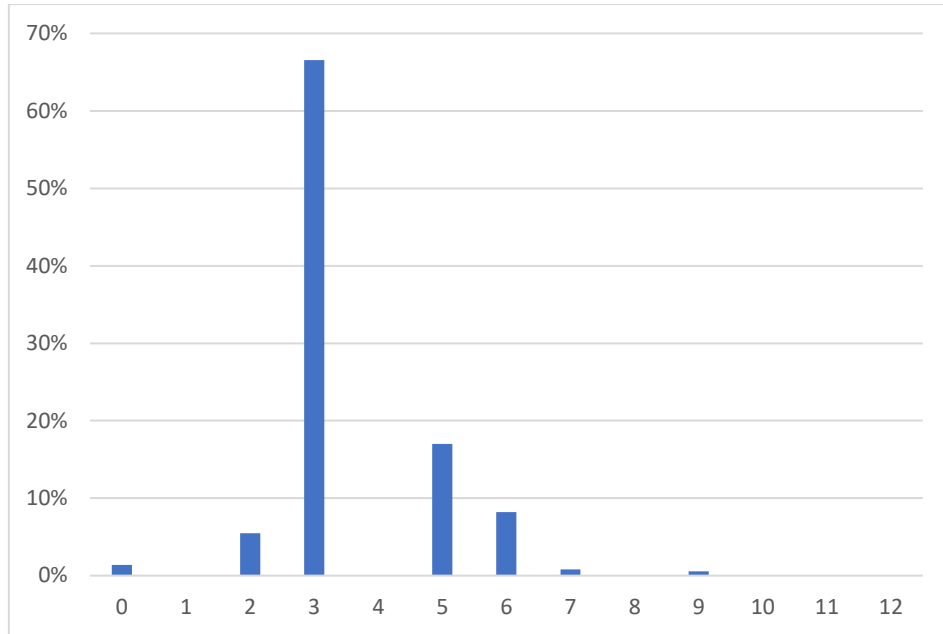


Figura 16. Histograma de duraciones porcentuales de velocidad del viento.
Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por Senamhi.

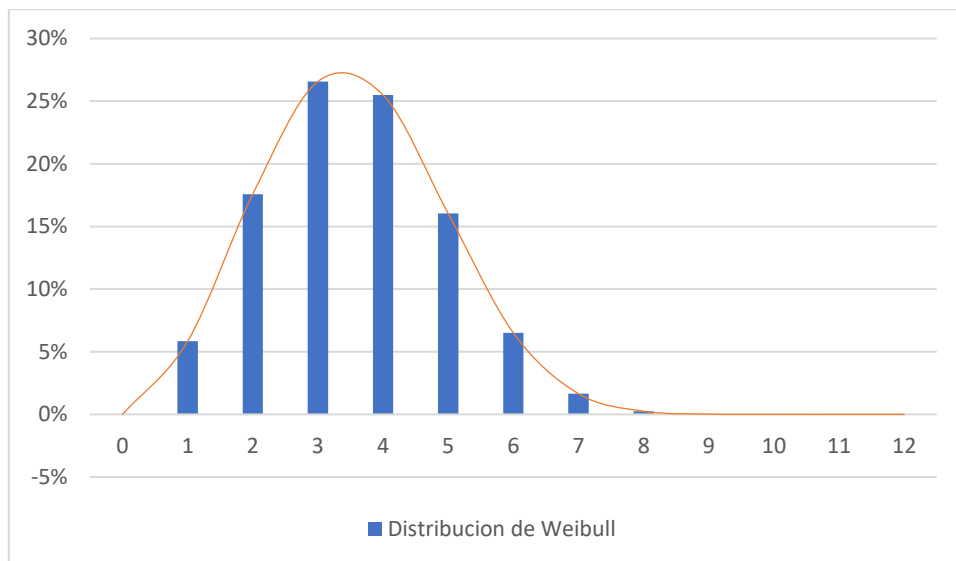
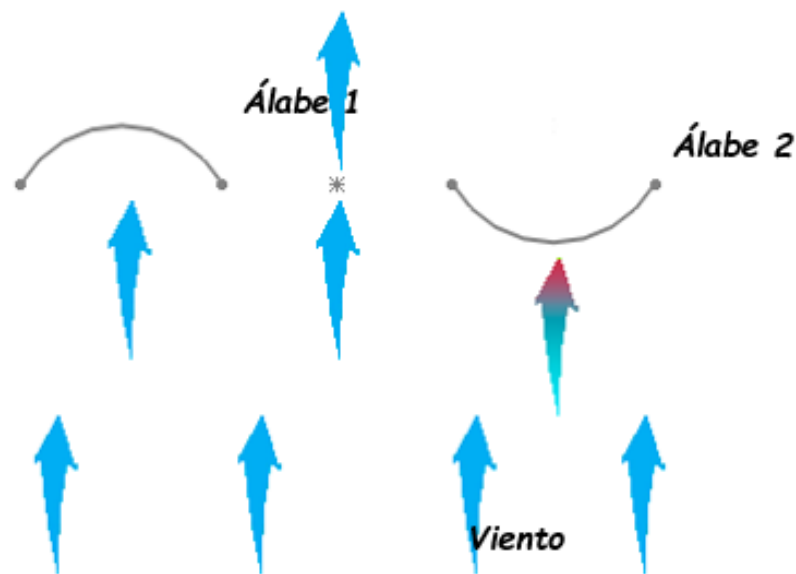


Figura 17. Histograma de frecuencias de velocidad de viento.
Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por Senamhi.

3.7.4. Principio del funcionamiento del diseño

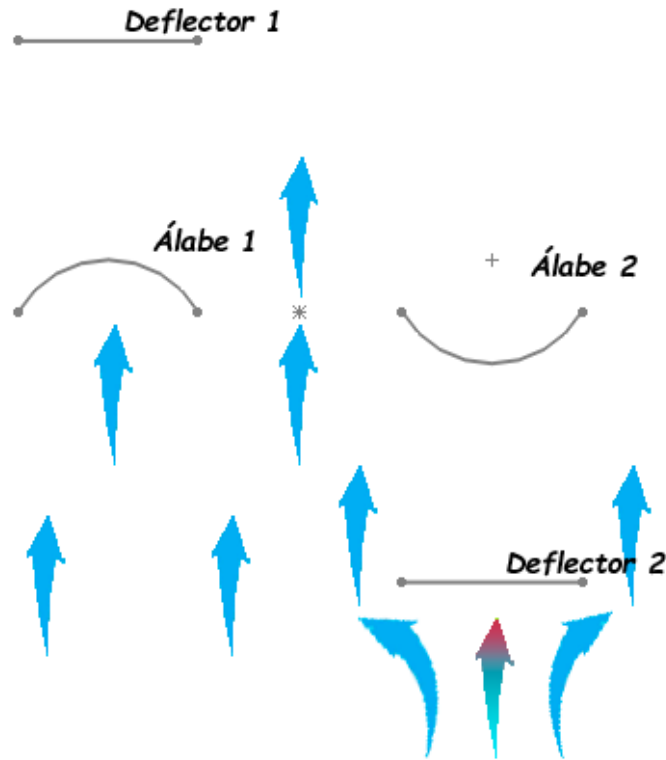
El principio es utilizar dos partes en la turbina eólica, la primera es una modificación del diseño original de la turbina Savonius, para alejar las palas con el fin de tener una mayor área frente al viento, además de modificar el tamaño de las palas.

La segunda parte son los deflectores de viento que tienen la función de direccionar el viento hacia las zonas activas de la turbina y anular el empuje negativo del viento en los álabes. Como se observa en la figura 18, el viento ejerce un empuje positivo en el álabe 1 mientras ejerce un empuje de menor intensidad en el álabe 2, por lo que es necesario implementar un mecanismo que evite la fuerza de empuje negativo del álabe 2.



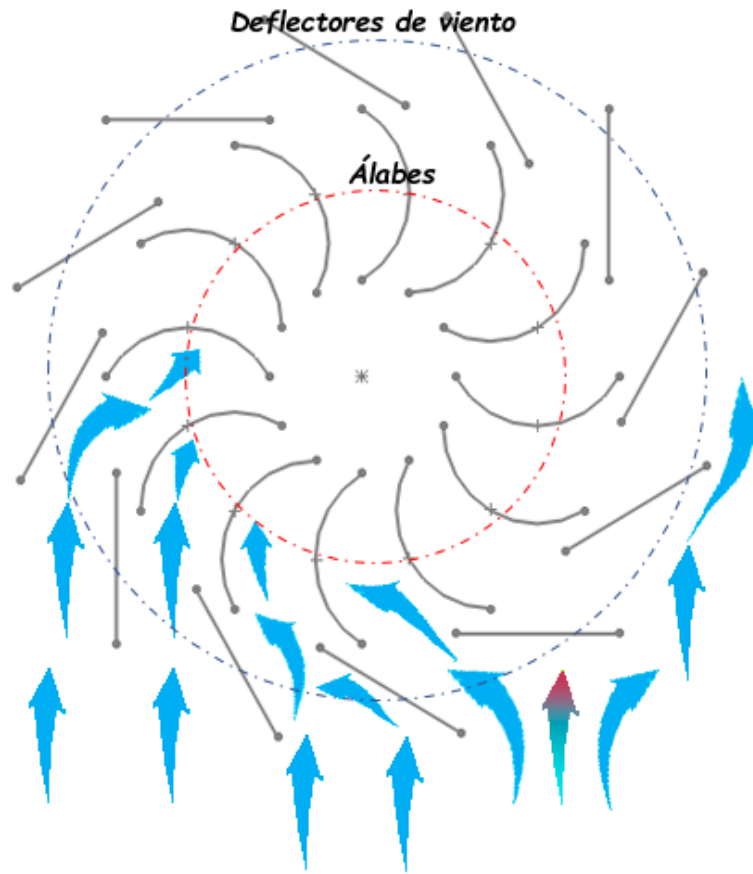
*Figura 18. Principio de funcionamiento del aerogenerador Savonius.
Fuente: Elaboración propia*

Para ello se implementan los deflectores de viento como se observa en la figura 19, el viento ejerce un empuje positivo en el álabe 1, además de que el deflector 2 impide que el viento ejerza un empuje negativo en el álabe 2. Esta configuración nos genera 4.61 veces un mejor rendimiento en nuestro aerogenerador



*Figura 19. Principio de funcionamiento de los deflectores de viento.
Fuente: Elaboración propia.*

En la figura 20 se ilustra el principio de funcionamiento de nuestro aerogenerador, el cual tiene 12 álabes y 12 deflectores de viento, los cuales concentran el viento en las zonas de empuje positivo de los álabes. Además, que la configuración de los deflectores de viento es estática, evitando timón o veleta para direccionar el viento, también se reducen partes móviles que harían más complejo el diseño y construcción.



*Figura 20. Principio de funcionamiento del aerogenerador Savonius modificado.
Fuente: Elaboración propia.*

Se puede observar que el viento incide en 4 álabes, que llamaremos álabes activos y servirán para realizar nuestro cálculo de la potencia generada por estos álabes.

3.7.5. Diseño de álabes

El diseño del álabe está sujeto a la accesibilidad del material para su fabricación y la disponibilidad, por lo que se optó por utilizar un tubo de PVC de 8 pulgadas de diámetro y 4 mm de espesor, el cual nos facilita la construcción del álabe, ya que esta tiene la forma cilíndrica y es muy sencillo de trabajar, en la figura 22 se observa la circunferencia del tubo de PVC y como está dividida en tres partes.

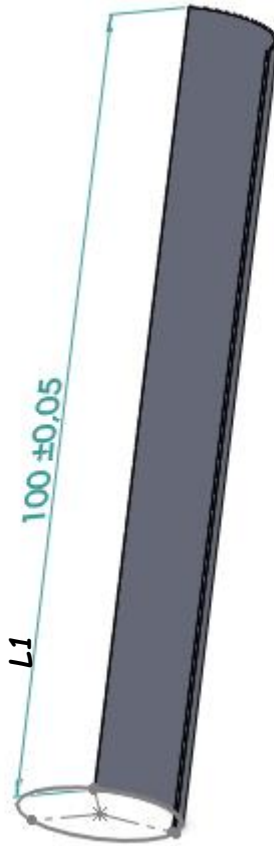


Figura 22. *Perspectiva isométrica del álabe*
Fuente: *Elaboración propia*

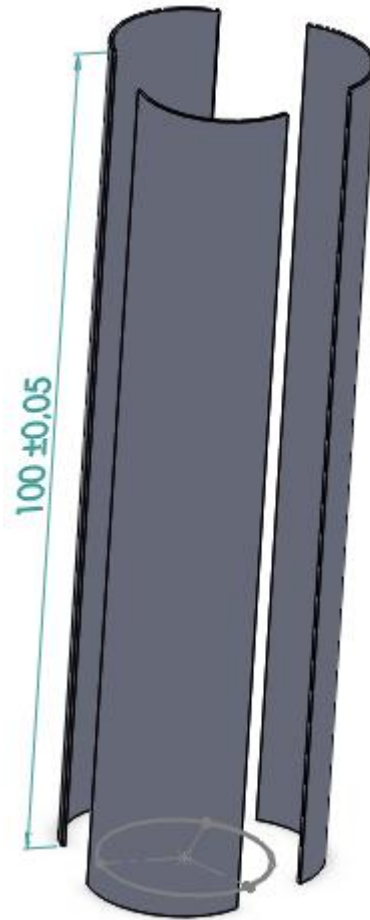
El área de la sección transversal de cada álabe será:

$$A = L1 * d'$$

$$A = 1 * 0.176$$

$$A = 0.176 \text{ m}^2$$

Se muestra en la figura 24 como se dividirá el tubo de PVC en 3 álabes.



*Figura 23. Perspectiva isométrica de tres álabes
Fuente: Elaboración propia*

La potencia generada en el álabe estará dada por la siguiente ecuación vista en la sección 2.2.4.

$$P_m = 0.341 * \left[\frac{1}{2} \rho A v^3 \right]$$

Se utilizará esta ecuación, debido a que implementaremos los deflectores de viento que anulan la fuerza F^* .

Reemplazando:

$$P_m = 0.341 * \left[\frac{1}{2} * 0.815 * 0.176 * 4^3 \right]$$

$$P_m = 1.57 W$$

Multiplicado por los álabes activos.

$$P_t = 1.57 * 4$$

$$P_t = 6.26 W$$

Esta potencia será comprobada en la simulación de la turbina con el *software* SolidWorks.

3.7.6. Cálculo del coeficiente de potencia C_p .

El coeficiente de potencia viene a ser la relación entre la potencia en el eje de la turbina y la potencia disponible del viento y se calcula mediante la siguiente ecuación:

(20)

$$C_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2} * (\rho v^3 A)}$$

Donde:

ρ : densidad del aire.

v : velocidad del aire.

A : área de la sección transversal que presenta a flujo de aire (área de cada álabe multiplicado por la cantidad de álabes activos que son 4).

Reemplazando valores:

$$C_p = \frac{6.26}{\frac{1}{2} * (0.815 * 4^3 * (0.176 * 4))}$$

$$C_p = 0.34$$

3.7.7. Cálculo del TRS o velocidad específica

El TSR es la relación entre la velocidad lineal en el extremo de los álabes y la velocidad del viento, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{u}{v}$$

Para calcular la velocidad lineal u utilizaremos la siguiente ecuación:

$$u = \frac{v}{3}$$

Esta ecuación la vimos anteriormente en el cálculo de los álabes, ya que esta se genera al utilizar los deflectores de viento donde se anula la fuerza F' .

Remplazando valores:

$$\lambda = 0.33$$

3.7.8. Cálculo de la velocidad de rotación

Para el cálculo de la velocidad de rotación utilizaremos la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{2\pi * n * R}{60 * v}$$

Despejando n :

$$n = \frac{\lambda * 60 * v}{2\pi * R}$$

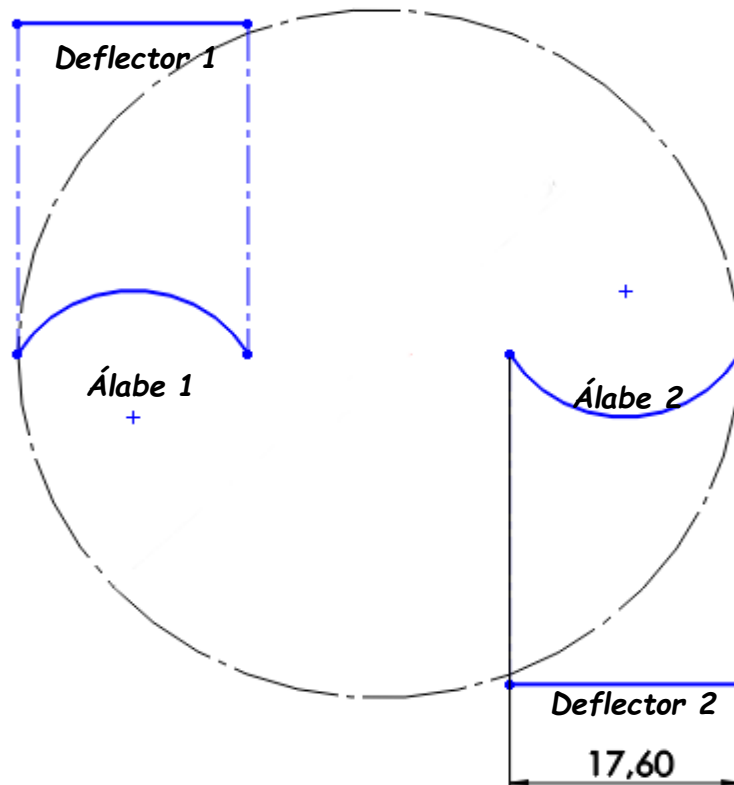
Remplazando valores:

$$n = \frac{0.33 * 60 * 4}{2\pi * 0.276}$$

$$n = 45.67 \text{ rpm}$$

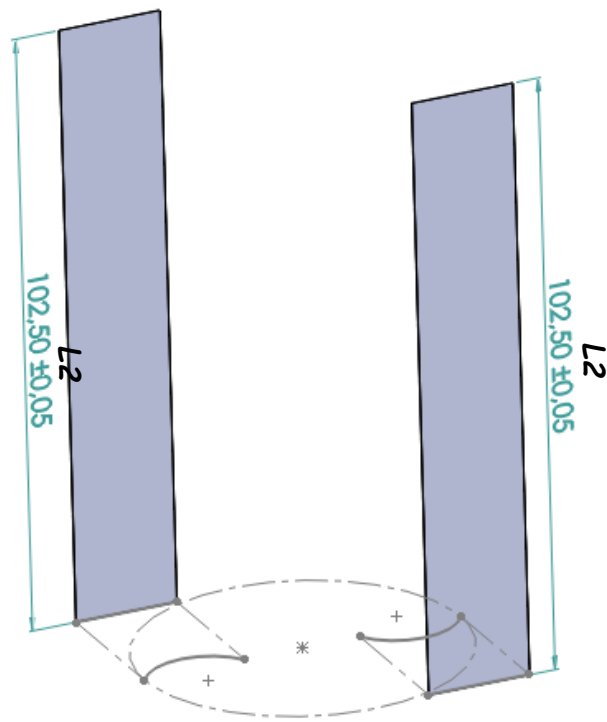
3.7.9. Diseño de los deflectores de viento

El objetivo de utilizar los deflectores de viento es que anulen la fuerza F' , por ello, la dimensión de los deflectores de viento debe ser como mínimo las mismas de la sección transversal de cada álabe como se muestran en la siguiente figura.



*Figura 24. Geometría de los deflectores de viento
Fuente: Elaboración propia*

Además, esta debe ubicarse paralela a la sección transversal por el lado convexo del álabe y fuera del radio de rotación. Se establece una altura L_2 para los deflectores con el fin de que los álabes giren libremente dentro de los deflectores de viento, al tener 1 metro de altura los deflectores de viento tendrán el 1 % más del tamaño como se observa a continuación.



*Figura 25. Perspectiva isométrica de los deflectores de viento.
Fuente: Elaboración propia*

El material utilizado serán planchas de acero laminado de 0.08 mm de espesor.

3.7.10. Dimensiones de la turbina

A partir de los datos de los álabes y del deflector de viento estableceremos las medidas de la turbina, en la figura 26 observamos los diámetros y distancias de un álabe teniendo en consideración la recomendación de:

$$L1 \approx 2 * D2$$

$$1 \approx 2 * D2$$

$$D2 \approx 0.5m$$

El resultado anterior es la óptima para el diseño de la turbina, pero al ser un aproximado tendrá una pequeña variación, por lo que se optó por adicionarle 5.2 cm más de lo recomendado y tener los siguientes valores.

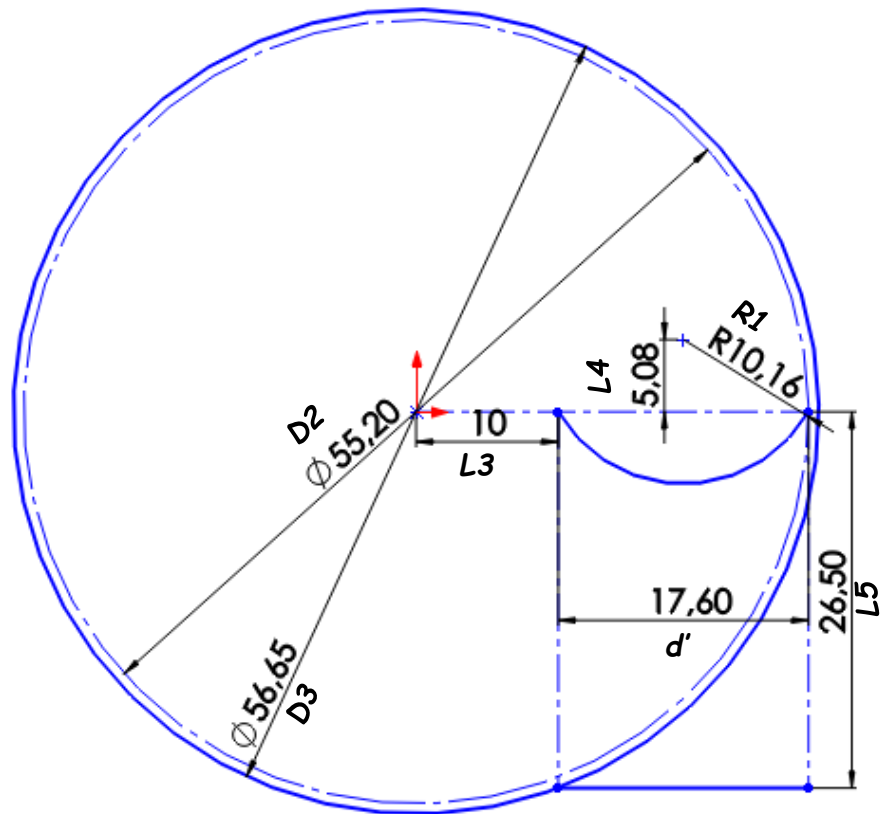


Figura 26. Dimensiones del aerogenerador.

Fuente: Elaboración propia

Resumiendo:

$$d' = 17.6 \text{ cm}$$

$$D1 = 20.32 \text{ cm}$$

$$D2 = 55.20 \text{ cm}$$

$$D3 = 56.65 \text{ cm}$$

$$L1 = 100 \text{ cm}$$

$$L2 = 102.5 \text{ cm}$$

$$L3 = 10 \text{ cm}$$

$$L4 = 5.08 \text{ cm}$$

$$L5 = 26.5 \text{ cm}$$

$$R1 = 10.16 \text{ cm}$$

Donde:

$$D3 = D2 + (2.55 \% * D2)$$

Esta relación se da, ya que el diámetro D3 debe ser del 2.55 % más grande que D2, debido a que el punto más cercano donde estará el deflector de viento respecto al álabe permitirá un movimiento libre de la turbina. Los álabes faltantes se adicionan cada 30 grados, quedando como se muestra en la siguiente figura.

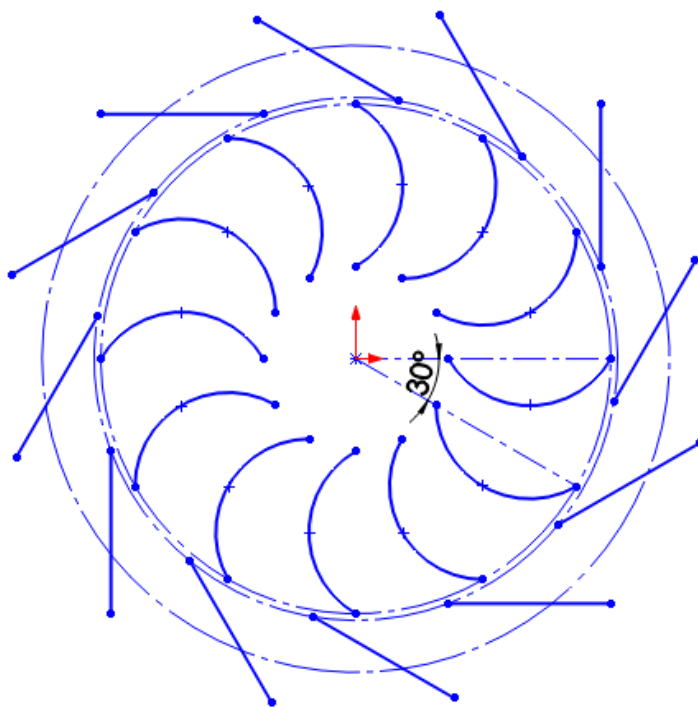


Figura 27. Disposición de los álabes y deflectores de viento

Fuente: Elaboración propia.

3.7.11. Diseño de partes y accesorios

3.7.11.1. Bases y tapas

Se tendrá dos bases para la turbina, una estática para los deflectores de viento y otra móvil para los álabes. La base y tapa de los álabes estarán fabricadas de planchas de acero de 0.08 mm de espesor con las siguientes dimensiones.

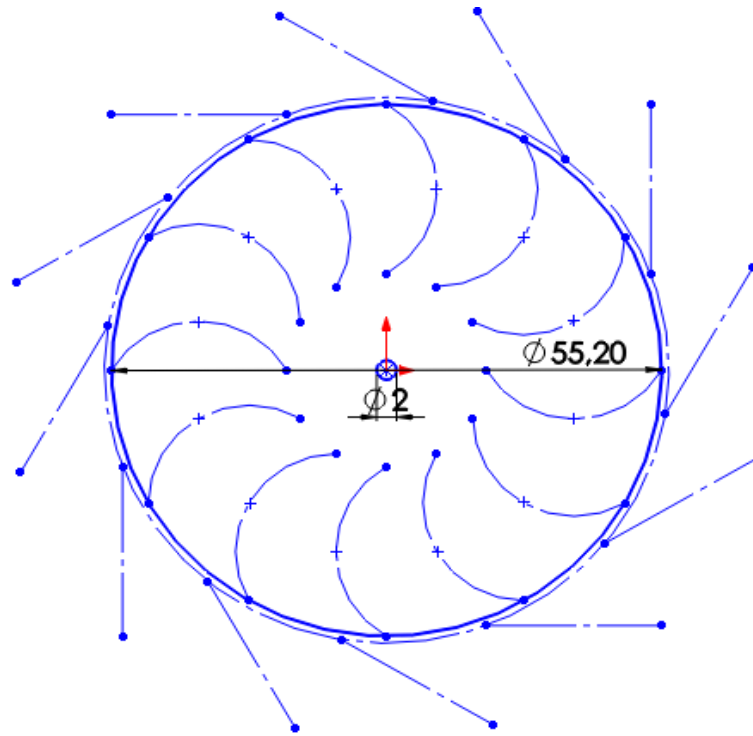


Figura 28. Dimensiones de la tapa y base de los álabes.

Fuente: Elaboración propia.

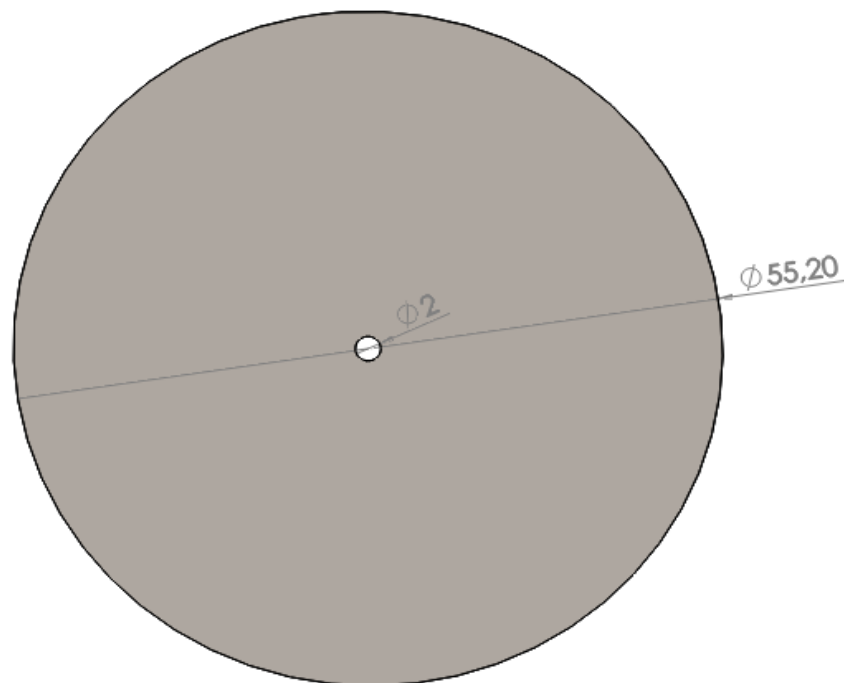


Figura 29. Vista superior de la tapa y base de los álabes.

Fuente: Elaboración propia.

Esta parte soportará los álabes en función a la geometría ya especificada y estará sujetas con los seguros de álabes. Además, la base y tapa de los deflectores de viento estarán fabricadas de planchas de acero de 0.08 mm de espesor con las siguientes dimensiones:

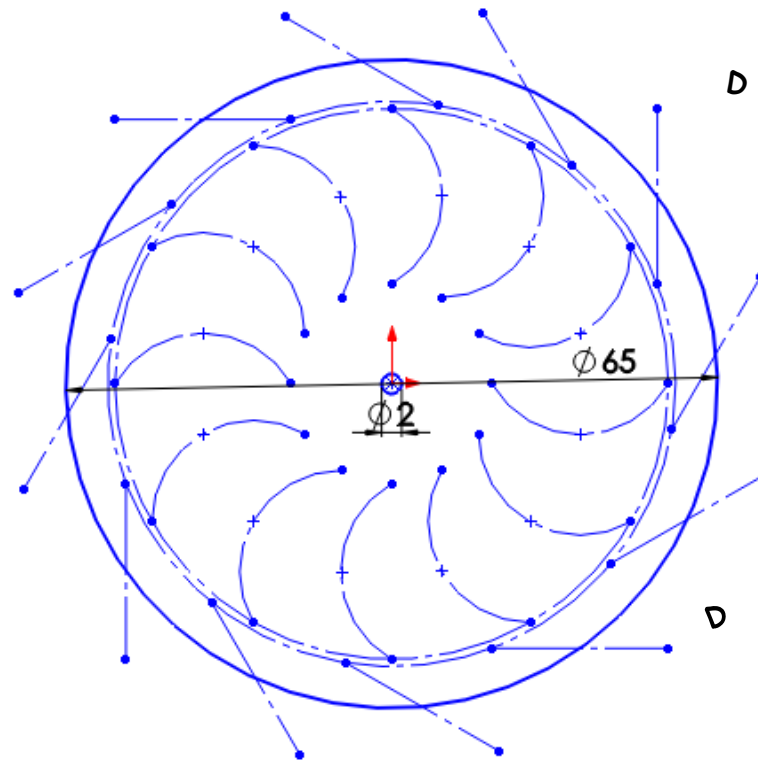


Figura 30. Dimensiones de la tapa y base de los deflectores de viento.

Fuente: Elaboración propia

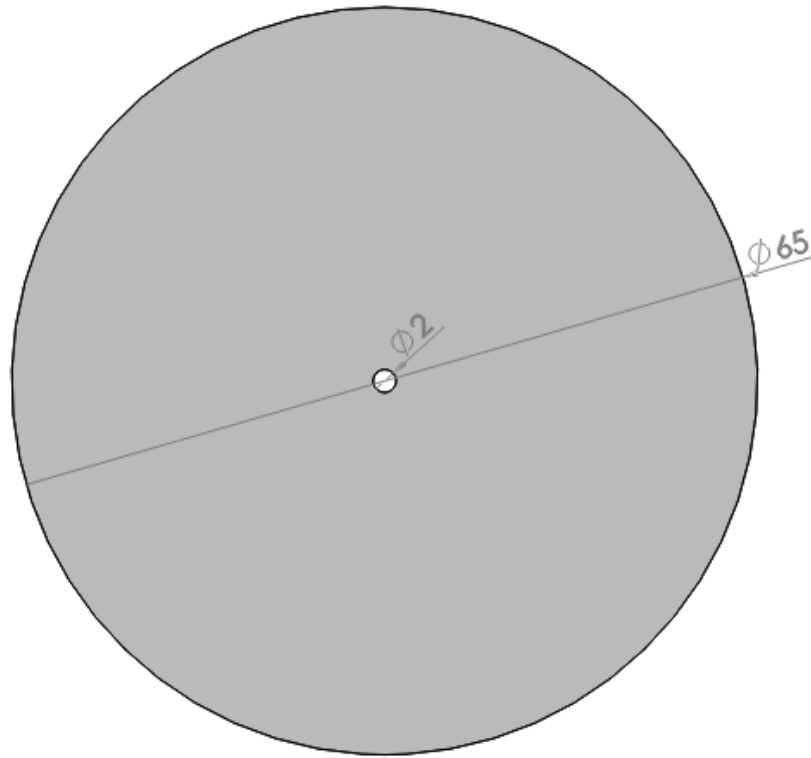


Figura 31. Vista superior de la tapa y base de los deflectores de viento.

Fuente: Elaboración propia

Esta parte está diseñada con un diámetro inferior al de los extremos de los deflectores de viento, esto con el fin de reducir la cantidad de material, además no afectará el buen funcionamiento del aerogenerador.

3.7.11.2. Refuerzo de deflectores de viento

Por experiencia empírica, las planchas de acero de 0.08 son flexibles y para el tamaño de los deflectores de viento no presentan la rigidez necesaria para trabajar correctamente, por ello, se diseñan los refuerzos de los deflectores de viento, los cuales estarán unidos por la parte posterior al deflector y en los extremos a la base y tapa de los álabes. Esto asegura el buen funcionamiento de los deflectores de viento. A continuación, se detallan las medidas del refuerzo.

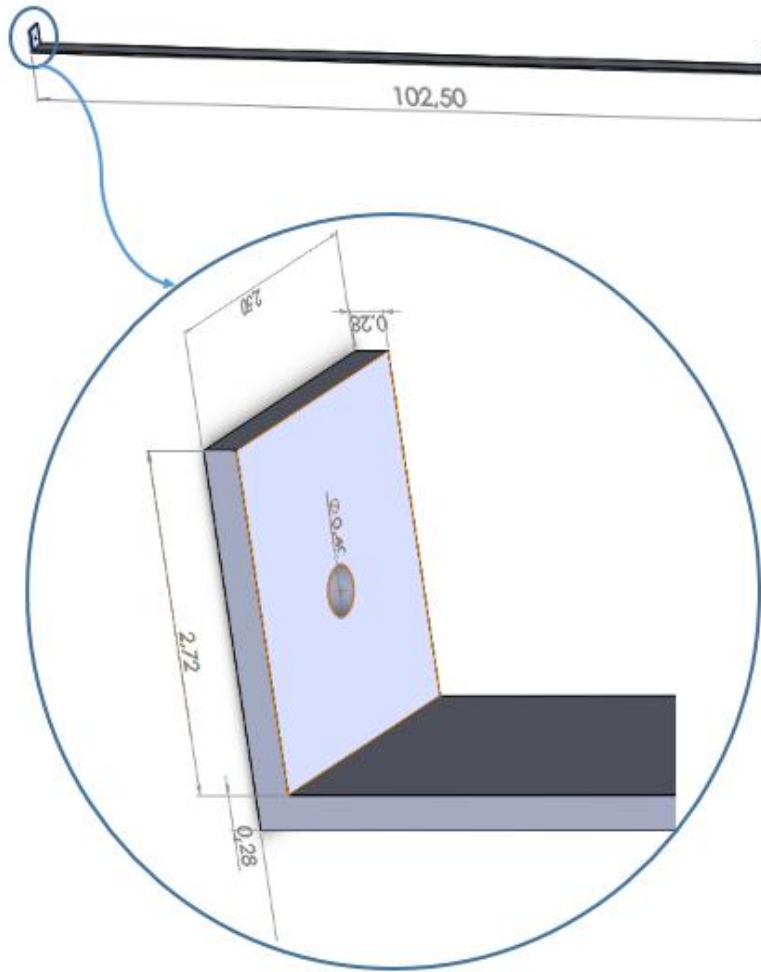


Figura 32. Refuerzo para los deflectores de viento

Fuente: Elaboración propia

3.7.11.3. Seguros de álabes y deflectores de viento

Con estas piezas aseguraremos los álabes y deflectores a sus tapas y bases respectivamente están diseñadas a partir de un perfil de acero en L de 1.5 x 1.5 cm y de 0.2 mm de espesor.

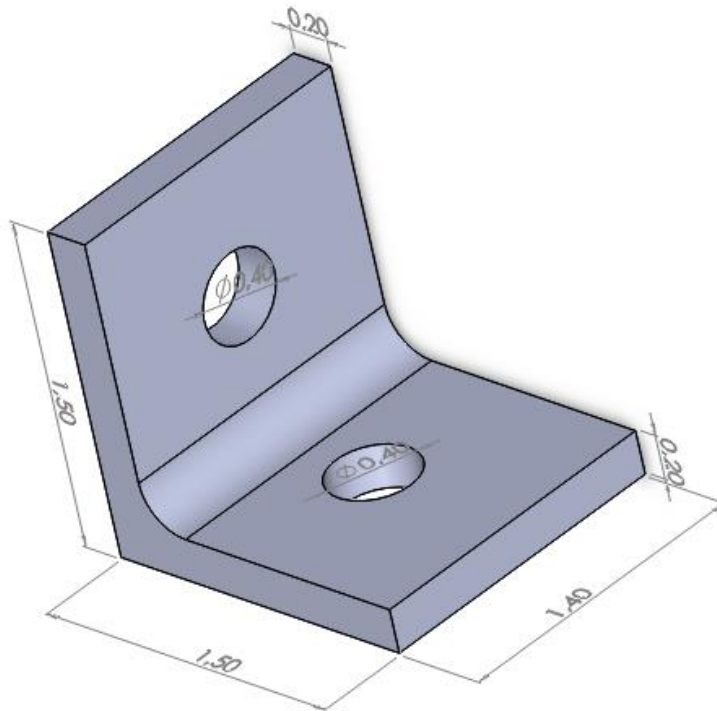


Figura 33. Seguros de los álabes

Fuente: Elaboración propia.

Para el seguro de los álabes se utilizará 2 inferiores y 2 superiores por cada álabes. Además de contar cada seguro con dos perforaciones de 4 mm de diámetro, los cuales servirán para los remaches que aseguran la pieza.

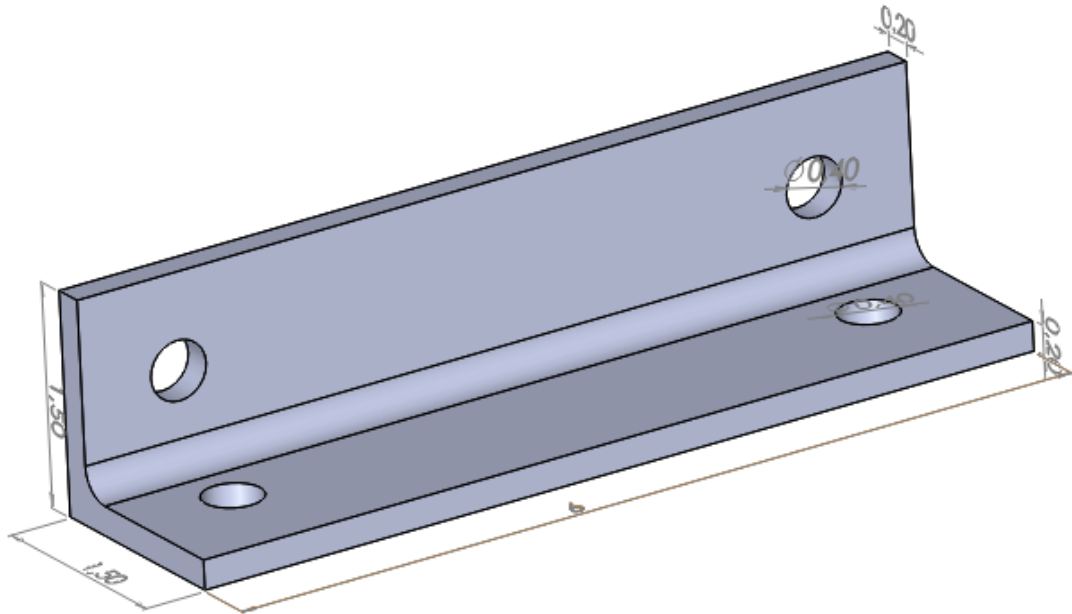


Figura 34. Seguro de los deflectores de viento.

Fuente: Elaboración propia.

Para el seguro de los deflectores de viento se utilizará 1 en la parte inferior y 1 en la parte superior, además de contar cada seguro con cuatro perforaciones de 4 mm de diámetro, los cuales servirán para los remaches que aseguran la pieza.

3.7.11.4. Selección de rodamiento

Serán de vital importancia el uso de 2 rodamientos de la serie 6004, los que permitirán la transferencia del movimiento de los álabes, además de apoyar y guiar el eje principal. (27)

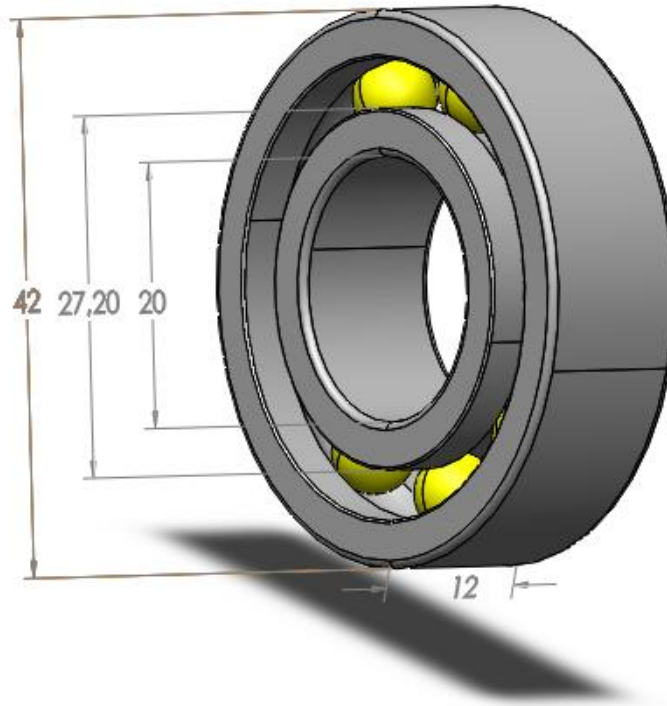


Figura 35. Rodamiento 6004

Fuente: Skf.com

En la siguiente tabla se muestran las características del rodamiento:

Tabla 9. Características del rodamiento 6004

Capacidad de carga dinámica básica	C	9.95 kN
Capacidad de carga estática básica	C0	5 kN
Carga límite de fatiga	Pu	0.212 kN
Velocidad de referencia		38 000 r/min
Velocidad límite		24 000 r/min
Factor de carga mínima	kr	0.025
Factor de cálculo	f0	14

Fuente: Skf.com

3.7.11.5. Eje de rotación

Esta pieza es un perfil circular de 2 cm de diámetro, se encargará de transmitir el movimiento de los álabes a través de los rodamientos y estará unido a la base y tapa de los álabes

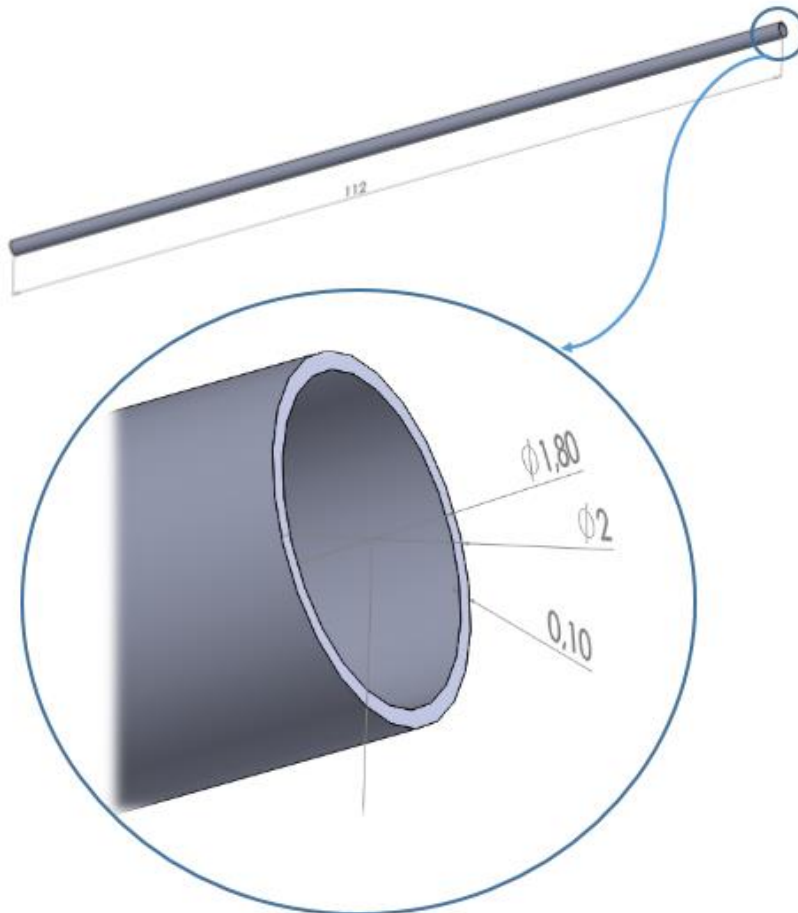


Figura 36. Eje principal

Fuente: Elaboración propia.

3.7.11.6. Estructura de soporte

La estructura propuesta está conformada por tres partes:

- La parte A es el soporte donde se colocará la base de los álabes y además del rodamiento inferior para el eje principal de los álabes.
- La parte B son 2 perfiles en L que funcionaran como soporte para el generador encargado de la conversión de la energía mecánica a eléctrica.
- En parte C se encontrará la base de sujeción, esta se adaptó a la necesidad de ubicar el aerogenerador en una pared alta con un techo de calamina el cual no podíamos perforar.

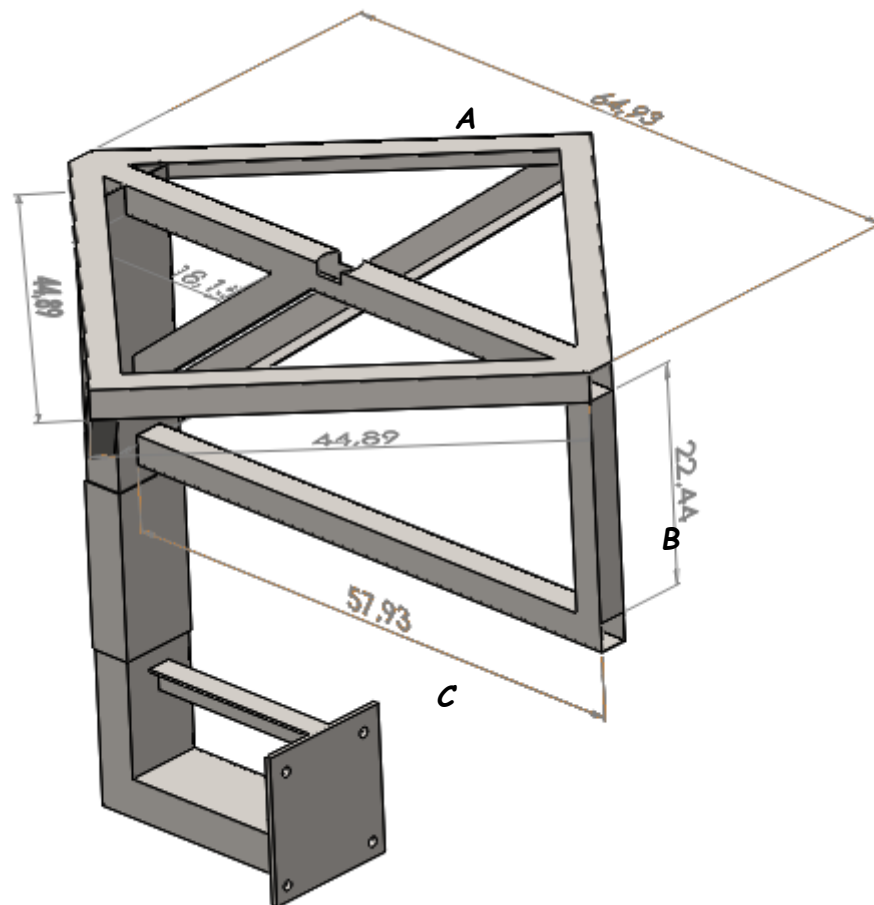


Figura 37. Estructura de soporte

Fuente: Elaboración propia.

3.7.11.7. Anclajes de la estructura

Con el fin evitar posibles vibraciones se utilizan anclajes que viene a ser cables de acero que están sujetadas a la parte superior del aerogenerador y orientadas en 4 direcciones simétricamente separadas hacia alguna base fija. Se utilizará cables acerados de 1.6 mm de diámetro.

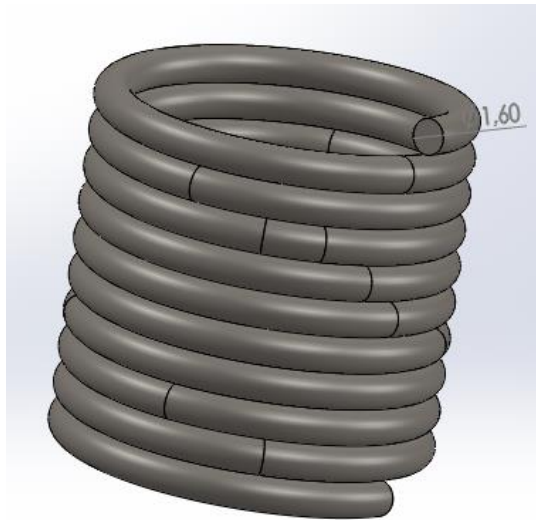


Figura 38. Cable de acero de 1.6 mm

Fuente: Elaboración propia.

3.7.12. Selección del generador CC

Para la selección del generador se requiere un voltaje de salida en corriente continua, potencia necesaria para alimentar la carga que conectemos a su salida y que sea fácil de adquirir, por ello, utilizaremos un generador síncrono de imanes permanentes en corriente continua con las siguientes características.



Figura 39. Placa de identificación del generador

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Datos de la placa del generador

Volt	38
Amp	1.9
RPM	3700
output	53 W
Encoder	240 P/R

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 4, el funcionamiento de esta requiere altas revoluciones, por lo que se tendrá que diseñar un multiplicador de velocidad de manera que las bajas revoluciones de la turbina se conviertan en las suficientes para que el generador trabaje en óptimas condiciones. Con respecto a la potencia se utilizarán dos generadores para así poder extraer la máxima potencia de la turbina.

3.7.13. Diseño del multiplicador de velocidad

El multiplicador de velocidad estará compuesto por un tren de engranes rectos, el cual se calcula a continuación con los siguientes datos que ya se tienen de la turbina y el generador, también utilizaremos la siguiente ecuación:

$$i = \frac{N_e}{N_s} = \frac{W_s}{W_e}$$

Donde:

I: relación de transmisión.

Ne: número de dientes del engrane conductoras.

Ns: número de dientes del engrane conducido.

Ws: velocidad de salida.

We: velocidad de entrada.

Los datos que ya tenemos son los siguientes:

- Velocidad de rotación en el eje de la turbina We: 45.67 RPM
- Velocidad de rotación en el generador Ws: 3700 RPM
- Relación de transmisión i: 81.01

Como se utilizará dos generadores optaremos por reducir al 9 % las revoluciones del generador, debido a que se tiene una relación de transmisión muy elevada y el par de rotación necesario no serán suficientes para el funcionamiento correcto de los generadores.

Entonces:

- Velocidad de rotación en el eje de la turbina W_e : 45.67 RPM
- Velocidad de rotación en el generador al 16 % W_s : 342.5 RPM
- Relación de transmisión i : 7.5

3.7.13.1. Diseño del tren de engranes

Para el diseño del tren de engranes tomaremos en consideración el diámetro del eje de los generadores y tener una idea del tamaño que consideraremos en los engranes y determinar el módulo de los engranes.

- Diámetro del eje del generador D_g : 9.8 mm

Como primer paso, dimensionaremos el primer engrane que estará ubicado en el eje del generador con un diámetro de 2.95 veces el diámetro del eje del generador, que será el primer diámetro primitivo D_{p1} y con 21 dientes. Para calcular el módulo utilizaremos la siguiente ecuación:

$$D_{p1} = M(N)$$

Donde:

D_{p1} : Diámetro primitivo en el primer engrane.

M = Módulo (el mismo para todo el tren de engranes).

N = Número de dientes.

Reemplazando:

$$M = \frac{2.95 * Dg}{N}$$

$$M = \frac{2.95 * 9.8}{21}$$

$$M = 1.375$$

Además:

Para calcular los siguientes engranes utilizaremos la siguiente ecuación:

$$V1 * N1 = V2 * N2$$

Donde:

V1: velocidad del engrane conductor (RPM)

N1: número de dientes del engrane conductor

V2: velocidad del engrane conducido (RPM)

N2: número de dientes del engrane conducido

Al tener el primer engrane conducido E1, dimensionaremos el engrane conductor E2 y los necesarios hasta llegar a tener la relación de transmisión calculada anteriormente.

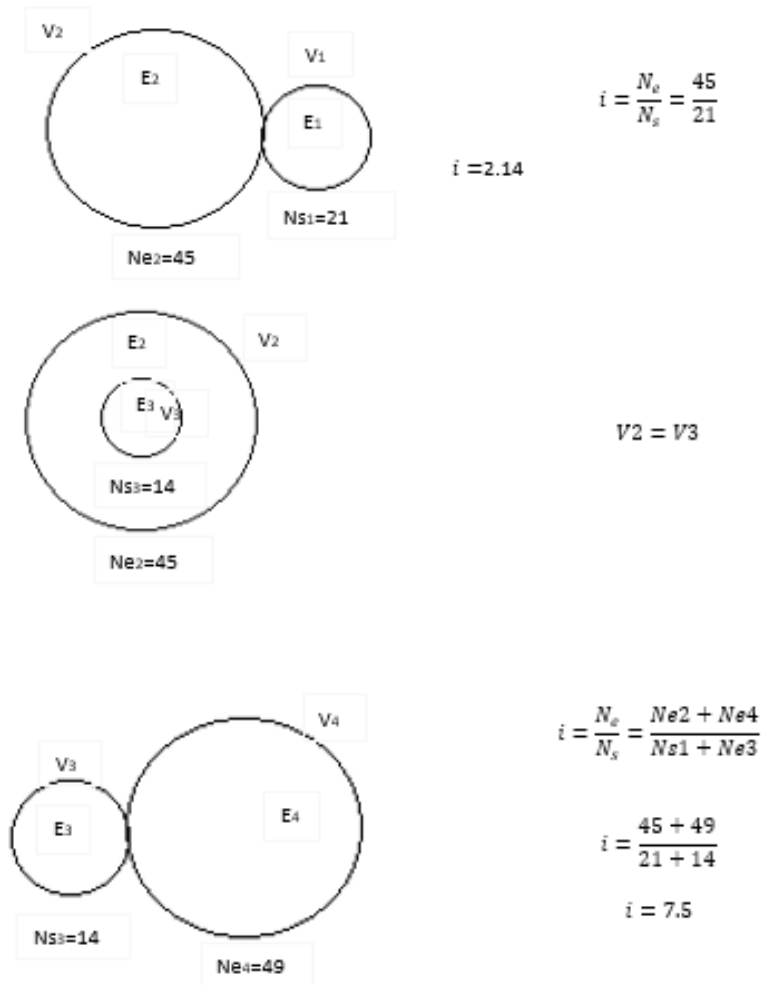


Figura 40. Cálculo del tren de engranes.

Fuente: Elaboración propia.

El tren de engranes quedaría de la siguiente forma:

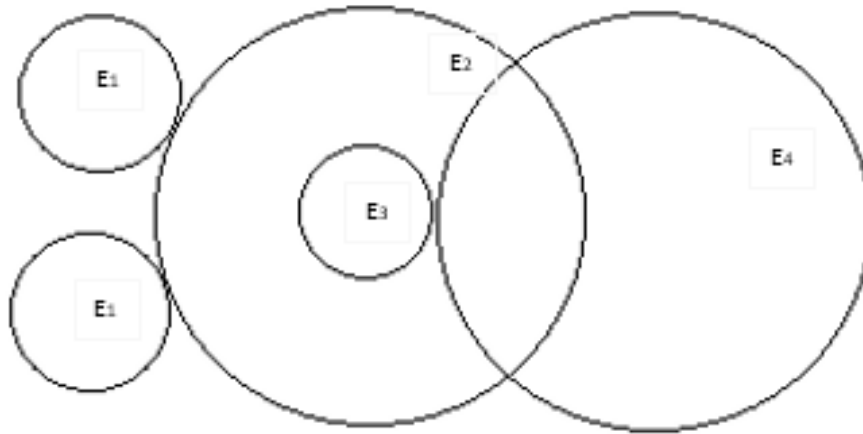


Figura 41. Disposición del tren de engranes.

Fuente: Elaboración propia.

Donde E1 es el engrane en el eje del generador E1 se duplica, ya que como se mencionó anteriormente utilizaremos 2 generadores y E4 es el engrane del eje de la turbina

Consolidaremos todos los datos para el diseño del tren de engranes en el software SolidWorks.

Tabla 11. Resumen de datos del tren de engranes

N.º engrane	Número de Dientes	Diámetro primitivo mm	Diámetro de ejes	Módulo
Engrane 1 (E1)	21	28.875	9.8 mm	1.375
Engrane 2 (E2)	45	61.875	8 mm	
Engrane 3 (E3)	14	19.25	8 mm	
Engrane 4 (E4)	49	67.375	8 mm	

Fuente: Elaboración propia.

Para culminar el diseño del multiplicador de velocidad se comenzó con el modelado en el *software* SolidWorks con la herramienta Toolbox, el cual nos facilita el diseño de los engranes.

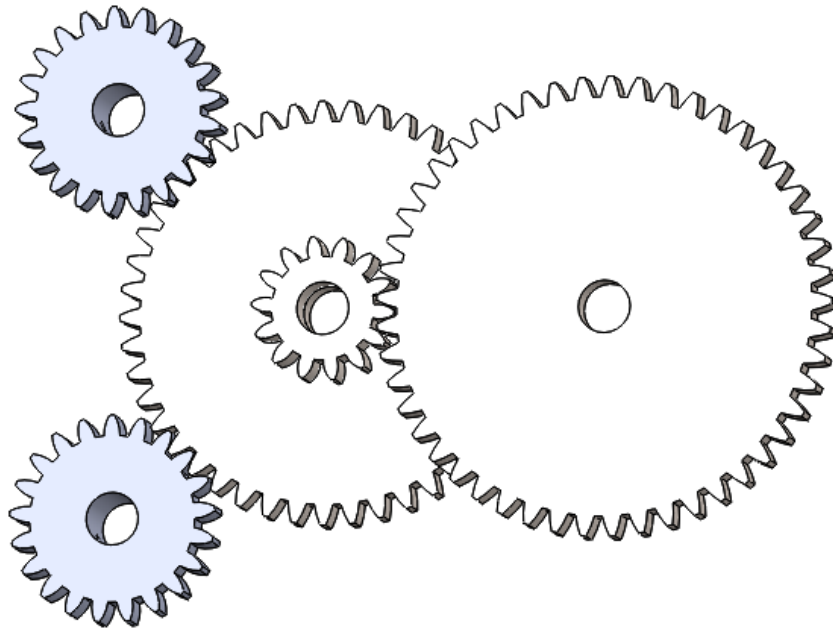


Figura 42. Perspectiva isométrica del tren de engranes.

Fuente: Elaboración propia.

Además de ello se diseñó el soporte y tapa donde se alojará el tren de engranes como se muestra en la siguiente imagen:

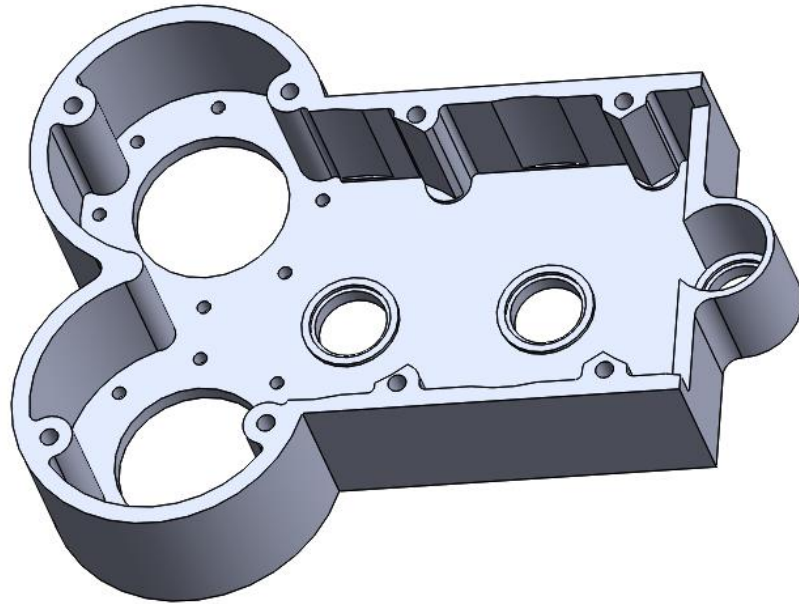


Figura 43. Perspectiva isométrica de la base del tren de engranes.

Fuente: Elaboración propia.

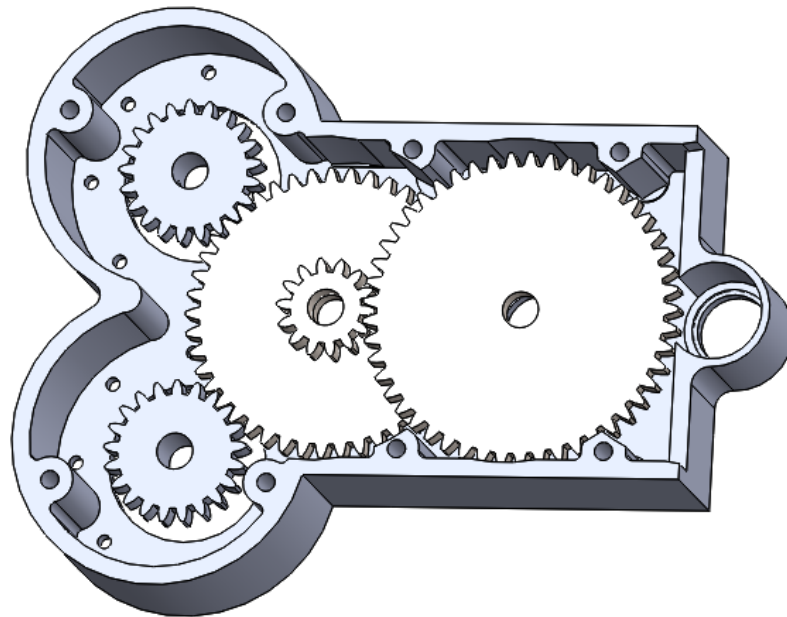


Figura 44. Perspectiva isométrica del tren de engranes y la base.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestra el ensamble final del multiplicador de velocidad con los ejes en cada engrane y los rodamientos, además se diseñó una pieza ubicada en el eje

del engrane E4, que servirá para que el eje de la turbina transmita el movimiento sin tener una conexión fija, esto facilitara la instalación de la misma.

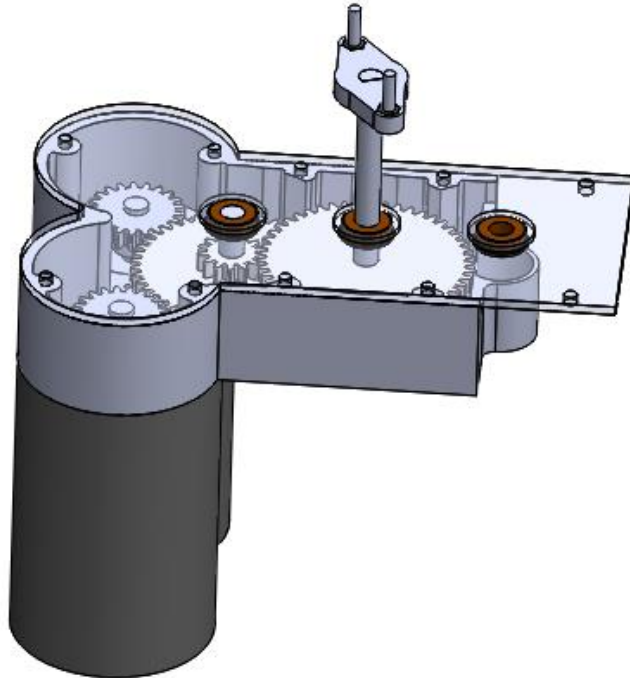


Figura 45. Vista final del diseño del multiplicador de velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

Todas las piezas son exportadas en formato. stl para generar el código g en el *software* Cura y realizar su fabricación en la impresora 3D.

3.7.14. Diseño del sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo estará dividida en 3 etapas las cuales explicaremos a continuación.

Primera etapa, posterior a los generadores se conectará un condensador de 3300 uf para eliminar algún ruido ocasionado por las escobillas del generador, además se muestra como es la conexión del encoder óptico de 240 p/r que nos enviara pulsos por

el terminal J2 al microcontrolador para medir las revoluciones por minuto de los generadores que estarán conectadas al eje de las mismas como se muestra en la siguiente imagen, este encoder se encuentra ubicado en el eje de generador, ya que es parte de ella.

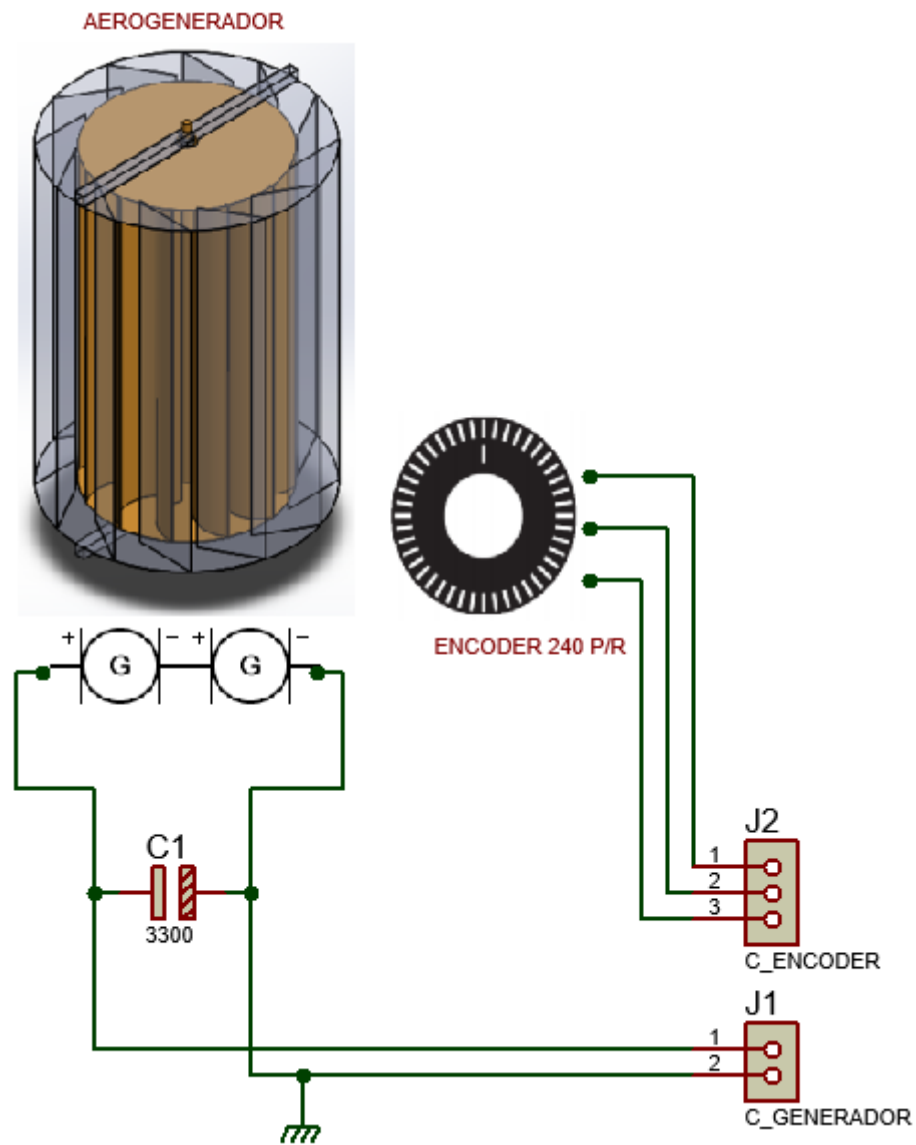


Figura 46. Primera etapa sistema de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

En la segunda etapa, el sistema de monitoreo está conformado por un módulo DS 3213, el que se encarga de enviar hora y fecha cuando el microcontrolador Arduino

Uno lo solicite. Esto se realiza mediante comunicación I2C, la hora y fecha serán registrados conjuntamente con el voltaje, corriente y RPM en una tarjeta SD mediante el Módulo SD como se muestra en la siguiente imagen 47, el código de programación del microcontrolador Arduino Uno se adjunta en el anexo 1. Mediante el conector J3 se obtiene las señales de corriente y voltaje y por el conector J2 se obtienen los pulsos del encoder óptico para calcular las revoluciones por minuto.

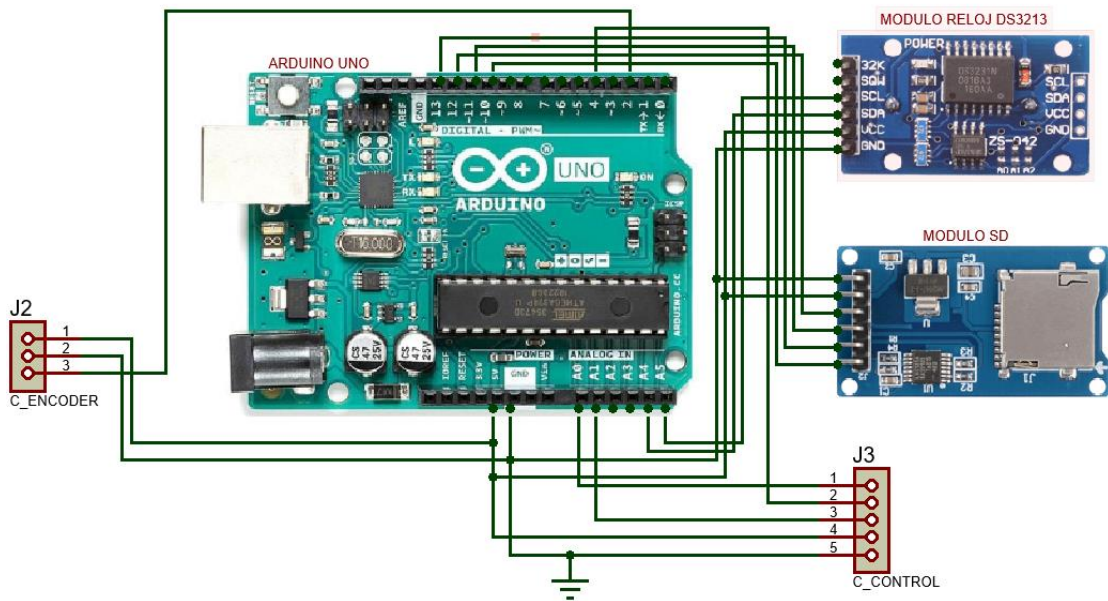


Figura 47. Segunda etapa sistema de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

La tercera etapa está conformada por el sensor ACS712, que se encarga de medir la corriente producida por los generadores y será enviada a través del terminal J3 al microcontrolador, el divisor de tensión se encarga de reducir el voltaje de entrada a valores entre 0 y 5 volts proporcional al voltaje producido por los generadores y también es enviado a través del terminal J3 al microcontrolador.

Para el cálculo del divisor de tensión se considera un voltaje de entrada de 50 v con el fin de proteger el microcontrolador de subidas de tensión. (28)

$$V_{out} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} * V_{in}$$

Datos:

$V_{in} = 50 \text{ v}$

$V_{out} = 5 \text{ v}$

$R_1 = 900 \text{ ohm}$

$R_2 = X$

Remplazando:

$$R_2 = 100 \text{ ohm}$$

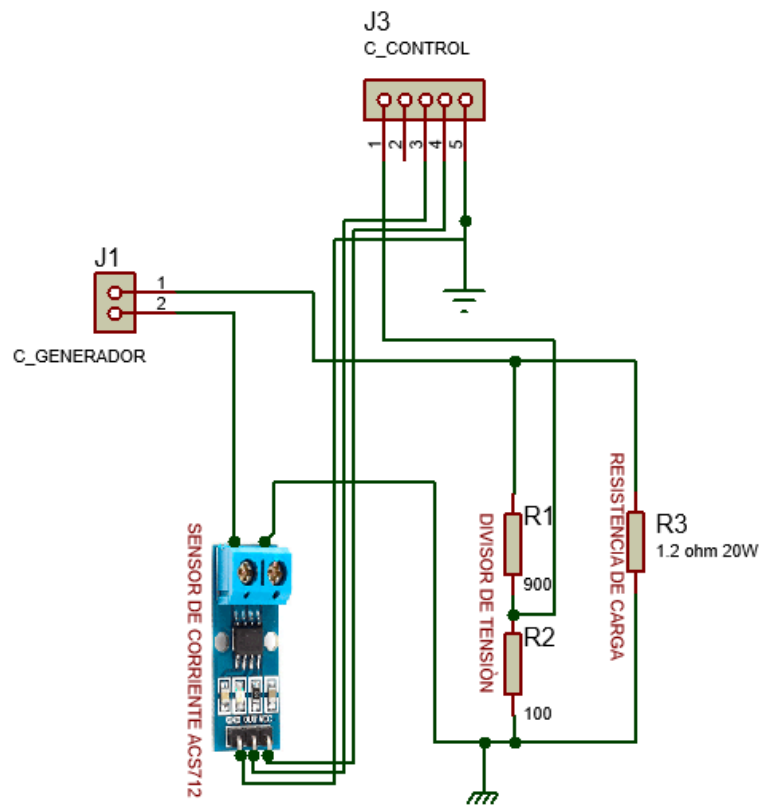


Figura 48. Tercera etapa sistema de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos del divisor de tensión nos servirán para programar la entrada del microcontrolador y registremos los valores correctos de voltaje en la tarjeta SD. Además, se considera una resistencia de carga de 1.2 ohm para obtener la máxima potencia a la salida del generador.

3.8. Simulaciones

Para realizar las simulaciones en un entorno virtual utilizamos el *software* SolidWorks en su versión 2016, como primer paso se realizó el ensamble de la turbina como se diseñó en la sección 3.7.

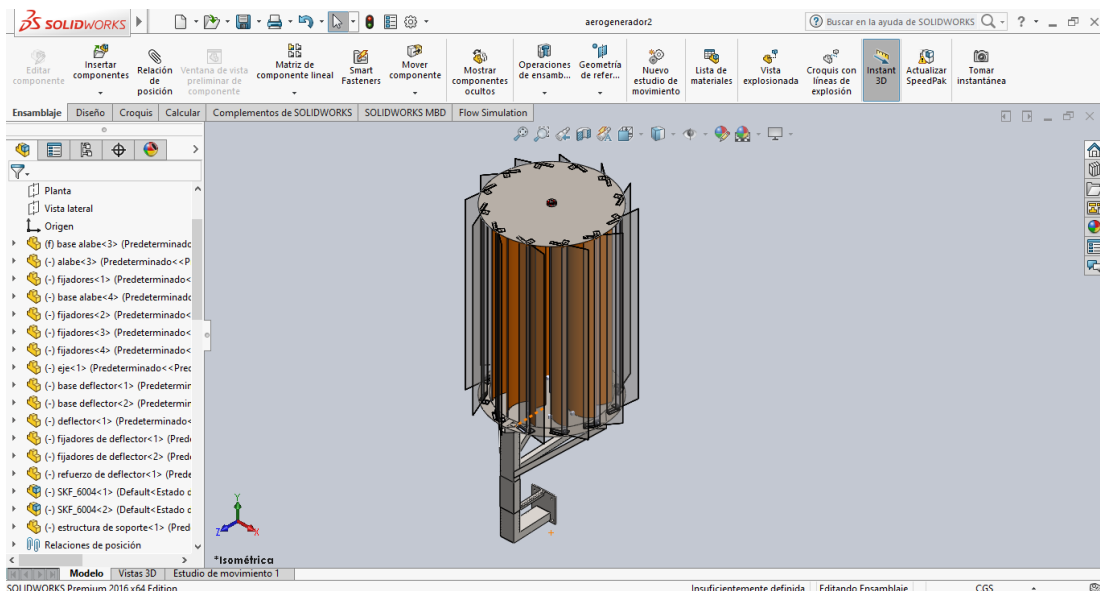


Figura 49. Ensamble final del aerogenerador en SolidWorks

Fuente: Elaboración propia.

Realizaremos la simulación en la herramienta de SolidWorks, llamado Flow Simulation, que simularás con eficiencia el flujo de fluidos, además de determinar las fuerzas que ejercen el fluido en un objeto. El objetivo de la simulación será obtener la trayectoria del flujo y el torque en el eje de la turbina a velocidad y densidad del aire de 4 m/s y 0.815 kg/m³ respectivamente.

Como primer paso realizaremos la configuración de nuestro entorno de trabajo, en el cual realizaremos un análisis externo, en nuestro caso no marcaremos la opción de rotación, ya que queremos realizar un análisis estático para ver cuanta fuerza ejerce el viento en los álabes de la turbina.

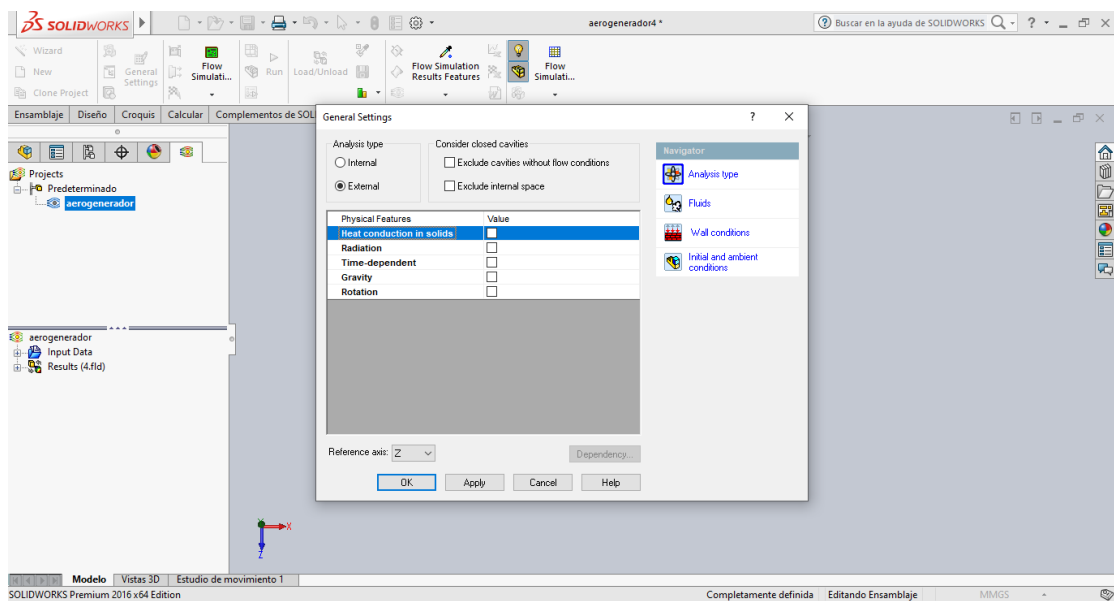


Figura 50. Configuración del tipo de análisis.

Fuente: Elaboración propia.

También, configuraremos el tipo de fluido que en nuestro caso será al aire:

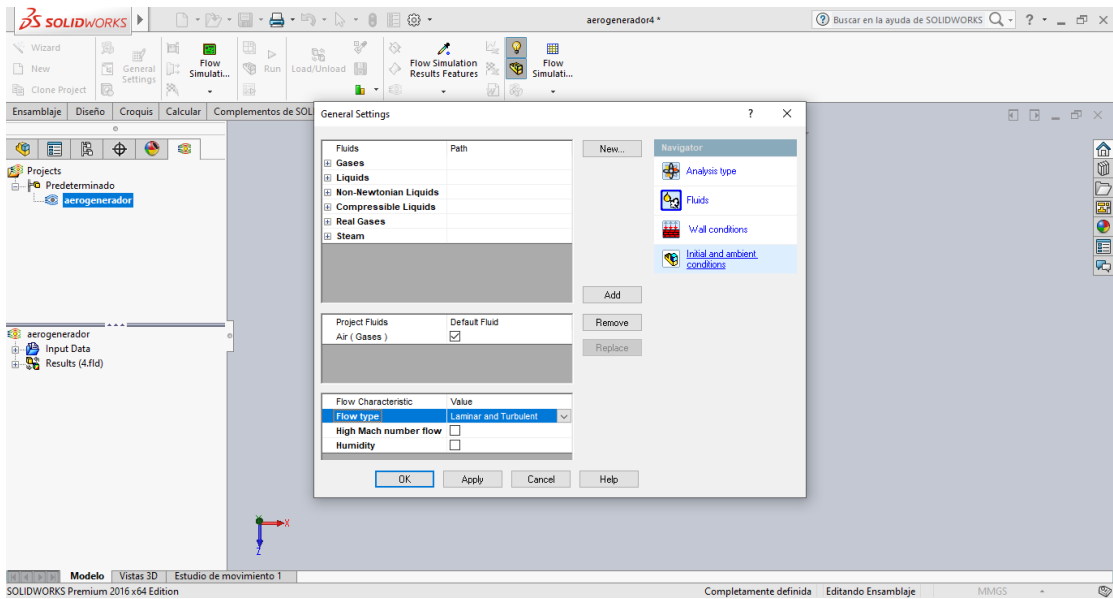


Figura 51. Configuración del fluido.

Fuente: Elaboración propia.

Además, configuraremos las condiciones iniciales y ambientales donde estableceremos el eje de referencia para el flujo del viento, la densidad y velocidad del viento, estos datos ya los definimos anteriormente.

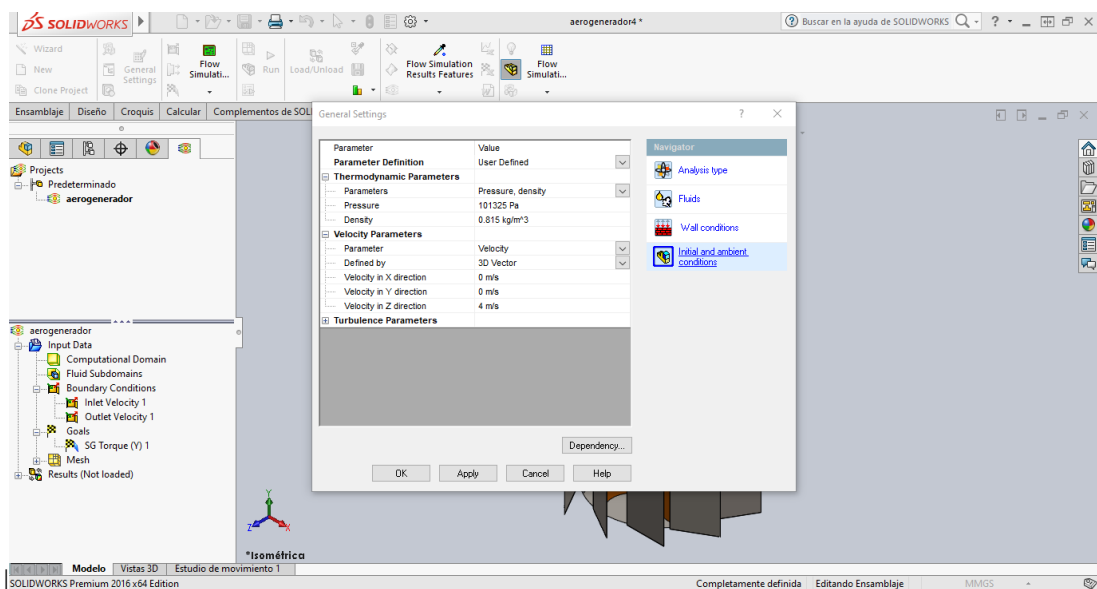


Figura 52. Configuración de las condiciones iniciales y ambientales

Fuente: Elaboración propia.

Segundo paso, ingresaremos los datos de entrada, modificaremos el dominio computacional como se observa a continuación:

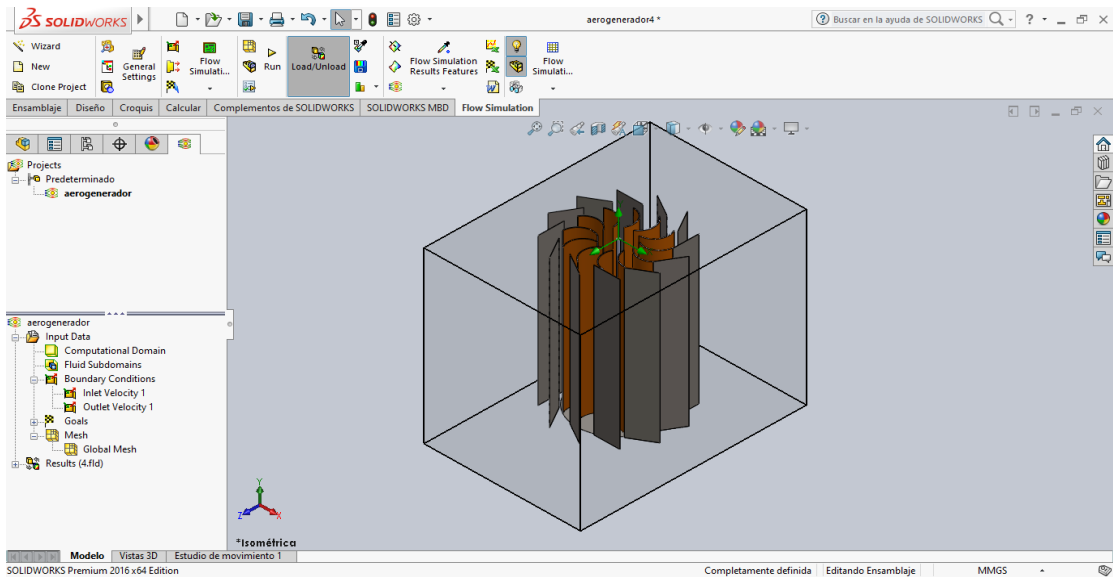


Figura 53. Configuración del dominio computacional.

Fuente: Elaboración propia.

En las condiciones de entorno ingresaremos un flujo de aire con velocidad de 7 m/s con relación al eje Z como se observa a continuación:

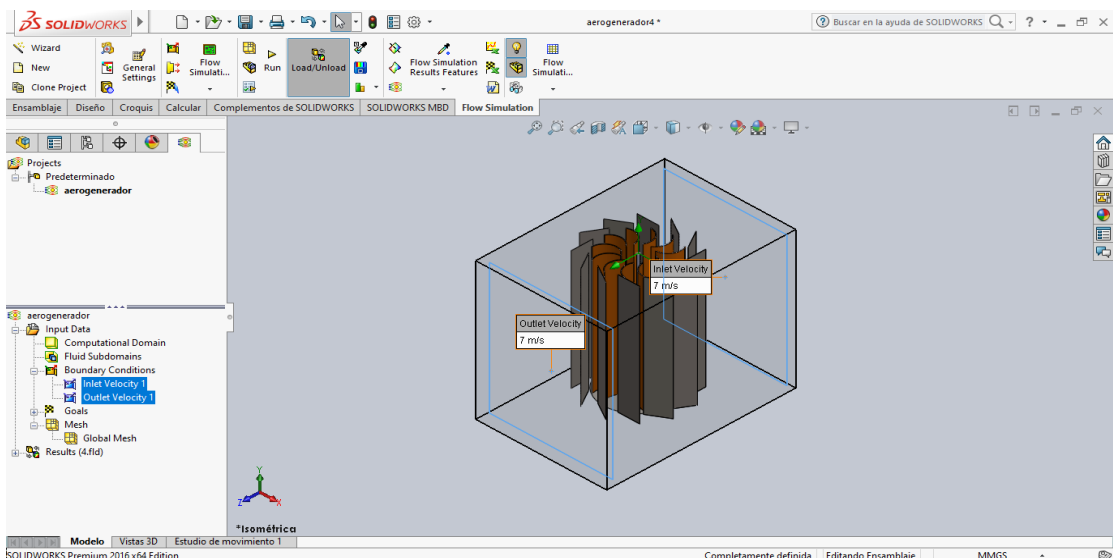


Figura 54. Configuración de las condiciones de entorno.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, estableceremos los objetivos del análisis donde obtendremos torque generado en el eje de la turbina, para el cual se seleccionará como superficies a todos los álabes de la turbina y seleccionado el torque en el eje Y, ya que el eje de la turbina está en el eje Y.

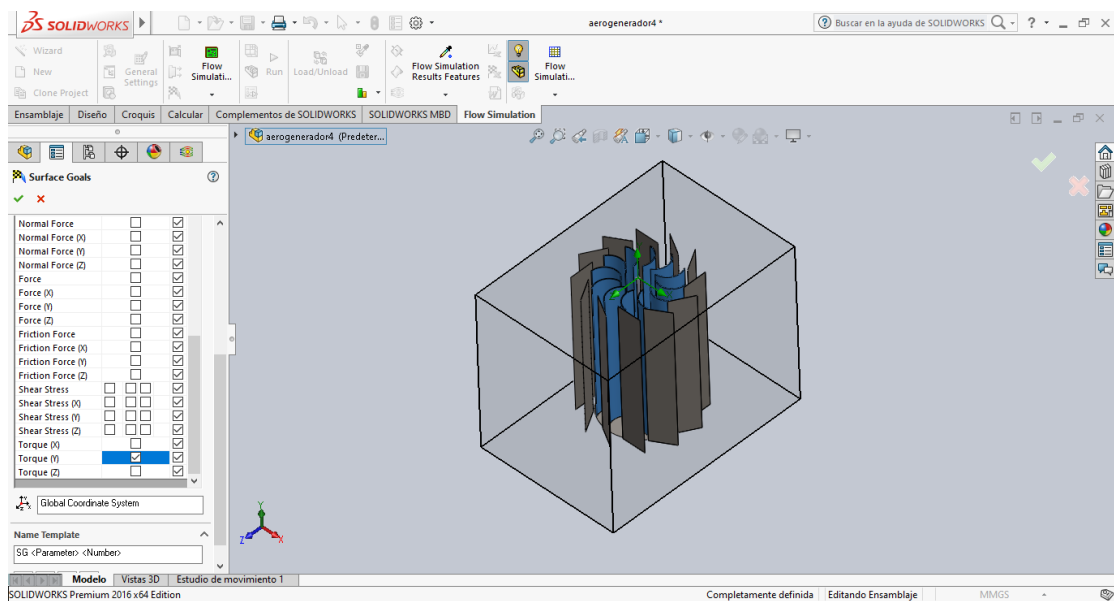


Figura 55. Configuración de los objetivos.

Fuente: Elaboración propia.

Además, configuraremos la malla de forma manual de la siguiente forma:

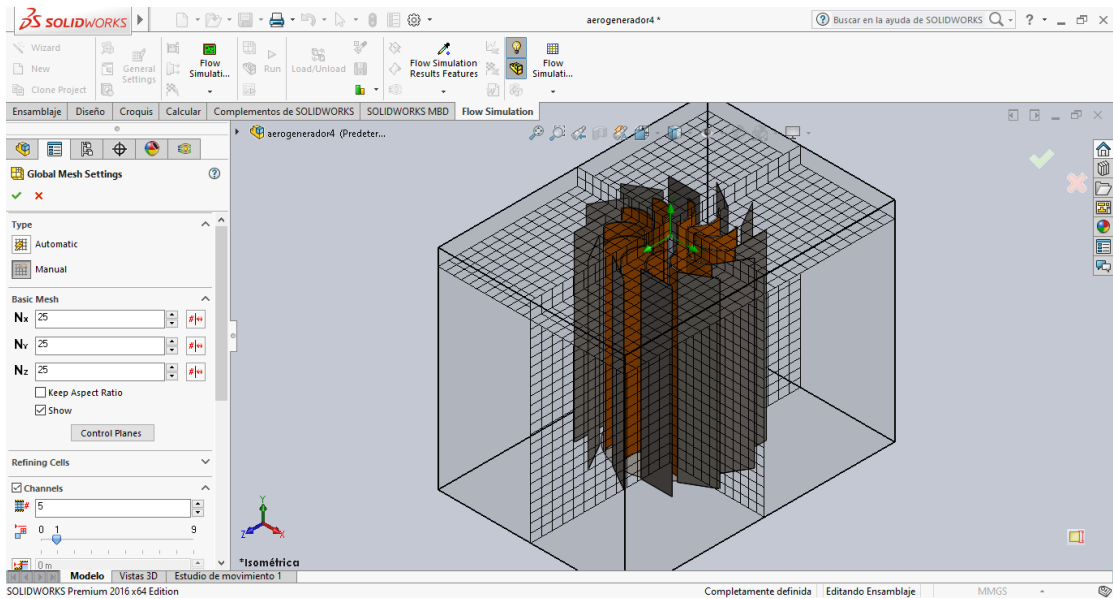


Figura 56. Configuración de la malla.

Fuente: Elaboración propia.

Tercer paso, ejecutaremos el proyecto para obtener los resultados, en la pestaña de resultados activaremos la trayectoria de flujo como se observa a continuación:

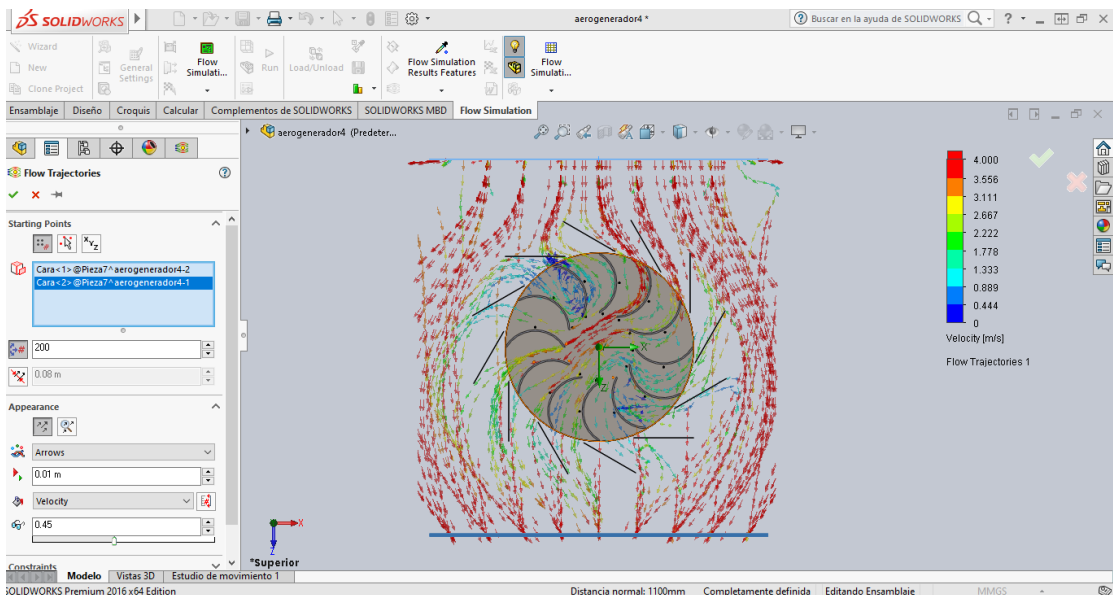


Figura 57. Trayectorias de fluido de la turbina.

Fuente: Elaboración propia.

En esta imagen podemos observar la trayectoria del flujo del aire; en flechas rojas podemos ver que la velocidad del viento es la máxima a medida que interactúa con la turbina que tiende a reducir la velocidad del aire, pero aumentado la presión en cada álabe como se observa a continuación:

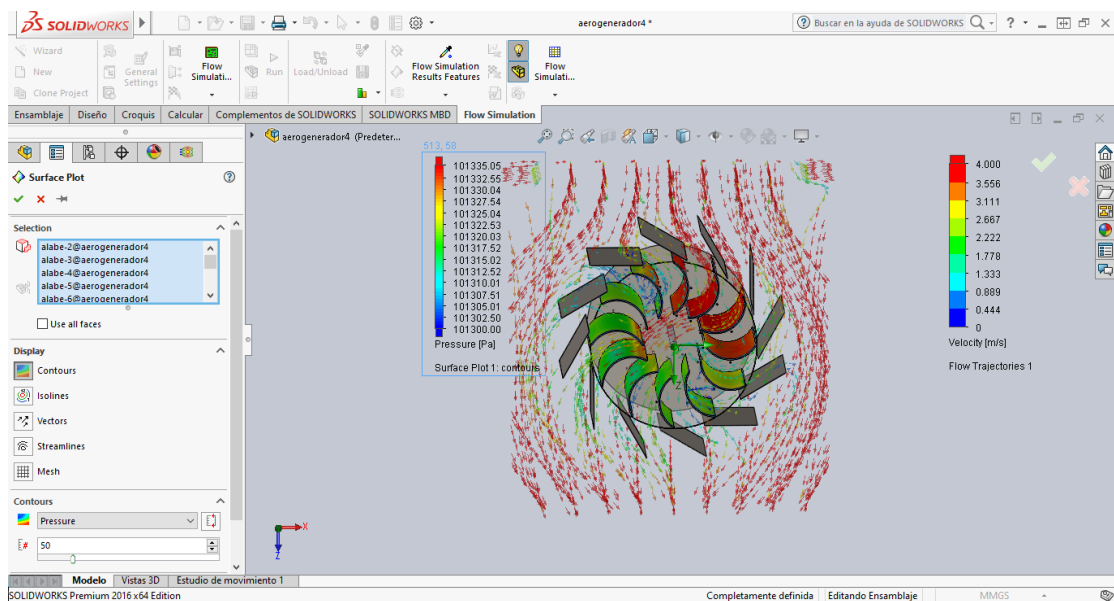


Figura 58. Presión en los álabes.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 58 vemos las superficies con color naranja en las zonas de mayor presión ejercida por el aire, además observamos que se crean turbulencia en algunas zonas de la turbina, pero estas son de bajas velocidades que tienen un mínimo efecto en la turbina.

Y por último veremos los objetivos donde obtendremos el torque en el eje de la turbina por el efecto de la fuerza del viento en los álabes.

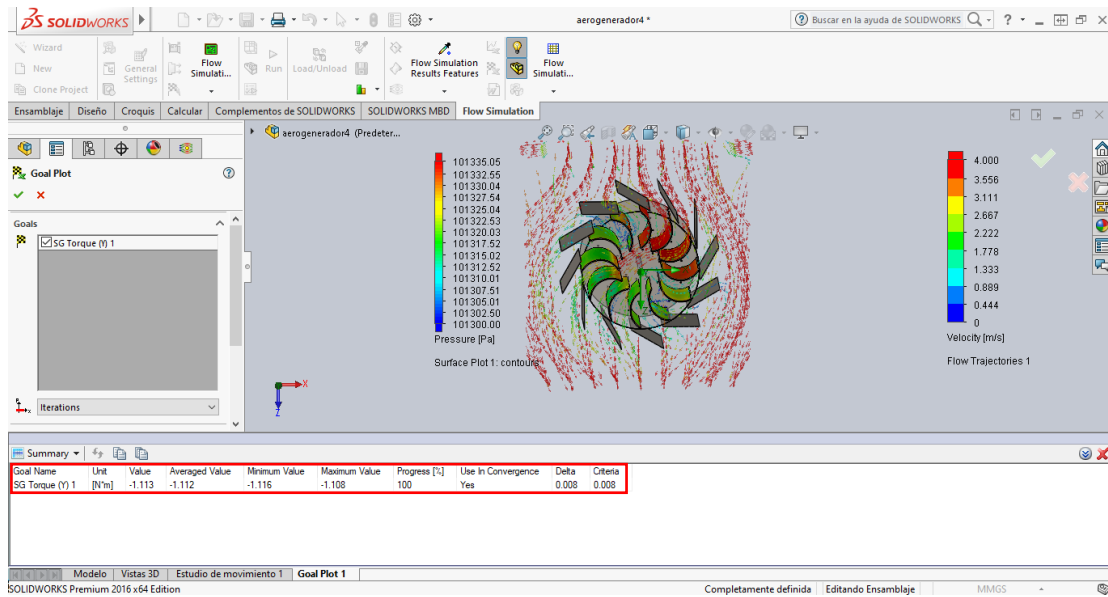


Figura 59. Observación del torque generado.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa, el valor del torque es 1.113 N.m en sentido horario, el cual corresponde a la dirección de rotación de la turbina a una velocidad del aire de 4 m/s.

Se calcula la potencia en el eje de la turbina con los datos del punto 3.7.7. y el torque obtenido a partir de la siguiente ecuación:

$$P = \text{torque}(kg.m) * \text{velocidad}(RPM)$$

Donde:

$$0.102 \text{ kg.m} = 1 \text{ N.m}$$

$$\text{velocidad} = 45.67 \text{ RPM}$$

Remplazando:

$$P = 1.113(0.102)kgm * 45.67 \text{ RPM}$$

$$P = 5.18 W$$

Se observa en esta simulación que existe una aproximación a la potencia calculada en la sección 3.7.4. esto se debe a que en dicha sección se calcula en función a 4 álabes activos.

Además, podemos calcular el coeficiente de potencia C_p . con la ecuación de la sección 3.7.5. el cuál es el siguiente.

$$C_p = \frac{5.18}{\frac{1}{2} * (0.815 * 4^3 * 0.552)}$$

$$C_p = 0.36$$

Este resultado es aproximado al calculado en la sección 3.7.5. verificando así los cálculos del diseño.

3.9. Evaluación Técnica y Económica

3.9.1. Presupuesto

Tabla 12. *Presupuesto del proyecto*

Descripción	Propiedades	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Precio parcial
Plancha de acero laminado	1.2 m x 2.4 m X 0.08 mm reciclado	3	und	S/ 20.00	S/ 60.00
Rodamientos	6004	2	und	S/ 5.00	S/ 10.00
Perfil de metal	Rectangular 1.5'x3'x2.5mm	2	m	S/ 5.00	S/ 10.00
	Cuadrado 1.5'x1.5'x2.5 mm	2	m	S/ 5.00	S/ 10.00
	Circular 20 mmx1.5 mm	1.5	m	S/ 4.00	S/ 6.00
Soldadura	6011	1	kg	S/ 7.00	S/ 7.00
Cable acero	Diámetro de 1.6 mm	10	m	S/ 0.80	S/ 8.00
Tubo PVC	8 pulgadas reciclado	4	m	S/ 8.00	S/ 32.00
Tornillos y tuercas	2 pulgadas X 3 mm	150	und	S/ 0.15	S/ 22.50
Filamento	PLA 1.75 mm	0.2	Kg	S/ 55.00	S/ 11.00
Generadores	38V-1.9 Amp reciclado	2	und	S/ 10.00	S/ 20.00
Cables	14AWG	6	m	S/ 2.50	S/ 15.00
	UTP	4	m	S/ 1.80	S/ 7.20
Servicios	Corte y Soldadura	1	días	S/ 25.00	S/ 25.00
	Impresión 3D	8	horas	S/ 2.20	S/ 17.60
	Montaje e instalación	1	día	S/ 30.00	S/ 30.00
Otros	Inversor 100 W	1	und	S/ 16.00	S/ 16.00
	Batería 9 Ah	1	und	S/ 75.00	S/ 75.00
	Controlador de carga	1	und	S/ 35.00	S/ 35.00
TOTAL					S/ 417.30

Fuente: Elaboración propia.

Se considera como inversión inicial el total del presupuesto de S/.417.30

3.9.2. VAN y TIR

El valor actual neto es una cantidad monetaria que refleja el valor actual de los cobros o ingresos menos el valor actualizado de los pagos. (29)

$$VAN = -I_0 + \sum_{n=1}^N \frac{C_n}{(1+r)^n} = 0$$

Donde:

I_0 = inversión inicial

C_n = flujo de caja o de beneficios generados por la inversión en cada periodo.

N = Número total de periodos

n = año en el que se obtiene los beneficios de cada periodo.

r = TIR

El TIR es la tasa interna de retorno o rentabilidad, es un indicador con el cual analizaremos la rentabilidad de un determinado proyecto, además de mejorar la toma de decisiones se puede interpretar de la siguiente forma: (29)

TIR>0: el proyecto es rentable

TIR=0: el proyecto no genera pérdidas ni beneficios

TIR<0: el proyecto genera perdidas

Comenzaremos por estimar el cargo por kWh/año, teniendo como partida la potencia generada y las horas de funcionamiento. Se ha tenido como referencia un valor aproximado en función al pliego tarifario fijado por el Osinergmin para Electrocentro S.A para obtener el Cargo por kWh. (30)

Cabe mencionar que el aerogenerador no funciona en paralelo a la red eléctrica comercial, esto debido a que al tener una baja potencia sería más útil suministrar la energía almacenada a un sistema independiente como, por ejemplo, el sistema de iluminación del domicilio o algún artefacto que la batería pueda suministrar.

Tabla 13. *Estimación del cargo por kWh/año*

Potencia generada	kWh/día	kWh/mes	kWh/año	Cargo por kWh	Cargo por kWh/año
5.3 W	0.1272	3.816	46.428	S/ 0.97	S/45.04

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo el cargo por kWh/ año de S/ 45.04, se estimará un flujo de caja para un periodo de 18 años, esto teniendo en cuenta la vida útil del aerogenerador que dependerá del mantenimiento y frecuencia de uso. Por lo que se destinará el 10 % del ingreso anual para mantenimiento preventivo, el cual consiste en la revisión y ajuste de las partes atornilladas, lubricación de rodamientos y engranes además del ajuste de los anclajes de la estructura con esto aseguraremos la vida útil del aerogenerador a 18 años. Además, utilizaremos como referencia la investigación de Miguel Ramos Rodríguez (31), donde establece un estudio comparativo de una instalación eólica Onshore en el mercado rumano y estadounidense, donde concluye que el mercado estadounidense tiene una mayor certidumbre en el retorno, por lo que utiliza una tasa de descuento del 7 %, el cual utilizaremos como referencia para realizar el cálculo del VAN y el TIR.

Por último, estableceremos un ajuste tarifario anual del 1.81 % para calcular los ingresos por energía generada.

A continuación, se muestra la tabla de flujo de caja y el cálculo del VAN, TIR y PR

Tabla 14. *Flujo de caja y cálculo del VAN, TIR y PR*

Año	Ingresos de energía generada	Mantenimiento	Flujo de Caja	Saldo acumulado al 7 %	Saldo actualizado acumulado
0			-S/ 417.30	-S/ 417.30	-S/ 417.30
1	S/ 45.20	-S/ 4.52	S/ 40.68	S/ 38.02	-S/ 379.28
2	S/ 46.02	-S/ 4.60	S/ 41.42	S/ 36.17	-S/ 343.11
3	S/ 46.85	-S/ 4.69	S/ 42.17	S/ 34.42	-S/ 308.69
4	S/ 47.70	-S/ 4.77	S/ 42.93	S/ 32.75	-S/ 275.94
5	S/ 48.56	-S/ 4.86	S/ 43.71	S/ 31.16	-S/ 244.77
6	S/ 49.44	-S/ 4.94	S/ 44.50	S/ 29.65	-S/ 215.12
7	S/ 50.34	-S/ 5.03	S/ 45.30	S/ 28.21	-S/ 186.91
8	S/ 51.25	-S/ 5.12	S/ 46.12	S/ 26.84	-S/ 160.07
9	S/ 52.17	-S/ 5.22	S/ 46.96	S/ 25.54	-S/ 134.53
10	S/ 53.12	-S/ 5.31	S/ 47.81	S/ 24.30	-S/ 110.22
11	S/ 54.08	-S/ 5.41	S/ 48.67	S/ 23.12	-S/ 87.10
12	S/ 55.06	-S/ 5.51	S/ 49.55	S/ 22.00	-S/ 65.10
13	S/ 56.06	-S/ 5.61	S/ 50.45	S/ 20.94	-S/ 44.16
14	S/ 57.07	-S/ 5.71	S/ 51.36	S/ 19.92	-S/ 24.24
15	S/ 58.10	-S/ 5.81	S/ 52.29	S/ 18.95	-S/ 5.29
16	S/ 59.16	-S/ 5.92	S/ 53.24	S/ 18.03	S/ 12.75
17	S/ 60.23	-S/ 6.02	S/ 54.20	S/ 17.16	S/ 29.91
18	S/ 61.32	-S/ 6.13	S/ 55.18	S/ 16.33	S/ 46.23
				Tasa de descuento	7.00 %
				VAN	S/ 46.23
				TIR	8 %
				PR	15.29 años

Fuente: Elaboración propia.

Para validar el proyecto se debe tener en cuenta las siguientes condiciones:

si VAN < 0 ó TIR < Tasa de descuento, se rechaza la inversión

si $VAN \geq 0$ y $TIR \geq Tasa\ de\ descuento$, se acepta la inversión

Se acepta la inversión ya que el TIR es de 8 % siendo mayor a la tasa de descuento.

3.10. Materiales y Especificaciones Técnicas

3.10.1. Objeto

La presente especificación técnica se refiere a la construcción del aerogenerador Savonius modificado desde los álabes, deflectores de viento, multiplicador de velocidad e instalación de los generadores. Quedarán excluidos el sistema de carga de batería, baterías e inversores de corriente.

3.10.2. Materiales

Tabla 15. *Materiales para el proyecto*

Material	Propiedades	Dimensiones	Cantidades
Plancha de acero laminado	Reciclado	1.2 m x 2.4 m X 0.08 mm	3 und
Rodamientos	6004	12 mm x 42 mm x 20 mm	2 und
Perfil de metal	Rectangular reciclado	1.5 in x3 in x2.5 mm x 2 m longitud	1 und
	Cuadrado reciclado	1.5 in x1.5 in x2.5 mm x 2 m longitud	1 und
	Circular reciclada	20 mmx1.5 mm x 1.5 m largo	1 und
Soldadura	6011	1/8 in	1 kg
Cable de acero	Alma de fibra	Diámetro de 1.6 mm	10 m
Tubo PVC	Reciclado	8 in x 4 m de largo	1 und
Tornillos y tuercas	M3	2 in x 3 mm	150 und
Filamento	PLA	1.75 mm	0.4 kg
Generadores	Reciclado	38 V-1.9 Amp	2 und
Cables	GPT	14AWG	8 m
	UTP	Cat 5E	4 m

Fuente: Elaboración propia.

3.10.3. Ejecución

Para realizar una correcta ejecución en la construcción del aerogenerador Savonius modificado deberemos seguir los siguientes pasos.

Primer paso, realizar el corte de los álabes como se muestra en la figura 21 y ubicarlos con la tapa y base de los álabes conforme a la figura 27, estos deben estar alineadas de forma paralela al eje principal y fijados a la tapa y base con los seguros de álabes conforme a la sección 3.7.10.3

Segundo paso, realizar la ubicación de los deflectores de viento a la base de los deflectores de viento con los seguros de deflectores, estos deben estar ubicados conforme a la figura 27, además de ubicar los refuerzos de los deflectores de viento como se muestra en la sección 3.7.10.2. Asimismo, se deberá ubicar en la parte interna de los deflectores de viento los álabes mencionados en el primer paso para luego cerrar con la tapa de los deflectores de viento.

Tercer paso, realizar la ubicación de los rodamientos que estarán fijados en la tapa y base de los deflectores de viento y deberán estar centrados para que el cuerpo de los álabes no tenga algún rozamiento con los deflectores de viento hasta este punto se tiene la turbina ya ensamblada.

Cuarto paso, realizar la ubicación de la turbina en la estructura de soporte como se muestra en la sección 3.7.10.6 verificando que esté centrado y que el eje principal no tenga algún rozamiento con la estructura.

Quinto paso, para realizar la instalación se deberá tener consideración los siguientes puntos.

- Realizar las perforaciones necesarias para fijar la estructura de soporte.
- Acondicionar el área de la instalación para no golpear o afectar la integridad de la turbina.
- Tener los equipos de protección personal necesarios para realizar la instalación como arnés, cascos y guantes para todo el equipo involucrado en la instalación.

Se deberá verificar una correcta nivelación de la turbina, ya que una mal ubicación puede afectar en el rendimiento de esta.

Sexto paso, realizar el anclaje de la turbina utilizando el cable de acero que estará ubicado cada 90 grados desde la parte más alta de la turbina hacia una parte fija, esto evitará vibraciones y tendremos una estructura más sólida.

Séptimo paso, realizar la impresión 3D de las piezas que conforman el multiplicador de velocidad como se muestra en la sección 3.7.12, verificando que el relleno este al 100 % para que los engranes tengan mayor resistencia, realizar el ensamble de todas las piezas y ubicar en la zona baja de la estructura de soporte alineando el eje principal de la turbina al eje de entrada del multiplicador de velocidad.

3.10.4. Pruebas

Para realizar las pruebas de una correcta construcción del aerogenerador verificaremos los siguientes puntos.

- Antes de instalar el multiplicador se debe verificar un movimiento fluido ante cualquier viento.
- Verificar que no exista ruidos de rozamiento o piezas sueltas.
- Verificar que no exista vibraciones por efecto de vientos de gran fuerza.

3.11. Construcción

3.11.1. Construcción de la turbina

Para la construcción de nuestros álabes se utilizó un tubo de PVC de 8 pulgadas, el cual se cortaron como se muestra en el diseño de los álabes, posteriormente se unieron los álabes a la base y tapa de álabes con los seguros con tornillos de 3.8 mm como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 60. Construcción de la turbina Savonius.

Fuente: Elaboración propia.

Como siguiente paso se realizó la construcción de la estructura de soporte colocando el rodamiento 6004 de la parte inferior.



Figura 61. Construcción de la base de turbina

Fuente: Elaboración propia.

Se colocaron las bases de los deflectores de viento sobre la estructura de soporte con la estructura de los álabes dentro del rodamiento inferior para luego colocar la tapa de los deflectores de viento con los seguros de las mismas.

Paso seguido se colocaron los refuerzos de los deflectores de viento que le darán una mayor estabilidad a todo el aerogenerador, estas se sujetaron con remaches de 3 mm.

Asimismo, se instaló todo el aerogenerador en la parte alta del domicilio quedando como se muestra en la imagen 63 verificando una correcta nivelación como último paso se fijó con cable de acero número 16 en 4 partes cada 90 grados para aumentar la estabilidad y minimizar las vibraciones.



Figura 62. Instalación de la Turbina Savonius modificado.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 63. Instalación de la Turbina Savonius modificado con el autor.

Fuente: Elaboración propia.

3.11.2. Construcción del multiplicador de velocidad

Para la fabricación del multiplicador de velocidad se utilizó una impresora 3D de la marca Creality modelo CR-10S PRO con la cual se realizó la impresión de cada pieza, se utilizó el PLA como material para la impresión.

A continuación, se muestran la impresión de las piezas.



Figura 64. Impresión 3D engranes.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 65. Impresión 3D base del tren de engranes

Fuente: Elaboración propia.

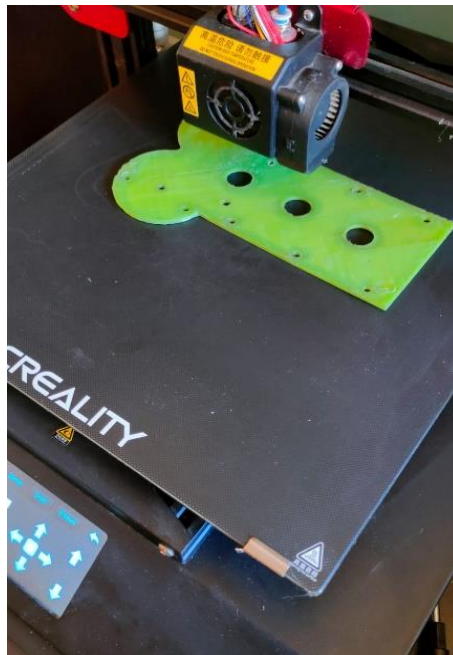


Figura 66. Impresión de la tapa del tren de engranes.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 67. Piezas del multiplicador de velocidad terminadas.

Fuente: Elaboración propia.

Paso seguido se realizó el ensamblaje de todas las piezas mostradas anteriormente quedando como de la siguiente forma.

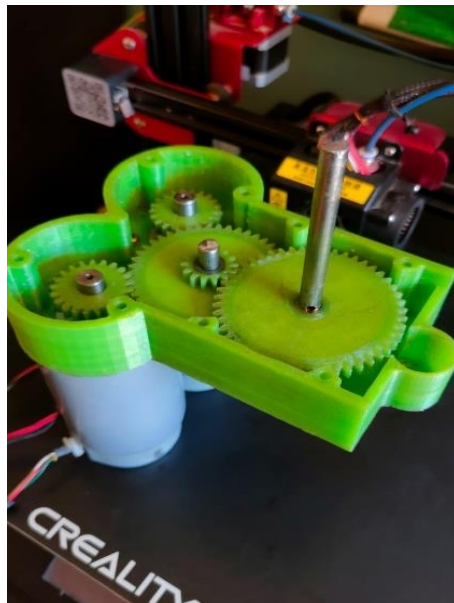


Figura 68. Ensamble del multiplicador de velocidad 1.

Fuente: Elaboración propia.

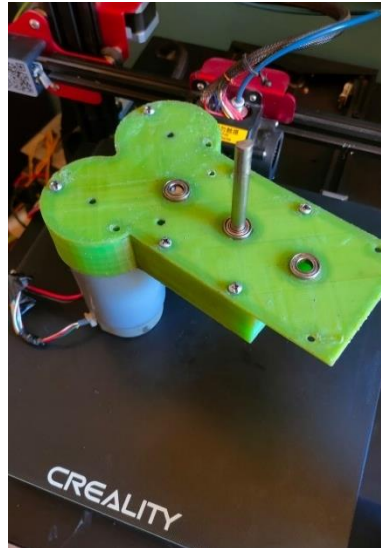


Figura 69. Ensamble del multiplicador de velocidad 2.

Fuente: Elaboración propia.

Como último paso se acondicionó un pequeño perfil de aluminio para facilitar el ensamblaje del multiplicador de velocidad a la estructura de soporte del aerogenerador.

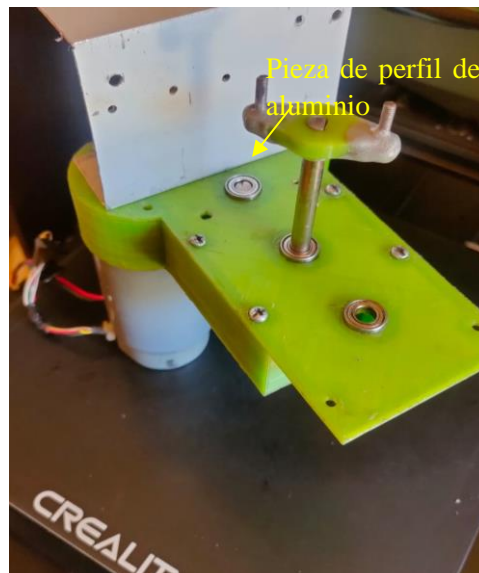


Figura 70. Ensamble final del multiplicador de velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

Adicional a ello se muestra como este ensamblado el multiplicador de velocidad al aerogenerador. Se puede apreciar como es el punto de contacto entre el eje de la turbina y el eje del multiplicador de velocidad.



Figura 71. Instalación del multiplicador de velocidad a la turbina.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 72. Vista completa del multiplicador de velocidad y turbina.

Fuente: Elaboración propia.

3.11.3. Construcción del sistema de monitoreo

Se ensambló el sistema de monitoreo y se optó por realizar una pequeña tarjeta de soporte donde se puedan instalar los componentes como el módulo de reloj, módulo SD, divisor de tensión como se muestra en la siguiente imagen.

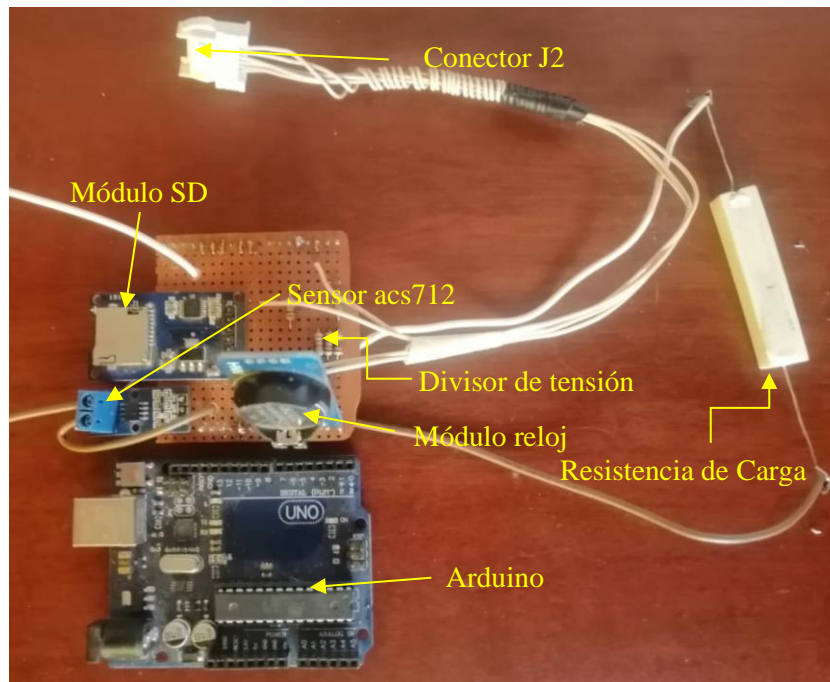


Figura 73. Partes del sistema de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

Esta tarjeta tiene los pines necesarios para instalarse en la placa Arduino y quedó de la siguiente forma:

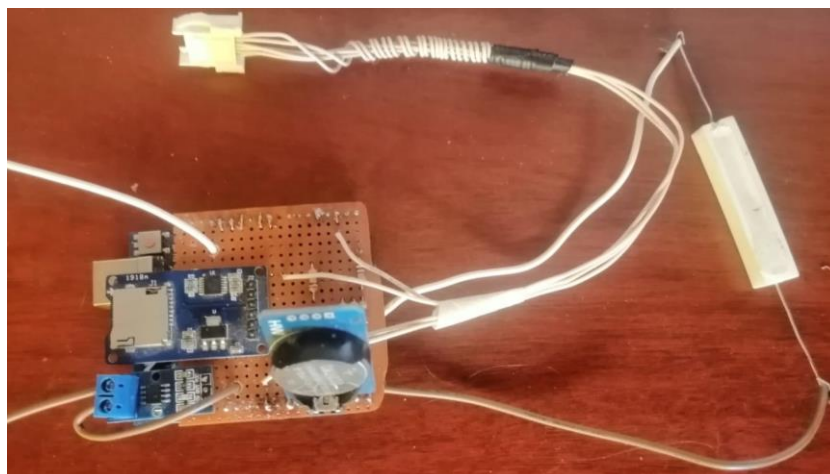


Figura 74. Ensamble final del sistema de monitoreo

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados e Interpretación

Para evaluar los resultados del aerogenerador construido, observamos los datos obtenidos por el sistema de monitoreo como voltaje, corriente, RPM y velocidad del viento, que previamente se conectó el sistema de monitoreo, anemómetro y la resistencia de carga. En el anexo 2, se muestran 318 datos extraídos del sistema de monitoreo y del anemómetro donde el viento llegó a tener altos niveles de velocidad, además se realizaron los cálculos de la potencia disponible y rendimiento, realizamos nuestro análisis en una sola prueba e interpretamos las gráficas obtenidas según los objetivos planteados en el presente estudio.

4.1.1. Velocidad del viento

Como se observó en el marco teórico el viento tiene como origen la diferencia de temperatura en los polos y el ecuador debido a la radiación solar y esta puede tener distintas velocidades durante el año, a continuación, se muestra un resumen anual de los datos registrado por Senamhi en el 2021.

Tabla 16. *Velocidad del viento según Senamhi durante el 2021*

Mes	Velocidad del viento m/s
Enero	3.7
Febrero	4
Marzo	3.6
Abril	3.1
Mayo	3.3
Junio	2.8
Julio	3.7
Agosto	3.7
Setiembre	3.6
Octubre	3.7
Noviembre	4
Diciembre	4
Promedio anual	3.6

Valores de velocidad de viento promedio por mes (Estación Huayao) durante el 2021.

Fuente: Elaboración propia con data de Senamhi.

La velocidad promedio anual tiene un valor de 3.6 m/s, el cual se puede utilizar para realizar los dimensionamientos del aerogenerador, pero en la sección 3.7.2 se realizó la distribución de Weibull determinando el factor c , que nos indica que la velocidad promedio de dicha distribución es de 4 m/s, el cual se utilizará para cálculos futuros.

4.1.2. Datos de la prueba del aerogenerador

Los datos registrados de la prueba realizada al aerogenerador se muestran en el anexo 2 del cual se obtuvo los siguientes resultados a distintas velocidades de viento.

Tabla 17. Datos aerogenerador Savonius modificado

Velocidad viento	RPM	P_util_final
2	30.43	1.45
3	37.56	2.26
4	64.64	6.67
5	57.80	6.16
6	56.53	5.79
7	57.62	5.85
8	55.15	5.76
9	41.94	3.09
10	45.26	3.51
11	45.48	3.47
12	50.41	4.87
13	44.03	2.87
14	36.34	3.04
15	27.24	0.76
16	28.77	0.93
17	20.13	0.38
18	16.67	0.36

Valores promedios para cada velocidad de viento.

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Velocidad del viento y potencia generada

En este punto obtendremos la curva de potencia para así poder estimar la energía generada mensualmente, de la tabla 15 obtendremos la siguiente figura con la cual formularemos la ecuación que nos dará una aproximación de la potencia generada.

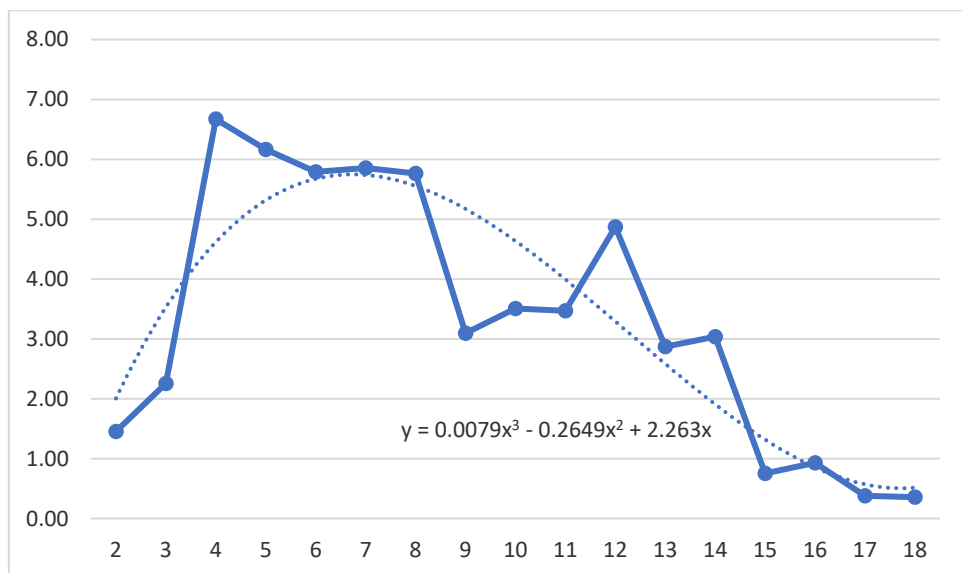


Figura 75. Curva de velocidad del viento vs potencia generada.

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente ecuación nos da una estimación de la potencia generada a distintas velocidades esta se obtuvo mediante regresión polinomial con ayuda del *software* Excel.

$$P = 0.0079V^3 - 0.2649V^2 + 2.263V$$

Con esta ecuación se calculará la potencia generada adicionalmente se estima la energía mensual en kWh.

Tabla 18. *Velocidad de viento y potencia generada*

Mes	Promedio	Potencia Generada W	Energía mensual kWh
Enero	3.7	5.1	3.8
Febrero	4	5.3	3.9
Marzo	3.6	5.1	3.7
Abril	3.1	4.7	3.4
Mayo	3.3	4.9	3.6
Junio	2.8	4.4	3.2
Julio	3.7	5.1	3.8
Agosto	3.7	5.1	3.8
Setiembre	3.6	5.1	3.7
Octubre	3.7	5.1	3.8
Noviembre	4	5.3	3.9
Diciembre	4	5.3	3.9
Suma anual			44.5

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que en la energía generada no existe una gran diferencia, ya que los valores van desde 3.2 kWh a 3.9 kWh siendo los meses de noviembre, diciembre y febrero con mayores niveles energía generada y el mes de junio con el nivel más bajo de energía generada

4.1.4. Rendimiento y potencia generada

A continuación, realizaremos el cálculo de la potencia disponible y rendimiento global.

$$P_{disp} = \frac{1}{2} * \rho * A * V^3$$

$$\eta_{global} = \frac{P_{util\ final}}{P_{disp}}$$

Tabla 19. *Resumen de potencia generada vs rendimiento*

Velocidad_viento	P_util_final	P_disponible	Rendimiento global
2	1.45	3.48	41.75 %
3	2.26	10.30	21.89 %
4	6.67	21.67	30.78 %
5	6.16	37.54	16.42 %
6	5.79	61.60	9.40 %
7	5.85	96.26	6.08 %
8	5.76	136.84	4.21 %
9	3.09	182.57	1.69 %
10	3.51	264.16	1.33 %
11	3.47	339.55	1.02 %
12	4.87	433.97	1.12 %
13	2.87	535.05	0.54 %
14	3.04	686.25	0.44 %
15	0.76	832.33	0.09 %
16	0.93	1009.15	0.09 %
17	0.38	1249.37	0.03 %
18	0.36	1371.77	0.03 %

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el rendimiento global para la velocidad de viento de 4 m/s es de 30.78 %

4.1.5. Movimiento de la turbina y potencia generada

De la tabla 15 obtendremos la siguiente figura donde observaremos la potencia generada en función de la velocidad angular del eje.

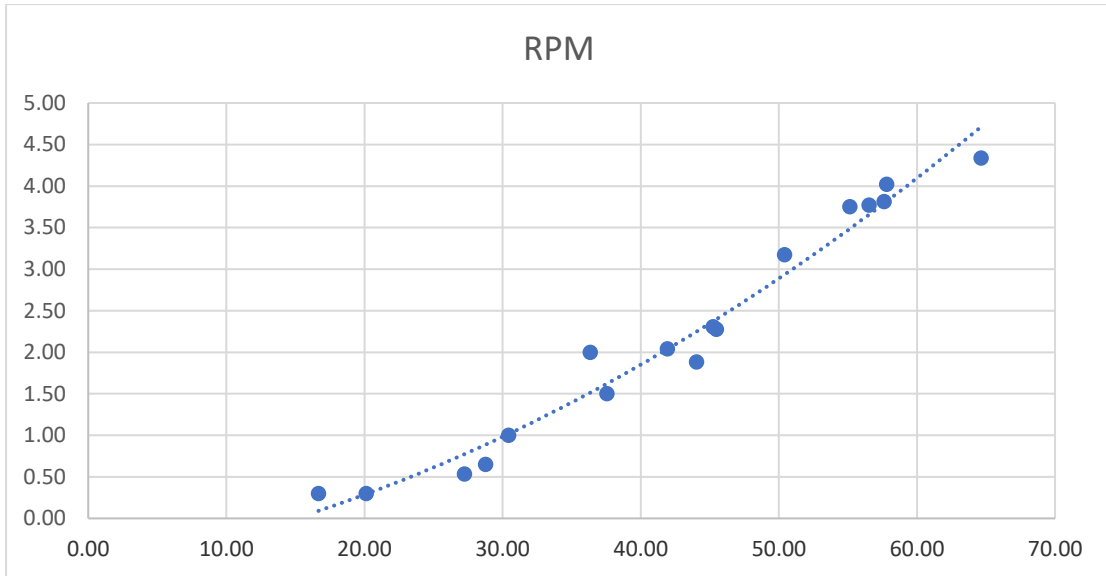


Figura 76. Movimiento de la turbina y potencia generada.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 78 se observa que las revoluciones por minuto aumentan proporcionalmente a la potencia generada y podemos ver que el umbral de generación es desde los 16.67 RPM y un máximo de 64.6 RPM.

4.2. Prueba de hipótesis

4.2.1. Prueba de la hipótesis general

I. Planteamiento de la hipótesis

H_0 : El diseño y la construcción del aerogenerador Savonius modificado no tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario del distrito de Ahuac, 2021.

H_i : El diseño y la construcción del aerogenerador Savonius modificado tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario del distrito de Ahuac, 2021.

II. Interpretación de la hipótesis general

Ante la aseveración de que “el diseño y la construcción del aerogenerador Savonius modificado tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario del distrito de Ahuac, 2021”, se ha demostrado con la validación de las hipótesis alternativas específicas, ya que se ha evidenciado que las variables evaluadas como rendimiento, RPM y velocidad del viento influyen en la energía suministrada a un usuario del distrito de Ahuac, 2021.

4.2.2. Prueba de hipótesis específicas

4.2.2.1. Prueba de hipótesis específica A

I. Planteamiento de hipótesis

H₀: La velocidad del viento del aerogenerador Savonius modificado no tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021.

H_i: La velocidad del viento del aerogenerador Savonius modificado tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021.

Para probar esta hipótesis se evalúa la variable rendimiento respecto a la energía eléctrica generada para el cual se utilizará el coeficiente de correlación de Pearson (r) y el coeficiente de determinación (R^2).

A. Influencia de velocidad del viento en la energía eléctrica.

Para realizar esta prueba se seleccionaron los datos de velocidad de viento promedio mensual de la estación meteorológica en Huayao-Huachac y los datos calculados de energía mensual generada por el aerogenerador Savonius modificado.

Tabla 20. *Coefficiente de Pearson para la velocidad del viento vs energía eléctrica*

r	n	t	V.C. (tabla)	R ²
0.9952	12	32.2757	0.4970	0.9905

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo una muestra de $n = 12$ se calculó un coeficiente de correlación de Pearson de 0.9952, donde el estadístico de prueba calculado tiene un valor de $t = 32.2757$ resulta mayor que el valor crítico $V.C = 0.4970$, para $n-2$ grados de libertad con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Tabla 21. *Velocidad del viento y potencia generada*

N	Mes	Velocidad del viento promedio mensual	Potencia generada w
1	Enero	3.7	5.1
2	Febrero	4	5.3
3	Marzo	3.6	5.1
4	Abril	3.1	4.7
5	Mayo	3.3	4.9
6	Junio	2.8	4.4
7	Julio	3.7	5.1
8	Agosto	3.7	5.1
9	Setiembre	3.6	5.1
10	Octubre	3.7	5.1
11	Noviembre	4	5.3
12	Diciembre	4	5.3

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados del cálculo del coeficiente de Pearson se interpreta que $|32.2757| > 0.4970$ y $r = 0.9952$, esto indica que en relación a la variable velocidad del viento, se valida la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula, además podemos decir que la velocidad del viento tiene influencia en la energía eléctrica generada y se

observa una correlación significativa muy fuerte también, el coeficiente de correlación R^2 nos indica que la velocidad del viento influirá en un 99.05 % en la energía eléctrica suministrada.

4.2.2.2. Prueba de hipótesis específica B

I. Planteamiento de hipótesis

H0: Las revoluciones por minuto del aerogenerador Savonius modificado no tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021.

Hi: Las revoluciones por minuto del aerogenerador Savonius modificado tienen influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021.

Para probar esta hipótesis se evalúa la variable rendimiento respecto a la energía eléctrica generada para el cual se utilizará el coeficiente de correlación de Pearson (r) y el coeficiente de determinación (R^2).

A. Influencia de las RPM en la energía eléctrica

Para realizar esta prueba se han tomado los datos de RPM y la potencia generada promedios registrados en la prueba realizada el 07 de noviembre del 2021.

Tabla 22. *Coeficiente de Pearson para las RPM vs energía eléctrica*

r	n	t	V.C. (tabla)	R^2
0.979	17	18.708	0.412	0.959

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo una muestra de $n = 17$ se calculó un coeficiente de correlación de Pearson de 0.979, donde el estadístico de prueba calculado tiene un valor de $t = 18.708$ resulta mayor que el valor crítico $V.C = 0.412$, para $n-2$ grados de libertad con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Tabla 23. RPM y potencia generada

n	Velocidad_Viento	RPM	P_util_final
1	2	30.43	1.45
2	3	37.56	2.26
3	4	64.64	6.67
4	5	57.80	6.16
5	6	56.53	5.79
6	7	57.62	5.85
7	8	55.15	5.76
8	9	41.94	3.09
9	10	45.26	3.51
10	11	45.48	3.47
11	12	50.41	4.87
12	13	44.03	2.87
13	14	36.34	3.04
14	15	27.24	0.76
15	16	28.77	0.93
16	17	20.13	0.38
17	18	16.67	0.36

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados del cálculo del coeficiente de Pearson se interpreta que $|18.708| > 0.412$ y $r = 0.979$; esto indica que, en relación a la variable RPM, se valida la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula. Además podemos decir que las RPM tiene influencia en la energía eléctrica generada y se observa una correlación significativa muy fuerte también, el coeficiente de correlación R^2 nos indica que las RPM influirán en un 95.9 % en la energía eléctrica suministrada.

4.2.2.3. Prueba de hipótesis específica C

I. Planteamiento de hipótesis

H₀: El rendimiento del aerogenerador Savonius modificado no tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021.

H_i: El rendimiento del aerogenerador Savonius modificado tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac, 2021.

Para probar esta hipótesis se evalúa la variable rendimiento respecto a la energía eléctrica generada para el cual se utilizará el coeficiente de correlación de Pearson (r) y el coeficiente de determinación (R²).

A. Influencia del rendimiento en la energía eléctrica

Para realizar esta prueba se han tomado los datos del rendimiento calculado y la potencia generada promedios registrados en la prueba realizada el 07 de noviembre del 2021.

Tabla 24. *Coeficiente de Pearson para el rendimiento vs energía eléctrica*

r	n	t	V.C. (tabla)	R ²
0.213	17	0.845	0.412	0.045

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo una muestra de $n = 17$ se calculó un coeficiente de correlación de Pearson de 0.213, donde el estadístico de prueba calculado tiene un valor de $t = 0.845$ resulta mayor que el valor crítico $V.C = 0.412$, para $n-2$ grados de libertad con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Tabla 25. Rendimiento y potencia generada

n	Velocidad_Viento	Rendimiento	P_util_final
1	2	41.75 %	1.45
2	3	21.89 %	2.26
3	4	30.78 %	6.67
4	5	16.42 %	6.16
5	6	9.40 %	5.79
6	7	6.08 %	5.85
7	8	4.21 %	5.76
8	9	1.69 %	3.09
9	10	1.33 %	3.51
10	11	1.02 %	3.47
11	12	1.12 %	4.87
12	13	0.54 %	2.87
13	14	0.44 %	3.04
14	15	0.09 %	0.76
15	16	0.09 %	0.93
16	17	0.03 %	0.38
17	18	0.03 %	0.36

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados del cálculo del coeficiente de Pearson se interpreta que $|0.845| > 0.412$ y $r = 0.213$, esto indica que en relación a la variable rendimiento, se valida la hipótesis alternativa y se rechaza la hipótesis nula. Además, podemos decir que el rendimiento tiene cierta influencia en la energía eléctrica generada, aunque no es muy significativo y se observa una correlación débil también, el coeficiente de correlación R^2 nos indica que el rendimiento influirá en un 4.5 % en la energía eléctrica suministrada.

4.3. Discusión de Resultados

En esta sección analizaremos nuestros resultados en comparación a nuestros antecedentes.

4.3.1. Artículos científicos

En el artículo “Diseño y Construcción de un Aerogenerador Tipo Savonius Multietapa” (1), se presenta como resultado las relaciones de torque estático vs. velocidad del viento, velocidad angular vs. velocidad del viento; con lo que se pudieron realizar las curvas de desempeño de la turbina como la relación del coeficiente de potencia vs. radio típico de velocidad. En comparación con nuestra investigación, el coeficiente de potencia de nuestro aerogenerador fue superior a una velocidad de viento de 4 m/s se obtuvo y un coeficiente de potencia de 0.36 en nuestra investigación frente a 0.0959 en el mencionado artículo, la potencia eléctrica generada fue de 18.94 W; esta potencia es superior a la potencia generada en nuestra investigación, esto se justifica, ya que el área de barrido es 2.54 veces más grande que el área de barrido de nuestro aerogenerador además que la densidad del viento es de 1.1187 Kg/m^3 lo que favorece a la potencia generada.

En el artículo “Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador de eje vertical para oxigenar estanques de peces” (2) se presenta como resultado que la configuración correcta es de 6 álabes semicirculares a 0 grados, el cual muestra un mejor desempeño a velocidades mayores. En este artículo, se nos muestra un resultado promedio de la velocidad de rotación de 374.7 RPM a una velocidad del viento de 4 m/s a diferencia de nuestra investigación la velocidad de rotación es menor con 50.6 RPM, esto debido a que las pruebas realizadas por ese autor son en un túnel de viento y sin carga en el eje por ello la velocidad fue mucho mayor.

En el artículo “Estudio de las características cualitativas de aerogeneradores mediante un modelo a escala” (3), sus resultados muestran que los aerogeneradores con 2 turbinas colocadas a barlovento y sotavento que giran en un solo sentido brindan una

potencia adicional mínima de 44 %. Este artículo nos sirvió para analizar las desventajas de un aerogenerador de eje horizontal y todos los mecanismos que se involucran, por ello, se decidió diseñar un aerogenerador con la mínima cantidad de partes móviles y además que pueda aprovechar el viento en todas las direcciones o vientos turbulentos.

En el artículo “Aerogenerador Alisio” (4), sus resultados mencionan que el aerogenerador Alisio es viable, ya que se obtienen voltajes aceptables a velocidades de viento superiores a 3.88 m/s, pero el funcionamiento ideal sería a los 6.8 m/s en comparación a nuestro estudio este aerogenerador operando a 3.88 m/s se alcanzará los 60 RPM frente a nuestros resultados con velocidad de 4 m/s y una velocidad de rotación de 64.6 RPM se observa que estos resultados son muy similares lo que respalda nuestra investigación.

En el artículo “Diseño experimental de aerogenerador tipo Savonius” (5), sus resultados obtenidos nos ayudaron a dimensionar el aerogenerador, calcular la potencia, velocidad de giro, diseño de palas además que el equipo fue diseñado a partir de materiales reciclados como tuberías de PVC al igual que nuestro aerogenerado. Además, de los soportes metálicos, este diseño nos brindó un mejor entendimiento sobre funcionamiento externo e interno de un aerogenerador tipo Savonius en comparación a nuestro aerogenerador la velocidad de viento fue de 8.68 m/s superior a la velocidad de viento de prueba de nuestra investigación con 4 m/s, también el aerogenerador se realizó con materiales reciclados y sobre todo los álabes que se fabricaron a partir de una tubería de PVC.

4.3.2. Tesis

En la tesis “Diseño de un aerogenerador vertical Savonius-curvado para ensayos experimentales con velocidades de 4 m/s a 8 m/s” (6), se expone la diferencia y los aerogeneradores de eje vertical tipo Savonius y se plantea un diseño distinto al diseño original del aerogenerador Savonius, se destaca las ventajas del rotor Savonius curvado. Entre las características más relevantes son la mayor cantidad de puntos de contacto entre en viento y el rotor además analizan el Coeficiente de potencia C_p . que en su caso es de 0.312 en comparación de la presente investigación se obtuvo un C_p . mayor con el valor de 0.36 obtenido en la sección de la simulación, se obtuvo un mejor resultado gracias a la implementación de los deflectores de viento.

En la tesis “Perfil de un aerogenerador tipo vertical en el edificio de 15 pisos de la universidad nacional del altiplano puno-2018” (7), en sus resultados, se muestran que un solo aerogenerador no suministraría la cantidad necesaria de energía para el edificio de 15 pisos como se planteó inicialmente y que se requieren 5 aerogeneradores de eje vertical para producir la potencia requerida de energía con lo que cumplirían la demanda del edificio a comparación de nuestra investigación obtuvimos en la simulación un coeficiente de potencia de 0.39 frente a 0.19, la potencia de salida fue de 3.681 W a una velocidad del viento de 8.2 m/s frente a nuestros resultados con 5.18 W a una velocidad del viento de 4 m/s se puede ver que en nuestra investigación obtuvimos un mejor resultado ya que implementamos los deflectores de viento.

En la tesis “Prototipo experimental turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia” (8), en el prototipo de turbina eólica, en sus resultados logra producir una potencia de 44 W a una velocidad de viento de 10 m/s. En comparación a nuestra investigación que logramos, producir 5.3 W a una velocidad de viento de 4 m/s, esto se

justifica, ya que el área de barrido del aerogenerador en mención es 1.44 veces mayor a nuestro aerogenerador, además de estar sometida a velocidad de viento elevada; por lo que nuestro aerogenerador aprovecha mayor energía del viento en un área menor, esto se puede verificar con el rendimiento global del aerogenerador siendo de 7 % para este prototipo frente a 30 % en nuestro aerogenerador.

En la tesis de maestría “Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico” (9), se concluyó que el aerogenerador diseñado no podía competir con los precios de la red eléctrica de España, pero se enfatizó que es una buena alternativa para hogares aislados que no pueden acceder a la red eléctrica. Se estimó que este prototipo logro generar energía anual de 27.86 kWh a velocidad de viento de 4 m/s, en comparación a nuestros resultados obtuvimos 44.5 kWh al año a velocidad de viento promedio de 4 m/s se observa que es superior a la potencia estimada por este investigador enfatizando que la implementación de los deflectores de viento resultó favorable para nuestros resultados.

En la tesis de maestría “Diseño de un generador eólico vertical de $\frac{1}{2}$ kWh para velocidades de 7 m/s” (10), los resultados muestran que se reduciría el consumo en un 20 % en un área de barrido de 1 m² con la capacidad de generar 0.61kWh/día, además se resalta el uso del *software* SolidWorks, ya que se pueden modelar sistemas complejos y ser analizados intuitivamente, que al igual que en nuestra investigación nos ayudó a determinar la interacción del viento con el aerogenerador y determinar la potencia producida por el aerogenerador, en la simulación obtuvimos que la potencia es de 5.18 W a una velocidad de 4 m/s o 0.12 kWh/día y el Cp es de 0.36, siendo mayor al Cp considerado en este prototipo con valor de 0.35. Si bien la potencia del aerogenerador propuesto por Trujillo es mayor, esto se debe a que el área de barrido es 1.81 veces

mayor al área de barrido de nuestra investigación además que la densidad del viento es de 1.225 Kg/m^3 favoreciendo sus resultados.

En la tesis “Diseño y construcción de un sistema de iluminación autosustentable alimentado por un aerogenerador accionado por vientos de baja velocidad” (11), se presenta un aerogenerador con una topología similar al aerogenerador diseñado y sus resultados teóricos son de 30 W a una velocidad de rotación de 46 RPM a una velocidad de viento de 6 m/s. Este resultado es mayor a nuestra investigación en la cual obtuvimos 5.3 W a una velocidad de rotación de 64.64 RPM con una velocidad de viento de 4 m/s, debido a que la densidad de 1.225 Kg/m^3 y el área de barrido de 0.7 m^2 y la velocidad de viento de 6 m/s mejoran los resultados de esta investigación, no obstante, el coeficiente de potencia obtenido en la simulación de 0.36 es mayor que el coeficiente de potencia en esta investigación.

4.4. Consecuencias teóricas

Una de las principales consecuencias teóricas es la influencia de los deflectores de viento, los cuales mejoraron el rendimiento del aerogenerador al anular la fuerza de empuje negativa como se observó en la simulación; además de dirigir el viento a zonas cóncavas de los álabes. Si bien no se calculó en que porcentaje aumenta el rendimiento los deflectores de viento, este puede ser objeto de estudio de parte de nuevos investigadores además de buscar una geometría ideal donde se pueda optimizar el funcionamiento del aerogenerador.

4.5. Aplicaciones Prácticas y Trabajos Futuros

Por los resultados obtenidos, el aerogenerador diseñado se puede aplicar a domicilios con bajo consumo de energía o que sean aisladas a una red eléctrica, también

puede ser aplicada a un sistema de reserva de energía que pueda brindar electricidad en casos de interrupciones del fluido eléctrico adicionalmente la investigación realizada nos sirve como referencia para poder modificar las dimensiones del aerogenerador con el fin de que pueda suministrar de energía eléctrica a un domicilio a un 100 %, además se complementará con el diseño de un generador de imanes permanentes de flujo axial que pueda funcionar a bajas velocidades y tener un mejor rendimiento. Por último, el aerogenerador diseñado puede ser complementado con la generación por paneles solares, el cual puede cumplir con la demanda de energía de un domicilio.

CONCLUSIONES

Conclusión general

De los resultados obtenidos se concluye que el diseño y la construcción del aerogenerador Savonius modificado tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario del distrito de Ahuac y se ha identificado tres indicadores como la velocidad del viento, RPM y rendimiento. La variable de velocidad del viento es un factor muy importante, ya que influye en el diseño del aerogenerador. Las RPM ha demostrado tener una influencia sobre la energía eléctrica suministrada y, por último, se ha verificado que el rendimiento tiene cierta influencia en la energía eléctrica suministrada. Además, se ha evaluado el comportamiento del aerogenerador Savonius modificado con el *software* Solidworks ante la velocidad del viento promedio en la zona y se obtiene resultados similares a lo calculado en la etapa de diseño.

Conclusiones específicas

- 1. La velocidad del viento del aerogenerador Savonius modificado tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac.** Esto a causa de que se ha probado, con el coeficiente de Pearson, que existe una relación significativa entre la velocidad del viento y la energía eléctrica suministrada, con un valor de $r = 0.9952$ y un coeficiente de determinación R^2 que significa que la velocidad del viento influye en la energía eléctrica generada en un 99.05 %.
- 2. Las revoluciones por minuto del aerogenerador Savonius modificado tienen influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac.** Esto porque que se ha probado, con el coeficiente de Pearson, que existe una relación significativa entre las RPM y la energía eléctrica suministrada, con un valor de

$r = 0.979$ y un coeficiente de determinación R^2 que significa que las RPM influye en la energía eléctrica generada en un 95.9 %.

- 3. El rendimiento del aerogenerador Savonius modificado tiene influencia en la energía eléctrica suministrada a un usuario residencial distrito de Ahuac.** Esto a causa de que se ha probado, con el coeficiente de Pearson, que existe una relación significativa entre el rendimiento y la energía eléctrica suministrada, con un valor de $r = 0.213$ y un coeficiente de determinación R^2 que significa que el rendimiento influye en la energía eléctrica generada en un 4.5 %.

RECOMENDACIONES

1. Para el cálculo de las dimensiones del aerogenerador, se recomienda tener en cuenta la velocidad del viento disponible en la zona, ya que de esto dependerá el tamaño de los alabes.
2. Al utilizar el *software* SolidWorks en la herramienta FlowSimulation se pide realizar un análisis externo, ya que es mucho más fácil realizar la configuración del entorno computacional y las iteraciones son más rápidas.
3. Al realizar la fabricación del aerogenerador se sugiere tener técnicas y herramientas adecuadas, ya que de lo contrario no se tendrá un acabado prolijo y el aerogenerador puede tener algún rozamiento o vibración en el funcionamiento.
4. Al realizar la instalación del aerogenerador se exhorta buscar un lugar abierto sin influencia de algún objeto, árbol o techo, esto dejará que el viento fluya sin turbulencias y más constante.

REFERENCIAS

1. FIESTAS, C., y otros. *Diseño y construcción de un aerogenerador tipo Savonius Multietapa*. Big Bang Faustiniiano, 2016. 23054352.
2. BALDOMERO, M. *Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador de eje vertical para oxigenar estanques de peces*. 4, México: Remexca, 2012. 2007-0934.
3. VORONIN, B. y ZERQUERA-IZQUIERDO, M. *Estudio de las características cualitativas de aerogeneradores mediante un modelo a escala*. México: Científica, 2012, 1665-0654.
4. FLORES, V., y otros. *Aerogenerador Alisio*. Veracruz: Ecorfan, 2017. 2523-6873.
5. SÁNCHEZ, J., *Diseño experimental de Aerogenerador tipo Savonius*. y otros. 19, Altamira: ECORFAN, 2019. 2410-3950.
6. WONG, M. *Diseño de un aerogenerador vertical Savonius-curvado para ensayos experimentales con velocidades de 4 m/s a 8 m/s*. Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2015.
7. ESTEFANERO, C. y UMPIRI, S. *Perfil de un aerogenerador tipo vertical en el edificio de 15 pisos de la Universidad Nacional del Altiplano Puno - 2018*. Tesis para optar el título profesional de ingeniero mecánico electricista. Puno: Universidad Nacional del Altiplano, 2018.
8. ORDUZ, O. y SUÁREZ, J. *Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia*. Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2011.
9. DIAGO, C. *Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico*. Máster Universitario en Ingeniería Mecatrónica. Valencia: Universidad Politécnica de València, 2019.
10. TRUJILLO, A. *Diseño de un generador eólico vertical de 1/2 KW para velocidades de 7 m/s*. Tesis que para obtener el grado de master en ingeniería energética. Xalapa Enriquez: Universidad Veracruzana, 2012.
11. VALAREZO, L. *Diseño y construcción de un sistema de iluminación autosustentable alimentado por un aerogenerador accionado por vientos de baja velocidad*. Tesis de grado previa a la obtención del título de ingeniero electromecánico. Loja: Universidad Nacional de Loja, 2011.
12. ACCIONA BUSINESS AS UNUSUAL. Acciona. [En línea] [Citado el: 30 de 11 de 2021.] https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/aerogeneradores/?_adin=11205121600.
13. MUHD, J, MUHAMMAD, A. y MOHAMMAD, M. *Comparison of horizontal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT)*. Kuala Lumpur: International Journal of Engineering & Technology, 2018.

14. SAAD, M., MAGEDI, M. y ASMUIN. *Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis*. 8, IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN), 2014, 4, 74-80. 2250-3021.
15. ENEL PERÚ. ENEL. [En línea] [Citado el: 30 de 11 de 2021.] <https://www.enel.pe/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-eolica-y-como-funciona.html>.
16. MINISTERIO de Energía y Minas. *Atlas Eólico del Perú*. Perú: s.n., 2016.
17. Atmosférica., Administración Nacional Oceánica y. Energía eólica: densidad del viento. [En línea] Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, 2019. [Citado el: 15 de 10 de 2021.] www.nrel.gov/wind/education/basics/wind_density.html.
18. ABB. *Cuaderno de Aplicaciones Técnicas - Plantas Eólicas*. Barcelona: s.n., 2012.
19. TROEN, I. y LUNDTANG, E. *El Atlas Eólico Europeo*. Dinamarca: Jyllinge Bogtrykkeri, 1990. 87-550-1638-3.
20. VILLARRUBIA, M. *Ingeniería de la energía eólica*. Barcelona: Marcombo, 2013. 978-607-707-402-1.
21. MOTT, R. *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Education, 2006. 970-26-0812-0.
22. CHAPMAN, S. *Maquinas Eléctricas*. México: Mcgraw-hill/interamericana editores, 2012. 978-607-15-0724-2.
23. BORDIGNON, F. *Diseño e impresión de objetos 3D: una guía de apoyo a escuelas*. Buenos Aires: Editorial Universitaria, 2018. 9789873805356.
24. BUNGE, M. *La investigación científica su estrategia y su filosofía*. Delegación Coyoacán. 04310. México. D.F: Siglo XXI editores, 2004. 968-23-2225-1.
25. Garcés, H. *Investigación Científica*. Quito: Abya-Yala, 2000. 9978-04-641-0.
26. Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. DE C.V., 2014. 978-1-4562-2396-0.
27. SKF. SKF. [En línea] [Citado el: 22 de 12 de 2021.] <https://www.skf.com/uy/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6004>.
28. ÁREA Tecnológica. *AreaTecnologica.com*. [En línea] [Citado el: 23 de 12 de 2021.] <https://www.areatecnologica.com/electronica/divisor-de-tension.html>.
29. GARCÍA, A., ACERO, R. y PEREA, J. *Libro virtual de economía y gestión*. Córdoba: Grupo Uco-6, 2007. 1698-4226.
30. OSINERGMIN. Distriluz. [En línea] [Citado el: 2021 de 12 de 25.] <https://www.osinergmin.gob.pe/Tarifas/Electricidad/PliegoTarifario?Id=120000>.

31. RODRIGUEZ, M. *Diseño y análisis económico y financiero de una instalación eólica onshore de 99MW en el mercado rumano y norteamericano*. Tesis para optar el título de ingeniero de minas. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2016.

ANEXOS

Anexo 1

Código C++ para el sistema de monitoreo.

```
int RPM = 0;
volatile int contador = 0;
int ano;
int mes;
int dia;
int hora;
int minu;
int seg;
int sensorvolt;
float RPM2;
float voltaje;
float SENSIBILITY = 0.066; // Modelo 30A acs712 sensor de corriente
int SAMPLESNUMBER = 200; //número de muestras para la corriente
float potencia;
float current;
float intensidad;
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include "RTCLib.h"
File logFile;
RTC_DS3231 rtc;
void printMeasure(String prefix, float value, String postfix)
{
  Serial.print(prefix);
  Serial.print(value, 3);
  Serial.println(postfix);
}
void setup() {

  Serial.begin(9600); //iniciar puerto serie
  attachInterrupt(0,interrupcion0,RISING);
  if (!rtc.begin()) {
    Serial.println(F("Couldn't find RTC"));
    while (1);
  }

  // Si se ha perdido la corriente, fijar fecha y hora
  if (rtc.lostPower()) {
    // Fijar a fecha y hora de compilacion
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
  }

  Serial.print(F("Iniciando SD ..."));
  if (!SD.begin(9))
  {
    Serial.println(F("Error al iniciar"));
    return;
  }
  Serial.println(F("Iniciado correctamente"));
}

void escribirsd()
```

```

{
  logFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
  if (logFile) {
    logFile.print(ano);
    logFile.print('/');
    logFile.print(mes);
    logFile.print('/');
    logFile.print(dia);
    logFile.print(" ");
    logFile.print(hora);
    logFile.print(':');
    logFile.print(minu);
    logFile.print(':');
    logFile.print(seg);
    logFile.print(' ');
    logFile.print(RPM);
    logFile.print(' ');
    logFile.print(voltaje);
    logFile.print(' ');
    logFile.print(intensidad);
    logFile.print(' ');
    logFile.print(potencia);
    logFile.println();
    logFile.close();
  }
  else {
    Serial.println("Error al abrir el archivo");
  }
}

void interrupcion0() // Funcion que se ejecuta durante cada interrupcion
{
  contador++; // Se incrementa en uno el contador
}

void loop() {
  if(contador){
    float current = getCorriente(SAMPLESNUMBER);
    intensidad=current;
    sensorvolt=analogRead(A0);//medir corriente
    voltaje=0.050183*sensorvolt ;//medir voltaje
    potencia=current*voltaje;//calculo de la potencia
    digitalWrite(8,HIGH);
    delay(999); // retardo de casi 1 segundo
    RPM=contador*0.25; // medir RPM
    RPM2=RPM/8.17; // calculo de RPM en el eje
    DateTime now = rtc.now();
    obfecha(now); // obtener hora y fecha de la medicion
    escribirsd(); // guardar datos en tarjeta SD
    contador = 0;
  }

  digitalWrite(8,LOW);

}

float getCorriente(int samplesNumber)
{
  float voltage;
  float corrienteSum = 0;
  for (int i = 0; i < samplesNumber; i++)

```

```

{
voltage = analogRead(A1) * 5.0 / 1023.0;
corrienteSum += (voltage-2.547) / SENSIBILITY;
}
return(corrienteSum / samplesNumber);
}
void obfecha(DateTime date)
{
ano= date.year();
mes=date.month();
dia=date.day();
hora=date.hour();
minu=date.minute();
seg=date.second();
Serial.print(ano);
Serial.print("/");
Serial.print(mes);
Serial.print("/");
Serial.print(dia);
Serial.print("h");
Serial.print(hora);
Serial.print(":");
Serial.print(minu);
Serial.print(":");
Serial.print(seg);
Serial.print(" ");
Serial.print("r");
Serial.print(RPM);
Serial.print(" ");
Serial.print("v");
Serial.print(voltaje);
Serial.print(" ");
Serial.print("i");
Serial.print(intensidad);
Serial.print(" ");
Serial.print("w");
Serial.print(potencia);
Serial.println();
}

```

Anexo 2

Datos exportados de anemómetro y sistema de monitoreo.

Velocidad Viento	hora anemometro	hora sis. monitoreo	RPM	Voltaje	Corriente	P util final
7.63	14:43:37	14:43:37	77.33	5.37	1.55	8.32
7.36	14:43:38	14:43:38	46.53	2.76	0.80	2.21
7.76	14:43:40	14:43:40	48.13	3.78	1.05	3.97
7.76	14:43:41	14:43:41	61.87	4.64	1.28	5.94
8.29	14:43:43	14:43:43	60.53	4.11	1.14	4.68
7.89	14:43:44	14:43:44	26.53	1.60	0.46	0.74
6.31	14:43:45	14:43:45	92.67	6.31	1.83	11.55
6.97	14:43:46	14:43:46	67.47	4.09	1.18	4.83
3.72	14:43:47	14:43:47	23.20	1.59	0.49	0.78
4.88	14:43:49	14:43:49	48.00	3.59	1.03	3.70
6.05	14:43:50	14:43:50	49.07	3.39	0.93	3.15
5.39	14:43:52	14:43:52	39.47	4.74	1.32	6.26
6.84	14:43:53	14:43:53	51.73	3.61	1.06	3.82
7.63	14:43:54	14:43:54	60.67	4.01	1.10	4.41
7.5	14:43:55	14:43:55	144.13	11.15	3.02	33.68
6.84	14:43:57	14:43:57	113.20	8.63	2.28	19.68
5.92	14:43:58	14:43:57	137.47	9.18	2.51	23.04
6.18	14:43:59	14:43:59	92.67	7.06	1.91	13.48
3.26	14:44:00	14:44:00	49.07	3.69	1.02	3.76
4.65	14:44:01	14:44:01	73.33	5.26	1.51	7.94
8.02	14:44:02	14:44:02	90.93	6.73	1.84	12.39
10.54	14:44:03	14:44:03	88.00	6.34	1.80	11.40
12.35	14:44:05	14:44:05	145.73	10.74	3.03	32.55
11.1	14:44:06	14:44:06	46.27	3.15	0.88	2.77
8.15	14:44:07	14:44:07	75.73	5.60	1.56	8.74
7.89	14:44:08	14:44:08	82.13	6.01	1.69	10.16
8.29	14:44:10	14:44:10	33.87	2.32	0.68	1.58
8.68	14:44:11	14:44:11	18.13	1.02	0.35	0.36
10.68	14:44:12	14:44:12	72.80	5.26	1.51	7.94
10.82	14:44:13	14:44:12	79.60	5.80	1.65	9.58
12.49	14:44:14	14:44:14	59.07	4.00	1.07	4.28
4.88	14:44:16	14:44:16	108.93	7.17	1.96	14.05
7.5	14:44:20	14:44:20	104.00	8.23	2.24	18.44
7.1	14:44:21	14:44:21	49.47	3.48	0.99	3.44
9.47	14:44:22	14:44:22	59.07	4.44	1.23	5.46
9.08	14:44:24	14:44:24	39.73	2.83	0.83	2.35
8.68	14:44:25	14:44:25	32.13	2.43	0.64	1.55
9.34	14:44:27	14:44:27	22.13	1.15	0.33	0.38
8.42	14:44:28	14:44:28	58.00	4.41	1.21	5.33
5.92	14:44:30	14:44:30	96.67	7.38	2.02	14.91
7.76	14:44:31	14:44:31	61.33	4.34	1.23	5.33
8.15	14:44:33	14:44:33	153.47	10.77	2.96	31.88
4.07	14:44:34	14:44:34	25.07	1.66	0.48	0.80
5	14:44:37	14:44:37	65.60	5.39	1.47	7.92
6.58	14:44:38	14:44:38	86.53	6.72	1.88	12.64
4.77	14:44:39	14:44:39	86.27	6.55	1.77	11.59
4.42	14:44:40	14:44:40	55.47	3.89	1.14	4.43
6.58	14:44:41	14:44:41	31.07	2.03	0.62	1.26
5.65	14:44:43	14:44:43	16.00	0.98	0.32	0.32
7.89	14:44:44	14:44:43	76.53	5.90	1.66	9.79
5.92	14:44:45	14:44:45	20.53	1.37	0.43	0.59
9.34	14:44:47	14:44:47	51.20	3.39	0.93	3.15
8.68	14:44:48	14:44:48	68.40	5.39	1.47	7.92
11.1	14:44:49	14:44:49	96.80	6.96	1.92	13.36
10	14:44:50	14:44:50	71.20	5.05	1.45	7.33
7.23	14:44:51	14:44:51	55.73	3.78	1.06	4.01
6.44	14:44:53	14:44:53	68.00	5.04	1.42	7.16
8.15	14:44:54	14:44:54	62.80	4.97	1.34	6.66
8.15	14:44:55	14:44:55	18.80	1.16	0.38	0.44
6.58	14:44:56	14:44:56	58.00	4.32	1.21	5.23
6.97	14:44:57	14:44:57	95.87	7.50	1.94	14.55
7.5	14:44:58	14:44:58	77.87	5.80	1.61	9.35
6.58	14:45:00	14:44:59	44.80	3.27	0.93	3.05
5.52	14:45:05	14:45:05	58.40	4.22	1.20	5.06
7.89	14:45:07	14:45:07	28.27	2.10	0.59	1.24
6.31	14:45:08	14:45:08	109.73	8.63	2.34	20.20
8.29	14:45:09	14:45:09	101.07	7.49	2.00	14.97
8.42	14:45:10	14:45:10	74.67	5.81	1.58	9.18
7.36	14:45:11	14:45:11	63.87	4.33	1.25	5.42
5	14:45:13	14:45:13	74.80	5.36	1.49	7.98
5	14:45:14	14:45:14	77.07	4.95	1.35	6.68
5.52	14:45:16	14:45:15	66.53	5.26	1.44	7.58
6.58	14:45:18	14:45:18	27.07	1.48	0.44	0.65
3.61	14:45:21	14:45:21	38.67	2.66	0.75	2.00
6.84	14:45:25	14:45:25	32.00	2.43	0.69	1.68
6.71	14:45:27	14:45:27	105.73	6.74	1.89	12.75
4.65	14:45:30	14:45:30	90.53	6.84	1.90	13.00
4.88	14:45:35	14:45:35	34.67	2.29	0.65	1.49

7.23	14:45:36	14:45:36	96.27	6.62	1.89	12.52
5.39	14:45:37	14:45:37	39.87	2.55	0.70	1.79
4.07	14:45:39	14:45:39	83.60	5.48	1.56	8.55
5.52	14:45:40	14:45:40	64.27	3.99	1.11	4.43
7.23	14:45:41	14:45:41	88.80	6.65	1.80	11.97
7.63	14:45:42	14:45:42	75.33	5.49	1.55	8.51
11.93	14:45:43	14:45:43	88.67	6.83	1.89	12.92
11.1	14:45:45	14:45:45	14.93	1.08	0.31	0.34
14.85	14:45:46	14:45:46	142.27	10.22	2.71	27.70
13.18	14:45:47	14:45:46	29.07	1.87	0.55	1.03
10.82	14:45:49	14:45:49	77.33	5.92	1.64	9.70
9.08	14:45:50	14:45:50	37.73	2.53	0.73	1.85
6.44	14:45:51	14:45:51	22.53	1.16	0.40	0.46
9.87	14:45:53	14:45:53	16.80	0.86	0.27	0.23
9.73	14:45:54	14:45:54	63.73	4.83	1.36	6.57
6.44	14:45:55	14:45:55	72.53	5.28	1.52	8.02
9.08	14:45:56	14:45:56	91.87	6.53	1.76	11.49
10.68	14:45:58	14:45:58	82.93	5.59	1.59	8.88
11.79	14:45:59	14:45:59	37.73	2.23	0.64	1.43
10.13	14:46:01	14:46:01	22.00	1.59	0.45	0.71
6.05	14:46:02	14:46:01	40.27	2.65	0.76	2.02
3.49	14:46:03	14:46:01	63.60	4.65	1.32	6.13
6.05	14:46:05	14:46:05	22.40	1.26	0.40	0.50
9.21	14:46:07	14:46:07	68.40	5.39	1.47	7.92
7.63	14:46:08	14:46:08	32.67	2.00	0.64	1.28
9.6	14:46:09	14:46:08	68.00	5.15	1.44	7.41
8.15	14:46:10	14:46:10	38.00	2.65	0.76	2.02
10.13	14:46:11	14:46:11	36.80	2.32	0.68	1.58
9.21	14:46:13	14:46:13	51.73	3.80	1.10	4.18
10.54	14:46:14	14:46:14	38.80	2.42	0.72	1.74
8.81	14:46:15	14:46:15	74.40	5.48	1.59	8.72
7.36	14:46:16	14:46:16	28.53	1.70	0.52	0.88
5.26	14:46:18	14:46:18	17.73	1.05	0.34	0.36
10.4	14:46:19	14:46:19	44.80	3.05	0.88	2.69
9.08	14:46:20	14:46:20	76.80	5.06	1.44	7.29
14.85	14:46:21	14:46:21	32.80	2.00	0.62	1.24
14.29	14:46:23	14:46:23	16.67	1.05	0.34	0.36
10.68	14:46:24	14:46:23	42.13	2.64	0.81	2.14
6.97	14:46:26	14:46:26	21.60	1.18	0.41	0.48
5.39	14:46:27	14:46:27	16.27	0.75	0.28	0.21
7.63	14:46:29	14:46:29	31.87	1.81	0.51	0.92
2.21	14:46:30	14:46:30	15.87	1.05	0.32	0.34
5.26	14:46:32	14:46:32	19.87	0.98	0.30	0.29
12.49	14:46:33	14:46:33	33.20	1.81	0.50	0.90
10.13	14:46:35	14:46:35	35.87	2.65	0.76	2.02
5.92	14:46:36	14:46:36	24.53	1.78	0.53	0.95
4.07	14:46:38	14:46:38	38.13	2.40	0.70	1.68
12.63	14:46:39	14:46:39	22.13	1.16	0.38	0.44
7.63	14:46:41	14:46:41	59.07	4.00	1.07	4.28
10.54	14:46:42	14:46:42	33.47	1.82	0.53	0.97
8.15	14:46:43	14:46:43	56.27	3.99	1.18	4.70
10.68	14:46:44	14:46:44	35.60	1.99	0.59	1.18
11.1	14:46:45	14:46:45	20.53	1.37	0.43	0.59
10.68	14:46:47	14:46:47	27.47	1.81	0.50	0.90
12.76	14:46:48	14:46:48	17.73	1.02	0.35	0.36
6.18	14:46:49	14:46:49	15.07	0.84	0.30	0.25
13.87	14:46:51	14:46:51	43.47	2.83	0.78	2.21
4.77	14:46:52	14:46:52	50.00	3.78	1.06	4.01
15.7	14:46:53	14:46:53	30.53	1.99	0.59	1.18
13.18	14:46:54	14:46:54	60.53	4.22	1.18	4.98
16.99	14:46:55	14:46:54	46.53	2.32	0.68	1.58
14.13	14:46:57	14:46:57	17.47	1.15	0.33	0.38
7.76	14:46:58	14:46:58	38.53	2.64	0.74	1.95
9.08	14:46:59	14:46:59	14.93	0.35	0.12	0.04
8.94	14:47:01	14:47:01	19.87	1.28	0.36	0.46
10.82	14:47:02	14:47:02	16.53	0.98	0.30	0.29
12.63	14:47:04	14:47:04	33.47	2.00	0.60	1.20
10.82	14:47:05	14:47:05	35.87	2.10	0.65	1.37
10.68	14:47:06	14:47:06	19.73	1.05	0.38	0.40
9.08	14:47:08	14:47:08	25.20	1.71	0.48	0.82
7.1	14:47:09	14:47:09	17.87	1.05	0.34	0.36
11.38	14:47:10	14:47:10	33.33	2.13	0.64	1.37
7.5	14:47:12	14:47:12	33.33	2.32	0.67	1.55
7.76	14:47:13	14:47:13	27.20	1.29	0.39	0.50
5.52	14:47:14	14:47:14	28.00	1.81	0.50	0.90
3.72	14:47:16	14:47:16	32.13	2.20	0.61	1.34
9.21	14:47:17	14:47:17	54.80	3.28	0.91	2.98
13.18	14:47:18	14:47:18	37.20	2.43	0.71	1.72
14.71	14:47:20	14:47:20	33.33	2.32	0.67	1.55
13.04	14:47:21	14:47:21	41.20	2.75	0.78	2.14
12.9	14:47:23	14:47:23	65.73	4.83	1.39	6.72
14.01	14:47:24	14:47:24	44.53	2.65	0.77	2.04
14.01	14:47:25	14:47:25	22.00	1.25	0.37	0.46
13.76	14:47:26	14:47:26	24.27	1.55	0.46	0.71
10.82	14:47:28	14:47:28	34.67	1.91	0.56	1.07
9.87	14:47:29	14:47:29	28.40	1.68	0.50	0.84
6.31	14:47:30	14:47:30	33.60	2.43	0.70	1.70


6.44	14:47:32	14:47:32	28.80	2.10	0.61	1.28
11.65	14:47:33	14:47:33	62.80	4.23	1.23	5.21
11.24	14:47:34	14:47:34	29.87	1.78	0.53	0.95
9.21	14:47:36	14:47:36	28.00	1.77	0.51	0.90
12.07	14:47:37	14:47:37	74.27	4.86	1.44	6.99
9.47	14:47:38	14:47:38	29.87	1.60	0.46	0.74
7.89	14:47:39	14:47:39	29.33	1.78	0.53	0.95
13.74	14:47:41	14:47:41	58.40	4.20	1.24	5.21
8.42	14:47:42	14:47:41	46.53	2.32	0.68	1.58
7.63	14:47:44	14:47:44	28.53	1.28	0.41	0.53
11.93	14:47:45	14:47:45	48.80	3.77	1.03	3.89
12.63	14:47:46	14:47:46	28.80	1.60	0.50	0.80
9.47	14:47:47	14:47:47	24.53	1.78	0.53	0.95
8.68	14:47:49	14:47:49	37.07	2.33	0.65	1.51
11.24	14:47:50	14:47:50	30.80	1.78	0.53	0.95
10.13	14:47:52	14:47:52	28.93	1.71	0.48	0.82
9.08	14:47:53	14:47:53	59.73	4.43	1.27	5.63
3.26	14:47:55	14:47:55	21.73	1.16	0.38	0.44
3.26	14:47:56	14:47:56	50.27	3.81	1.03	3.93
4.53	14:47:57	14:47:57	82.40	6.11	1.68	10.27
8.94	14:47:58	14:47:57	76.00	5.38	1.48	7.96
7.5	14:48:00	14:48:00	69.47	4.85	1.35	6.55
8.81	14:48:01	14:48:01	125.33	9.48	2.58	24.47
5.52	14:48:02	14:48:02	65.87	4.54	1.25	5.67
12.21	14:48:04	14:48:04	47.07	3.14	0.89	2.79
12.21	14:48:05	14:48:05	54.40	3.80	1.09	4.14
10.82	14:48:06	14:48:06	93.73	7.07	1.91	13.50
12.07	14:48:07	14:48:07	80.53	6.09	1.72	10.48
10.27	14:48:09	14:48:09	28.67	1.99	0.57	1.13
6.18	14:48:10	14:48:10	63.20	4.84	1.32	6.38
10.82	14:48:12	14:48:12	29.87	1.78	0.53	0.95
4.88	14:48:13	14:48:13	41.20	2.85	0.84	2.89
2.68	14:48:14	14:48:13	39.33	2.84	0.82	2.33
13.04	14:48:16	14:48:16	71.87	5.06	1.41	7.14
14.99	14:48:17	14:48:17	34.27	2.10	0.63	1.32
11.79	14:48:18	14:48:18	59.07	4.00	1.07	4.28
11.1	14:48:19	14:48:19	31.87	2.14	0.58	1.24
17.99	14:48:20	14:48:20	22.40	1.05	0.32	0.34
16.27	14:48:22	14:48:22	30.80	2.03	0.57	1.16
12.35	14:48:23	14:48:23	26.80	1.70	0.47	0.80
12.21	14:48:24	14:48:24	52.00	3.27	0.93	3.05
16.27	14:48:26	14:48:26	16.53	1.14	0.35	0.40
14.71	14:48:27	14:48:27	35.60	1.99	0.59	1.18
16.42	14:48:28	14:48:28	21.20	1.37	0.43	0.59
17.42	14:48:30	14:48:29	17.87	1.17	0.36	0.42
18.27	14:48:31	14:48:31	16.67	1.08	0.33	0.36
14.85	14:48:32	14:48:32	13.33	0.26	0.08	0.02
15.56	14:48:33	14:48:33	22.00	0.83	0.28	0.23
14.29	14:48:35	14:48:35	14.00	0.64	0.23	0.15
8.81	14:48:36	14:48:36	30.27	1.60	0.46	0.74
6.71	14:48:38	14:48:38	18.00	0.64	0.23	0.15
10.54	14:48:39	14:48:39	14.53	0.76	0.22	0.17
11.52	14:48:41	14:48:41	27.07	1.61	0.43	0.69
9.87	14:48:42	14:48:42	18.53	1.05	0.34	0.36
14.71	14:48:43	14:48:43	38.67	2.63	0.72	1.89
12.49	14:48:45	14:48:45	23.73	1.40	0.42	0.59
9.08	14:48:46	14:48:46	17.87	0.86	0.27	0.23
14.01	14:48:47	14:48:47	27.47	1.99	0.59	1.18
13.18	14:48:48	14:48:48	23.20	1.18	0.39	0.46
15.13	14:48:50	14:48:50	29.20	1.69	0.51	0.86
13.18	14:48:51	14:48:51	20.93	1.25	0.37	0.46
10.82	14:48:52	14:48:52	20.27	1.25	0.42	0.53
12.76	14:48:54	14:48:54	19.60	0.85	0.32	0.27
11.52	14:48:55	14:48:55	48.93	3.36	0.97	3.26
11.93	14:48:56	14:48:56	39.87	3.17	0.90	2.86
11.79	14:48:58	14:48:58	58.13	4.22	1.20	5.06
11.52	14:48:59	14:48:59	28.53	1.58	0.48	0.76
10.96	14:49:00	14:48:59	33.60	2.31	0.71	1.64
7.1	14:49:01	14:49:01	62.67	4.75	1.30	6.17
11.38	14:49:02	14:49:02	30.00	1.99	0.59	1.18
8.81	14:49:03	14:49:03	28.80	2.10	0.61	1.28
9.08	14:49:04	14:49:04	19.73	1.50	0.42	0.63
10.82	14:49:06	14:49:06	67.20	4.31	1.29	5.57
11.52	14:49:07	14:49:07	64.40	4.11	1.17	4.81
10.54	14:49:08	14:49:08	58.13	4.22	1.20	5.06
13.74	14:49:09	14:49:09	61.60	4.02	1.15	4.62
13.6	14:49:11	14:49:11	49.60	3.36	0.98	3.30
12.35	14:49:12	14:49:12	102.80	6.86	1.87	12.83
8.68	14:49:13	14:49:13	15.47	0.73	0.26	0.19
11.1	14:49:14	14:49:14	56.67	4.20	1.19	5.00
10.13	14:49:16	14:49:15	22.53	1.24	0.39	0.48
9.08	14:49:17	14:49:17	37.73	2.53	0.73	1.85
8.68	14:49:18	14:49:18	56.53	3.57	1.00	3.57
12.07	14:49:19	14:49:19	46.53	3.05	0.86	2.63
13.18	14:49:21	14:49:21	31.33	2.10	0.58	1.22
10.27	14:49:22	14:49:22	60.80	4.11	1.15	4.73
8.81	14:49:24	14:49:24	20.80	1.14	0.37	0.42

6.44	14:49:25	14:49:25	44.80	3.27	0.93	3.05
4.07	14:49:26	14:49:26	73.60	5.26	1.53	8.04
6.58	14:49:27	14:49:27	55.20	4.02	1.14	4.58
6.05	14:49:28	14:49:28	19.33	1.05	0.34	0.36
8.55	14:49:30	14:49:30	35.20	2.40	0.71	1.70
10.13	14:49:31	14:49:30	32.67	1.99	0.59	1.18
6.58	14:49:32	14:49:32	38.40	2.41	0.68	1.64
8.02	14:49:33	14:49:33	20.53	1.05	0.34	0.36
10.82	14:49:35	14:49:35	61.73	4.44	1.23	5.46
8.29	14:49:36	14:49:36	78.93	6.13	1.71	10.48
6.05	14:49:38	14:49:38	43.33	2.72	0.81	2.21
4.77	14:49:39	14:49:39	49.33	3.71	1.03	3.82
6.44	14:49:41	14:49:41	30.27	1.60	0.46	0.74
8.29	14:49:42	14:49:42	51.87	3.26	0.94	3.07
7.76	14:49:44	14:49:44	27.60	1.70	0.53	0.90
10.27	14:49:45	14:49:45	27.60	1.88	0.57	1.07
10.4	14:49:46	14:49:46	35.73	2.24	0.62	1.39
6.84	14:49:47	14:49:46	75.60	5.29	1.47	7.77
8.15	14:49:49	14:49:49	48.93	3.49	0.95	3.32
4.42	14:49:50	14:49:50	80.53	6.09	1.72	10.48
4.88	14:49:53	14:49:53	63.07	4.42	1.22	5.40
7.1	14:49:55	14:49:55	109.07	6.85	1.86	12.75
7.36	14:49:56	14:49:56	52.93	3.80	1.05	3.99
4.3	14:49:58	14:49:58	57.60	4.02	1.17	4.70
5.65	14:49:59	14:49:59	43.47	2.98	0.84	2.50
3.95	14:50:00	14:50:00	36.27	2.62	0.73	1.91
6.58	14:50:02	14:50:02	60.53	4.09	1.14	4.66
7.1	14:50:03	14:50:02	33.87	2.14	0.60	1.28
7.63	14:50:04	14:50:04	81.73	5.37	1.55	8.32
7.23	14:50:05	14:50:05	102.40	7.58	2.20	16.67
8.15	14:50:07	14:50:07	66.00	4.42	1.26	5.57
8.94	14:50:08	14:50:08	33.73	2.44	0.67	1.64
8.29	14:50:09	14:50:09	66.13	4.96	1.32	6.55
5.52	14:50:10	14:50:10	26.00	1.51	0.46	0.69
2.33	14:50:13	14:50:13	26.80	1.70	0.47	0.80
2.68	14:50:15	14:50:15	39.73	2.83	0.83	2.35
3.95	14:50:16	14:50:16	28.00	1.88	0.58	1.09
4.65	14:50:19	14:50:19	85.60	6.23	1.74	10.84
5.39	14:50:20	14:50:20	89.73	6.12	1.78	10.90
6.18	14:50:23	14:50:23	91.07	6.31	1.74	10.98
5.79	14:50:25	14:50:25	48.53	3.08	0.86	2.65
7.23	14:50:26	14:50:26	69.47	4.73	1.34	6.34
6.44	14:50:27	14:50:27	32.67	2.00	0.61	1.22
7.76	14:50:29	14:50:29	33.47	1.78	0.53	0.95
6.71	14:50:30	14:50:30	58.40	4.20	1.24	5.21
4.53	14:50:31	14:50:31	90.80	6.45	1.82	11.74
5.13	14:50:33	14:50:33	83.47	5.91	1.62	9.58
3.37	14:50:34	14:50:33	32.67	2.03	0.58	1.18
4.53	14:50:37	14:50:37	81.87	5.81	1.64	9.53
5.79	14:50:38	14:50:38	118.00	9.05	2.43	21.99
4.77	14:50:39	14:50:39	37.73	2.32	0.68	1.58
6.58	14:50:45	14:50:45	108.93	8.12	2.23	18.10
6.05	14:50:47	14:50:47	67.73	5.07	1.47	7.46
6.05	14:50:48	14:50:48	40.53	2.73	0.83	2.27
6.31	14:50:49	14:50:49	35.07	2.44	0.68	1.66
5.39	14:50:50	14:50:49	86.80	6.30	1.73	10.90
4.77	14:50:52	14:50:52	41.07	2.84	0.82	2.33
6.97	14:50:53	14:50:53	92.00	6.65	1.79	11.91
4.42	14:50:55	14:50:55	72.53	5.37	1.44	7.73
7.76	14:50:56	14:50:56	34.00	1.92	0.57	1.09
7.5	14:50:57	14:50:57	87.20	6.22	1.75	10.88
7.1	14:50:59	14:50:59	38.53	2.84	0.80	2.27
7.89	14:51:00	14:51:00	23.73	1.68	0.50	0.84
6.71	14:51:01	14:51:01	73.33	5.37	1.54	8.27
10.68	14:51:04	14:51:04	72.40	4.94	1.45	7.16

Anexo 3

Velocidad del viento durante el 2021.

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ

 DIRECCION DE REDES DE OBSERVACION Y DATOS												
ESTACION : HUAYAO / 000635 / DZ-11			LAT. : 12° 2' "S"			DPTO. : JUNIN			PROV. : CHUPACA			
PARAMETRO : VELOCIDAD DEL VIENTO DIARIO A LAS 07 HORAS			LONG. : 75° 19' "W"			ALT. : 3321 msnm			DIST. : HUACHACA			
2021												
DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
01	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0
02	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0
03	0.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0
04	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0
05	0.0	2.0	3.0	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0	0.0
06	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0
07	0.0	2.0	2.0	0.0	2.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0
08	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0
09	0.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	2.0	0.0
11	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0
12	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0
13	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0
14	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0
15	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0
16	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0
17	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0
19	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	2.0	0.0
20	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0
21	0.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	2.0	0.0	2.0
23	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0
24	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0
25	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	0.0
26	2.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0
28	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0
29	2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0
30	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	2.0
31	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	0.0

INFORMACIÓN PREPARADA PARA: POOL DIEGO MEDINA SOCUALAYA
LIMA, 15 de Junio de 2023

N° PRES / SOLIC. PROC: 202305000066/202306000020
 N° EXP: 3688
 N° IMPRESION: 4231

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ



DIRECCION DE REDES DE OBSERVACION Y DATOS

ESTACION : HUAYAO / 000635 / DZ-11 LAT. : 12° 2' "S DPTO. : JUNIN
 PARAMETRO : VELOCIDAD DEL VIENTO DIARIO A LAS 19 HORAS LONG. : 75° 19' "W PROV. : CHUPACA
 (m/s) ALT. : 3321 msnm DIST. : HUACHAC

2021												
DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
01	2.0	2.0	4.0	4.0	2.0	2.0	4.0	4.0	2.0	4.0	2.0	2.0
02	4.0	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	4.0	2.0	2.0	4.0	4.0	2.0
03	4.0	4.0	S/D	2.0	0.0	2.0	S/D	6.0	2.0	2.0	2.0	2.0
04	2.0	2.0	S/D	2.0	S/D	2.0	2.0	S/D	2.0	2.0	2.0	2.0
05	2.0	S/D	S/D	2.0	S/D	2.0	S/D	S/D	2.0	2.0	2.0	2.0
06	2.0	2.0	2.0	2.0	4.0	0.0	S/D	S/D	2.0	2.0	2.0	4.0
07	2.0	8.0	2.0	2.0	S/D	2.0	0.0	S/D	2.0	4.0	2.0	2.0
08	S/D	S/D	2.0	2.0	2.0	0.0	S/D	4.0	2.0	6.0	2.0	4.0
09	6.0	2.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	S/D	2.0	2.0	2.0	2.0
10	2.0	S/D	S/D	2.0	2.0	0.0	0.0	S/D	6.0	2.0	2.0	2.0
11	2.0	S/D	4.0	4.0	0.0	2.0	2.0	S/D	2.0	2.0	2.0	2.0
12	2.0	6.0	2.0	2.0	2.0	S/D	2.0	2.0	4.0	4.0	2.0	4.0
13	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	S/D	S/D	2.0	2.0	2.0	4.0
14	2.0	S/D	6.0	2.0	10.0	2.0	4.0	4.0	2.0	2.0	2.0	0.0
15	2.0	S/D	0.0	2.0	8.0	S/D	2.0	2.0	2.0	4.0	2.0	2.0
16	S/D	10.0	0.0	2.0	2.0	S/D	2.0	S/D	2.0	2.0	6.0	4.0
17	11.0	10.0	0.0	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
18	0.0	S/D	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0	S/D	2.0	2.0	2.0	2.0
19	3.0	S/D	2.0	2.0	S/D	0.0	S/D	S/D	4.0	2.0	2.0	2.0
20	4.0	4.0	S/D	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	4.0
21	4.0	S/D	0.0	4.0	2.0	S/D	S/D	S/D	2.0	2.0	2.0	2.0
22	S/D	2.0	2.0	2.0	S/D	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0
23	S/D	2.0	4.0	2.0	S/D	S/D	S/D	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0
24	2.0	2.0	5.0	2.0	2.0	2.0	4.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0
25	2.0	S/D	2.0	2.0	2.0	S/D	2.0	6.0	4.0	2.0	2.0	6.0
26	4.0	4.0	S/D	0.0	2.0	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	2.0	8.0
27	8.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	S/D	4.0	2.0	2.0	2.0
28	2.0	S/D	2.0	0.0	2.0	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	6.0	2.0
29	S/D	2.0	2.0	2.0	4.0	4.0	4.0	2.0	2.0	2.0	4.0	2.0
30	S/D	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	6.0	4.0	2.0	4.0	2.0	6.0
31	2.0	4.0	4.0	S/D	4.0	4.0	4.0	S/D	2.0	2.0	2.0	2.0

S/D: Sin Dato INFORMACIÓN PREPARADA PARA: POOL DIEGO MEDINA SOCUALAYA
 LIMA, 15 de Junio de 2023

N° PRES / SOLIC. PROC.: 202305000066/20230600020
 N° EXP.: 3888 N° IMPRESION: 4233

SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ



DIRECCION DE REDES DE OBSERVACION Y DATOS

ESTACION : HUAYAO / 000635 / DZ-11 LAT. : 12° 2' "S DPTO. : JUNIN
 PARAMETRO : VELOCIDAD DEL VIENTO DIARIO A LAS 13 HORAS LONG. : 75° 19' "W PROV. : CHUPACA
 (m/s) ALT. : 3321 msnm DIST. : HUACHAC

2021												
DIA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
01	3.0	4.0	2.0	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0	7.0	6.0	2.0
02	2.0	4.0	4.0	2.0	2.0	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	4.0	8.0
03	4.0	4.0	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0
04	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	2.0	4.0
05	2.0	2.0	2.0	4.0	2.0	2.0	0.0	2.0	4.0	2.0	2.0	6.0
06	2.0	2.0	6.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	4.0	2.0	4.0	4.0
07	2.0	2.0	3.0	4.0	2.0	0.0	2.0	2.0	4.0	3.0	2.0	4.0
08	2.0	2.0	8.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	6.0	2.0
09	4.0	6.0	6.0	2.0	2.0	2.0	3.0	2.0	2.0	4.0	4.0	2.0
10	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0	6.0	2.0	2.0
11	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	6.0	2.0
12	2.0	3.0	3.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	6.0	2.0
13	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	2.0
14	4.0	2.0	2.0	5.0	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	4.0	4.0	3.0
15	6.0	2.0	0.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
16	2.0	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	10.0
17	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	4.0	2.0	2.0	6.0	2.0	2.0	4.0
18	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
19	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0	4.0	4.0	2.0
20	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	4.0
21	6.0	2.0	0.0	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0
22	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	2.0
23	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	4.0
24	4.0	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0
25	2.0	2.0	3.0	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	6.0	4.0	2.0	2.0
26	0.0	3.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0	8.0	2.0	2.0	6.0	2.0
27	0.0	3.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	2.0
28	2.0	2.0	2.0	0.0	2.0	2.0	2.0	4.0	4.0	6.0	6.0	2.0
29	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	6.0	4.0	4.0	2.0	4.0	2.0
30	2.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	6.0	4.0
31	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	4.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

INFORMACIÓN PREPARADA PARA: POOL DIEGO MEDINA SOCUALAYA
 LIMA, 15 de Junio de 2023

N° PRES / SOLIC. PROC.: 202305000066/20230600020
 N° EXP.: 3888 N° IMPRESION: 4232