



UNL

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no
Renovables

Carrera de Electromecánica



Diseño y simulación de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, accionado por vientos de baja velocidad para la iluminación exterior del Laboratorio de Energías Renovables, de la FEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja

**Trabajo de Titulación
previo a optar por el
Título de Ingeniero
Electromecánico**

AUTOR:

Héctor Manuel Carrillo Sisalima

DIRECTOR:

Ing. Jorge Luis Maldonado Correa, Mg. Sc

Loja – Ecuador

2022

Certificación del trabajo de Titulación

Ing. Jorge Luis Maldonado Correa, Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de titulación, en su proceso de investigación cuyo tema versa en: “**Diseño y simulación de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, accionado por vientos de baja velocidad para la iluminación exterior del Laboratorio de Energías Renovables, de la FEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja**”, previa a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico, realizado por el señor egresado: **Héctor Manuel Carrillo Sisalima**, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Lugar y fecha: Loja, 22 de marzo del 2021



Firmado electrónicamente por:

**JORGE LUIS
MALDONADO
CORREA**

Ing. Jorge Luis Maldonado Correa, Mg. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **HÉCTOR MANUEL CARRILLO SISALIMA**, declaro ser autor del presente trabajo de titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi trabajo de titulación en el Repositorio Institucional - Biblioteca Virtual.

Firma: 

Cédula: 1105766263

Correo electrónico: hmcarrillos@unl.edu.ec

Teléfono celular: +593990432200

Fecha: 06 de Junio de 2022

Carta de autorización del trabajo de titulación por parte del autor, para la consulta de reproducción parcial o total y publicación electrónica del texto completo

Yo, **Héctor Manuel Carrillo Sisalima** declaro ser autor del trabajo de titulación: **Diseño y simulación de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, accionado porvientos de baja velocidad para la iluminación exterior del Laboratorio de Energías Renovables, de la FEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja**, como requisito para optar el grado de: **Ingeniero Electromecánico**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del trabajo de titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización en la ciudad de Loja, a los seis días del mes de junio del dos mil veintidós.

Firma:



Autor: Héctor Manuel Carrillo Sisalima

Cédula: 1105766263

Dirección: Loja (Esteban Godoy-Sldo. Rafael Pullaguari y Cbo Alfredo Angulo)

Correo electrónico personal: carrillosisalima94@gmail.com

Correo electrónico institucional: hmcarrillos@unl.edu.ec

Teléfono-Celular: +593990432200

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del trabajo de titulación: Ing. Jorge Luis Maldonado Correa, Mg. Sc.

Tribunal de Grado: Ing. Milton Amable León Tapia, Mg. Sc. (Presidente)

Ing. Darwin Giovanni Tapia Peralta, Mg. Sc.

Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo, Mg. Sc.

Dedicatoria

A Dios, por haberme dado el valor, la sabiduría y fortaleza suficiente para seguir adelante y culminar con éxito mi carrera profesional.

A mis padres por la vida obsequiada y de manera muy especial a mi madre y hermanos quienes fueron el pilar fundamental para lograr alcanzar este objetivo, supieron formar en mí, valores de responsabilidad, humildad y sencillez, y me incentivaron a seguir adelante para concluir todas mis metas propuestas.

A mi padre, por su esfuerzo y el sustento económico brindado en el transcurso de toda mi carrera universitaria.

A mi esposa Johanna y mi hijo Thiago por estar a mi lado y nunca dejarme solo, ya que sin el apoyo de ellos no hubiera sido posible llegar a culminar mi carrera universitaria.

Familia, amigos y personas especiales en mi vida a quienes con mucha gratitud llevo siempre en mi corazón. Agradecimientos sinceros por acompañarme en el transcurso de este largo camino y ayudarme en este importante paso de mi vida.

Es gracias a ustedes que es posible el presente estudio, y a quienes dedico mi trabajo de titulación.

De todo corazón...

----Héctor Carrillo----

Agradecimiento

Expreso mis más sinceros agradecimientos a mi madre Germania, por brindarme su apoyo incondicional y enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia, al igual que lo hago con cada uno de mis hermanos, por alentarme a superar mis expectativas.

Un sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Loja a la “Carrera de Ingeniería Electromecánica” por darnos la oportunidad de educarnos en nuestra formación técnica y humana.

A nuestros docentes quienes con su preparación nos supieron brindar su experiencia y conocimientos, los cuales nos permitieron culminar con éxito las metas trazadas.

Mis más sinceros agradecimientos al Ing. Mg. Sc. Jorge Luis Maldonado Correa, director del presente trabajo de titulación, su discusión, ideas y comentarios en este proceso han sido absolutamente invaluable para mí.

Muchas gracias a mis compañeros de clases y a todas las personas que han puesto un granito de arena para la culminación de este proyecto.

Índice de contenido

Portada	i
Certificación del trabajo de Titulación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimiento.....	vi
Índice de contenido.....	vii
Índice de tablas	xi
Índice de ilustraciones.....	xii
Índice de anexos.....	xiv
Índice de ecuaciones	xv
Simbología	xvii
1. Título.....	1
2. Resumen.....	2
2.1. Abstract.....	3
3. Introducción	4
4. Marco Teórico.....	6
4.1. Energías renovables.....	6
4.1.1. Energías renovables en el Ecuador	6
4.1.2. Estaciones meteorológicas en la provincia de Loja	7
4.2. Viento.....	8
4.2.1. Potencia del viento.....	8
4.2.2. Densidad del viento.....	10
4.2.3. Variación de la velocidad del viento con la altura.....	10
4.2.4. Velocidad y dirección del viento	13
4.2.5. Teorema de Betz	13
4.2.6. Instrumentos de medición del viento	15
4.3. Clasificación de los aerogeneradores.....	16
4.3.1. De acuerdo a la posición del eje	16
4.3.2. Aerogenerador de eje vertical	17
4.4. Aerogenerador de eje vertical tipo Savonius	17
4.4.1. Aerogenerador Savonius.....	17

4.4.2. Líneas de corriente del aire en un rotor Savonius.....	18
4.4.3. Principios de operación de un rotor Savonius.....	19
4.4.4. Eficiencia del rotor Savonius.....	20
4.4.5. Comportamiento aerodinámico del rotor Savonius.....	21
4.4.6. Consideraciones para el diseño de un aerogenerador Savonius.....	22
4.5. Generadores de imanes permanentes y de manivela (Dinamo).....	23
4.6. Conversión de la energía eólica en energía eléctrica.....	23
4.7. Dinámica de Fluidos Computacionales.....	24
4.7.1. ¿Qué es la Dinámica de Fluidos Computacionales?.....	24
4.7.2. Ventajas y desventajas en la utilización de CFD.....	25
4.8. Baterías y equipos complementarios.....	26
5. Metodología.....	27
5.1. Materiales.....	27
5.2. Métodos.....	28
5.3. Lugar de emplazamiento.....	29
5.4. Iluminación y elección de las luminarias LED.....	30
5.5. Demanda de potencia requerida.....	31
5.6. Cálculo de la potencia total extraída.....	31
5.7. Potencia aprovechada por el rotor.....	32
5.8. Eficiencia del aerogenerador.....	33
5.9. Mecanismo.....	33
5.9.1. Tipo de mecanismo.....	33
5.9.2. Dimensionamiento del rotor.....	34
5.9.3. Geometría de las aspas del aerogenerador.....	35
5.9.4. Diseño de las tapas circulares del aerogenerador.....	36
5.9.5. Materiales de las aspas del aerogenerador Savonius.....	37
5.9.6. Cálculo de la forma de los álabes.....	38
5.9.7. Cálculo de la velocidad angular del rotor.....	39
5.9.8. Determinación del TSR y número de revoluciones del rotor.....	39
5.9.9. Fuerza ascensional y arrastre.....	40
5.9.10. Determinación de las fuerzas que actúan sobre los álabes.....	41
5.9.11. Diseño del eje principal.....	43

5.9.12. Selección de los rodamientos.....	44
5.9.13. Diseño del sistema de transmisión de potencia.....	45
5.10. Dimensionamiento de los equipos eléctricos.....	45
6. Resultados.....	47
6.1. Presentación estadística de datos obtenidos de las fuentes de información.....	47
6.2. Extrapolación de la velocidad del viento.....	56
6.3. Determinación de la velocidad de diseño.....	59
6.4. Iluminación y elección de las luminarias LED.....	59
6.5. Demanda de potencia requerida.....	61
6.6. Cálculo de la potencia total extraída.....	61
6.7. Propuesta de diseño del aerogenerador Savonius.....	62
6.7. Dimensionamiento del rotor.....	64
6.8. Geometría de los álabes del aerogenerador.....	64
6.9. Cálculo de la potencia total extraída.....	65
6.10. Diseño de las tapas circulares del aerogenerador.....	67
6.11. Selección del material para los álabes y tapas circulares del aerogenerador.....	67
6.12. Cálculo de la velocidad angular del rotor.....	69
6.13. Determinación del número de revoluciones del rotor.....	69
6.14. Cálculo de la fuerza ascensional y de arrastre.....	69
6.15. Determinación de las fuerzas que actúen sobre los álabes.....	71
6.16. Diseño del eje del rotor.....	73
6.17. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en el eje del rotor.....	74
6.18. Cálculo del diámetro previo del eje.....	76
6.18.1. Análisis estático.....	78
6.18.2. Análisis de fatiga.....	78
6.18.3. Cálculo del límite de fatiga corregido.....	79
6.18.4. Selección del coeficiente K.....	80
6.18.5. Resistencia del eje a la deflexión máxima.....	82
6.19. Selección de los rodamientos.....	85
6.20. Diseño del sistema de transmisión de potencia.....	90
6.21. Diseño de la chaveta.....	95
6.22. Selección de soportes para los rodamientos.....	97

6.23. Dimensionamiento de los equipos electrónicos	98
6.24. Estructura de soporte para el aerogenerador	100
6.24.1. Modelo tridimensional del rotor Savonius.....	101
6.25. Simulación de elementos finitos	102
6.25.1. Análisis estático y de fatiga	103
6.25.2. Análisis de esfuerzos en la estructura de soporte.....	105
6.25.3. Pasos a considerar para la simulación en el software Ansys	106
6.25.4. Mallado para el dominio computacional.....	108
6.25.5. Método de solución.....	110
6.25.6. Modelo de turbulencia	110
6.25.7. Criterios de convergencia de los residuales	111
6.25.8. Cálculo del Time Step.....	112
6.25.9. Contornos de presión	114
6.25.10. Contornos de velocidad.....	115
6.25.11. Análisis de resultados teóricos y valores obtenidos en la simulación	116
6.26. Potencia nominal y potencia teórica del aerogenerador	116
6.26.1. Potencia teórica del aerogenerador y área de barrido	118
6.27. Análisis de resultados de la simulación CFD	120
6.27.1. Comparación de resultados	124
6.27.2. Tiempo de carga de la batería	125
6.28. Análisis económico	126
6.28.1. Ahorro anual	127
7. Discusión.....	129
8. Conclusiones	132
9. Recomendaciones	134
10. Bibliografía	135
11. Anexos	139

Índice de tablas

Tabla 1	Estaciones meteorológicas	7
Tabla 2	Clase y longitud de rugosidad.....	12
Tabla 3	Ventajas y desventajas del aerogenerador de eje vertical	17
Tabla 4	Ventajas y desventajas de CFD.....	25
Tabla 5	Niveles de iluminación recomendada	30
Tabla 6	Datos de velocidad media y máxima del INAMHI correspondiente a los períodos 2015-2020.....	48
Tabla 7	Velocidad de viento obtenida a través del visor de datos de la NASA período 2015-2020	50
Tabla 8	Velocidad de viento casa autosustentable de la FEIRNNR período 2015-2016 (Tesis) 51	
Tabla 9	Velocidad de viento de la casa autosustentable de la FEIRNNR período 2020-2021	52
Tabla 10	Velocidad de viento correspondiente al INAMHI período 2020-2021	53
Tabla 11	Velocidad de viento promedio y máxima obtenidas de las diferentes fuentes de información	55
Tabla 12	Valores perfil de velocidad de viento para los modelos logarítmico y potencial	58
Tabla 13	Demanda de potencia requerida para la iluminación exterior del laboratorio	61
Tabla 14	Propiedades mecánicas de diferentes tipos de materiales para el diseño del rotor	68
Tabla 15	Masa total de los álabes y tapas circulares del aerogenerador	68
Tabla 16	Propiedades del acero AISI-SAE 4340.....	73
Tabla 17	Características del rodamiento seleccionado	86
Tabla 18	Denominación y características de los engranajes.....	92
Tabla 19	Especificaciones y características del generador eléctrico de manivela.....	99
Tabla 20	Componentes que conforman el rotor Savonius	102
Tabla 21	Valores de Time Step para el rotor Savonius-Diámetro 1.342m-Velocidad 4,68 m/s 113	
Tabla 22	Potencia nominal y potencia teórica del aerogenerador para diferentes velocidades de viento.....	117
Tabla 23	Cálculo del área de barrido para distintas velocidades de viento	119
Tabla 24	Resultados conseguidos de la simulación del rotor	122
Tabla 25	Comparación de resultados de potencia.....	124
Tabla 26	Análisis económico considerado para el rotor Savonius	127

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Estaciones meteorológicas y Altitud. (Escala gráfica en km)	8
Ilustración 2 Marcha anual promedio (1982 – 2010) de las 10 estaciones	8
Ilustración 3 Incidencia del viento sobre un área A	9
Ilustración 4 Perfiles de velocidades de viento según su emplazamiento	11
Ilustración 5 Ley de Betz.....	13
Ilustración 6 Curva de eficiencia de Betz.....	15
Ilustración 7 Clasificación de los aerogeneradores	16
Ilustración 8 Esquema del aerogenerador Savonius.....	18
Ilustración 9 Líneas de corriente de aire en un rotor Savonius	18
Ilustración 10 Diagrama de flujo del aire, pasaje de álabe cerrado.....	19
Ilustración 11 Diagrama del flujo del aire, pasaje de álabe abierto	20
Ilustración 12 Coeficiente de eficiencia del rotor (C_p) con base en la relación de la velocidad en punta de pala (TSR)	21
Ilustración 13 Diversas opciones de un rotor Savonius	22
Ilustración 14 Rotor de tipo Savonius	34
Ilustración 15 Dimensiones en el rotor Savonius.....	35
Ilustración 16 Medidas geométricas de las tapas circulares del aerogenerador Savonius	36
Ilustración 17 Efecto de las tapas circulares en el rendimiento de un rotor Savonius	37
Ilustración 18 Coeficientes aerodinámicos.....	38
Ilustración 19 Acción del viento sobre un rotor de arrastre diferencial	39
Ilustración 20 Coeficientes del rotor Savonius en función del TSR	40
Ilustración 21 Distancia al centro de gravedad	43
Ilustración 22 Velocidad de viento promedio estación meteorológica la Argelia período 2015-2020.....	49
Ilustración 23 Velocidad de viento máxima estación meteorológica la Argelia período 2015-2020.....	49
Ilustración 24 Velocidad de viento promedio del visor de datos de la NASA período 2015-2020	50
Ilustración 25 Velocidad de viento máxima del visor de datos de la NASA período 2015-2020.....	51
Ilustración 26 Velocidad de viento promedio de la casa autosustentable de la FEIRNNR período 2020-2021	52
Ilustración 27 Velocidad de viento máxima de la casa autosustentable de la FEIRNNR período 2020-2021	53
Ilustración 28 Velocidad de viento promedio estación meteorológica Argelia período 2020-2021	54
Ilustración 29 Velocidad de viento máxima estación meteorológica Argelia período 2020-2021	54
Ilustración 30 Bases de datos de las diferentes fuentes de información	55
Ilustración 31 Velocidad de viento estimada en el lugar de emplazamiento	56
Ilustración 32 Edificio de energías renovables de la FEIRNNR.....	57
Ilustración 33 Distribución de las luminarias LED para la iluminación exterior del laboratorio	60
Ilustración 34 Isolíneas y colores falsos de la iluminación exterior del edificio	60

Ilustración 35	Propuesta de diseño del aerogenerador Savonius	63
Ilustración 36	Dimensiones de los álabes del aerogenerador.....	66
Ilustración 37	Fuerza ascensional y fuerza de arrastre del rotor Savonius	69
Ilustración 38	Fuerzas que actúan en los álabes del aerogenerador	71
Ilustración 39	Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en el eje del aerogenerador	74
Ilustración 40	Factor de superficie	80
Ilustración 41	Factor de tamaño	80
Ilustración 42	Factor de confiabilidad.....	81
Ilustración 43	Dimensiones del eje principal del aerogenerador	84
Ilustración 44	Fuerzas que actúan en los rodamientos rígidos de bolas.....	85
Ilustración 45	Factores axiales y radiales de los rodamientos rígidos de bolas	86
Ilustración 46	Diagrama cinemático de los elementos de la transmisión de potencia	91
Ilustración 47	Interacción de las fuerzas en la transmisión de potencia de los engranajes	91
Ilustración 48	Geometría del sistema de transmisión por engranajes rectos.....	94
Ilustración 49	Dimensiones de la chaveta y fuerza cortante F_{ch} en la misma.....	96
Ilustración 50	Soporte de brida de dos pernos con tornillos de apriete.....	97
Ilustración 51	Generador de manivela (Dinamo).....	99
Ilustración 52	Esquema de la estructura de soporte para el rotor Savonius	100
Ilustración 53	Esquema general del rotor eólico Savonius (Diseño 3D)	101
Ilustración 54	Análisis estático en el eje	103
Ilustración 55	Desplazamiento en el eje.....	104
Ilustración 56	Factor de carga	104
Ilustración 57	Tensión axial y deflexión máxima	105
Ilustración 58	Desplazamientos resultantes en la estructura	106
Ilustración 59	Flujograma que indica los pasos a considerar para la simulación en Ansys.....	107
Ilustración 60	Dominio computacional	108
Ilustración 61	Generación de malla al dominio computacional	109
Ilustración 62	Definición de la entrada, salida y paredes del dominio computacional para la simulación.....	109
Ilustración 63	Método de solución basado en presión	110
Ilustración 64	Modelo de turbulencia para el rotor Savonius	111
Ilustración 65	Criterios de convergencia para los residuales	112
Ilustración 66	Contornos de presión, vista frontal y posterior	114
Ilustración 67	Contornos de presión.....	115
Ilustración 68	Contornos de velocidad del viento en los álabes del rotor.....	116
Ilustración 69	Curva de potencia nominal y potencia teórica del rotor.....	118
Ilustración 70	Curvas de potencia y área de barrido	119
Ilustración 71	Velocidad tangencial en los álabes del rotor	120
Ilustración 72	Valor de residuales de la simulación.....	121
Ilustración 73	Torque generado para las diferentes velocidades de viento.....	122
Ilustración 74	Curva de potencia simulada al aumentar la velocidad del viento	123
Ilustración 75	Curvas de potencia	125

Índice de anexos

Anexo 1: Compromiso de confidencialidad INAMHI	139
Anexo 2: Especificaciones generales del material seleccionado para el eje del aerogenerador.....	141
Anexo 3: Análisis de datos utilizando el lenguaje de programación Python.	142
Anexo 4: Especificaciones técnicas de la luminaria.....	154
Anexo 5: Diagrama de conexión eléctrica para la carga y descarga de la batería.....	155
Anexo 6: Isolíneas, colores falsos y valores en luxes, de la iluminación exterior del Laboratorio de Energías Renovables de la FEIRNNR.	156
Anexo 7: Características de la batería de ciclo profundo SSB.....	162
Anexo 8: Tablas de las propiedades del aire a 1 at de presión.	163
Anexo 9: Ficha técnica del acrílico.	164
Anexo 10: Dimensiones de los diámetros normalizados para el eje.	165
Anexo 11: Especificaciones generales de los rodamientos FAG.	166
Anexo 12: Valor del factor de esfuerzos dinámicos.....	169
Anexo 13: Especificaciones de los soportes para los rodamientos.	170
Anexo 14: Características del inversor.....	171
Anexo 15: Controlador de carga SHS-10.....	172
Anexo 16: Características del tubo estructurado cuadrado.	173
Anexo 17: Análisis de esfuerzos en el eje del aerogenerador.	174
Anexo 18: Análisis de esfuerzos en la estructura del aerogenerador.	177
Anexo 19: Calidad del mallado.	180
Anexo 20: Cálculo de la velocidad tangencial y el torque simulado.	182
Anexo 21: Certificado de traducción del resumen.	184
Anexo 22: Planos mecánicos (Ubicado en el CD-R Nro 1).....	185

Índice de ecuaciones

Ecuación 1.....	9
Ecuación 2.....	10
Ecuación 3.....	11
Ecuación 4.....	11
Ecuación 5.....	12
Ecuación 6.....	14
Ecuación 7.....	14
Ecuación 8.....	14
Ecuación 9.....	14
Ecuación 10.....	15
Ecuación 11.....	31
Ecuación 12.....	31
Ecuación 13.....	32
Ecuación 14.....	32
Ecuación 15.....	32
Ecuación 16.....	32
Ecuación 17.....	33
Ecuación 18.....	33
Ecuación 19.....	34
Ecuación 20.....	34
Ecuación 21.....	34
Ecuación 22.....	36
Ecuación 23.....	36
Ecuación 24.....	38
Ecuación 25.....	39
Ecuación 26.....	39
Ecuación 27.....	39
Ecuación 28.....	40
Ecuación 29.....	40
Ecuación 30.....	40
Ecuación 31.....	41
Ecuación 32.....	41
Ecuación 33.....	41
Ecuación 34.....	41
Ecuación 35.....	42
Ecuación 36.....	42
Ecuación 37.....	42
Ecuación 38.....	42
Ecuación 39.....	43
Ecuación 40.....	43
Ecuación 41.....	43
Ecuación 42.....	44

Ecuación 43.....	44
Ecuación 44.....	44
Ecuación 45.....	46
Ecuación 46.....	74
Ecuación 47.....	76
Ecuación 48.....	76
Ecuación 49.....	77
Ecuación 50.....	78
Ecuación 51.....	79
Ecuación 52.....	79
Ecuación 53.....	79
Ecuación 54.....	82
Ecuación 55.....	82
Ecuación 56.....	83
Ecuación 57.....	83
Ecuación 58.....	83
Ecuación 59.....	92
Ecuación 60.....	93
Ecuación 61.....	93
Ecuación 62.....	93
Ecuación 63.....	93
Ecuación 64.....	96
Ecuación 65.....	96
Ecuación 66.....	97
Ecuación 67.....	112
Ecuación 68.....	113
Ecuación 69.....	120
Ecuación 70.....	120

Simbología

P_v	Potencia del viento [W]	n	Número de revoluciones [rpm]
ρ	Densidad del aire [kg/m^3]	F_{asc}	Fuerza ascensional [kg]
A	Área de barrido [m^2]	F_{arr}	Fuerza de arrastre [kg]
v^3	Velocidad del viento [m/s]	F	Fuerza [N]
P	Presión del aire [Pa]	Cy	Coefficiente ascensional
R_g	Constante del gas [$\frac{J}{mol} * K$]	Cx	Coefficiente de arrastre
T	Temperatura [°C]	F_{tota}	Fuerza total [N]
$v(z)$	Velocidad del viento extrapolada a una altura superior [m/s]	τ	Torque [N. m]
$v(z_r)$	Velocidad de viento a 10m de altura	P_{rev}	Presión del viento [Pa]
z	Altura de la velocidad del viento superior a 10m	F_c	Fuerza centrífuga
z_r	Altura de referencia 10m	m	Masa [kg]
z_0	Longitud de rugosidad	r_{cg}	Radio de rotación del álabe [m]
α	Coefficiente de corte de viento	P_a	Perímetro del álabe [m]
P_t	Potencia total [W]	A_a	Área del álabe [m^2]
C_p	Coefficiente de potencia	H_a	Altura del álabe [m]
η_t	Rendimiento total	W	Peso [W]
h	Altura del rotor [m]	P_{apr}	Potencia aprovechable [W]
D	Diámetro del rotor [m]	η_t	Rendimiento total
b	Base del rotor [m]	η_m	Rendimiento mecánico
d_p	Diámetro de pala [m]	η_e	Rendimiento eléctrico
e	Distancia de superposición [m]	P_0	Carga estática equivalente
d_t	Diámetro de tapas circulares [m]	F_r	Carga radial
r	Radio [m]	F_a	Carga axial
$P_{captado}$	Potencia captada [W]	X_0	Factor radial
E_{cin}	Energía cinética [J]	Y_0	Factor axial

Δt	Variación de tiempo [s]	f_z	Factor de seguridad
Δm_{aire}	Variación de masa de aire [kg]	D_a	Días de autonomía
C	Coefficiente aerodinámico	E_e	Energía entregada
ω	Velocidad angular [rad/s]	E_a	Energía almacenada
u	Velocidad lineal [m/s]	PD	Profundidad de descarga
u_m	Velocidad lineal de cazoletas [m/s]	S_t	Carga total
P_m	Potencia máxima [W]	V	Voltaje
λ	Velocidad en el extremo del álabe [m/s]	S_{sd}	Esfuerzo admisible
T_v	Par torsional [N.m]	K_e	Factor de efectos varios
d_e	Diámetro del eje	K_{car}	Factor de carga
N	Factor de seguridad	W_x	Momento de resistencia de la sección
K_f	Factor concentrador de esfuerzos	L_h	Vida útil de los rodamientos
M	Momento flector [N.m]	F_L	Factor de esfuerzos dinámicos
S_n	Resistencia a la fatiga [MPa]	Z	Número de dientes
S_y	Resistencia a la fluencia [MPa]	σ_{mat}	Esfuerzo del material
K	Coefficiente resistencia fatiga	Y	Factor de forma de Lewis
S_e	Límite de fatiga	σ_{dier}	Esfuerzo del diente
K_a	Factor de acabado superficial	k_v	Factor de velocidad
K_b	Factor de tamaño	L_d	Longitud del diente
K_c	Factor de confiabilidad	F_{ch}	Fuerza de la chaveta
K_d	Factor de temperatura	L_{ch}	Longitud de la chaveta

1. Título

Diseño y simulación de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, accionado por vientos de baja velocidad para la iluminación exterior del Laboratorio de Energías Renovables, de la FEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja

2. Resumen

En el presente proyecto se realiza el diseño y simulación de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, con el fin de aprovechar el recurso eólico existente en el edificio de laboratorios de la FEIRNNR y utilizarlo para iluminar el exterior del mismo. En el documento se contextualiza la metodología, enfocada a indicar los aspectos teóricos y físicos que rigen el funcionamiento de este tipo de rotores eólicos como: descripción técnica detallada, parámetros necesarios para el diseño, consideraciones para la simulación de elementos finitos entre otras. El modelo propuesto consta de un rotor de dos álabes de forma semicircular de pasaje abierto, en donde se utilizó la velocidad de viento de 4,68 m/s para fines de aprovechamiento energético y 11,70 m/s para el diseño de los componentes de rotor, valores obtenidos al realizar una triangulación y estimación del recurso eólico en el lugar de estudio. Así mismo su validación está sujeta al análisis teórico y a la valoración del conjunto geométrico diseñado en el *software* CAD (Solid Works), para posteriormente ser evaluado con la dinámica de fluidos computacionales CFD, en el *software* ANSYS FLUENT®, aplicando el modelo de turbulencia (SST k-w). Para asegurar que el modelo de simulación sea correcto y obtener mayor precisión en el dominio rotacional, se aplicó varios parámetros de refinamiento de malla, permitiendo que los fenómenos de la mecánica de fluidos se desarrollen al interior del mismo de forma aceptable. El modelo de simulación establecido se utilizó para encontrar los coeficientes de torque y potencia, que permitieron analizar el rendimiento aerodinámico de la geometría, y su posterior comparación con resultados teóricos obtenidos.

Palabras clave: Aerogenerador Savonius, iluminación exterior, simulación aerogenerador.

2.1. Abstract

In this research project is design and simulation of a vertical axis wind turbine of type Savonius also carried out in order to take advantage of the existing wind resource in the laboratory building of the FEIRNNR and use it to illuminate the exterior of the building. This document contextualizes the methodology, focused on indicating the theoretical and physical aspects that govern the operation of this type of wind rotor, such as: detailed technical description, necessary parameters for the design, considerations for the finite element simulation, among others. The proposed model consists of an open passage semicircular two bladed rotor, where the wind speed of 4.68 m/s was used for energy use purposes and 11,70 m/s for the design of the rotor components, values obtained by performing a triangulation and estimation of the wind resource at the study site. Also, its validation is subject to the theoretical analysis and the evaluation of the geometric set designed in the CAD software (Solid Works), to be after evaluated with the computational fluid dynamics CFD, in the ANSYS FLUENT® software, applying the turbulence model (SST k-w). To secure the simulation model is correct and to obtain greater accuracy in the rotational domain, several mesh refinement parameters were applied, allowing the fluid of mechanics phenomena to develop normally. The established simulation model was used to find the coefficient of torque and power which allowed analyzing the aerodynamic performance of the geometry, and its subsequent comparison with theoretical results obtained.

Keywords: Savonius wind turbine, outdoor lighting, wind turbine simulation.

3. Introducción

En la actualidad en el Ecuador se utiliza el recurso eólico en diferentes partes del país, la ciudad de Loja ha sido una de las primeras en utilizar energías renovables en alturas considerables sobre el nivel del mar. Así mismo, el interés que existe por utilizar el recurso eólico con turbinas de baja potencia de eje vertical, se debe a que pueden servir para generar bajos consumos de energía, en entornos urbanos y en zonas aisladas a la red eléctrica que presenten un recurso eólico apreciable (Ramón, 2017).

El tipo de aerogenerador Savonius a pequeña y mediana escala resulta muy competitivo frente a los aerogeneradores de eje horizontal, teniendo en consideración los siguientes factores: estructura no compleja, independencia de la dirección del viento, bajo costo de implementación, bajo costo de instalación y principalmente su fácil mantenimiento (Quevedo Cueva, 2008).

Considerando estos antecedentes, el presente proyecto de investigación pretende llevar a cabo el diseño y simulación de un aerogenerador de eje vertical de tipo Savonius, mediante el uso de la dinámica de fluidos computacionales CFD, para la validación de resultados en función de las geometrías involucradas en el diseño, el cual parte desde el estudio del recurso eólico presente en el lugar de emplazamiento, y en función de la demanda de potencia requerida para la aplicación a la cual está destinado el dispositivo, el cual es la iluminación de exteriores.

Así mismo se propone un diseño y selección de los diferentes componentes electromecánicos que conformarán el rotor Savonius, en base a materiales, accesorios y tecnologías disponibles en nuestro medio.

Para llevar a cabo la presente investigación se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo general

Diseñar y simular un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, accionado por vientos de baja velocidad para iluminar el exterior del laboratorio de energías renovables situado en la FEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja.

Objetivos específicos

- Determinar el recurso eólico existente en el lugar de emplazamiento, utilizando diferentes fuentes de información.
- Diseñar los componentes del aerogenerador Savonius, en función del recurso eólico y demanda de potencia.
- Analizar el funcionamiento aerodinámico del aerogenerador Savonius, utilizando para el efecto un *software* de Dinámica de Fluidos Computacionales "CFD".

En cuanto a la estructura del documento, en el apartado uno se representa una revisión literaria, en el que se abordan temas relacionados al tipo de turbina eólica utilizada, al igual que los antecedentes y avances del recurso eólico, de igual manera se establece los principios de funcionamiento y aspectos teóricos del rotor, mismos que resultan de suma importancia para entender con claridad el tema.

En el apartado dos se detalla los materiales y métodos, en el cual se muestra de manera detallada todos los materiales y componentes utilizados, así como los métodos que se utilizaron para dar fiel cumplimiento a los objetivos antes expuestos.

Seguidamente, en el apartado tres se muestra los resultados, los cuales se dividen en tres secciones, siendo la primera el análisis y evaluación del recurso eólico disponible en la zona de estudio, luego el diseño, cálculos de las piezas y componentes principales del aerogenerador en base a la demanda de potencia requerida y finalmente una validación del prototipo utilizando para el efecto una simulación de elementos finitos.

4. Marco Teórico

En el presente apartado se describe una reseña histórica de los antecedentes y avances del recurso eólico, proporciona un enfoque lo más real posible del entorno que vive la energía eólica y en particular la predisposición existente en el progreso de los aerogeneradores, de igual manera se detalla los principios de funcionamiento y aspectos teóricos del aerogenerador Savonius, que es la parte principal en el desarrollo de la presente investigación.

4.1. Energías renovables

4.1.1. Energías renovables en el Ecuador

En los últimos tiempos, en Ecuador las energías renovables han estado evolucionando de manera considerable, principalmente en el sector eléctrico. Debido a esta atribución se ha implementado proyectos de generación de energía eléctrica por medio del aprovechamiento de energía hidráulica (hidroeléctricas), energía solar (planta fotovoltaica) y energía eólica (parques eólicos), dentro de los cuales en el presente estudio solo se considera a la energía eólica.

Por lo tanto, el funcionamiento de la energía eólica en el Ecuador se lo encuentra en lugares como: la isla San Cristóbal en la provincia de Galápagos y en el cerro Villonaco en la provincia de Loja, con una potencia instalada anual de 2,4 MW y de 16,5 MW respectivamente; además, está en construcción un proyecto en las islas Baltra-Santa Cruz en la provincia de Galápagos, con

una capacidad de 2,25 MW. El equivalente de la energía proporcionada por estos proyectos puede abastecer los hogares de hasta 150 mil ecuatorianos (Ollague y Crespo, 2014, p. 6).

4.1.2. Estaciones meteorológicas en la provincia de Loja

En la provincia de Loja existen 20 estaciones meteorológicas, según un estudio realizado se ha tomado datos de la velocidad del viento durante el período 1982 - 2010 y se ha seleccionado aquellas que poseen un mínimo de 20 años de datos (las 10 estaciones relacionadas en la Tabla 1) (Álvarez O et al., 2014).

Tabla 1

Estaciones meteorológicas

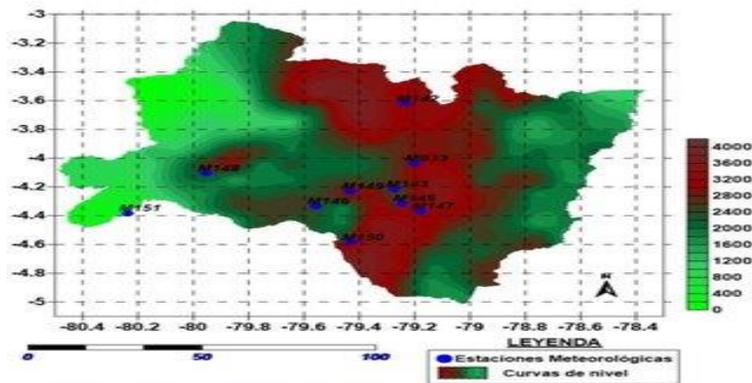
LONGITUD	LATITUD	ALTITUD	CÓDIGO	NOMBRE
-79,2	-4,04	2160	M033	LA ARGELIA, LOJA
-79,23	-3,62	2525	M142	SARAGURO
-79,27	-4,22	1453	M143	MALACATOS
-79,24	-4,31	1560	M145	QUINARA, INAMHI
-79,55	-4,33	1950	M146	CARIAMANGA
-79,17	-4,37	1835	M147	YANGANA
-79,95	-4,1	1984	M148	CELICA
-79,43	-4,23	2042	M149	GONZANAMÁ
-79,43	-4,58	1672	M150	AMALUZA, INAMHI
-80,24	-4,38	223	M151	ZAPOTILLO

Fuente: Adaptado de (Álvarez O et al., 2014)

En la Ilustración 1, se muestra la ubicación de las estaciones superpuestas al Modelo Digital del Terreno (MDT).

Ilustración 1

Estaciones meteorológicas y Altitud. (Escala gráfica en km)

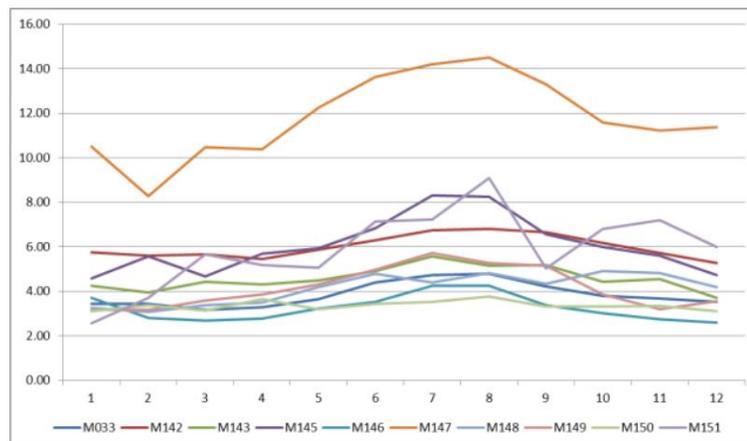


Fuente: Tomada de (Maldonado, Álvarez, Montaña, & Tenechagua, 2015)

En la Ilustración 2, se muestra el comportamiento del viento durante el período 1982-2010, destacándose la estación M147, la cual presenta valores de velocidad del viento por encima de los 8 m/s.

Ilustración 2

Marcha anual promedio (1982 – 2010) de las 10 estaciones



Fuente: Tomada de (Álvarez O et al., 2014)

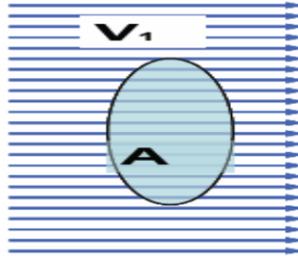
4.2. Viento

4.2.1. Potencia del viento

En el viento la masa del aire está en continuo movimiento y en definitiva conserva una energía cinética de traslación, tal como se aprecia en la Ilustración 3.

Ilustración 3

Incidencia del viento sobre un área A



Fuente: Tomada de (Hernandez, 2009)

Supongamos que tenemos un viento uniforme que sopla con una velocidad (v) y sea (ρ) la densidad del aire. Si ahora consideramos una superficie en el seno del viento (Ilustración 3) y perpendicular a éste, cuya área sea (A), entonces la potencia del viento (P_v), que se define como la cantidad de energía cinética del aire que pasa a través del área en unidad de tiempo, es fácilmente cuantificable y su ecuación es:

$$P_v = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad \text{Ecuación 1}$$

Esta potencia lo que está indicando físicamente es la cantidad de energía cinética del aire que está pasando a través del área de la superficie, en la unidad de tiempo.

De la (Ecuación 1) se deduce que la potencia del viento a través de un área dada, es directamente proporcional a la densidad del aire, proporcional al área de captación y proporcional al cubo de la velocidad del viento.

De aquí se deduce que un aerogenerador producirá más energía cuanto más cerca del nivel del mar este (mayor densidad), cuanto mayor sea su área de captación (mayor será el diámetro) y sobre todo cuanto más aire exista (cuanto más alto sea el valor del viento) ya que la potencia eólica crece con el cubo de la velocidad (Hernandez, 2009).

4.2.2. Densidad del viento

Un aspecto a considerar al analizar la potencia del viento; es la densidad del aire que impacta las aspas; la cual, al igual que la potencia eólica, también varía linealmente. La densidad del aire, varía con respecto a la temperatura y presión, de acuerdo a la ley de los gases.

$$\rho = \frac{P}{R_g * T} = 3,4837 \frac{P}{T} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

ρ = densidad del aire en [kg/m^3].

P = Presión del aire en [Pa].

R_g = Constante del gas en [J/mol*K].

T = Temperatura en [°C].

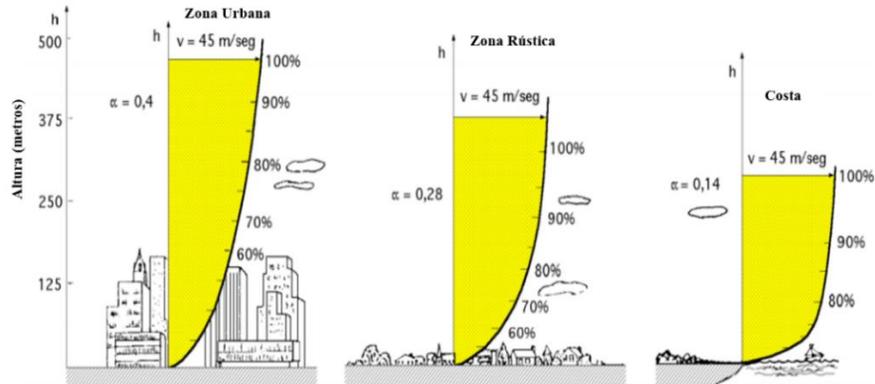
La densidad del aire al nivel del mar [1 atm (14,7 psi) a 15,5 °C (60 °F)] es igual a 1,225 kg/m^3 , usando esto como referencia, la densidad se ajusta dependiendo de la temperatura y presión, ambos en función de la altura del sitio (Trujillo Rivera, 2012).

4.2.3. Variación de la velocidad del viento con la altura

El viento tiene una variación con la altura debido principalmente al rozamiento con la superficie terrestre, hasta un cierto límite en donde la velocidad no se verá afectada. Para que suceda esta variación dependerá de algunos factores, como es el caso de la rugosidad que posee el terreno, la estación del año, la presión, la hora del día etc., que tienden a seguir una ley exponencial. En la Ilustración 4, se aprecia cómo es el comportamiento de la ley exponencial en función de las características típicas de diferentes instalaciones.

Ilustración 4

Perfiles de velocidades de viento según su emplazamiento



Fuente: Tomada de (Sola y Zurita, 2012)

Para determinar la velocidad de viento comúnmente se utiliza el perfil logarítmico y exponencial que permiten determinar la variación supuesta de la velocidad del viento a una altura determinada sobre la superficie.

Se encuentra expresada con las siguientes ecuaciones:

Forma logarítmica:

$$v(z) = v(z_r) * \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Forma exponencial:

$$v(z) = v(z_r) \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$v(z)$ = es la velocidad extrapolada a una altura superior

$v(z_r)$ = es la velocidad del viento a 10 m de altura

z = es la altura a la que se requiere conocer la velocidad superior a 10 m

z_r = es la altura de referencia, en este caso a 10 m de altura

z_0 = es la longitud de rugosidad (ver Tabla 2)

α = coeficiente de corte del viento o cizallamiento

“El coeficiente de corte (α) es el que determina el grosor de la capa límite de velocidades. En la mayoría de escenarios prácticos, el exponente de corte posee un valor de 1/7 pertenece a condiciones atmosféricas neutras” (Pesca y Ardila, 2014, p. 39). Y se encuentra expresado con la siguiente ecuación:

$$\alpha = 0,24 + 0,04 * \ln(z_0) + 0,003[\ln(z_0)]^2 \quad \text{Ecuación 5}$$

Sin embargo, en escenarios reales (α) no es constante, depende de algunos factores señalados anteriormente. La Tabla 2 muestra los valores de clase y longitud de rugosidad para determinar el coeficiente de corte de viento agrupado con diferentes tipos de geografía y topografía.

Tabla 2

Clase y longitud de rugosidad

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad (m)	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje
0	0,002	100	Superficie del agua.
0,5	0,0024	73	Terreno completamente abierto con la superficie lisa. Pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado.
1	0,03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni vallas y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas.
1,5	0,055	45	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 1.250 m.
2	0,1	39	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2,5	0,2	31	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0,4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terrenos accidentado y muy desigual.
3,5	0,8	18	Ciudades más grandes con edificios altos.
4	1,6	13	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos.

Fuente: Adaptado de (Villarrubia , 2012)

4.2.4. Velocidad y dirección del viento

El viento viene determinado por dos parámetros principales que son, su dirección y su velocidad. Para la dirección en la actualidad se usa internacionalmente la rosa dividida en 360°. El cálculo se realiza tomando como origen el norte y contando los grados en el sentido de las manecillas del reloj. La velocidad del viento generalmente se maneja como un vector bidimensional, es decir, incluye magnitud (velocidad, rapidez o intensidad del viento) y dirección la cual se mide con respecto al Norte geográfico.

4.2.5. Teorema de Betz

El Teorema de Betz dice que sólo puede convertirse menos de 59 % de la energía cinética en energía mecánica usando una turbina eólica. Como se indica en la Ilustración 5, la velocidad del viento es mayor antes de pasar por la turbina (V_1), en el momento en que se encuentra en el área que trazan las palas, es cuando se obtiene la potencia máxima y la velocidad disminuye (V_2), saliendo por la parte posterior de la turbina.

“Es importante reconocer que este teorema es formulado para una turbina de eje horizontal, pero podemos asumir que el comportamiento será el mismo en una turbina de eje vertical” (Estrella, 2008, p. 13).

Ilustración 5

Ley de Betz



Fuente: Tomada de (Estrella, 2008)

La potencia captada por el aerogenerador se define como la diferencia instantánea de la energía cinética del viento antes y después de pasar por el obstáculo en un determinado tiempo.

$$P_{captado} = \frac{E_{cin1} - E_{cin2}}{\Delta t} = \frac{1}{2} * \frac{\Delta m_{aire}}{\Delta t} * (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$P_{captado}$ = Potencia captada en [W]

E_{cin} = Energía cinética en [J]

Δt = Variación de tiempo [s]

Δm_{aire} = Variación de masa de aire en [kg]

v = Velocidad del viento en [m/s]

Otra manera para definir la masa de aire que pasa por el aerogenerador se logra considerando el promedio de las velocidades antes y después del obstáculo:

$$\frac{\Delta m_{aire}}{\Delta t} = \rho * A * \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

A = Superficie en [m^2]

Sustituyendo la masa del aire con lo expresado en la ecuación 6 nos queda lo siguiente:

$$P_{captado} = \frac{1}{4} * \rho * A * (v_1^2 - v_2^2) * (v_1 + v_2) \quad \text{Ecuación 8}$$

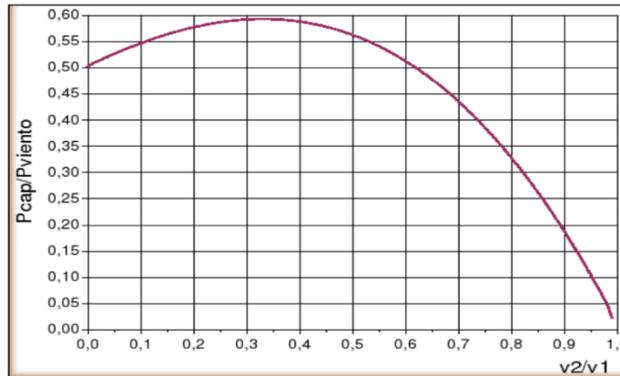
Luego se define la razón entre la potencia captada sobre potencia del viento definida por la ecuación 1: donde v será v_1 :

$$\frac{P_{captado}}{P_v} = \frac{1}{2} * \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) * \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \quad \text{Ecuación 9}$$

Lo anterior permite definir una función $\frac{P_{captado}}{P_v}$ en relación a una variable $\frac{v_2}{v_1}$ tal como se muestra en la Ilustración 6.

Ilustración 6

Curva de eficiencia de Betz



Fuente: Tomada de (Calderón y Díaz, 2012)

La curva mostrada anteriormente (Ilustración 6), define un máximo en $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$ con una potencia máxima captada de $P_{captada} = \frac{16}{27} * P_v$. En resumen, se define la relación aproximada tal como aparece en la ecuación 10 y se denomina Ley de Betz, que representa la máxima cantidad de energía del viento que se puede transformar en energía mecánica rotacional (Flores Calderón & Lalanguí Díaz, 2012).

$$P_{captada} = 0,59 * A * v^3 * \rho \quad \text{Ecuación 10}$$

Esta ecuación es un límite teórico ideal ya que no considera los siguientes factores reales de operación:

- ✓ Resistencia aerodinámica de las aspas.
- ✓ La compresibilidad del fluido
- ✓ La interferencia de las aspas.

4.2.6. Instrumentos de medición del viento

Para medir la velocidad del viento se utiliza un anemómetro, que es un dispositivo giratorio que consta de una placa que gira libremente y un señalador que indica la dirección del viento, es usado para medir la velocidad o rapidez de los gases ya sea en un flujo contenido, como el flujo

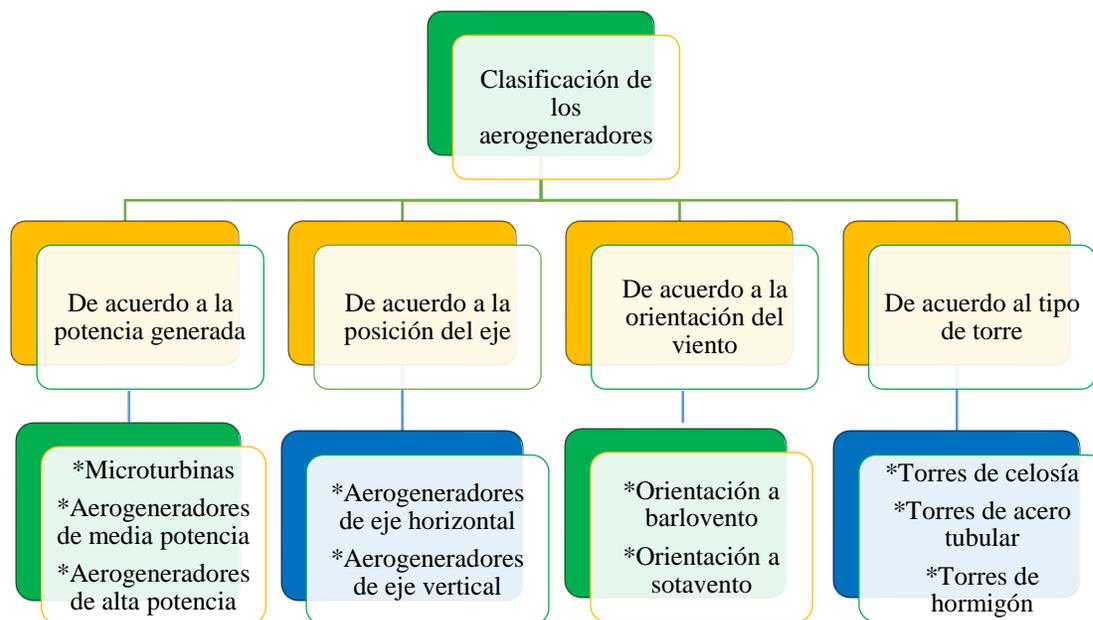
de aire en un conducto, o en flujos no confinados, como un viento atmosférico (BOHORQUEZ y ENCISO, 2019).

4.3. Clasificación de los aerogeneradores

Se estudia la clasificación de los aerogeneradores ya que estos pueden ser de acuerdo a su eje de rotación, por la cantidad de potencia que producen y en función de su utilización, es por ello que los aerogeneradores poseen diferentes criterios, en la Ilustración 7 se muestra la categorización usada más habitualmente.

Ilustración 7

Clasificación de los aerogeneradores



Fuente: (El Autor)

4.3.1. De acuerdo a la posición del eje

Como el presente estudio se basa fundamentalmente en un aerogenerador de eje vertical, se procede analizar las ventajas y desventajas que ofrece este tipo de aerogenerador.

4.3.2. Aerogenerador de eje vertical

Los aerogeneradores de eje vertical o VAWT, por sus siglas en inglés (Vertical Axis Wind Turbine), usan la resistencia al viento y representan una alternativa para la necesidad de implementación de turbinas pequeñas. Su principal ventaja es que funcionan independientemente a la dirección del viento. Los dos tipos más comunes son los Darrieus (basados en la elevación) y los Savonius (basados en el arrastre). (Saavedra y Alejos, 2019, p. 2) en la Tabla 3 se presentan las ventajas y desventajas de este tipo de aerogenerador.

Tabla 3

Ventajas y desventajas del aerogenerador de eje vertical

Aerogenerador de eje vertical	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Debido a que es más ligera, puede instalarse en mástiles o sobre edificios altos.• Puede ser instalada en la ciudad sin molestar a los vecinos a causa del ruido.• Es más eficiente, porque al ser generación distribuida tiene menos pérdidas en la transmisión.• Pueden funcionar con viento débil.• No necesitan de un mecanismo de orientación para tomar el viento, ya que sus palas son omnidireccionales.	<ul style="list-style-type: none">• Vientos lentos, escasos por estar a nivel de suelo.• Aunque cada vez están saliendo modelos más económicos, siguen siendo más caros que los de eje horizontal.• Difícil colocar un sistema que regule la velocidad cuando hay grandes vientos (Rotor-H)• Mucho más material por metro cuadrado que los aerogeneradores de eje horizontal.• No pueden aprovechar las corrientes más veloces al estar instalados tan bajos.

Fuente: (Saavedra y Alejos, 2019)

4.4. Aerogenerador de eje vertical tipo Savonius

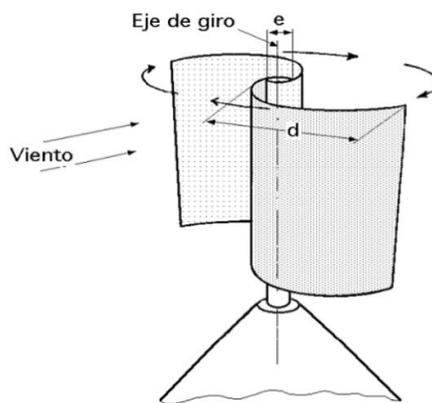
4.4.1. Aerogenerador Savonius

El tipo de aerogenerador Savonius extrae la energía del viento a través de dos semicilindros ahuecados desplazados tal como se muestra en la Ilustración 8. El torque de rotación se origina

por el cambio de momento del viento que pasa a través de ella, como también del resultado aerodinámico que ocasiona una reacción perpendicular a una corriente de aire, cuando un cilindro gira dentro de ella, este efecto es conocido también con el nombre de Magnus. Además, posee un buen torque de partida y no requiere orientarse con relación al viento para poder girar.

Ilustración 8

Esquema del aerogenerador Savonius



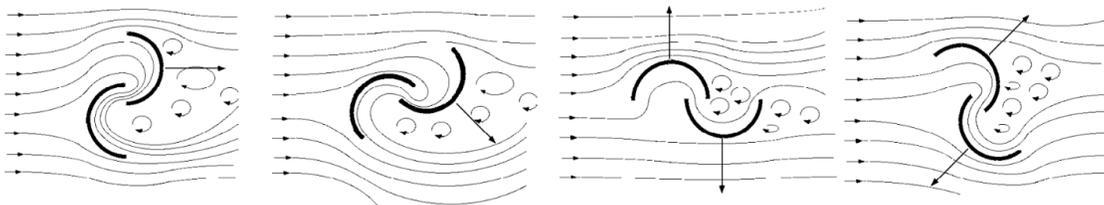
Fuente: (Defaz Vizcaino & Pallasco Yugsi, 2017)

4.4.2. Líneas de corriente del aire en un rotor Savonius

La baja circulación de aire en el eje de rotación reduce la eficiencia del rotor, por lo tanto, resta momento de rotación. Igualmente, el viento que choca por detrás de los álabes puede ocasionar paros inesperados en operaciones de alta velocidad (Fernández, 2008), en la Ilustración 9 se muestra el comportamiento de las líneas de corriente de aire al cruzar el rotor.

Ilustración 9

Líneas de corriente de aire en un rotor Savonius



Fuente: (Fernández, 2008)

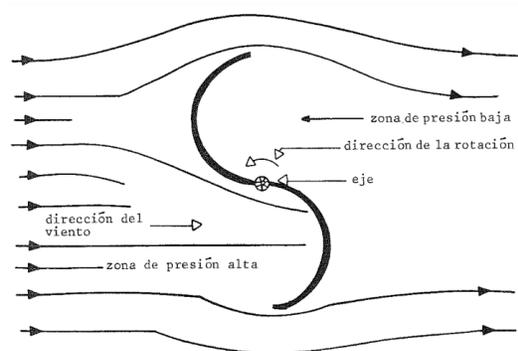
4.4.3. Principios de operación de un rotor Savonius

Para obtener el principio de operación del rotor Savonius se toma en cuenta las disposiciones de los álabes del rotor, para el diseño del rotor se posee dos tipos de disposiciones las cuales se representan a continuación.

- **Pasaje de álabes cerrado.** Es cuando los álabes están acoplados entre sí al eje del rotor, e impiden principalmente la circulación del flujo de aire, ocasionando un vacío parcial en el lado de viento, abajo del álabes, el cual avanza hacia el viento (OLADE, 1981), tal como se muestra en la Ilustración 10.

Ilustración 10

Diagrama de flujo del aire, pasaje de álabes cerrado

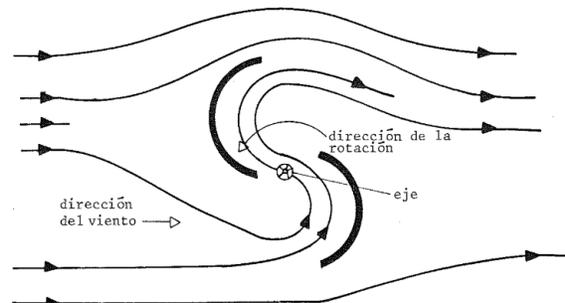


Fuente: (OLADE, 1981)

- **Pasaje de álabes abierto.** Es cuando los álabes están acoplados entre sí al eje del rotor, La región de vacío es sustituido por una zona de presión, por lo tanto, crece el torque. Así que por la regulación del flujo de aire en esta apertura es viable controlar la velocidad de rotación y el torque que se origina en el eje (OLADE, 1981), tal como se muestra en la Ilustración 11.

Ilustración 11

Diagrama del flujo del aire, pasaje de álabe abierto



Fuente: (OLADE, 1981)

4.4.4. Eficiencia del rotor Savonius

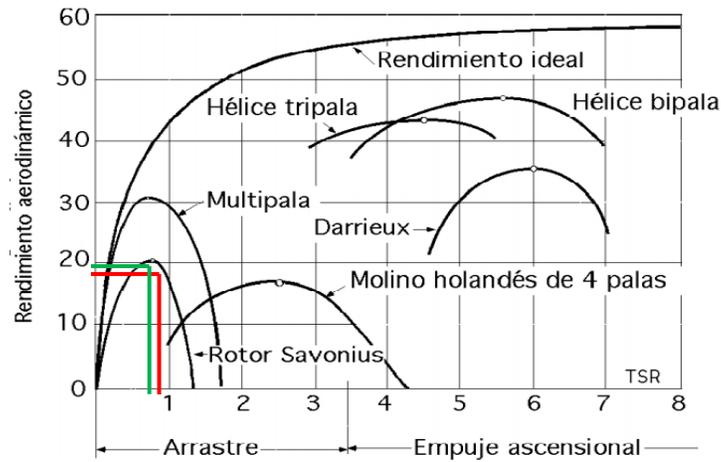
Los aerogeneradores de eje vertical no son muy comunes ya que tienen una eficiencia menor que los de eje horizontal. Sin embargo, en el caso de electrificación rural se busca más la sencillez tanto en diseño, fabricación, montaje y mantenimiento, que la eficiencia.

El hecho de diseñar un aerogenerador Savonius se debe a que dentro de los aerogeneradores de eje vertical se trata del más sencillo en fabricación e instalación. Así, necesita un mantenimiento mínimo, tiene un coste bajo, consigue arrancar con poco viento y no necesita de un sistema de orientación del viento, ya que funciona con vientos de cualquier dirección.

“Sin embargo, también tiene inconvenientes como el hecho de que gira a una velocidad muy pequeña, por lo que a veces necesitará de sistemas de transmisión. No obstante, el mayor inconveniente que tiene es que su rendimiento también es de los más bajos en cuanto a aerogeneradores de eje vertical” (Sola y Zurita, 2012, p. 86). La Ilustración 12, muestra el rendimiento aerodinámico para el aerogenerador Savonius el cual es de 0,2 (línea color verde).

Ilustración 12

Coeficiente de eficiencia del rotor (C_p) con base en la relación de la velocidad en punta de pala (TSR)



Fuente: Tomada de (Sola y Zurita, 2012)

4.4.5. Comportamiento aerodinámico del rotor Savonius

Las turbinas eólicas están dimensionadas para un punto de funcionamiento nominal, es decir, para una velocidad de viento determinada. En muchos de los casos, por su alta eficiencia, turbinas de 2 o 3 aspas son las preferidas. Aunque tienen un rendimiento bueno, este tipo de turbinas no es necesariamente el que permite la extracción de la máxima energía de un sitio eólico. Se ha demostrado que una turbina eólica de eje vertical (VAWT) de funcionamiento lento, como el rotor Savonius, puede extraer más energía que los aerogeneradores de funcionamiento rápido. (Rivera, 2012, p. 18-19)

Esta idea pudiera parecer contradictoria a la literatura habitual; que dice que los rotores Savonius tienen un comportamiento aerodinámico, donde las características de un dispositivo de arrastre son dominantes, lo cual claramente introduce un coeficiente de eficiencia bajo, la Ilustración 12 mostrada anteriormente muestra el coeficiente de eficiencia para el rotor Savonius correspondiente a 0,2.

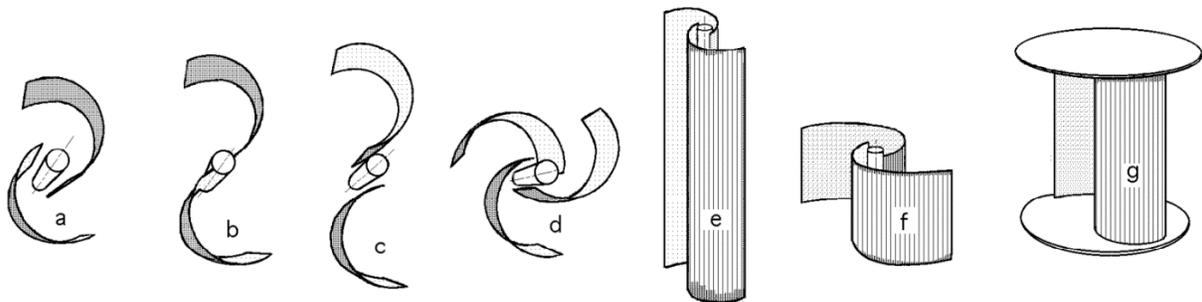
Debido a su alto torque de arranque, un rotor Savonius puede teóricamente producir energía en velocidades de vientos bajas, y debido a su baja velocidad angular, puede seguir suministrando electricidad en altas velocidades de viento, cuando los generadores de altas velocidades, serían generalmente detenidos por protección. La desventaja principal de los rotores Savonius es la gran inestabilidad del mecanismo, debido a los grandes esfuerzos de torque ya que el flujo dentro del rotor es no estacionario. (Rivera, 2012, p. 19)

4.4.6. Consideraciones para el diseño de un aerogenerador Savonius.

Como lo indica (Fernández, 2008) para el diseño de un rotor Savonius se debe conocer de antemano las alternativas que pueden existir, espaciados entre álabes, número de álabes, esbeltez y posicionamiento de las mismas y tapas circulares que conforman las bases de los apoyos, tal como se indica en la Ilustración 13.

Ilustración 13

Diversas opciones de un rotor Savonius



Fuente: (Fernández, 2008)

De estos diferentes tipos de configuración del rotor Savonius se observa que: la del literal “e” tiene una mayor esbeltez que la del literal “f”, mientras que la del literal “g” mejora el rendimiento del rotor a bajas rpm, así como la energía liberada para un determinado campo de velocidades del viento (Fernández, 2008).

4.5. Generadores de imanes permanentes y de manivela (Dinamo)

En la actualidad es muy común el uso de generadores eléctricos en distintas aplicaciones que se requiera, en especial para la generación de energía para sistemas eólicos. Al utilizar generadores de imanes permanentes se elimina la necesidad de anillos rozantes, e implica la eliminación de las pérdidas en el cobre del rotor; con lo que desaparece la necesidad de refrigeración del rotor, además se disminuye considerablemente el volumen de la máquina (Sánchez, 2001).

Los generadores de manivela o dinamos al igual que los generadores de imanes permanentes, transforman la energía mecánica a energía eléctrica, pero la diferencia está en que el dinamo transforma dicha energía mediante el fenómeno de la inducción electromagnética, generando una corriente continua eléctrica.

Existe una gran diferencia entre estos dos tipos de generadores, el de imanes permanentes posee un gran campo magnético debido a los imanes, lo cual hace que se requiera de un torque elevado para vencer la inercia del mismo, mientras que el dinamo en cambio no requiere de un elevado torque para accionarse, siendo utilizados ambos tipos de generadores eléctricos según sea las condiciones requeridas.

4.6. Conversión de la energía eólica en energía eléctrica

La energía disponible en el viento es energía cinética, dicha energía es la que choca con las palas del rotor y estas palas la convierten en energía mecánica. El rotor se encuentra conectado al eje, y el par motor en dicho eje puede hacer trabajos mecánicos o generar electricidad. Dependiendo del diseño aerodinámico de la pala, el viento, al actuar en las palas, produce un levantamiento o un arrastre. En el levantamiento lo que ocurre es que se produce una presión

diferente en cada lado de la superficie del rotor, haciendo que el plano aerodinámico se levante. En el arrastre el viento golpea físicamente al rotor y lo arrastra con esa fuerza de choque. En cuanto a eficiencia se prefiere el levantamiento y las máquinas más modernas emplean este principio en su operación.

Una vez que se ha extraído la energía del viento, esta energía mecánica es convertida en energía eléctrica mediante un generador eléctrico, el cual puede ser de muy diversos tipos dependiendo de cómo sea el aerogenerador (según su potencia nominal, uso y posición). Por tanto, en esta conversión de energía mecánica a energía eléctrica también habrá determinadas pérdidas, las cuales también dependerán del tipo de generador escogido. (Sola y Zurita, 2012, p. 53)

4.7. Dinámica de Fluidos Computacionales

4.7.1. ¿Qué es la Dinámica de Fluidos Computacionales?

Según Bernardo (2018), “La Dinámica de Fluidos Computacionales CFD, del inglés (Computational Fluid Dynamics) es una rama de la mecánica de fluidos que estudia el comportamiento de los fluidos, sus parámetros principales como la velocidad, presión, temperatura, etc. Mediante el uso de técnicas aplicadas en un ordenador o conjunto de ordenadores.

A la hora de realizar diseños y análisis de sistemas de ingeniería relacionados con el flujo de fluidos, existen dos métodos fundamentales: la experimentación y el cálculo. El primero de ellos conlleva, por lo general, la construcción de modelos que son probados en túneles de viento u otras instalaciones, mientras que el segundo implica resolver ecuaciones diferenciales, ya sea de manera analítica o computacional.

En la actualidad el estado de la dinámica de fluidos computacionales es el siguiente: los flujos laminares los maneja con facilidad, pero los flujos turbulentos que tienen interés

práctico son los imposibles de resolver sin recurrir a los modelos de turbulencia. Además, ningún modelo de turbulencia es universal, y una solución de CFD de flujo turbulento es tan buena dependiendo de qué tan apropiado sea el modelo de turbulencia empleado (Cimbala y Cengel, n.d.)

4.7.2. Ventajas y desventajas en la utilización de CFD

Como se ha manifestado anteriormente con el uso de CFD solo se obtiene una solución aproximada de las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos. Es por ello que la utilización de *software* puede ser muy útil, pero al mismo tiempo se corre el riesgo de introducir errores durante el cálculo, conllevando así, a la obtención de resultados inciertos (García, 2012).

En la Tabla 4 se muestran algunas de las ventajas y desventajas.

Tabla 4

Ventajas y desventajas de CFD

VENTAJAS	DESVANTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • El cálculo CFD es una herramienta muy buena de pre diseño que permite reemplazar en algunos casos costosos, ensayos experimentales. • Se utiliza como una herramienta complementaria en el diseño de aeronaves, de vehículos y de sus elementos, dando una buena aproximación de su forma y geometría final. • Permite realizar ensayos numéricos en cortos períodos de tiempo con gran fidelidad, y sin elevar los costos de manera considerable. • Permite resolver problemas de flujos complejos y aporta comprensión de fenómenos difíciles de observar y medir. • Las condiciones de entrada de datos pueden variarse continuamente en los procesos de simulación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Para resolver problemas de flujos complejos, es necesaria una gran potencia de cálculo. • Las mayores limitaciones vienen dadas por las incertidumbres debidas a los modelos de turbulencia y el tiempo necesario para realizar la malla y para ejecutar el cálculo. • Muchas veces es necesario estudiar los elementos más importantes por separado para optimizarlos. Luego, se ensambla toda la estructura a fin de calcular la aerodinámica completa con las distintas interacciones entre elementos y el fluido.

Fuente: Adaptada de (García, 2012)

4.8. Baterías y equipos complementarios

El sistema del aerogenerador de eje vertical de tipo Savonius, para almacenar y entregar energía está compuesto por:

- **Baterías.**

Las baterías son dispositivos que acumulan energía eléctrica en forma química y la liberan luego como corriente continua de una manera controlada. En la actualidad la mayoría de las baterías que se ofrecen en el mercado a los clientes son de plomo-ácido, lo que significa que poseen electrodos positivos y negativos, que a su vez están conformados por compuestos de plomo en un electrolito de ácido sulfúrico disuelto, estas baterías son de gran importancia ya que pueden recargarse sin ningún inconveniente después de que se hayan descargado por completo.

- **Inversor de corriente.**

Es un componente electrónico, encargado de convertir el voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje de salida de corriente alterna, estos dispositivos transforman 12 V o 24 V de corriente continua de una batería, a 110 V o 220 V de corriente alterna según sea el requerimiento. Hoy en la actualidad los inversores de corriente se utilizan en gran variedad de aplicaciones, comenzando desde pequeñas fuentes de alimentación, hasta las grandes aplicaciones industriales.

- **Regulador de carga.**

Nos permite restringir el paso de la corriente eléctrica, controlando la carga de las baterías, con esta acción se previene una sobrecarga y se puede proteger contra una sobretensión, que ocasionaría un deterioro en el rendimiento y la vida útil de la batería.

5. Metodología

En el presente apartado se exponen los materiales y métodos que se requieren para el dimensionamiento del aerogenerador Savonius, primeramente se analiza las diferentes fuentes de información para estimar la velocidad de viento existente en la zona de estudio, realizada a través una interpolación IDW (Distancia Inversa Ponderada) en el *software* QGIS, seguidamente se analiza el diseño y dimensionamiento que tendrá el prototipo, considerando las partes que lo componen como son: rotor, álabes, tapas circulares, eje, rodamientos, sistema de transmisión de potencia y la estructura de sujeción, todo esto se lleva a cabo para el correcto dimensionamiento del sistema eólico.

5.1. Materiales

Los materiales utilizados se encuentran detallados a continuación.

Materiales de oficina.

Material bibliográfico

- Libros de diseño de elementos de máquinas, mecánica de sólidos.
- Artículos científicos con temas relacionados al diseño y simulación de aerogeneradores.
- Proyectos de grado relacionados al diseño de aerogeneradores de eje vertical.
- Parámetros para simulación de Dinámica de Fluidos Computacional.

Recursos tecnológicos

- Computador

Recursos humanos.

- Tutor del trabajo de titulación
- Asesor del trabajo de titulación
- Autor del trabajo de titulación

Softwares.

- Paquete de Microsoft Office 2019.
- *Software* de cálculo (Excel, Python).
- *Software* CAD (Autodesk® AutoCAD 2016, SolidWorks® Premium 2020).
- *Software* CFD (ANSYS® Student 2020 R2, 2020).
- Otros (QGIS, DiaLux).

5.2. Métodos

Para el correcto desarrollo de esta investigación se estructuró la siguiente metodología:

- Búsqueda de información sobre el recurso eólico existente en la zona de emplazamiento, esta búsqueda se la realiza a través del internet, artículos científicos, tesis, base de datos del INAMHI, datos meteorológicos de la casa autosustentable de la FEIRNNR y a través del visor de acceso de datos meteorológicos de la Nasa.
- Analizando la base de datos de todas las fuentes de información, se determina la velocidad de viento en el lugar de estudio, determinando la velocidad promedio que servirá para fines de aprovechamiento energético y de igual manera la velocidad máxima para el diseño de los componentes que conformarán el rotor .
- Demanda de potencia, aquí se debe establecer la cantidad de potencia que se requiere para cubrir la demanda, se realiza en base a la cantidad de luminarias utilizadas y las horas de funcionamiento del sistema.
- Identificación de las partes principales del rotor, se debe realizar una síntesis de las partes que conforman el aerogenerador, se toma en cuenta los diferentes criterios de ingeniería de trabajos realizados anteriormente, así mismo dentro del campo de resistencia de los elementos mecánicos, la sistemática se establece en la propuesta del material y una

geometría básica que se ajuste a las necesidades funcionales de la máquina, se define las características geométricas comerciales como, perfiles, espesores, diámetros, momentos de inercia, entre otros, para de esta manera proponer el diseño general del prototipo.

- Diseño de los componentes que conforman el rotor Savonius, para realizar este diseño es necesario elegir una teoría de cálculo apropiada, misma que tome en cuenta las condiciones a las que estarán sometidos los componentes, con la finalidad de dimensionar adecuadamente. Una vez obtenidos los cálculos correspondientes se procede a diseñar las piezas en 3D a través de un software CAD, para luego realizar la validación del prototipo en un software de dinámica de fluidos computacionales (CFD)
- Para el apartado de la simulación es necesario definir correctamente una metodología de desarrollo, para ello se debe de tener en cuenta aspectos importantes como la creación del volumen de control, generación de la malla, método de solución y modelo de turbulencia, con esto se determina de manera correcta el comportamiento aerodinámico que tiene el rotor al encontrarse en contacto con el fluido y por ende los resultados obtenidos son lo más exactos posibles.

5.3. Lugar de emplazamiento

El lugar de emplazamiento en donde se realizó el presente estudio, es el laboratorio de energías renovables de la FEIRNNR (Edificio N° 2), a través de varias fuentes de información como el caso del INAMHI, el visor de acceso a datos de la NASA POWER v2.0.0, los datos de la casa autosustentable de la FEIRNNR y revisión de información de tesis relacionadas a la presente investigación, se determina el recurso eólico existente en la zona de estudio y se lleva a cabo el desarrollo de la misma. Cabe recalcar que el INAMHI otorgó información de la estación

meteorológica la Argelia M033 de los últimos años, para lo cual se firmó un acuerdo de confidencialidad de los datos, cuyo documento reposa en el (Anexo 1).

5.4. Iluminación y elección de las luminarias LED

Para el desarrollo del presupuesto de potencia que involucra directamente el dimensionamiento del aerogenerador Savonius, se utilizó las luminarias de tipo LED, siempre y cuando cumplan con los requisitos luminotécnicos, pues como es de conocimiento lo que se pretende con la investigación es conseguir el máximo aprovechamiento energético, proporcionado por el rotor.

En el Ecuador el IESS (Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social) ha dictado las pautas en materia de seguridad ocupacional, fundamentalmente a partir del Decreto No. 2393 Registro oficial No. 249 según el artículo 56 de Iluminación y Niveles Mínimos, que establece los niveles de iluminación recomendados para realizar trabajos seguros (Rivera, 2014, p. 17). En la Tabla 5 se muestra los niveles de iluminación recomendados.

Tabla 5

Niveles de iluminación recomendada

Niveles de iluminación (Luxes)	Características del espacio
20	Pasillos, patios y lugares de paso.
50	Operaciones en las que la distinción no sea esencial como manejo de materias, desechos de mercancías, embalaje, servicios higiénicos.
100	Cuando sea necesaria una ligera distinción de detalles como: fabricación de productos de hierro y acero, taller de textiles y de industria manufacturera, salas de máquinas y calderos, ascensores.
200	Si es esencial una distinción moderada de detalles, tales como: talleres de metal mecánica, costura, industria de conserva, imprentas.
300	Siempre que sea esencial la distinción media de detalles, tales como: trabajos de montaje, pintura a pistola, tipografía, contabilidad, taquigrafía.
500	Trabajos en que sea indispensable una fina distinción de detalles, bajo condiciones de contraste, tales como: corrección de pruebas, fresado y torneado, dibujo.

Fuente: (Rivera, 2014)

5.5. Demanda de potencia requerida

Dados los antecedentes antes mencionados, existen diferentes niveles de iluminación recomendados de acuerdo al área que se va a proyectar, por tal motivo se analiza los luxes necesarios que se requiere para iluminar el exterior del laboratorio la FEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja, y de acuerdo al área proyectada se realiza un estudio de iluminación a través del *software* DiaLux, para determinar la cantidad de luminarias que se requiere para satisfacer los requerimientos de iluminación.

5.6. Cálculo de la potencia total extraída.

Para calcular la potencia total que debe extraer el rotor se procede a calcular la demanda requerida, con ello se determina la capacidad de la batería que se requiere para alimentar la carga.

Se debe tener en cuenta los días de autonomía (D_a), para este caso se tomará 3 días que son los recomendados en el supuesto caso de que no se consigan corrientes de viento y por ende la no generación de energía.

La energía entregada (E_e) se define por la siguiente ecuación:

$$E_e = D_a * Consumo\ diario \quad \text{Ecuación 11}$$

Luego se procede a calcular la energía almacenada (E_a) para una profundidad de descarga (PD) de las baterías del 50 %, debido a que no se debe tener una descarga mayor, con eso se garantiza la vida útil de las baterías.

La energía almacenada se define mediante la siguiente ecuación:

$$E_a = \frac{E_e}{PD} \quad \text{Ecuación 12}$$

Finalmente se obtiene la carga total (S_t) que es la relación entre la energía almacenada (E_a) y el voltaje de la batería (V) que se define mediante la siguiente ecuación:

$$S_t = \frac{E_a}{V} \quad \text{Ecuación 13}$$

Una vez obtenida la capacidad de las baterías se procede a calcular la potencia total que debe de extraer el aerogenerador, se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$P = V * I \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

P = Potencia, [W]

V = Voltaje nominal, [V]

I = Corriente, [A]

5.7. Potencia aprovechada por el rotor

Como es de conocimiento no es posible aprovechar toda la energía útil del viento, debido a que existe una disminución del viento al momento que hace contacto con el área barrida por el rotor, puesto que en la Ilustración 6 se puede observar en el teorema de Betz que la máxima energía que puede aprovechar el aerogenerador es de 0,59. Por tal razón el coeficiente de potencia no puede exceder ese valor, entonces la potencia aprovechada queda expresada de la siguiente manera:

$$P_{apr} = C_p * P_v \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

P_{apr} = Potencia aprovechable en [W]

C_p = Coeficiente de potencia, no puede superar el límite de Betz

Posteriormente sustituimos en (P_v) la (Ecuación 1), quedando la potencia aprovechada de la siguiente manera:

$$P_a = C_p * \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad \text{Ecuación 16}$$

5.8. Eficiencia del aerogenerador

Para el presente trabajo de titulación consideramos un rendimiento mecánico (η_m) del 90 %, ya que debemos tener en cuenta que existen pérdidas en la transmisión de potencia a través de los ejes, en el movimiento de los álabes entre otras, y así mismo se considera un rendimiento eléctrico (η_e) del 95 %, ya que también se pierde energía en el generador y cableado, que son los encargados de convertir la energía y transportarla.

De esta manera obtenemos un rendimiento total (η_t) expresado de la siguiente manera:

$$\eta_t = \eta_m * \eta_e \quad \text{Ecuación 17}$$

El coeficiente de potencia, muestra con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía mecánica producida por el viento, a energía eléctrica. Para ello en la Ilustración 12 se muestra un valor aproximado a 0,2, que es el valor asignado para un rotor Savonius, donde se muestra la relación existente entre la velocidad del viento y la curva entregada por el tipo de aerogenerador.

De tal forma, la potencia total (P_t) emitida por el aerogenerador será calculada por la siguiente expresión:

$$P_t = \eta_t * C_p * \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad \text{Ecuación 18}$$

5.9. Mecanismo

5.9.1. Tipo de mecanismo

Para desarrollar el mecanismo del presente proyecto se ha elegido una turbina eólica tipo Savonius, aerodinámicamente son dispositivos de arrastre que pueden constar de dos o tres álabes, al observar desde la parte superior se puede observar que los álabes forman una figura en forma de una S, tal como se indica en la Ilustración 14, estas giran sobre un eje vertical, logra su movimiento rotacional gracias a la fuerza de empuje que el viento ejerce sobre los álabes, por otra

parte no necesitan orientarse en la dirección del viento, ya que pueden soportar mejor las turbulencias y pueden empezar a girar con vientos de baja velocidad, es una de las turbinas más económicas y fáciles de usar.

Ilustración 14

Rotor de tipo Savonius



Fuente: (El Autor)

5.9.2. Dimensionamiento del rotor

El área de rotor Savonius es representado de la siguiente manera:

$$A = b * h \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

b = base de aerogenerador en [m]

h = altura del aerogenerador en [m]

Para el dimensionamiento del rotor empezaremos despejando el área de barrido obteniendo la siguiente expresión:

$$A = \frac{2 * P_t}{\rho * v^3 * C_p * \eta_t} \quad \text{Ecuación 20}$$

El área no depende del factor π (pi) como en los aerogeneradores de eje horizontal, y con el propósito de lograr simetría en el diseño, se considera que la altura es igual al diámetro o base, o en su defecto es igual a la raíz cuadrada del área. Así obtenemos:

$$h = D = b = \sqrt{A} \quad \text{Ecuación 21}$$

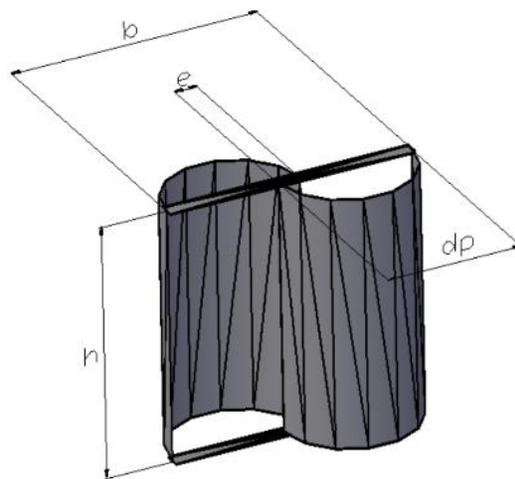
5.9.3. Geometría de las aspas del aerogenerador

Como se indica en la Ilustración 15, la geometría en las aspas del aerogenerador tiene un papel importante en la aerodinámica del rotor, ya que son el componente que interactúa con el viento, y cumplen la función de captar la energía del viento y liberarla de una manera más eficiente, para que las aspas puedan aprovecharlas.

Al considerar su correcta ubicación se podrá alcanzar una mejor eficiencia del prototipo ya que, si no se toma en cuenta este aspecto, el prototipo puede resultar un fracaso al momento de conseguir la rotación.

Ilustración 15

Dimensiones en el rotor Savonius



Fuente: Tomada de (Valarezo, 2011)

Luego de conocer las dimensiones de la base y altura del rotor, se debe calcular el diámetro de la pala (d_p), y la abertura entre palas (e), para ello se considera que el rotor debe cumplir la relación de traslape de $1/6$, por tal razón al momento de sustituir el valor de (e) en la (Ecuación 23), se obtendría el diámetro de las palas.

$$b = \left(d_p - \frac{e}{2}\right) * 2 \quad \rightarrow \quad e = \frac{d_p}{6} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$b = 2d_p - e$$

$$b = 2d_p - \frac{d_p}{6} = \frac{12d_p - d_p}{6} = \frac{11d_p}{6} \quad \text{Ecuación 23}$$

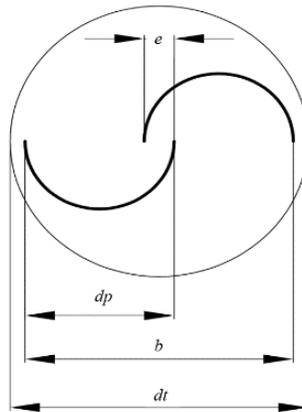
$$d_p = \frac{6 * b}{11}$$

5.9.4. Diseño de las tapas circulares del aerogenerador

El diseño de las tapas que conforman los módulos del aerogenerador Savonius son elementos simples, en la Ilustración 16, se puede observar las medidas geométricas de las tapas, siendo dt (diámetro de las tapas circulares).

Ilustración 16

Medidas geométricas de las tapas circulares del aerogenerador Savonius



Fuente: (El Autor)

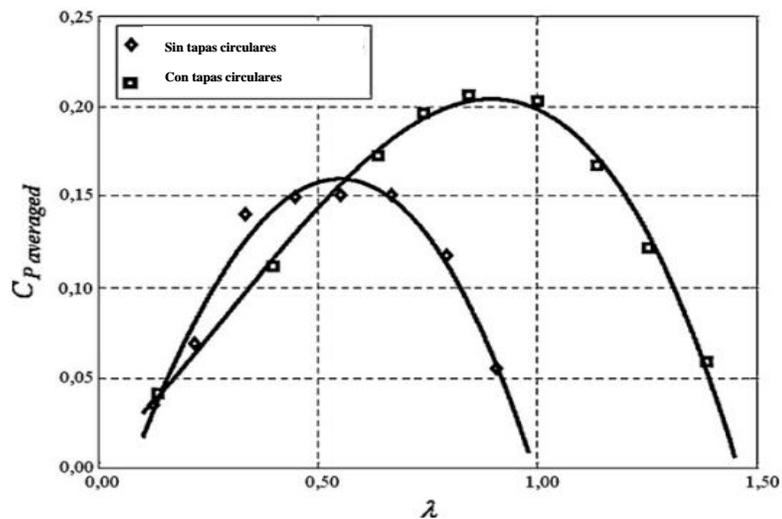
Como se puede apreciar en la Ilustración 17, la adición de tapas finales en una turbina Savonius, puede aumentar considerablemente el coeficiente de potencia promedio. La turbina también funciona de manera más eficiente con relaciones de velocidad de punta más altas. Las tapas en los extremos de la turbina impiden que se escape de aire, desde el lado cóncavo de las

tapas hacia el exterior, manteniendo la diferencia de presión entre el lado cóncavo y convexo, de las tapas a niveles satisfactorios sobre la altura del rotor.

Para el tamaño óptimo de estos accesorios se recomienda un grosor despreciable, en relación con la altura de la turbina eólica. Para el diámetro de las tapas, el tamaño recomendado es equivalente a 1,1 veces el diámetro del rotor. Los diámetros muy altos para las tapas pueden aumentar dramáticamente la inercia del rotor. (Akwa et al., 2012, p. 3059)

Ilustración 17

Efecto de las tapas circulares en el rendimiento de un rotor Savonius



Fuente: Tomada de (Akwa et al., 2012)

5.9.5. Materiales de las aspas del aerogenerador Savonius

Para la estructura de los álabes se optará por utilizar un material que sea resistente, de buenas características mecánicas y liviano, de esta manera se le da rigidez con un bajo peso y sobre todo la seguridad de que el material resista cualquier período climático al que estará sometido.

5.9.6. Cálculo de la forma de los álabes

El aerogenerador Savonius es de arrastre, debido a que el viento ejerce sobre el rotor fuerzas de empuje y de frenado, lo que permite que este aerogenerador gire. Esta fuerza (F) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$F = C \left(\frac{1}{2} * \rho * A * \omega^2 \right) \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde:

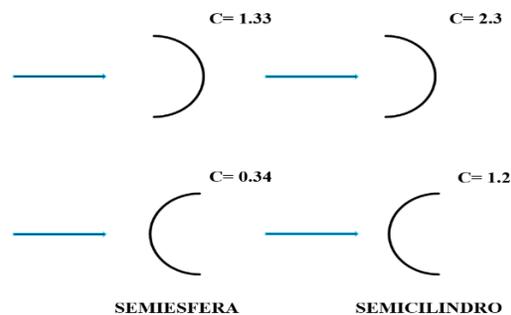
C = Coeficiente aerodinámico (según la geometría del cuerpo).

ω = Velocidad angular [Rad/s].

En la Ilustración 18 se muestra los valores del coeficiente aerodinámico correspondiente a una semiesfera y a un semicilindro.

Ilustración 18

Coeficientes aerodinámicos

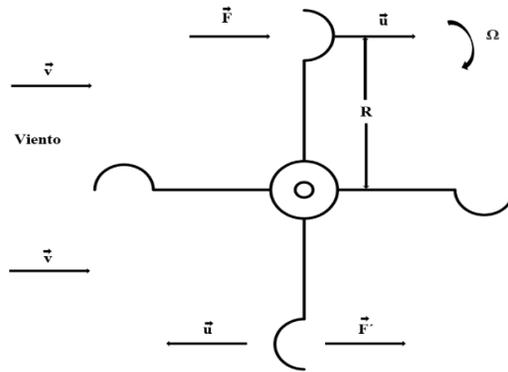


Fuente: (Villarrubia , 2012)

Como se puede apreciar en la Ilustración 19 la acción el viento origina fuerzas distintas en las partes cóncava y convexa de las cazoletas, lo que produce un par de fuerzas que hace girar el rotor. Debido a que la fuerza que origina el par, es la diferencia entre las fuerzas aerodinámicas que experimentan las partes cóncava y convexa de los álabes del rotor, este tipo de máquina recibe el nombre de eólica de arrastre diferencial (Valarezo, 2011).

Ilustración 19

Acción del viento sobre un rotor de arrastre diferencial



Fuente: (Valarezo, 2011)

El rotor gira con una velocidad de rotación (Ω), en donde el centro del álabe situado a una distancia del centro de giro (R), posee una velocidad lineal de las paletas (u), el cual queda representado por la siguiente ecuación:

$$u = \omega * R \quad \text{Ecuación 25}$$

5.9.7. Cálculo de la velocidad angular del rotor

Para determinar la velocidad angular del rotor se utilizará la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{TSR * v}{R} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

TSR = Velocidad en el extremo del álabe

5.9.8. Determinación del TSR y número de revoluciones del rotor

TSR (relación de velocidad de punta) indica que el perímetro de la pala circula a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad del viento, en este caso las palas funcionan por arrastre ya que la turbina es Savonius y el valor se determina con la siguiente ecuación:

$$TSR = \frac{\omega R}{v} \quad \text{Ecuación 27}$$

Para calcular el número de revoluciones del rotor (n) se realizará con la siguiente ecuación.

$$n = \frac{TSR * 60 * v}{2 * \pi * R} \quad \text{Ecuación 28}$$

5.9.9. Fuerza ascensional y arrastre

La fuerza ascensional (F_{asc}) y la fuerza de arrastre (F_{arr}) para el aerogenerador de tipo Savonius surgen por efecto Magnus; es decir que, el rotor frena al viento por una parte (sotavento), mientras lo acelera por lo contrario (barlovento), se expresan en unidades de (kg). En este caso la fuerza ascensional es aquella que actúa sobre un cuerpo debido a su movimiento a través de un fluido y la fuerza de arrastre es aquella que se opone al movimiento de un objeto, se definen mediante las siguientes ecuaciones:

$$F_{asc} = 1,08 * C_y * \rho * A * v^2 \quad \text{Ecuación 29}$$

$$F_{arr} = 1,08 * C_x * \rho * A * v^2 \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde:

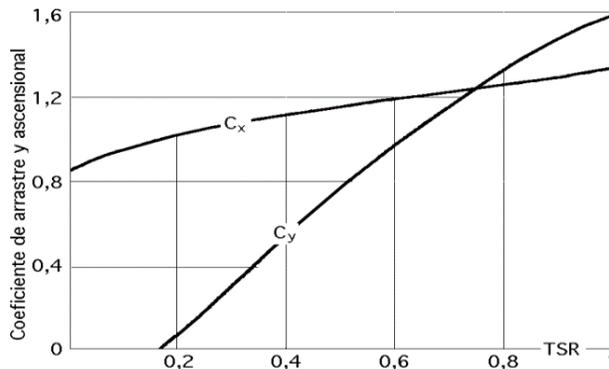
C_y = Coeficiente ascensional

C_x = Coeficiente de arrastre

Los coeficientes $C_y - C_x$ se los obtiene en función del TSR a partir de la Ilustración 20.

Ilustración 20

Coeficientes del rotor Savonius en función del TSR



Fuente: (Valarezo, 2011)

Una vez conseguidas estas dos fuerzas se obtiene la fuerza total (F_{total}), que es la carga general que tiene que absorber el soporte de la estructura, y que se encuentra definida por la siguiente ecuación:

$$F_{total} = \sqrt{F_{asc}^2 + F_{arr}^2} \quad \text{Ecuación 31}$$

Finalmente se determina el torque (τ) producido por la fuerza de arrastre a partir de la siguiente ecuación:

$$F_{arr} = \frac{2 * \tau}{R} \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde se despeja el torque, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{F_{arr} * R}{2} \quad \text{Ecuación 33}$$

5.9.10. Determinación de las fuerzas que actúan sobre los álabes

- **Fuerza del viento:** El viento ejecutará una fuerza sobre el álabe al toparse con él. Esta presión (P_{rev}) está determinada por la siguiente ecuación:

$$P_{rev} = \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad \text{Ecuación 34}$$

Cabe recalcar que este cálculo se lo debe realizar para la condición más crítica, es decir, para la velocidad máxima de viento que se puede encontrar en la zona de emplazamiento. Aunque se presenten estas velocidades ocasionalmente y no sean muy comunes, el aerogenerador deberá estar diseñado para soportar estas condiciones.

- **Fuerza centrífuga:** Debido al giro del aerogenerador se origina la fuerza centrífuga, la cual hace que los álabes tiendan a separarse del eje de rotación. Esta fuerza se la determina por medio de la siguiente ecuación:

$$F_c = m * \omega^2 * r_{cg} \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde:

F_c = Fuerza centrífuga en (N)

m = es la masa de los álabes en (kg)

r_{cg} = es el radio de rotación de los álabes en (m)

El valor de la masa se obtiene de acuerdo al material del cual están compuestos los álabes del aerogenerador, y para determinar esta fuerza se calcula el perímetro del álabe (P_a) determinado por la siguiente ecuación:

$$P_a = \frac{\pi * dp}{2} \quad \text{Ecuación 36}$$

Luego se calcula el área del álabe (A_a) con la siguiente ecuación:

$$A_a = P_a * H_a \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde:

H_a = Es la altura del álabe.

Luego se procede a calcular la masa de los álabes ($m_{\text{álabe}}$), teniendo en cuenta el peso que tiene el material del cual están compuestos, y se determina mediante la siguiente ecuación.

$$m_{\text{álabe}} = W * A_a \quad \text{Ecuación 38}$$

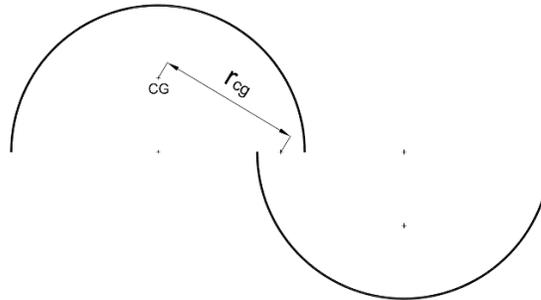
Donde:

W = es el peso del material del cual están compuestos los álabes en (N).

Una vez obtenida la masa de los álabes, se procede a calcular el radio de rotación de los álabes, para lo cual se deben hallar las componentes de la distancia del centro de giro al centro de masa del álabe (X_{cg}) y (Y_{cg}), como se puede apreciar en la Ilustración 21.

Ilustración 21

Distancia al centro de gravedad



Fuente: (El Autor)

Las componentes (X_{cg}) y (Y_{cg}) y el radio de rotación de los álabes (r_{cg}) se determinan con las siguientes ecuaciones:

$$X_{cg} = r_p - \frac{e}{2} \quad \text{Ecuación 39}$$

$$Y_{cg} = \frac{4 * r_p}{3 * \pi} \quad \text{Ecuación 40}$$

$$r_{cg} = \sqrt{X_{cg}^2 + Y_{cg}^2} \quad \text{Ecuación 41}$$

Donde:

r_p = es el radio de las palas

5.9.11. Diseño del eje principal

El eje principal del aerogenerador es el encargado de transmitir la potencia receptada por el viento hacia el generador de corriente eléctrica.

Para lo cual el eje está sujeto a cargas combinadas de torsión y flexión que se producen al momento en que el viento impacta con el eje, en el presente estudio se comprobará si el material seleccionado soporta las cargas antes mencionadas, siendo necesario determinar que el esfuerzo admisible de diseño sea mayor al esfuerzo cortante máximo de las cargas.

Para el desarrollo de esta investigación se ha seleccionado un material comúnmente utilizado para ejes que es el acero AISI-SAE 4340 (Defaz Vizcaino & Pallasco Yugsi, 2017), laminado en frío, resistente a la fatiga y rigidez, cuyas características se aprecia en el (Anexo 2)

5.9.12. Selección de los rodamientos

Los rodamientos son componentes mecánicos que sirven de unión entre dos elementos de un sistema, logrando un movimiento libre del rotor. Para el presente proyecto los rodamientos utilizados servirán de unión entre la estructura del soporte y el eje del aerogenerador, para ello se elegirá considerando algunos aspectos como: diámetro del eje, cargas a las que estarán sometidos, magnitud y dirección.

Las ecuaciones para realizar la evaluación de los rodamientos son las siguientes:

Carga dinámica equivalente: la carga dinámica se obtiene con la siguiente ecuación:

$$P_0 = (X_0 * F_r + Y_0 * F_a)(f_z) \quad \text{Ecuación 42}$$

Carga estática equivalente: esta carga se la obtiene con la siguiente ecuación:

$$P_0 = F_r \quad ; \quad \frac{F_a}{F_r} \leq 0,8 \quad \text{Ecuación 43}$$

$$P_0 = 0,6 * F_r + 0,5 * F_a \quad ; \quad \frac{F_a}{F_r} > 0,8 \quad \text{Ecuación 44}$$

Donde:

P_0 = Carga estática equivalente

F_r = Carga radial

F_a = Carga axial

X_0 = Factor radial

Y_0 = Factor axial

f_z = Factor de seguridad

5.9.13. Diseño del sistema de transmisión de potencia

Para la transmisión de potencia del aerogenerador Savonius se utilizará un sistema de transmisión de potencia conformado por engranajes, este método es necesario ya que la velocidad de giro del eje principal del aerogenerador es muy baja y por medio de este sistema se puede aumentar la velocidad de giro para que el generador funcione correctamente.

5.10. Dimensionamiento de los equipos eléctricos

Para la elección correcta de los equipos electrónicos se debe tener en cuenta el análisis de carga para el cual está destinado, en nuestro caso esta energía producida por el aerogenerador se va a utilizar para la iluminación exterior de laboratorio de energías renovables y se lo ejecuta con base en el tiempo de consumo por día.

Este dimensionamiento comprende lo siguiente:

➤ Generador.

Para la transformación de energía mecánica a eléctrica, es importante establecer el tipo de generador eléctrico, su función es convertir la energía mecánica producida por el rotor en energía eléctrica. El generador que se va a utilizar será un dinamo, para ello debemos considerar la capacidad de generación de la turbina eólica, ya que permite aprovechar las ráfagas de viento de velocidades mayores sin descuidar la eficiencia del mismo, ya que, a mayor capacidad de generación, el generador requiere de más torque de accionamiento.

➤ Inversor de corriente.

Los inversores tienen el propósito de adaptar las diferencias de la corriente generada a la demanda total o parcial de las aplicaciones. En el caso de la presente investigación, se tiene que las baterías trabajan en corriente continua y la demanda energética del laboratorio de energías renovables está en corriente alterna (iluminación exterior). Por lo tanto, se necesita de un inversor

que transforme la corriente continua en corriente alterna. Este equipo se lo selecciona en base a la potencia total de las cargas que las baterías alimentarán.

Para determinar la potencia necesaria del inversor se calcula con la siguiente ecuación:

$$Potencia\ inversor = \frac{\% \text{ de seguridad} * Carga\ neta}{Factor\ de\ potencia} \quad \text{Ecuación 45}$$

Donde:

% de seguridad recomendable = 1,25

Factor de potencia recomendable = 0,8

➤ **Regulador de carga.**

Para la elección de un regulador de carga se debe tomar en cuenta la capacidad de las baterías, ya que estos son elementos necesarios para el correcto funcionamiento de la instalación en cuanto a la unión del aerogenerador con la batería, debido a que su función es impedir que la batería continúe recibiendo energía del aerogenerador una vez que ésta haya alcanzado su carga máxima, esto es muy importante, caso contrario la batería podría empezar procesos de recalentamiento que disminuirían la vida de la misma, haciendo que en períodos posteriores reduzcan la capacidad de carga de la batería.

6. Resultados

En el presente apartado se analiza los valores obtenidos del recurso eólico a través de un análisis estadístico y la utilización de un *software* de georreferenciación, realizando una triangulación e interpolación IDW para estimar la velocidad de viento existente en la zona de estudio, así mismo se realiza el dimensionamiento del prototipo en base al recurso eólico calculado y demanda de potencia requerida, estableciendo la geometría correspondiente y asignando materiales resistentes y de bajo peso, con la finalidad de que el diseño sea liviano y por ende resulte eficiente, posteriormente se analiza los valores obtenidos de la simulación computacional para las diferentes velocidades de viento, con los valores obtenidos teóricamente del dimensionamiento del prototipo, con el fin de contrastar ambos resultados y comprobar si los resultados son satisfactorios, finalmente se analiza los costos correspondientes que tendría llevar a cabo la construcción de este sistema.

6.1. Presentación estadística de datos obtenidos de las fuentes de información

Para llevar a cabo el desarrollo de la presente investigación, se analizaron diversas fuentes de información para determinar el recurso eólico existente en la zona de emplazamiento, para ello se obtuvo datos del INAMHI correspondientes a los períodos 2015-2021, datos meteorológicos de la NASA POWER v2.0.0 correspondientes a los períodos 2015-2020, datos de la casa autosustentable de la FEIRNNR del período 2020-2021 y de igual manera información de tesis relacionadas al recurso eólico existente en la zona de estudio.

A continuación, en la Tabla 6 se presentan los promedios de la velocidad del viento de el INAMHI correspondientes al 2015-2020

Tabla 6

Datos de velocidad media y máxima del INAMHI correspondiente a los períodos 2015-2020

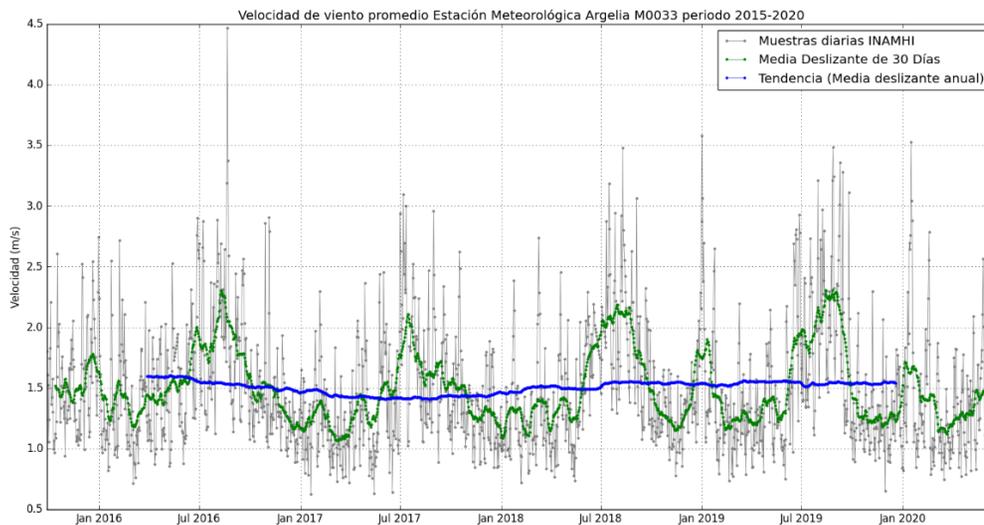
Datos meteorológicos estación la Argelia “M033” año 2015-2020					
Mes	Temperatura °C	Velocidad media m/s	Velocidad máxima m/s	Dirección Dominante	
Enero	16,27	1,43	8,78	179,25°	S
Febrero	16,34	1,28	8,74	173,56°	S
Marzo	16,48	1,24	8,36	162,94°	SSE
Abril	16,44	1,33	8,75	166,56°	SSE
Mayo	16,31	1,36	8,96	174,23°	S
Junio	15,92	1,68	10,40	178,73°	S
Julio	15,39	1,94	11,35	192,81°	SSW
Agosto	15,84	2,03	12,34	191,60°	SSW
Septiembre	16,34	1,75	10,95	173,65°	S
Octubre	16,35	1,38	9,30	161,91°	SSE
Noviembre	16,56	1,30	8,63	167,77°	SSE
Diciembre	16,18	1,41	8,91	174,39°	S
Promedio	16,20	1,52	9,63	174,79°	S

Fuente: (El Autor)

En las Ilustraciones (22-29) se ha realizado el análisis de los datos, utilizando el *software* de programación Python, el uso de la librería Pandas y el análisis de los datos mediante series temporales, todo esto se llevó a cabo mediante un script (ver Anexo 3) en los cuales claramente se puede observar que, las medias deslizantes de velocidad de viento aplicadas para este conjunto de datos, ocupan el mismo espacio que las muestras diarias, pero la curva es más suave porque se ha promediado una mayor variabilidad de frecuencia. Los picos y valles de las series temporales de media deslizante, tienden a alinearse estrechamente con los picos y valles de las series temporales diarias, mostrando de una mejor manera el comportamiento del viento en el transcurso del tiempo.

Ilustración 22

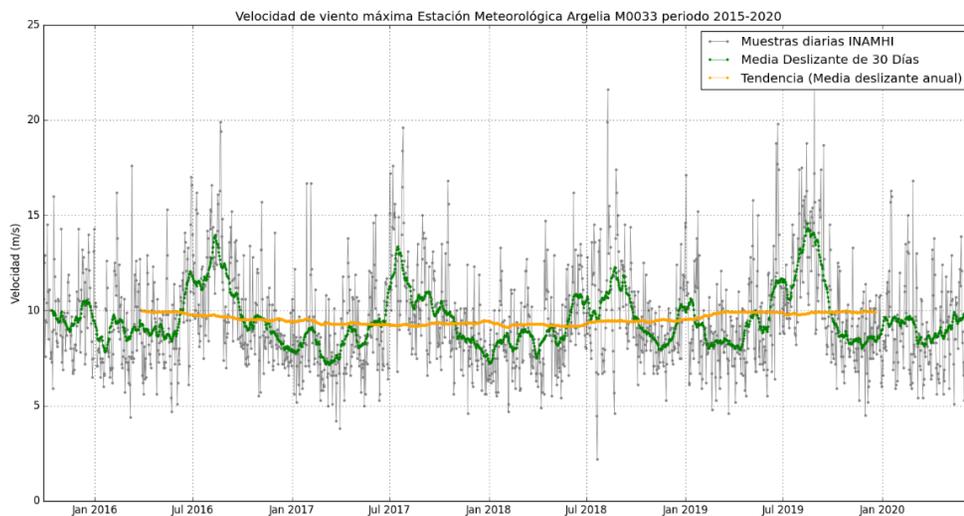
Velocidad de viento promedio estación meteorológica la Argelia período 2015-2020



Fuente: (El Autor)

Ilustración 23

Velocidad de viento máxima estación meteorológica la Argelia período 2015-2020



Fuente: (El Autor)

Así mismo en la Tabla 7 se presenta los datos de la velocidad del viento proporcionados por el visor de acceso a datos de la NASA POWER v2.0.0 correspondientes a los años 2015-2020

Tabla 7

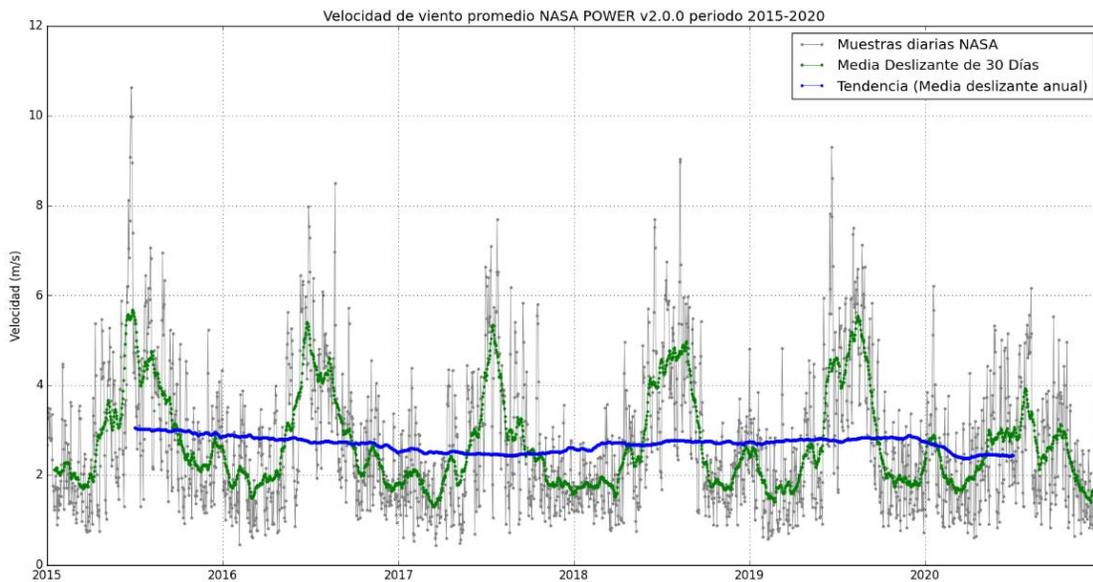
Velocidad de viento obtenida a través del visor de datos de la NASA período 2015-2020

Datos meteorológicos NASA POWER v2.0.0 período 2015-2020		
Mes	Velocidad promedio (m/s)	Velocidad máxima (m/s)
Enero	2,14	4,31
Febrero	1,9	4
Marzo	1,67	3,56
Abril	2,29	4,55
Mayo	2,62	5,13
Junio	4,1	7,07
Julio	4,24	7,46
Agosto	4,05	7,24
Septiembre	3,08	6,16
Octubre	2,25	4,66
Noviembre	1,95	4,13
Diciembre	2,04	4,26
Promedio	2,69	5,21

Fuente: (El Autor)

Ilustración 24

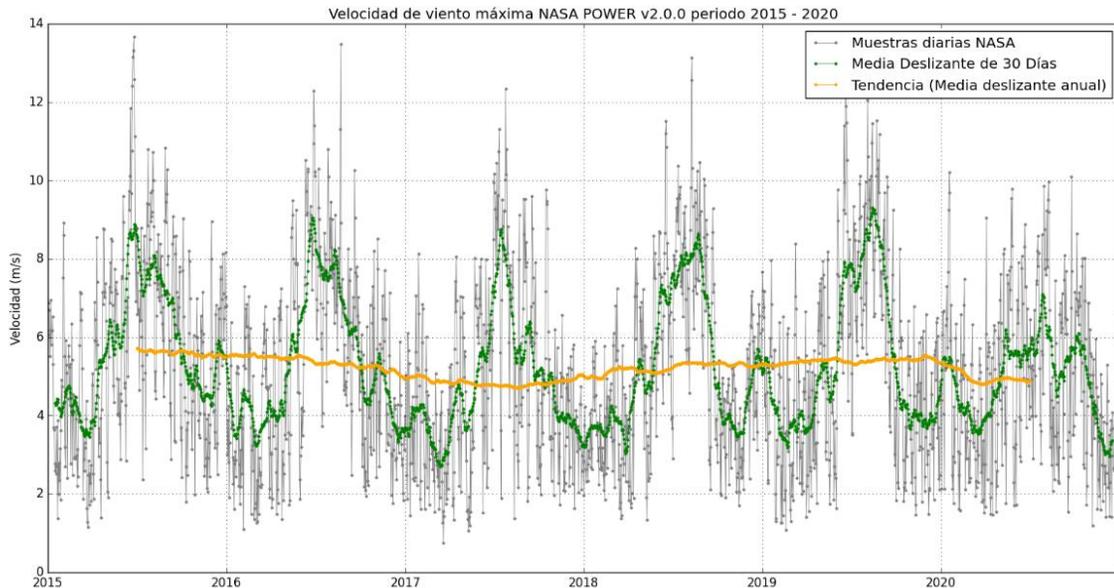
Velocidad de viento promedio del visor de datos de la NASA período 2015-2020



Fuente: (El Autor)

Ilustración 25

Velocidad de viento máxima del visor de datos de la NASA período 2015-2020



Fuente: (El Autor)

Seguidamente en la Tabla 8 se presenta los datos de velocidad de viento de un estudio realizado por (Ramón, 2017), en donde se muestra la velocidad existente para el período 2015-2016.

Tabla 8

Velocidad de viento casa autosustentable de la FEIRNNR período 2015-2016 (Tesis)

Mes	Velocidad promedio (m/s)	Velocidad máxima (m/s)	Dirección dominante.	
Noviembre	1,9	6,50	191,202°	SW
Diciembre	1,98	6,45	234,974°	S
Enero	2,15	7,00	188,146°	W
Febrero	2,8	7,50	204,676°	SW
Marzo	2,97	7,30	196,314°	W
Abril	3,50	7,51	195,643°	W
Mayo	3,65	7,65	212,779°	SW
Junio	3,6	8,15	214,007°	SW
Julio	4,00	9,03	214,415°	SW
Agosto	3,75	8,40	251,308°	S
Promedio	3,03	7,55	241,715°	SW

Fuente: (Ramón, 2017)

En la Tabla 9 se representa los datos de la velocidad del viento de la casa autosustentable de la FEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja correspondiente al período 2020-2021

Tabla 9

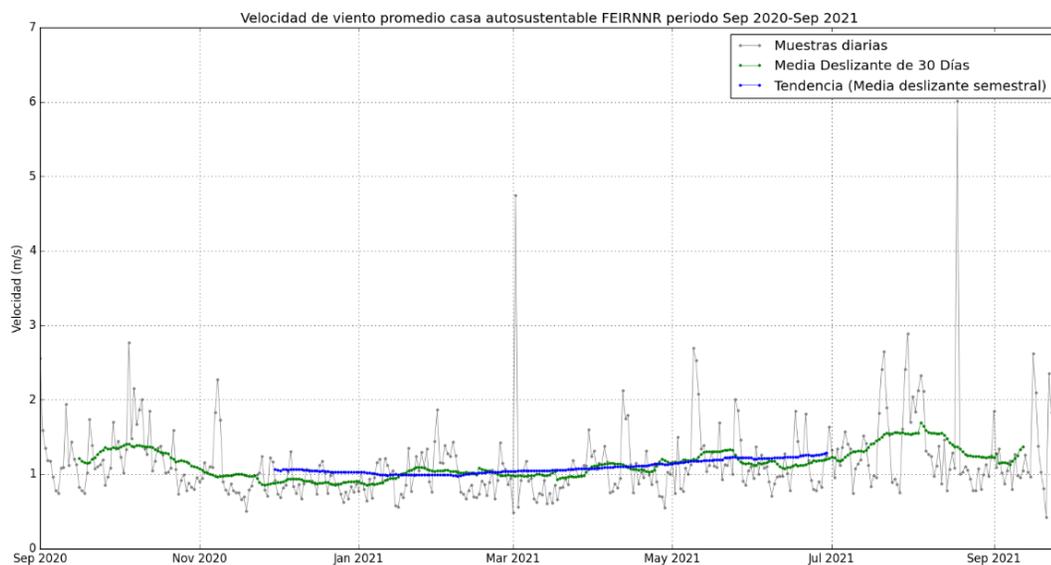
Velocidad de viento de la casa autosustentable de la FEIRNNR período 2020-2021

Datos eólicos casa autosustentable período 2020-2021		
Mes	Velocidad promedio (m/s)	Velocidad máxima (m/s)
Septiembre	1,21	3,5
Octubre	1,3	3,84
Noviembre	1,00	2,84
Diciembre	0,88	2,34
Enero	1,00	2,64
Febrero	0,98	2,65
Marzo	1,02	2,82
Abril	1,07	2,73
Mayo	1,30	3,74
Junio	1,11	2,91
Julio	1,41	4,32
Agosto	1,39	3,72
Septiembre	1,26	3,49
Promedio	1,15	3,19

Fuente: (El Autor)

Ilustración 26

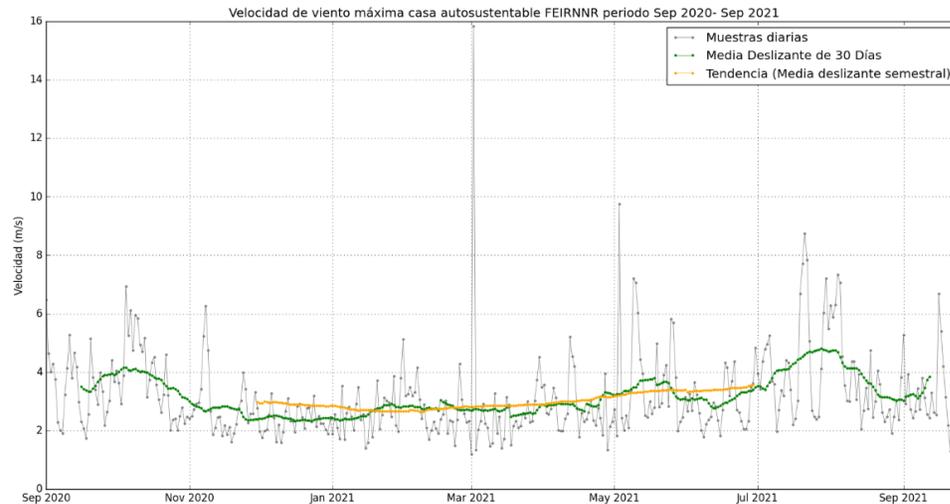
Velocidad de viento promedio de la casa autosustentable de la FEIRNNR período 2020-2021



Fuente: (El Autor)

Ilustración 27

Velocidad de viento máxima de la casa autosustentable de la FEIRNNR período 2020-2021



Fuente: (El Autor)

En la Tabla 10 se puede apreciar los promedios de velocidad de viento del INAMHI correspondiente al período 2020-2021

Tabla 10

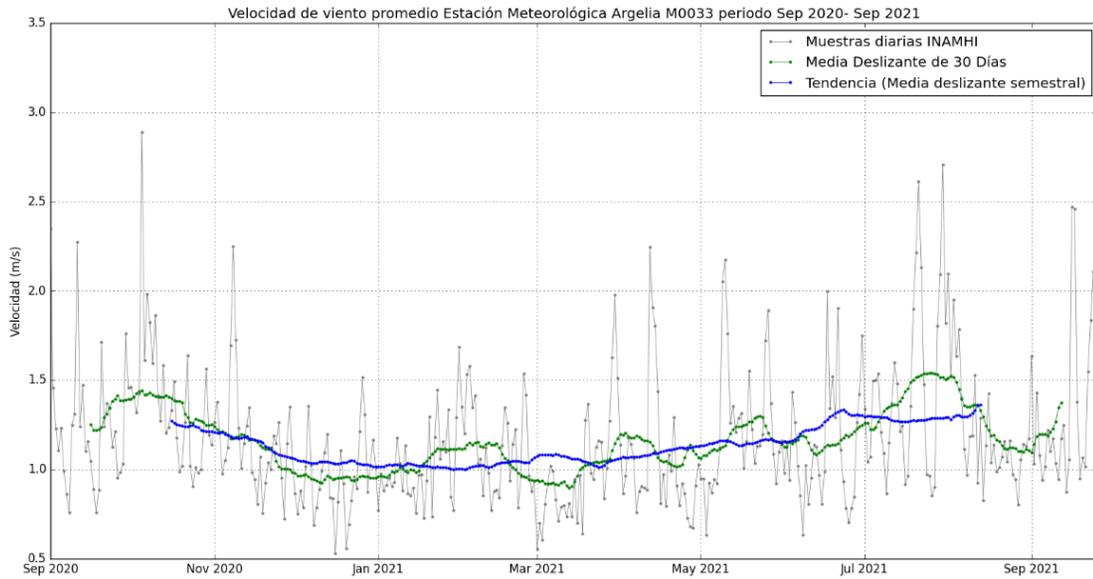
Velocidad de viento correspondiente al INAMHI período 2020-2021

Datos eólicos INAMHI período 2020-2021		
Mes	Velocidad promedio (m/s)	Velocidad máxima (m/s)
Septiembre	1,25	3,79
Octubre	1,39	4,19
Noviembre	1,17	3,03
Diciembre	1,00	2,53
Enero	1,01	2,62
Febrero	1,12	2,81
Marzo	0,96	2,26
Abril	1,05	2,68
Mayo	1,24	3,44
Junio	1,13	3,03
Julio	1,45	4,61
Agosto	1,22	3,82
Septiembre	1,41	4,16
Promedio	1,18	3,31

Fuente: (El Autor)

Ilustración 28

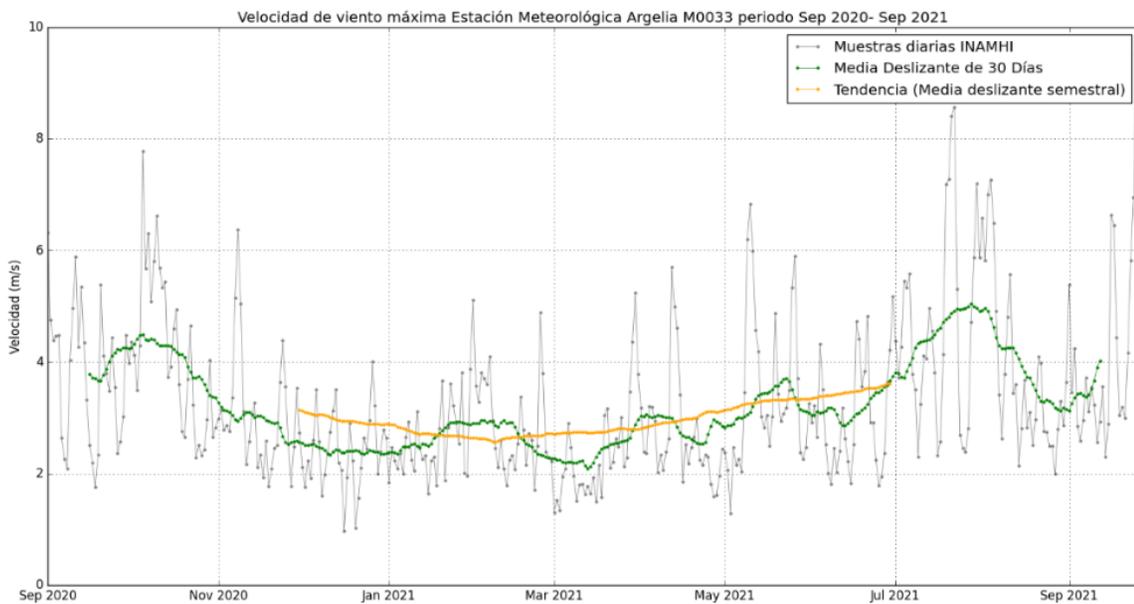
Velocidad de viento promedio estación meteorológica Argelia período 2020-2021



Fuente: (El Autor)

Ilustración 29

Velocidad de viento máxima estación meteorológica Argelia período 2020-2021



Fuente: (El Autor)

Finalmente, en la Tabla 11 se muestra los valores de velocidad del viento (promedio y máxima) correspondientes a las diferentes fuentes de información.

Tabla 11

Velocidad de viento promedio y máxima obtenidas de las diferentes fuentes de información

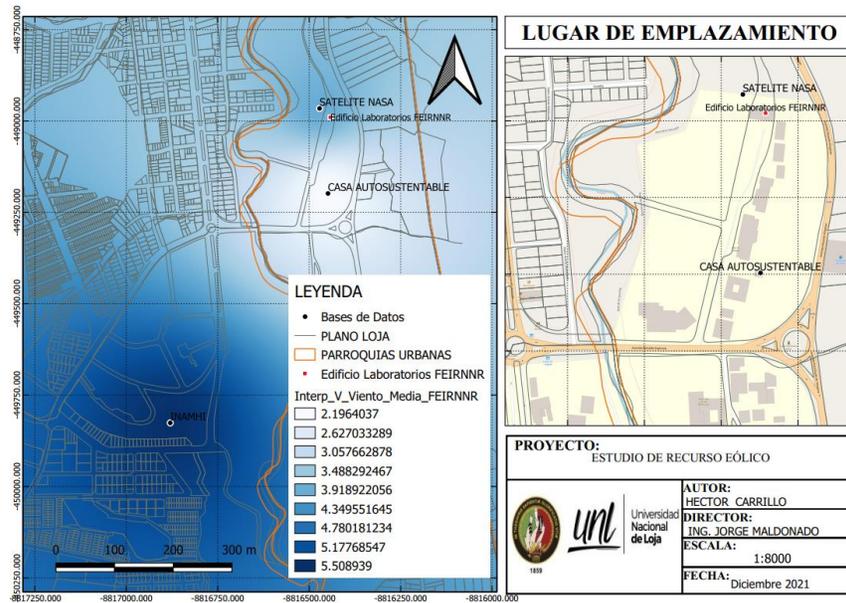
Fuentes	Velocidad promedio (m/s)	Velocidad máxima (m/s)
Datos INAMHI 2015-2020	1,52	9,63
Datos Meteorológicos NASA 2015-2020	2,69	5,21
Datos tesis Juan Javier Ramón Segarra 2015-2016	3,03	7,55
Datos casa autosustentable FEIRNNR 2020-2021	1,15	3,19
Datos INAMHI 2020-2021	1,18	3,31

Fuente: (El Autor)

Una vez conocidas las velocidades de viento existentes y cercanas a la zona de estudio, se procede a realizar una interpolación IDW a través del *software* QGIS, que consiste en interpolar valores desconocidos de un punto en específico con los valores más cercanos, de tal manera que cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia tendrá en el proceso de cálculo del promedio, en la Ilustración 30 se muestra los puntos de las diferentes bases de datos.

Ilustración 30

Bases de datos de las diferentes fuentes de información

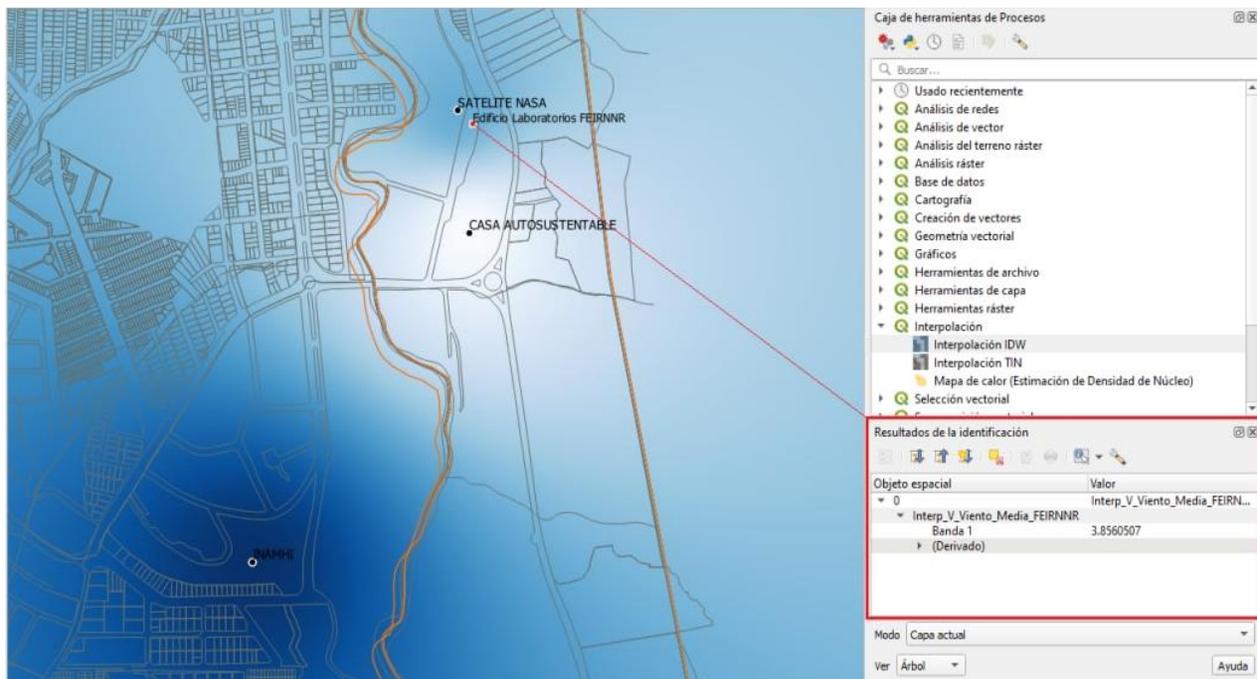


Fuente: (El Autor)

Una vez que se ha ingresado los datos de las fuentes de información al *software* QGIS, se procede a realizar la interpolación IDW para el punto en específico que es el edificio de laboratorios de la FEIRNNR, obteniendo una velocidad de viento promedio de 3,85 m/s, tal como se indica en la Ilustración 31, cabe mencionar que este valor de velocidad de viento corresponde para una altura de 10m ya que los datos analizados corresponden para dicha altura.

Ilustración 31

Velocidad de viento estimada en el lugar de emplazamiento



Fuente: (El Autor)

6.2. Extrapolar de la velocidad del viento

Como se mencionó anteriormente el lugar de estudio es el edificio del laboratorio de la FEIRNNR (ver Ilustración 32) en donde estará ubicado el aerogenerador, por lo cual los datos de velocidad de viento antes encontrados corresponden para una altura de 10m, por lo cual se requiere extrapolar dicha velocidad de viento ya que el sitio donde irá ubicada la turbina será la terraza del edificio, la cual tiene una altura equivalente a 20m, por tal razón es necesario dicha extrapolación del viento para la nueva altura.

Ilustración 32

Edificio de energías renovables de la FEIRNNR



Fuente: (El Autor)

Para determinar la velocidad del viento a una altura determinada sobre la superficie se utilizó el perfil logarítmico (Ecuación 3), perfil exponencial (Ecuación 4) y el coeficiente para condiciones atmosféricas neutras ($\alpha = 1/7$).

Para el desarrollo de este proyecto, de la Tabla 2 se tomó la clase de rugosidad equivalente a 3 donde se encuentran pueblos, ciudades pequeñas, terrenos agrícolas con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terrenos accidentados y muy desigual. La longitud de rugosidad corresponde a $Z_0 = 0,4$ m y el índice de energía representa el 24 %.

Con el valor de $Z_0 = 0,4$ m se obtiene de la Ecuación 5 un valor para $\alpha = 0,20587$. Con $Z_r = 10$ m como punto de referencia de la toma de datos y $V(Z_r) = 3,85$ m/s. Con estos valores en la Tabla 12 se obtiene los datos para el modelo logarítmico y potencial.

Tabla 12

Valores perfil de velocidad de viento para los modelos logarítmico y potencial

Altura (m)	Tipo de Modelo		
	Logarítmico ($Z_0=0,4$)	Potencial ($Z_0=0,4$)	Potencial (Atmósfera Neutra =1/7)
0	0	0	0
10	3,85	3,85	3,85
15	4,33	4,19	4,08
20	4,68	4,44	4,25
25	4,95	4,65	4,39
30	5,16	4,83	4,50
35	5,35	4,98	4,60
40	5,51	5,12	4,69

Fuente: (El Autor)

Mediante el uso de la Ecuación 3 se obtiene la variación de velocidad de viento con respecto a la altura, para este caso la rugosidad se establece como $z_0 = 0,4$ de acuerdo a la Tabla 2.

$$v(z) = (3,85 \text{ m/s}) * \frac{\ln\left(\frac{20 \text{ m}}{0,4}\right)}{\ln\left(\frac{10 \text{ m}}{0,4}\right)}$$

$$v(z) = 4,68 \text{ m/s}$$

Obteniendo la velocidad de viento entre la velocidad promedio y máxima, obtenemos que a 20m de altura la velocidad del viento representa un valor de 4,68 m/s, esta velocidad de viento será utilizada con fines de aprovechamiento energético.

En la Tabla 12 se muestra los perfiles de velocidad del viento extrapolado, para lo cual para el primero y segundo modelo se utilizó una longitud de rugosidad equivalente a $Z_0 = 0,4$ m, para con ello determinar una altura de rugosidad (α). Para el tercer caso se utilizó una altura de rugosidad para condiciones atmosféricas neutras equivalente a $\alpha = 1/7$. Para este caso se trabajará

con el modelo logarítmico que representa datos más acercados a la realidad, ya que se considera la clase y longitud de rugosidad del terreno donde se realizará la investigación.

6.3. Determinación de la velocidad de diseño

Para el diseño de los componentes del aerogenerador Savonius es necesario conocer la velocidad máxima, de esta manera se diseña las piezas para que resistan las condiciones a las que se van a encontrar sometidas, por tal razón se procede a extrapolar la velocidad máxima encontrada en los datos proporcionados del INAMHI correspondientes a los años 2015-2020 ,obteniendo una velocidad máxima de 9,63 m/s, con esta velocidad se obtiene una velocidad máxima de diseño correspondiente a:

$$v(z) = (9,63 \text{ m/s}) * \frac{\ln\left(\frac{20 \text{ m}}{0,4}\right)}{\ln\left(\frac{10 \text{ m}}{0,4}\right)}$$

$$v(z) = 11,70 \text{ m/s}$$

Este nuevo valor de velocidad corresponde a la velocidad de diseño que va a estar expuesto el prototipo, el cual servirá para calcular que los componentes empleados resistan dichas condiciones.

6.4. Iluminación y elección de las luminarias LED

Mediante el uso del *software* "DIALux evo" se lleva a cabo la simulación de iluminación en el exterior del laboratorio de energías renovables de la FEIRNNR, para lo cual se ha tomado como referencia de la Tabla 5 la iluminación correspondiente a 20 Lux (Pasillos, patios y lugares de paso), determinando que se requiere 7 lámparas LED de 25,4 W de potencia necesarias para cumplir los niveles de iluminación requeridos, las cuales fueron colocadas a una altura de 4 m desde el piso de la losa, y distribuidas equitativamente con el fin de cubrir el área total de

iluminación tal como se indica en la Ilustración 33, las características de las luminarias utilizadas se muestran en el (Anexo 4), y el diagrama de conexión del sistema de iluminación en el (Anexo5)

Ilustración 33

Distribución de las luminarias LED para la iluminación exterior del laboratorio

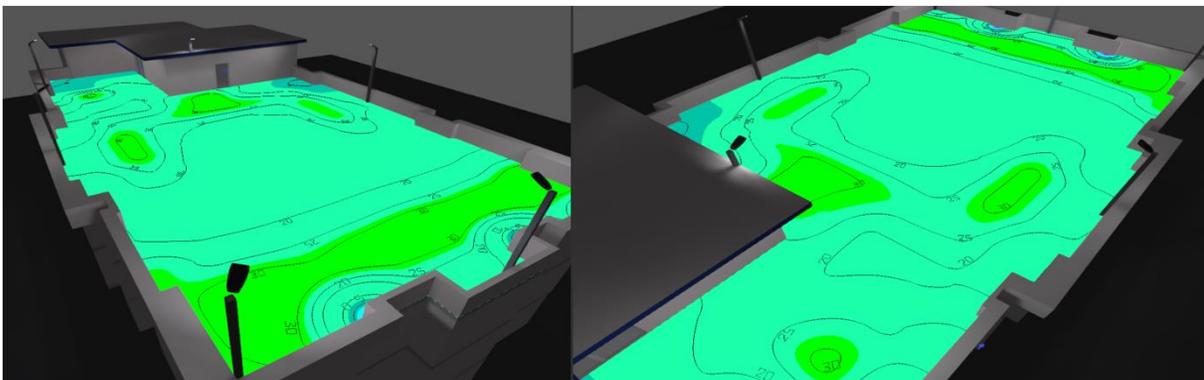


Fuente: (El Autor)

Se obtuvo un promedio de 21,7 luxes (ver Anexo 6), para ello, las lámparas fueron ubicadas con un ángulo de enfoque de 30°, en esa ubicación se pudo conseguir un área mejor iluminada y proporcionalmente copada de luminosidad, como se muestra en la Ilustración 34 las isolíneas y colores falsos indican la cantidad de luxes emitidas en toda el área las cuales satisfacen con la iluminación requerida.

Ilustración 34

Isolíneas y colores falsos de la iluminación exterior del edificio



Fuente: (El Autor)

6.5. Demanda de potencia requerida

Una vez determinadas las luminarias que se requiere para satisfacer la demanda requerida, se realiza el cálculo de la demanda de potencia, en la Tabla 13 se muestra la potencia que se requiere de acuerdo a las horas de funcionamiento del sistema.

Tabla 13

Demanda de potencia requerida para la iluminación exterior del laboratorio

Elemento	Potencia (W)	Cantidad	Hora/Día (h/día)	Energía (Wh/día)	Energía (Wh/año)	% de consumo
Luminaria	25,4	7	1	177,8	64.897	100
Total				177,8	64.897	100

Fuente: (El Autor)

Como se puede apreciar en la Tabla 13 la potencia necesaria para las luminarias es de 25,4 W cada una, lo que representa un consumo de potencia de 177,8 Wh/día por 1 hora de funcionamiento del sistema. Adicionalmente se considera aplicar un 10% o más de la energía necesaria para evitar trabajar al límite tal como lo recomienda la (AMCOP, 2017), con esto la demanda requerida será de 195 Wh/día.

6.6. Cálculo de la potencia total extraída

Primeramente, se procede a calcular la capacidad de la batería conociendo la carga que va alimentar, para ello se procede a utilizar la Ecuación 11 con lo que se determina la energía entregada.

$$E_e = D_a * Consumo\ diario$$

$$E_e = 3\ dias * 195,6\ Wh/día$$

$$E_e = 586,8\ Wh$$

A continuación, se calcula la energía almacenada para una profundidad de descarga del 50% por medio de la Ecuación 12.

$$E_a = \frac{E_e}{PD}$$

$$E_a = \frac{586,8 \text{ Wh}}{0,5} = 1173,6 \text{ Wh}$$

Posteriormente se determina la capacidad necesaria de la batería con la Ecuación 13.

$$S_t = \frac{E_a}{V}$$

$$S_t = \frac{1173,6 \text{ Wh}}{12 \text{ V}} = 97,8 \text{ Ah}$$

Para satisfacer la demanda requerida se necesita una batería de 97,8 Ah, pero debido a que en el mercado no existe una batería de esa capacidad se selecciona una batería superior correspondiente a 100 Ah, las características de la batería se muestran en el (Anexo 7)

6.7. Propuesta de diseño del aerogenerador Savonius

Se propone un prototipo de turbina de eje vertical de tipo Savonius debido a que en la zona de emplazamiento las velocidades de viento son bajas y este tipo de turbina es la mejor que se adapta para llevar a cabo la presente investigación.

Según investigaciones como (Zemamou et al., 2017) y (Lorena et al., 2021) es recomendable que para una turbina de tipo Savonius sea de dos álabes de pasaje abierto, ya que este perfil presenta mejores resultados en la eficiencia y estabilidad del diseño, por lo que se propone que el prototipo planteado tenga la misma configuración.

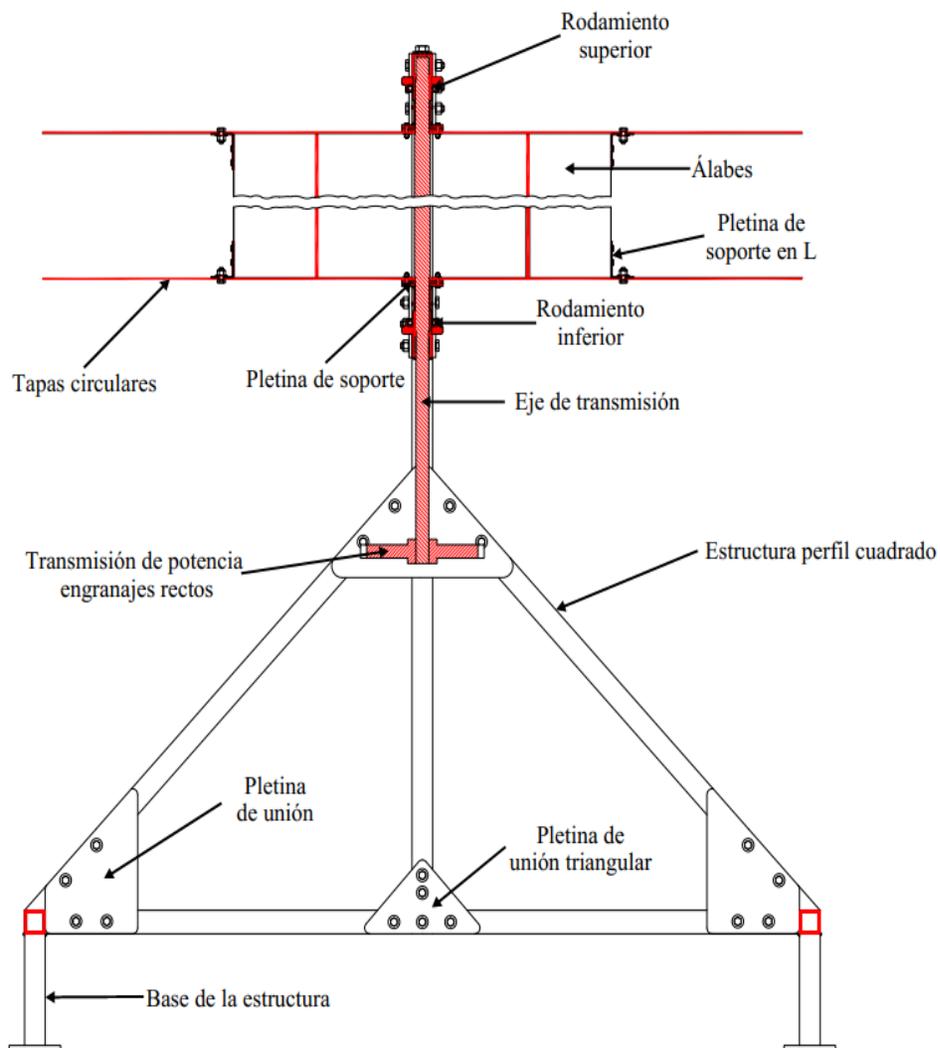
El prototipo contará de dos álabes de forma semicircular, los cuales estarán unidos por tapas circulares a un soporte de tipo pletina, los cuales asegurarán los perfiles y la rigidez de los elementos mecánicos, así mismo el eje del prototipo será de acero y tendrá rodamientos tanto en la parte superior e inferior, para de esta manera facilitar la rotación del mismo.

La estructura propuesta para el prototipo se plantea que sea de acero estructural AISI/SAE 1020 (perfil cuadrado 40x40x4mm) lo cual garantiza firmeza y permitirá su fácil ubicación en la azotea del edificio de laboratorios de la FEIRNNR.

En la Ilustración 35 se muestra una representación general de la propuesta de diseño que se plantea, en donde se detallan las principales partes que lo conforman.

Ilustración 35

Propuesta de diseño del aerogenerador Savonius



Fuente: (El Autor)

6.7. Dimensionamiento del rotor

Se realizan todos los cálculos necesarios para el dimensionamiento de los componentes del aerogenerador de tipo Savonius.

Primeramente, se procede a obtener la densidad del aire, en el (Anexo 8) se realizó una interpolación para determinar el valor de la densidad del aire para una temperatura de 16,20°C, valor de temperatura promedio correspondiente al registrado en los últimos años cuyo valor de densidad es 1,220 kg/m³.

Posteriormente se obtendrá el rendimiento total del conjunto, para lo cual se asigna un valor de rendimiento mecánico ($\eta_m = 0,90$) debido a que existe pérdidas en la transmisión de potencia y un rendimiento eléctrico de ($\eta_e = 0,95$) ya que existe pérdidas en el generador (Pazmiño y Silva, 2010) por lo tanto, reemplazando estos valores en la (Ecuación 17) se obtiene:

$$\begin{aligned}\eta_t &= \eta_m * \eta_e \\ \eta_t &= 0,90 \% * 0,95 \% \\ \eta_t &= 0,855 \%\end{aligned}$$

Luego de haber obtenido la eficiencia total del conjunto se procede a las dimensiones que tendrá el rotor, en este caso se calculará el área que tendrá el rotor de acuerdo a la demanda requerida de potencia (ver Tabla 13).

6.8. Geometría de los álabes del aerogenerador

Para el desarrollo del presente proyecto se escogió un diseño de dos palas de pasaje abierto. Según varios autores como por ejemplo (Zemamou et al., 2017) y (Lorena et al., 2021) recomiendan utilizar este tipo de rotor debido a que si afecta el rendimiento de la turbina y se ha determinado que el número óptimo para este tipo de rotores es dos álabes. Esto, porque con dos

álabes se consigue un mayor coeficiente de potencia que con un rotor de tres álabes. La razón es que aumentar el número de álabes aumenta a su vez el tamaño de la superficie de arrastre, lo que hace que incremente el par inverso que conduce a disminuir el par neto en los álabes de la turbina.

6.9. Cálculo de la potencia total extraída.

Mediante el uso de la Ecuación 20 se procede a calcular el área que deberá poseer el rotor.

$$A = \frac{2 * P_t}{\rho * v^3 * C_p * \eta_t}$$

$$A = \frac{2 * 195,6 W}{1,22 kg/m^3 * (4,68 m/s)^3 * 0,2 * 0,855}$$

$$A = 18,29 m^2$$

Debido a que el área del rotor es considerablemente grande para generar la potencia requerida, y teniendo en cuenta que en el lugar de estudio las velocidades de viento son bajas, se procede a dimensionar el rotor considerando 1/10 del área total de barrido, quedando un valor correspondiente a $1,8 m^2$, con esta área de barrido se procede a dimensionar el rotor.

Seguidamente se debe tener en cuenta que debe de existir una simetría en el diseño, se considera que la altura debe ser igual al diámetro o base, para ello con la Ecuación 21 se procede a calcular la base y altura del rotor conociendo que el área de barrido es igual a $1,8 m^2$.

$$h = b = \sqrt{A}$$

$$h = b = \sqrt{1,8 m^2}$$

$$h = b = 1,342 m$$

Conociendo el área del rotor se procede a calcular la potencia que produciría en esas condiciones, con la ayuda de la Ecuación 18 se tiene que la potencia generada es igual a:

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

$$P_t = 0,855 * 0,2 * \frac{1}{2} * 1,220 \text{ kg/m}^3 * 1,8 \text{ m}^2 * (4,68 \text{ m/s})^3$$

$$P_t = 19,25 \text{ W}$$

Con los valores de dimensionamiento del rotor se debe calcular el diámetro de las palas y la abertura, para ello se utilizará la (Ecuación 22) y (Ecuación 23).

$$b = \left(d_p - \frac{e}{2}\right) * 2 \quad \rightarrow \quad e = \frac{d_p}{6}$$

$$b = 2d_p - e$$

$$b = 2d_p - \frac{d_p}{6} = \frac{12d_p - d_p}{6} = \frac{11d_p}{6}$$

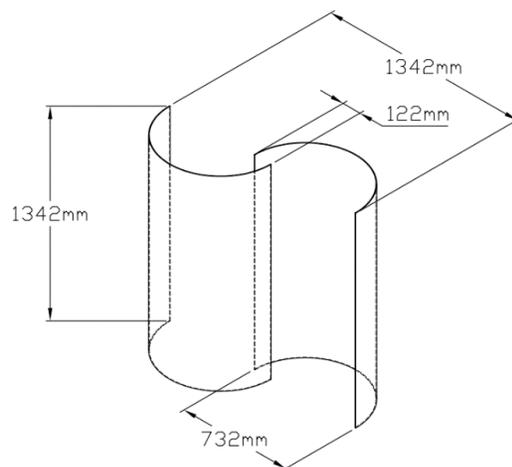
$$d_p = \frac{6 * b}{11} = \frac{6 * 1,342 \text{ m}}{11} = 0,732 \text{ m}$$

$$e = \frac{d_p}{6} = \frac{0,732}{6} = 0,122 \text{ m} = 12,2 \text{ cm}$$

En la Ilustración 36 se muestra las dimensiones correspondientes de los álabes del rotor.

Ilustración 36

Dimensiones de los álabes del aerogenerador



Fuente: (El Autor)

6.10. Diseño de las tapas circulares del aerogenerador

Como se mencionó anteriormente para el diseño de las tapas circulares que conforman el aerogenerador, según (Menet, 2004) se considera que el tamaño recomendado sea de 1,1 veces el diámetro del rotor (10%), el espesor de estos componentes será de 4 mm, por lo tanto, el diámetro quedará de la siguiente manera:

$$D_{tapas} = 1,1 * D_{aerog}$$

$$D_{tapas} = 1,1 * 1,342 \text{ m}$$

$$D_{tapas} = 1,4762 \text{ m}$$

Este procedimiento es recomendable realizarlo, ya que al considerar un mayor diámetro a las tapas circulares se provocaría aumento de inercia en el rotor.

6.11. Selección del material para los álabes y tapas circulares del aerogenerador

Un aspecto importante que se debe tener en cuenta para llevar a cabo el diseño del rotor es la correcta selección del material ya que se debe considerar como elemento importante el peso que tendrá ya que afecta al desempeño y la vida útil del mismo.

También se debe considerar que en el lugar de emplazamiento el dispositivo va a estar sometido a distintos cambios climáticos que afectan en gran medida la vida útil del prototipo, para ello existe una gran variedad de materiales que se pueden utilizar para el diseño del aerogenerador, por tal razón se debe elegir un material resistente con buenas características y así mismo que sea lo más liviano posible, con ello se garantiza la vida útil del prototipo, en la Tabla 14 se muestra algunas propiedades de diferentes materiales que se pueden utilizar para el aerogenerador.

Tabla 14*Propiedades mecánicas de diferentes tipos de materiales para el diseño del rotor*

Material	Propiedades mecánicas	Densidad
Acero inoxidable 304 (e = 0,40 - 15 mm)	Resistencia a la tracción: 515 MPa Límite elástico: 205 MPa Módulo de tracción: 193-200 GPa Resistencia a la tracción: 150MPa	7850 kg/m ³
Aleación de aluminio 3105 (e = 0,2 - 3mm)	Límite elástico: 130MPa Esfuerzo cortante: 97 MPa Módulo de tracción: 70-80 GPa	2,7 kg/m ³
Lámina galvanizada A653 (e = 0,3 - 3 mm)	Resistencia a la tracción: 100-155 MPa Límite elástico: 40 MPa	7850 kg/m ³
Acrílico (PMMA) (e = 4mm)	Resistencia a la tracción: 65 MPa Límite elástico: 48 MPa	1190 kg/m ³

Fuente: (El Autor)

Se debe considerar que el aerogenerador sea lo más liviano posible, para ello la mejor opción que se tiene es utilizar la lámina de acrílico PMMA (metacrilato de metilo) de espesor de 4mm, que se utilizará tanto para los álabes como para las tapas circulares del rotor, en el (Anexo 9) se muestran las características del acrílico a utilizar. Una vez seleccionado el material, conociendo las propiedades mecánicas, y dimensiones, en la Tabla 15 se procede a calcular la masa total tanto de los álabes como de las tapas circulares.

Tabla 15*Masa total de los álabes y tapas circulares del aerogenerador*

<i>Peso de las tapas circulares del aerogenerador</i>	
Dimensiones	Diámetro = 1,4762 m; espesor = 4 mm
Volumen	$v = \pi * r^2 * e$ $v = 6,85 \times 10^{-3} m^3$
Densidad	1190 kg/m ³
Masa	8,15 kg x 2 = 16,3 kg
<i>Peso de las aspas del aerogenerador</i>	
Dimensiones	Longitud = 1,1498 m; espesor = 4 mm; altura = 1,342 m
Volumen	$v = l * e * h$ $v = 6,17 \times 10^{-3} m^3$
Densidad	1190 kg/m ³
Masa	7,34 kg x 2 = 14,68 kg
Masa total	30,98 kg

Fuente: (El Autor)

6.12. Cálculo de la velocidad angular del rotor

$$\omega = \frac{TSR * v}{R}$$
$$\omega = \frac{0,8 * 4,68 \text{ m/s}}{0,671}$$
$$5,58 \text{ rad/s}$$

6.13. Determinación del número de revoluciones del rotor

Luego de obtener la velocidad angular se procede a calcular las revoluciones por minuto a las que se encuentra girando el rotor, y se lo determina con la (Ecuación 28).

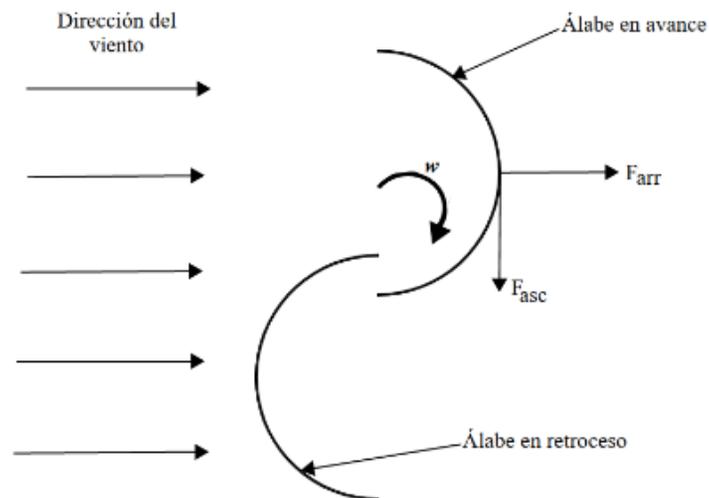
$$n = \frac{TSR * 60 * v}{2 * \pi * R}$$
$$n = \frac{0,8 * 60 * 4,68 \text{ m/s}}{2\pi * 0,671} = 53 \text{ rpm}$$

6.14. Cálculo de la fuerza ascensional y de arrastre

Se procede a calcular la fuerza ascensional y fuerza de arrastre en el rotor Savonius, en la Ilustración 37 se muestra el comportamiento de estas fuerzas.

Ilustración 37

Fuerza ascensional y fuerza de arrastre del rotor Savonius



Fuente: (El Autor)

Primeramente, se debe escoger los coeficientes C_y y C_x en función del TSR ($\lambda=0,8$) de la Ilustración 20.

$$C_y = 1,4$$

$$C_x = 1,3$$

A partir de la (Ecuación 29) se calcula la fuerza ascensional:

$$F_{asc} = 1,08 * C_y * \rho * A * v^2$$

$$F_{asc} = 1,08 * 1,4 * 1,220 \text{ kg/m}^3 * 1,8 \text{ m}^2 * (4,68 \text{ m/s})^2$$

$$F_{asc} = 72,72 \text{ kg}$$

A partir de la (Ecuación 30) se calcula la fuerza de arrastre:

$$F_{arr} = 1,08 * C_x * \rho * A * v^2$$

$$F_{arr} = 1,08 * 1,3 * 1,220 \text{ kg/m}^3 * 1,8 \text{ m}^2 * (4,68 \text{ m/s})^2$$

$$F_{arr} = 67,5 \text{ kg}$$

Una vez conseguidas estas dos fuerzas se obtiene la fuerza total, que es la carga general que tiene que absorber el soporte de la estructura, definida por la (Ecuación 31):

$$F_{total} = \sqrt{F_{asc}^2 + F_{arr}^2}$$

$$F_{total} = \sqrt{(72,72 \text{ kg})^2 + (67,5 \text{ kg})^2}$$

$$F_{total} = 99,22 \text{ kg}$$

Luego se procede a sacar el torque producido por la fuerza de arrastre de la (Ecuación 33).

$$\tau = \frac{F_{arr} * R}{2}$$

$$\tau = \frac{67,5 \text{ kg} * 0,671 \text{ m}}{2} = 22,65 \text{ kg m}$$

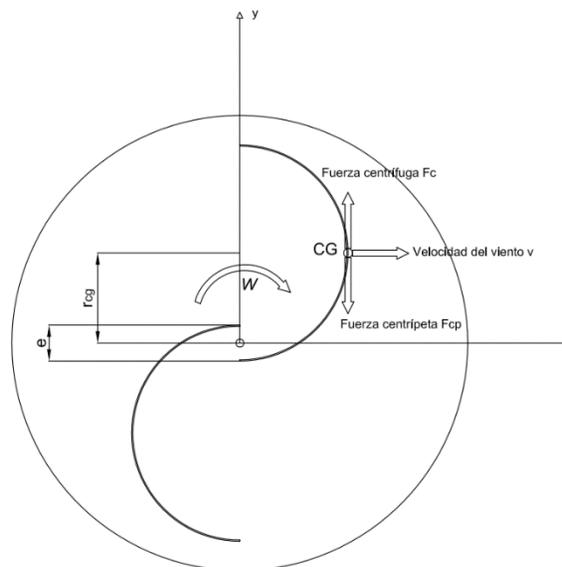
$$22,65 \text{ kg m} \left(\frac{9,80665 \text{ Nm}}{1 \text{ kg m}} \right) = 222,12 \text{ Nm}$$

6.15. Determinación de las fuerzas que actúan sobre los álabes

- Fuerza del viento:** Con la (Ecuación 34) se procede a calcular fuerza que actúa en el álabe al entrar en contacto con el viento, en esta ocasión se considera la velocidad máxima a los 20 m de altura equivalente a 11,70 m/s, aunque sean velocidades ocasionales el aerogenerador debe estar diseñado para soportar estas condiciones. En la Ilustración 38 se muestra las fuerzas que actúan en los álabes del aerogenerador.

Ilustración 38

Fuerzas que actúan en los álabes del aerogenerador



Fuente: (El Autor)

$$P_{rev} = \frac{1}{2} * \rho * v^2$$

$$P_{rev} = \frac{1}{2} * 1,220 \text{ kg/m}^3 * (11,70 \text{ m/s})^2$$

$$P_{rev} = 83,50 \text{ Pa}$$

Para el perímetro del álabe se calcula con la (Ecuación 36) y su valor es:

$$P_a = \frac{\pi * dp}{2}$$

$$P_a = \frac{\pi * 0,732 \text{ m}}{2} = 1,15 \text{ m}$$

El área del álabe se calcula con la (Ecuación 37) y su valor corresponde a:

$$A_a = P_a * H_a$$

$$A_a = 1,15 \text{ m} * 1,342 \text{ m} = 1,5433 \text{ m}^2$$

Para obtener el radio de rotación de los álabes (r_{cg}) primero se encuentra sus componentes (X_{cg}) y (Y_{cg}) determinadas por la (Ecuación 39) y (Ecuación 40), cuyos valores corresponden a:

$$X_{cg} = r_p - \frac{e}{2}$$

$$X_{cg} = 0,366 \text{ m} - \frac{0,122 \text{ m}}{2} = 0,305 \text{ m}$$

$$Y_{cg} = \frac{4 * r_p}{3 * \pi}$$

$$Y_{cg} = \frac{4 * 0,366 \text{ m}}{3 * \pi} = 0,16 \text{ m}$$

Se procede a calcular la velocidad angular (ω) para una velocidad máxima de 11,70 m/s cuyo valor corresponde a:

$$\omega = \frac{\lambda * v}{r}$$

$$\omega = \frac{0,8 * 11,70 \text{ m/s}}{0,671 \text{ m}} = 13,95 \text{ rad/s}$$

El radio de rotación de los álabes (r_{cg}) será igual a:

$$r_{cg} = \sqrt{X_{cg}^2 + Y_{cg}^2}$$

$$r_{cg} = \sqrt{(0,305 \text{ m})^2 + (0,16 \text{ m})^2}$$

$$r_{cg} = 0,344 \text{ m}$$

- **Fuerza centrífuga:** Finalmente se obtiene esta fuerza que es la que tiende a que los álabes se separen cuando el aerogenerador está a su máxima velocidad y su valor corresponde a:

$$F_c = m * \omega^2 * r_{cg}$$

$$F_c = 7,34 \text{ kg} * (13,95 \text{ rad/s})^2 * 0,344 \text{ m}$$

$$F_c = 491,36 \text{ N}$$

6.16. Diseño del eje del rotor

Como se ha manifestado con anterioridad el eje debe soportar las cargas transmitidas por los álabes ya que se encuentra sometido a flexión y torsión con cargas estáticas como resultado de la acción del viento. Para el diseño al eje se lo debe considerar como si se tratara de una viga apoyada en sus dos extremos ya que la fuerza del viento se considera como una carga distribuida a lo largo del rotor, para realizar este cálculo se considera la velocidad máxima de 11,70 m/s registrada ya que el rotor debe estar diseñado para resistir las condiciones más críticas que puedan presentarse en la zona de emplazamiento. Las características del acero se muestran a continuación en la Tabla 16.

Tabla 16

Propiedades del acero AISI-SAE 4340

Propiedades	Métrico	Imperial
Esfuerzo último a tracción (Su)	745 MPa	108000 psi
Esfuerzo de fluencia (Sy)	470 MPa	68200 psi
Módulo de elasticidad	190 - 210 GPa	27557 – 30458 kis

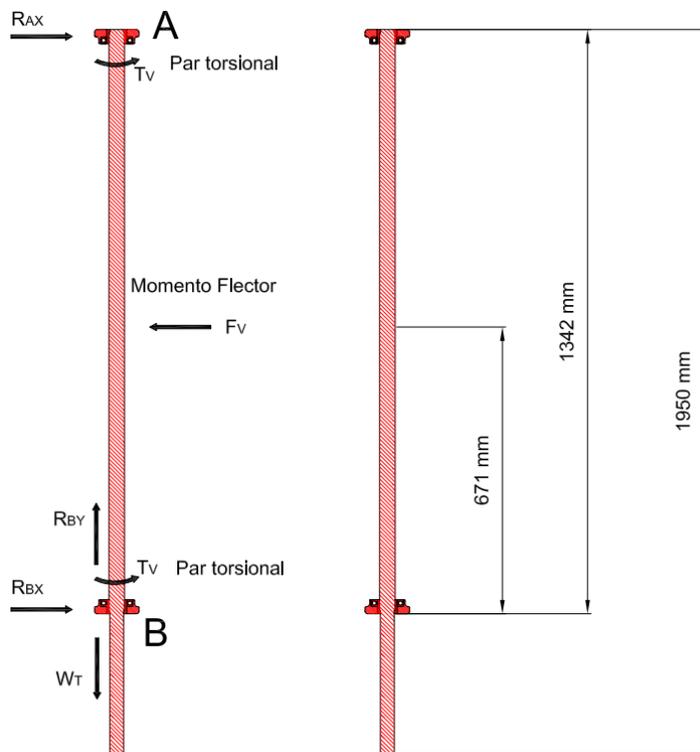
Fuente: (AZO MATERIALS, n.d.)

6.17. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en el eje del rotor

Para llevar a cabo el análisis y los cálculos correspondientes al eje, se realiza un diagrama de cuerpo libre tal como se indica en la Ilustración 39, con la finalidad de conocer los puntos de apoyo, fuerzas resultantes, pares de torsión y momentos flectores que intervienen en el eje.

Ilustración 39

Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en el eje del aerogenerador



Fuente: (El Autor)

Con la ayuda del diagrama de cuerpo libre en la Ilustración 39 se puede apreciar las reacciones que tiene que soportar el eje, así mismo se tiene la fuerza del viento distribuida a lo largo del rotor, por lo tanto, la fuerza del viento (F_v) se determina con la Ecuación 46.

$$F_v = P_{rev} * A \quad \text{Ecuación 46}$$

$$F_v = 83,50 \text{ Pa} * 1,8 \text{ m}^2$$

$$F_v = 150,3 \text{ N}$$

Posteriormente se realiza la sumatoria de fuerzas para determinar las reacciones en los extremos del eje.

$$\begin{aligned}\Sigma F_X &= 0 \\ R_{AX} + R_{BX} &= F_V\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Sigma F_Y &= 0 \\ R_{BY} &= W_T\end{aligned}$$

Donde:

R_{AX} = Reacción en el punto A en el plano X, [N]

R_{BX} = Reacción en el punto B en el plano X, [N]

R_{BY} = Reacción en el punto B en el plano Y, [N]

W_T = Peso total en el plano Y, [N]

A continuación, se realiza la sumatoria de momentos en el punto A y se iguala a cero.

$$\begin{aligned}\Sigma M_A &= 0 \\ L * R_{BX} - \frac{L}{2} * F_V &= 0\end{aligned}$$

$$R_{BX} = \frac{L}{L * 2} * F_V$$

$$R_{BX} = \frac{F_V}{2} = \frac{150,3 \text{ N}}{2}$$

$$R_{BX} = \mathbf{75,15 \text{ N}}$$

$$R_{AX} + R_{BX} = F_V$$

$$R_{AX} = 150,3 \text{ N} - 75,15 \text{ N}$$

$$R_{AX} = \mathbf{75,15 \text{ N}}$$

Donde:

M_A = Momento flector en el punto A, [N.m]

L = Longitud del eje AB, [m]

A través de la Ecuación 47 se procede a encontrar el momento flector en el punto B

$$M_B = F_v * \frac{L}{2} \quad \text{Ecuación 47}$$

$$M_B = 150,3 \text{ N} * \frac{1,342 \text{ m}}{2}$$

$$M_B = 100,85 \text{ N.m}$$

Donde:

M_B = Momento flector en el punto B, [N.m]

Seguidamente se procede a calcular la potencia máxima (P_{max}) para las condiciones más críticas a las que se va a encontrar sometido el aerogenerador, la velocidad correspondiente es 11,70 m/s y con la Ecuación 18 se obtiene:

$$P_{max} = \eta_t * C_p * \frac{1}{2} * \rho * A * v^3$$

$$P_{max} = 0,855 \% * 0,2 * \frac{1}{2} * 1,220 \text{ kg/m}^3 * 1,8 \text{ m}^2 * (11,70 \text{ m/s})^3$$

$$P_{max} = 300,72 \text{ W}$$

Con la potencia máxima obtenida y empleando la Ecuación 48, se calcula el par torsional (T_v) del eje producido por el viento.

$$T_v = \frac{P_{max}}{\omega} \quad \text{Ecuación 48}$$

$$T_v = \frac{300,72 \text{ W}}{13,95 \text{ rad/s}}$$

$$T_v = 21,56 \text{ N.m}$$

6.18. Cálculo del diámetro previo del eje

Para obtener un diámetro previo se realiza el cálculo en base al par torsional máximo, adicional se considerará el esfuerzo cortante de la Ecuación 49, esta debe

ser menor al esfuerzo admisible (S_{sd}) el cual es igual a la resistencia del material seleccionado (Defaz Vizcaino & Pallasco Yugsi, 2017).

$$d_e \geq \left(\frac{16 * T_v}{\pi * S_{sd}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 49}$$

Según (Vanegas Useche, 2018) recomienda que:

- a) Si el diámetro que se está calculando es el de entrada de potencia (o el del extremo saliente del árbol)

$$S_{sd} = (20 \dots 25)MPa,$$

- b) Si el diámetro que se está calculando es donde se ubican las ruedas dentadas en un árbol intermedio de la transmisión

$$S_{sd} = (10 \dots 20)MPa.$$

Para este estudio el diámetro del eje que se desea conocer es el de entrada de potencia, se coge un valor intermedio de 22,5 MPa y con el uso de la Ecuación 49 de determina el diámetro mínimo que se requiere.

$$d_e \geq \left(\frac{16 * 21,56 N.m}{\pi * 22,5 MPa} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d_e \geq 0,017 m = 17 mm$$

Una vez realizado el cálculo se obtuvo un diámetro de 17 mm, este diámetro es el mínimo que debe poseer el eje del rotor, pero debido a que se debe de acoplar rodamientos en los extremos del eje, se utiliza un rodamiento normalizado para diámetro 25 mm (ver Anexo 10), con este valor se realizará los cálculos respectivos para determinar que el diámetro seleccionado sea el correcto.

6.18.1. Análisis estático

Se realiza el análisis estático del eje sometido a cargas máximas, con el propósito de comprobar que el eje no fallara después de recibir las cargas de viento, para ello se toma un factor de seguridad de $N=2$ (Adimensional) y se calcula con la Ecuación 50

$$d_e = \left(\frac{16 * N}{\pi * S_y} (4M^2 + 3T_v^2)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 50}$$

$$d_e = \left[\frac{16 * 2}{\pi * 470 \text{ MPa}} [4(100,85 \text{ N.m})^2 + 3(21,56)^2]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$d_e = 0,01644 \text{ m} = 16,44 \text{ mm}$$

El diámetro calculado de 16,44 mm es el mínimo para un análisis estático, debido a que es menor al diámetro obtenido de 17 mm se comprueba que el eje soportara las cargas máximas producidas por el viento.

6.18.2. Análisis de fatiga

Durante la vida útil, el eje debe estar en la capacidad de resistir las cargas de trabajo y las cargas casuales máximas. Para el análisis del eje se toma algunas consideraciones propuestas por la ASME “American Society of Mechanical Engineers”, donde se considera lo siguiente:

- Sección transversal circular sólida
- Par de torsión y momento flector constante
- Eje sometido a fatiga
- Carga aplicada de forma repentina con cambios ligeros o fuertes

Esta ecuación está basada en datos prácticos, por lo que es un método de cálculo apropiado y se determina mediante la Ecuación 51.

$$d_e = \left\{ \frac{32 * N}{\pi} \left[\left(K_f * \frac{M}{S_n} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

Ecuación 51

Donde:

d_e = Diámetro del eje, [m]

N = Factor de seguridad, [Adimensional]

K_f = Factor concentrador de esfuerzos, [Adimensional]

M = Momento flector, [N.m]

S_n = Resistencia a la fatiga, [MPa]

T = Par torsional, [N.m]

S_y = Resistencia a la fluencia, [MPa]

6.18.3. Cálculo del límite de fatiga corregido

Se efectúa el cálculo de los coeficientes rectificadores para la sección del eje, con lo que se consigue el límite de fatiga corregido (S_n) y se calcula con la Ecuación 52.

$$S_n = K * S_e$$

Ecuación 52

Donde:

S_n = Fatiga corregida, [MPa]

K = Coeficiente que modifica la resistencia a la fatiga, [Adimensional]

S_e = Límite de fatiga, [MPa]

Para el cálculo de los coeficientes K se realiza por medio de la Ecuación 53.

$$K = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * K_{car}$$

Ecuación 53

Donde:

K_a = Factor de acabado superficial, [Adimensional]

K_b = Factor de tamaño, [Adimensional]

K_c = Factor de confiabilidad, [Adimensional]

K_d =Factor de temperatura, [Adimensional]

K_e = Factor de efectos varios, [Adimensional]

K_{car} =Factor de carga, [Adimensional]

6.18.4. Selección del coeficiente K

K_a = Factor de superficie

Para calcular este factor se usa el maquinado en frío tal como se muestra en la Ilustración 40.

Ilustración 40

Factor de superficie

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} kpsi	S_{ut} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Fuente: (BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, 2014)

$$K_a = a * S_{ut}^b$$

$$K_a = 4,51 * 745^{-0,265} = \mathbf{0,781}$$

K_b = Factor de tamaño

Para el factor de tamaño se lo obtiene usando la condición para diámetros que se encuentren entre 2,79 y 51 mm, en la Ilustración 41 se muestra el factor correspondiente.

Ilustración 41

Factor de tamaño

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Fuente: (BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, 2014)

$$K_b = 1,24 * d^{-0,107}$$

$$K_b = 1,24 * (25)^{-0,107} = \mathbf{0,878}$$

K_c = Factor de confiabilidad

Según (Vanegas Useche, 2018) es recomendable trabajar con una confiabilidad del 99,9%, por lo tanto en la Ilustración 42 se muestra el valor correspondiente para el factor **$K_c = 0,753$**

Ilustración 42

Factor de confiabilidad

Confiabilidad (%)	K_c
50	1
90	0.897
99	0.814
99.9	0.753
99.99	0.702
99.999	0.659

Fuente: (Vanegas Useche, 2018)

K_d = Factor de temperatura

La temperatura para el presente estudio es de 16,20 °C < 50 °C, por lo tanto **$K_d = 1$**

K_e = Factor de efectos varios

Se considera que no va a existir corrosión y esfuerzos residuales por lo tanto **$K_e = 1$**

K_{car} = Factor de carga

Se considera la relación entre el tipo de carga y el límite de fatiga, por lo tanto **$K_{car} = 1$**

Reemplazando todos estos valores en la Ecuación 53 se obtiene:

$$K = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * K_{car}$$

$$K = 0,781 * 0,878 * 0,753 * 1 * 1 * 1$$

$$K = 0,515$$

Mediante la Ecuación 54 se calcula el esfuerzo último del material, para este caso $S_u = 745 \text{ MPa} < 1380 \text{ MPa} (200\text{Ksi})$

$$S'_e = 0,5 * S_u$$

Ecuación 54

$$S'_e = 0,5 * 745 \text{ MPa}$$

$$S'_e = 372,5 \text{ MPa}$$

Reemplazando estos valores obtenidos en la Ecuación 52 se obtiene:

$$S_n = K * S_e$$

$$S_n = 0,515 * 372,5 \text{ MPa} = 191,83 \text{ MPa}$$

Finalmente reemplazando el límite de fatiga corregido en la Ecuación 51 se obtiene:

$$d_e = \left\{ \frac{32 * N}{\pi} \left[\left(K_f * \frac{M}{S_n} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d_e = \left\{ \frac{32 * 2}{\pi} \left[\left(\frac{100,85 \text{ N.m}}{191,83 \times 10^6 \text{ Pa}} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{21,56 \text{ N.m}}{470 \times 10^6 \text{ Pa}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d_e = 0,022 \text{ m} = 22 \text{ mm}$$

Se obtiene un diámetro equivalente a 22 mm, lo que significa que el eje soportará las cargas de fatiga a las cuales estará sometido, por tal razón queda demostrado que el eje seleccionado de 25 mm es correcto.

6.18.5. Resistencia del eje a la deflexión máxima

Posteriormente se calcula la deflexión máxima para el eje, que es la deformación producida por las cargas aplicadas sobre el mismo, se calcula mediante la Ecuación 55.

$$\frac{M_b}{W_x} \leq \frac{S_y}{N}$$

Ecuación 55

Donde:

W_x = Momento de resistencia de la sección

$$W_x = \frac{\pi * d_e^3}{32} \quad \text{Ecuación 56}$$

$$W_x = \frac{\pi * (0,025m)^3}{32}$$

$$W_x = 1,53 \times 10^{-6} m^3$$

Sustituyendo los valores en la Ecuación 55 se determina la deflexión máxima para el eje

$$\frac{100,85 N \cdot m}{1,53 \times 10^{-6} m^3} \leq \frac{470 \times 10^6 Pa}{2}$$

$$65,91 \times 10^6 Pa \leq 235 \times 10^6 Pa$$

Calculado el valor de la deflexión, se demuestra que el eje soportará la deflexión máxima a la que estará sometido.

Posteriormente se calcula la masa del eje (m_e) con la Ecuación 57.

$$m_e = \rho * (\pi * r^2 * h) \quad \text{Ecuación 57}$$

$$m_e = 7850 kg/m^3 * (\pi * (0,0125m)^2 * 1,95m)$$

$$m_e = 7,51 kg$$

Seguidamente con la Ecuación 58 se calcula el peso total (W_T) que estará soportando el eje, para ello de la Tabla 15 se toma la masa del rotor y la masa de las tapas circulares.

$$W_T = (m_r + m_t + m_e) * g \quad \text{Ecuación 58}$$

Donde:

m_r = masa del rotor, [kg]

m_t = masa de las tapas circulares, [kg]

g = Gravedad, [m/s²]

$$W_T = (14,68 kg + 16,3 kg + 7,51 kg) * 9,81 m/s^2$$

$$W_T = 377,58 N$$

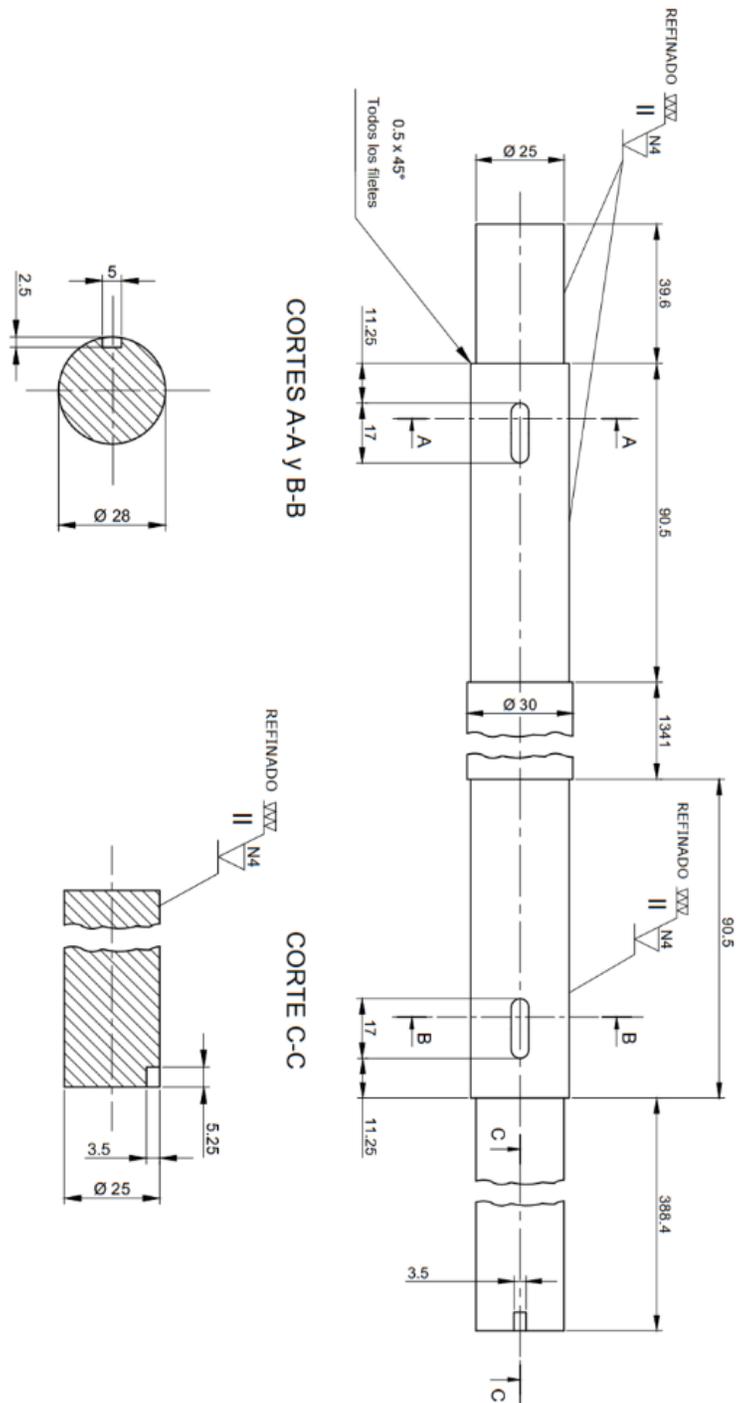
Al conocer el peso que soportara el eje se encuentra la reacción en el eje "y" quedando igual a:

$$R_{BY} = W_T = 377,58 N$$

Finalmente, en la Ilustración 43 se muestra las medidas correspondientes al eje del aerogenerador.

Ilustración 43

Dimensiones del eje principal del aerogenerador



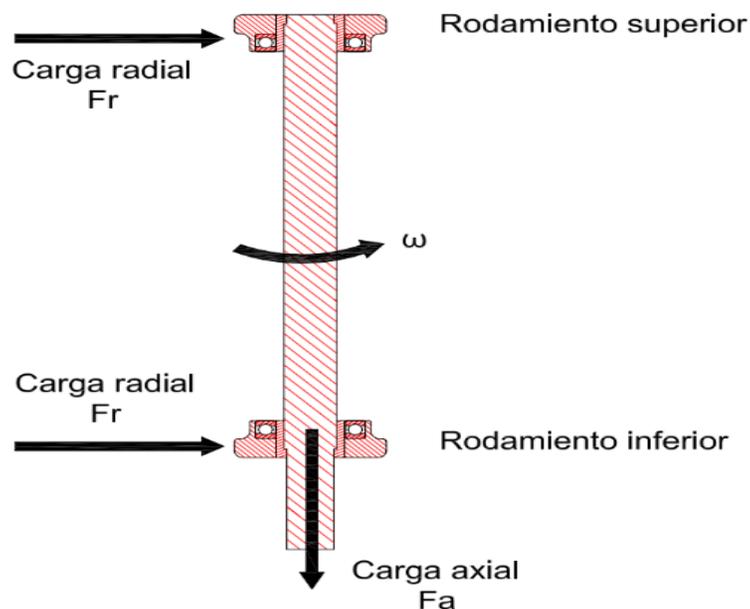
Fuente: (El Autor)

6.19. Selección de los rodamientos

Los rodamientos de bolas cumplen funciones principales como la de reducir la fricción, resistir cargas y así mismo permiten el posicionamiento de las partes móviles de una máquina, estos rodamientos soportan cargas radiales y cargas axiales ya sea que actúen de forma simultánea o individual en cualquier combinación, en la Ilustración 44 se muestra las fuerzas que actúan en el rotor.

Ilustración 44

Fuerzas que actúan en los rodamientos rígidos de bolas



Fuente: (El Autor)

Los rodamientos seleccionados tanto para la parte superior como inferior serán de la marca FAG, los factores para los rodamientos rígidos de bolas se pueden apreciar en la Ilustración 45 y las demás características se muestran en el (Anexo 11).

Ilustración 45

Factores axiales y radiales de los rodamientos rígidos de bolas

$\frac{f_0 \cdot F_a}{C_0}$	Juego normal de rodamiento				
	e	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{F_r} > e$	
		X	Y	X	Y
0,3	0,22	1	0	0,56	2
0,5	0,24	1	0	0,56	1,8
0,9	0,28	1	0	0,56	1,58
1,6	0,32	1	0	0,56	1,4
3	0,36	1	0	0,56	1,2
6	0,43	1	0	0,56	1

Fuente: (FAG, 2000)

Es importante señalar que el rodamiento superior estará sometido a una fuerza radial, mientras que el rodamiento inferior estará sometido a una fuerza radial y fuerza axial, ejercida por el peso de los componentes que conforman el aerogenerador (tapas circulares, aspas, eje).

A continuación, en la Tabla 17 se detalla las características del rodamiento seleccionado.

Tabla 17

Características del rodamiento seleccionado

Eje (mm)	Dimensiones (mm)		Capacidad de carga (KN)		Denominación	Factor de esfuerzos dinámicos	Factor de velocidad	Factor	Factor de seguridad
	D	B	C	C_0					
d	D	B	C	C_0	Rodamiento	(f_l)	(f_n)	(f_0)	(f_z)
25	47	8	7,2	4,65	16005	3	0,8516	15,4	2

Fuente: (El Autor)

Rodamiento en la parte superior: se considera que este rodamiento soporta solo carga radial, para este caso se hará una evaluación para conocer si el rodamiento soporta la carga dinámica equivalente y la carga estática equivalente, a las cuales estará sometido.

- Para la carga dinámica se tiene lo siguiente:

Para el rodamiento superior la $F_a = 0$ y $F_r = 75,15 N$, por lo tanto, la relación de carga dinámica es igual a:

$$\frac{F_a}{F_r} = 0 \leq e$$

De la Ilustración 45 se obtiene que el factor de carga radial $X_0 = 1$ y el factor de carga axial $Y_0 = 0$

Utilizando la (Ecuación 42) se obtiene que la carga dinámica equivalente es igual a:

$$P_0 = (X_0 * F_r + Y_0 * F_a)(f_z)$$

$$P_0 = (1 * 75,15 \text{ N} + 0 * 0)(2)$$

$$P_0 = 150,3 \text{ N} = 0,1503 \text{ KN}$$

Considerando el valor de la carga dinámica equivalente (P_0) y la capacidad de carga dinámica (C) se obtiene que:

$$\frac{C}{P_0} = \frac{7,2 \text{ KN}}{0,1503 \text{ KN}} = 47,90 \text{ KN}$$

$$\frac{C}{P_0} > 1$$

Por lo tanto, el rodamiento seleccionado soportará la carga dinámica equivalente a la cual estará sometido.

- Para la carga estática se tiene lo siguiente:

Para el rodamiento superior la $F_a = 0$ y $F_r = 75,15 \text{ N}$, la relación de carga es igual a:

$$\frac{F_a}{F_r} = 0$$

Por lo tanto, se utilizará la (Ecuación 43) quedando la carga equivalente a:

$$P_0 = F_r ; \frac{F_a}{F_r} \leq 0,8$$

$$P_0 = F_r$$

$$P_0 = 75,15 \text{ N} = 0,07515 \text{ KN}$$

Considerando el valor de la carga estática equivalente (P_0) y la capacidad de carga estática (C_0) se obtiene que:

$$\frac{C_0}{P_0} = \frac{4,65 \text{ KN}}{0,07515 \text{ KN}} = 61,87 \text{ KN}$$
$$\frac{C_0}{P_0} > 1$$

Por lo tanto, el rodamiento seleccionado soportará la carga estática equivalente a la cual estará sometido.

Rodamiento en la parte inferior: al igual que el rodamiento anterior para este caso se considera que este rodamiento soporta carga radial y carga axial, igualmente se hará una evaluación para conocer si el rodamiento soporta la carga dinámica equivalente y la carga estática equivalente, a las cuales estará sometido.

La carga axial que soportara el rodamiento inferior es de 377,58 N

- Para la carga dinámica se tiene lo siguiente:

Para el rodamiento inferior la $F_a = 377,58 \text{ N}$; $F_r = 75,15 \text{ N}$; $f_0 = 15,4$ y $C_0 = 4650 \text{ N}$ por lo tanto:

$$\frac{f_0 * F_a}{C_0} = \frac{15,2 * 377,58 \text{ N}}{4650 \text{ N}} = 1,23$$

Con este valor en la Ilustración 45 se aproxima al inmediato superior ($\frac{f_0 * F_a}{C_0} = 1,6$) teniendo el valor de ($e = 0,32$), además:

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{377,58 \text{ N}}{75,15 \text{ N}} = 5,02 \text{ N} > e$$

Con esta relación de fuerzas se tiene que el factor de la carga radial $X_0 = 0,56$ y el factor de la carga axial $Y_0 = 1,4$

Utilizando la (Ecuación 42) se obtiene que la carga dinámica equivalente es igual a:

$$P_0 = (X_0 * F_r + Y_0 * F_a)(f_z)$$
$$P_0 = (0,56 * 75,15 N + 1,4 * 377,58)(2)$$
$$P_0 = 1141,392 N = 1,141392 KN$$

Considerando el valor de la carga dinámica equivalente (P_0) y la capacidad de carga dinámica (C) se obtiene que:

$$\frac{C}{P_0} = \frac{7,2 KN}{1,141392 KN} = 6,30 KN$$
$$\frac{C}{P_0} > 1$$

Por lo tanto, el rodamiento seleccionado soportará la carga dinámica equivalente a la cual estará sometido.

- Para la carga estática se tiene lo siguiente:

Para el rodamiento inferior la $F_a = 377,58 N$ y $F_r = 75,15 N$, la relación de carga es igual a:

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{377,58 N}{75,15 N} = 5,024 N > 0,8$$

Por lo tanto, se utilizará la (Ecuación 44) quedando la carga estática equivalente a:

$$P_0 = 0,6 * F_r + 0,5 * F_a \quad ; \quad \frac{F_a}{F_r} > 0,8$$
$$P_0 = 0,6 * 75,15 N + 0,5 * 377,58 N$$
$$P_0 = 233,88 N = 0,23388 KN$$

Considerando el valor de la carga estática equivalente (P_0) y la capacidad de carga estática (C_0) se obtiene que:

$$\frac{C_0}{P_0} = \frac{4,65 \text{ KN}}{0,23388 \text{ KN}} = 19,88 \text{ KN}$$

$$\frac{C_0}{P_0} > 1$$

Por lo tanto, el rodamiento seleccionado soportará la carga estática equivalente a la cual estará sometido.

Una vez comprobado que los rodamientos resistirán las cargas se estima la vida útil de los rodamientos, como para ambos casos se eligió el mismo rodamiento las horas calculadas serán iguales, en el (Anexo 12) se muestra los valores del factor de esfuerzos dinámico (F_L), por lo general se recomienda que este factor sea de (2 – 3,5) y en este caso se ha escogido un factor igual a 3, con este valor se procede a calcular la vida útil que tendrán los rodamientos seleccionados.

$$L_h = f_l^3 * 500$$

$$L_h = 3^3 * 500$$

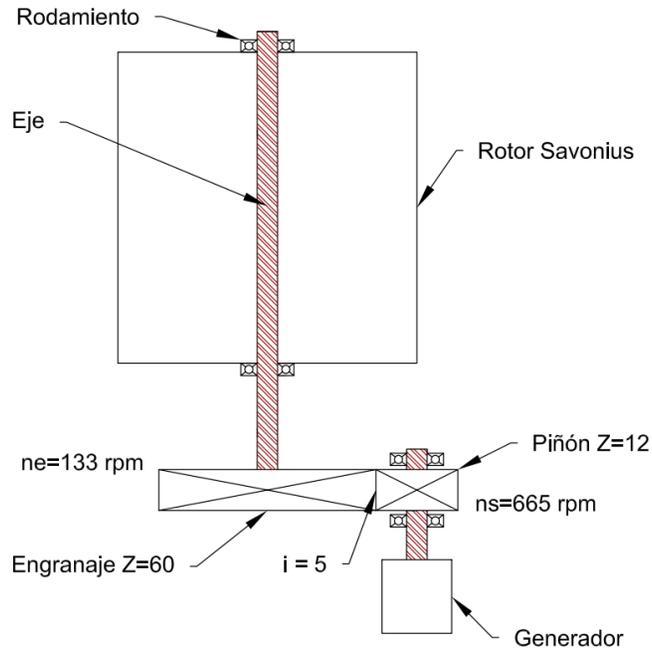
$$L_h = 13500 \text{ horas}$$

6.20. Diseño del sistema de transmisión de potencia

Como se manifestó anteriormente, se necesita acoplar un sistema de transmisión de potencia constituido por engranajes para aumentar las revoluciones del rotor del aerogenerador. El material seleccionado para los engranajes es grilon, que por su proceso de fabricación muestra gran estabilidad y resistencia. Tiene una elevada resistencia al choque y a la fatiga. Su flexibilidad permite la absorción de las vibraciones, por lo que los soportes y engranajes trabajan de forma silenciosa, así mismo poseen una óptima actuación frente a los agentes atmosféricos. En la Ilustración 46 se muestra un diagrama cinemático, en donde se observa como estará constituido el sistema de transmisión de potencia, y de igual manera en la Ilustración 47 se muestra la interacción de las fuerzas que actúan en el sistema de engranajes.

Ilustración 46

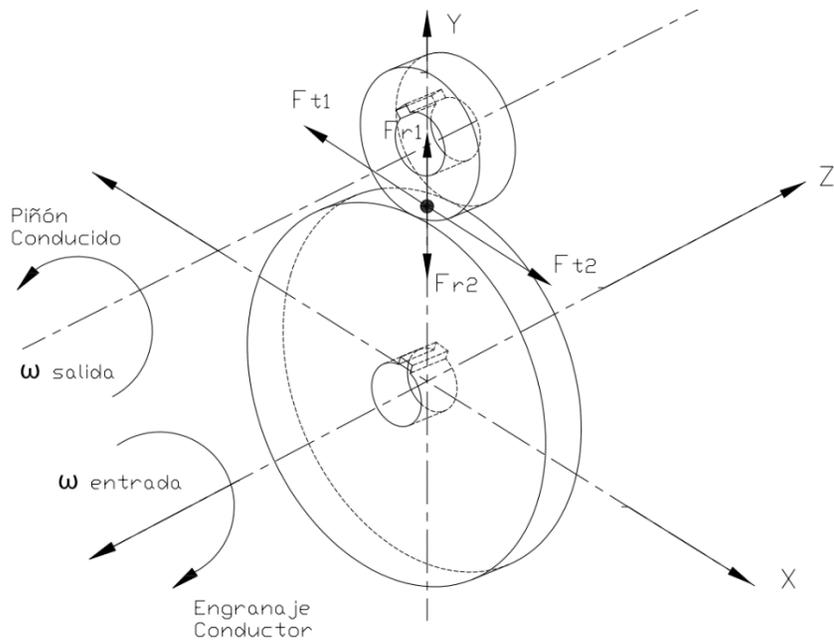
Diagrama cinemático de los elementos de la transmisión de potencia



Fuente: (El Autor)

Ilustración 47

Interacción de las fuerzas en la transmisión de potencia de los engranajes



Fuente: (El Autor)

En la Tabla 18 se muestra la denominación y características de la transmisión por engranajes.

Tabla 18

Denominación y características de los engranajes

Denominación	i	Z	$\sigma_{material}$	Y	η_{seg}	σ_{diente}	ω	k_v	v_l	m
Engranaje	1	60	39,2	0,422	2	19,6	13,95	2,92	11,70	4
Piñón	2	12	39,2	0,245		19,6	69,75	2,92		

Fuente: (El Autor)

Donde:

Z = Número de dientes

$\sigma_{material}$ = Esfuerzo del material

Y = Factor de forma de Lewis

η_{seg} = Coeficiente de seguridad

σ_{diente} = Esfuerzo del diente

ω = Velocidad angular

k_v = Factor de velocidad

v_l = Velocidad lineal

m = Módulo

Primeramente, se calcula el factor de velocidad (k_v), utilizando la ecuación del sistema internacional (SI) para un perfil fresado, el material de los engranajes es de grilon.

$$k_v = \frac{6,1 + v}{6,1} \quad \text{Ecuación 59}$$

$$k_v = \frac{6,1 + 11,70 \text{ m/s}}{6,1}$$

$$k_v = 2,92 \text{ m/s}$$

Una vez obtenido el factor de velocidad se procede a calcular el módulo con la Ecuación 60, debido a que ambos engranajes son del mismo material se procede a calcular siempre al más crítico, en este caso el más crítico sería el piñón.

$$m = \sqrt[3]{\frac{P_{diseño}}{5 * \sigma_{diente} * \omega_2 * Z_2} \left(\frac{k_v}{Y_2}\right)} \quad \text{Ecuación 60}$$

$$m = \sqrt[3]{\frac{300,72 \text{ W}}{5 * 19,6 \times 10^6 \text{ Pa} * 69,75 \text{ rad/s} * 12} \left(\frac{2,92 \text{ m/s}}{0,245}\right)}$$

$$m = 0,0035 \text{ m} = 3,5 \text{ mm} = 4 \text{ mm}$$

$$\mathbf{m = 4 \text{ mm}}$$

Calculado el módulo se procede a calcular la longitud del diente correspondiente que debe tener el piñón con la Ecuación 62.

$$F_t = \frac{P_{diseño}}{v_l} \quad \text{Ecuación 61}$$

$$F_t = \frac{300,72 \text{ W}}{11,7 \text{ m/s}} = \mathbf{25,70 \text{ N}}$$

$$L_d = \frac{F_t}{\sigma_{diente} * m} * \left(\frac{k_v}{Y_2}\right) \quad \text{Ecuación 62}$$

$$L_d = \frac{25,70 \text{ N}}{19,6 \times 10^6 \text{ Pa} * 0,004 \text{ m}} * \left(\frac{2,92 \text{ m/s}}{0,245}\right)$$

$$L_d = 0,0039 = 3,9 \text{ mm} = \mathbf{4 \text{ mm}}$$

Obteniendo la longitud del diente se calcula el esfuerzo del mismo, teniendo en cuenta que su valor debe ser menor al esfuerzo del material, se demuestra que el piñón va a resistir las cargas a las que estará sometido.

$$\sigma_{diente} = \frac{P_{diseño}}{L_d * m * v_l} * \left(\frac{k_v}{Y_2}\right) \quad \text{Ecuación 63}$$

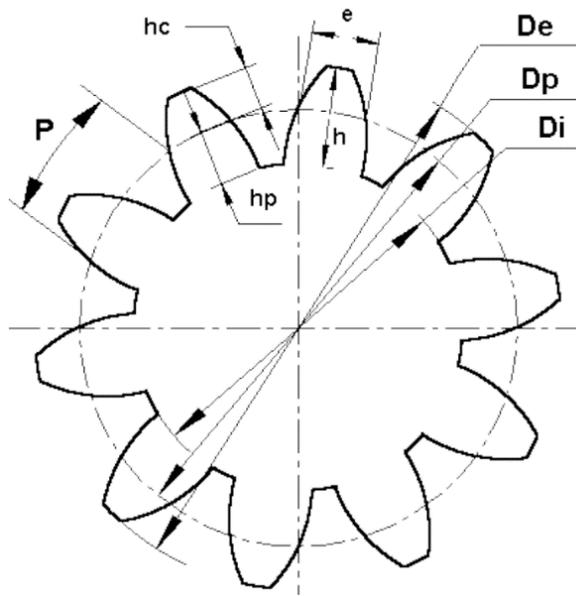
$$\sigma_{diente} = \frac{300,72 \text{ W}}{0,004 \text{ m} * 0,004 \text{ m} * 11,70 \text{ m/s}} * \left(\frac{2,92 \text{ m/s}}{0,245}\right)$$

$$\sigma_{diente} = \mathbf{19,1 \times 10^6 \text{ Pa}}$$

Finalmente se procede a calcular la geometría que debe poseer el piñón y el engranaje, para ello en la Ilustración 48 se muestra la geometría que se debe calcular para el sistema de transmisión de potencia, quedando sus valores de la siguiente manera:

Ilustración 48

Geometría del sistema de transmisión por engranajes rectos



Fuente: (Nueva et al., 2016)

$$H_{cabeza} = 0,004m$$

$$D_{primitivo} = Z * m$$

$$H_{pie} = 1,25 * m = 1,25 * 0,004 m$$

$$D_{primitivo} = 12 * 0,004 m = 0,048 m$$

$$H_{pie} = 0,005m$$

$$D_{exterior} = m(Z + 2)$$

$$Holgura = 1,25 * m - 1 * m$$

$$D_{exterior} = 0,004 m (12 + 2) = 0,058 m$$

$$Holgura = 1,25 * 0,004 m - 1 * 0,004 m$$

$$D_{interior} = m(Z - 2,5)$$

$$Holgura = 0,001 m$$

$$D_{interior} = 0,004 m (12 - 2,5) = 0,038 m$$

$$H_{diente} = 2,25 * m$$

$$D_c = \frac{m}{2} (Z_1 + Z_2)$$

$$H_{diente} = 2,25 * 0,004 m = 0,009 m$$

$$D_c = \frac{0,004 m}{2} (60 + 12) = 0,144 m$$

Así mismo, luego de que se haya calculado los valores correspondientes para el piñón, se procede a calcular la longitud del diente del engranaje, cuyo valor corresponde a:

$$L_d = \frac{F_t}{\sigma_{diente} * m} * \left(\frac{k_v}{Y_1} \right)$$

$$L_d = \frac{25,70 \text{ N}}{19,6 \times 10^6 \text{ Pa} * 0,004 \text{ m}} * \left(\frac{2,92 \text{ m/s}}{0,422} \right)$$

$$L_d = 0,0023 = \mathbf{2,3 \text{ mm}}$$

La geometría que debe tener el engranaje es la siguiente:

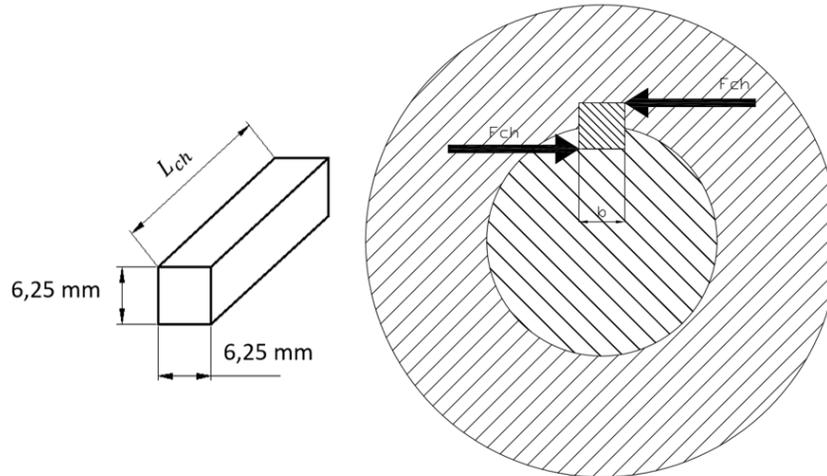
$H_{cabeza} = \mathbf{0,0023 \text{ m}}$	$D_{primitivo} = Z * m$
$H_{pie} = 1,25 * m = 1,25 * 0,004 \text{ m}$	$D_{primitivo} = 60 * 0,004 \text{ m} = \mathbf{0,24 \text{ m}}$
$H_{pie} = \mathbf{0,005 \text{ m}}$	$D_{exterior} = m(Z + 2)$
$Holgura = 1,25 * m - 1 * m$	$D_{exterior} = 0,004 \text{ m} (60 + 2) = \mathbf{0,248 \text{ m}}$
$Holgura = 1,25 * 0,004 \text{ m} - 1 * 0,004 \text{ m}$	$D_{interior} = m(Z - 2,5)$
$Holgura = \mathbf{0,001 \text{ m}}$	$D_{interior} = 0,004 \text{ m} (60 - 2,5) = \mathbf{0,232 \text{ m}}$
$H_{diente} = 2,25 * m$	$D_c = \frac{m}{2} (Z_1 + Z_2)$
$H_{diente} = 2,25 * 0,004 \text{ m} = \mathbf{0,009 \text{ m}}$	$D_c = \frac{0,004 \text{ m}}{2} (60 + 12) = \mathbf{0,216 \text{ m}}$

6.21. Diseño de la chaveta

El diseño de la chaveta permitirá la transmisión de potencia entre los elementos unidos (eje y engranaje), para este estudio se realiza los cálculos correspondientes para determinar si la chaveta que se requiere está sometida a corte o comprensión. En la Ilustración 49 se muestra las dimensiones y las fuerzas cortantes que se producen en la chaveta.

Ilustración 49

Dimensiones de la chaveta y fuerza cortante F_{ch} en la misma



Fuente: (El Autor)

Con la Ecuación 64 se determina si la chaveta está sometida a corte o compresión.

$$b = \frac{1}{4} \varnothing_{eje} \quad \text{Ecuación 64}$$

$$b = \frac{25 \text{ mm}}{4} = 6,25 \text{ mm}$$

La chaveta está sometida a corte ya que el valor calculado es menor a 8 mm, por lo tanto, la chaveta es cuadrada, así mismo el material utilizado para la chaveta es de hierro bajo en carbono, el cual tiene un esfuerzo correspondiente a ($\sigma_y = 117 \text{ MPa}$).

Seguidamente con la Ecuación 65 se determina la fuerza de la chaveta (F_{ch}) a la cual estará sometida.

$$F_{ch} = \frac{2 * M_{eje}}{\varnothing_{eje}} \quad \text{Ecuación 65}$$

$$F_{ch} = \frac{2 * (21,6 \text{ N.m})}{0,025 \text{ m}}$$

$$F_{ch} = 1728 \text{ N}$$

Seguidamente se calcula el esfuerzo del material de la chaveta ($\sigma_{material}$)

$$\sigma_{material} = \sigma_y * 0,45$$

$$\sigma_{material} = 117 \text{ MPa} * 0,45$$

$$\sigma_{material} = 52,65 \text{ MPa}$$

Finalmente, con la Ecuación 66 se calcula la longitud de la chaveta que debe poseer (L_{ch}), para evitar la falla por corte y así mismo garantizar que resista la carga sometida.

$$L_{ch} = \frac{F_{ch}}{b * \sigma_{material}} \quad \text{Ecuación 66}$$

$$L_{ch} = \frac{1728 \text{ N}}{0,00625 \text{ m} * 52,65 * 10^6 \text{ Pa}}$$

$$L_{ch} = 0,00525 \text{ m} = 5,25 \text{ mm}$$

6.22. Selección de soportes para los rodamientos

Se utilizará un soporte de brida de dos pernos para unir el rodamiento con la estructura del aerogenerador. Tanto la superficie superior como la superficie inferior.

En la Ilustración 50 se muestra el soporte de brida utilizado, cuyas características técnicas se muestran en el (Anexo 13).

Ilustración 50

Soporte de brida de dos pernos con tornillos de apriete



Fuente: (El Autor)

6.23. Dimensionamiento de los equipos electrónicos

➤ Inversor

Para realizar el cálculo del inversor de corriente se utiliza la (Ecuación 45) con la cual se obtiene la potencia necesaria del inversor para el sistema.

$$Potencia\ inversor = \frac{\% \text{ de seguridad} * Carga\ neta}{Factor\ de\ potencia}$$

$$Potencia\ inversor = \frac{1,25 * 177,8\ W}{0,8}$$

$$Potencia\ inversor = 277,8\ W$$

La potencia requerida para el inversor es de 277,8 W, dado que en el mercado no existe un inversor de la capacidad calculada, se utilizará uno de 300 W, cuyas características se muestran en el (Anexo 14).

➤ Controlador de carga.

El dispositivo más apropiado para este caso será un “Controlador 10 A/12 V DC MORNINGSTAR” para la batería de 100 Ah, en el (Anexo 15) se muestran sus principales características.

➤ Selección del generador.

Es importante determinar el tipo de generador eléctrico ya que debe convertir la energía mecánica producida por el rotor en energía eléctrica, para este estudio se optó por acoplar un generador de manivela (Dinamo), debido a que este dispositivo no necesita de mucha fuerza para accionarse y producir energía, en la Ilustración 51 se muestra el generador utilizado y en la Tabla 19 se muestra las características y especificaciones correspondientes.

Ilustración 51

Generador de manivela (Dinamo)



Fuente: (Generador Manual de Manivela, Generador Portátil de Alta Potencia de Carga Manual, n.d.)

Tabla 19

Especificaciones y características del generador eléctrico de manivela

Especificación	
Material	Metal
Potencia máxima	20 W
Velocidad de rotación	2000 rpm/min
Corriente de voltaje de salida (DC)	3 V/6,6 A, 5 V/4 A, 6 V/3,3 A, 9 V/2,2 A, 12 V/1,6 A, 15 V/1,3 A
Tamaño	19,5x8x17 cm/7,68x3,15x6,69 pulgadas
Peso	Aprox.270g

Características

- Generador manual, un buen ayudante bajo circunstancia emergente.
- Ahorro de energía, respetuoso con el medio ambiente y con muchos tipos de interfaz.
- Multifunción, puede cargar para teléfono móvil, luz nocturna USB, ventilador USB, banco de energía.
- Caja exterior de metal más duradera, almohadilla de pie antideslizante más estable, rodamiento de alta calidad, sin esfuerzo y que ahorra tiempo.
- Pequeño, cómodo de montar, fácil de transportar y con función de almacenamiento de energía interna.
- Práctico, adecuado para ser utilizado en el campo, operaciones de campo, viajes de campo, operaciones de rescate, desastres naturales, entrenamiento de supervivencia, comunicaciones de emergencia, escasez de energía a largo plazo, turismo, etc.

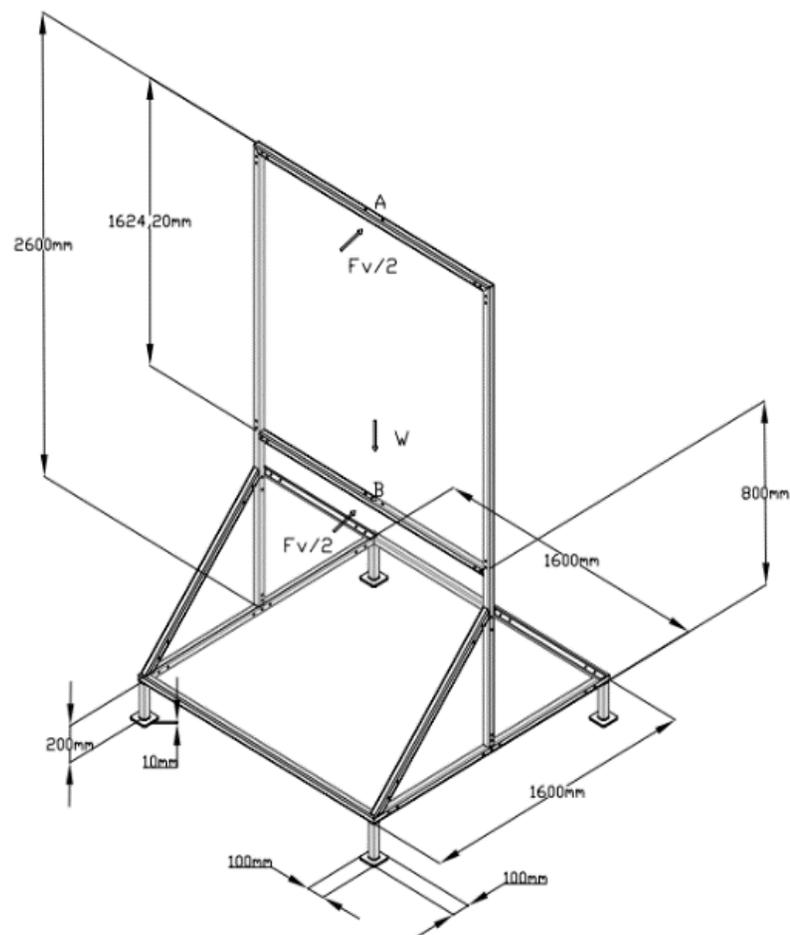
Fuente: (Generador Manual de Manivela, Generador Portátil de Alta Potencia de Carga Manual, n.d.)

6.24. Estructura de soporte para el aerogenerador

La estructura de soporte es muy importante ya que es aquella que contendrá los componentes que conforma el aerogenerador, para ello la estructura debe garantizar la firmeza que se requiere para acoplar dichos componentes, en la Ilustración 52 se muestra el diseño de la estructura, para lo cual se elige un perfil cuadrado de 40 x 40 x 4mm bajo la norma ASTM-500, tal como se indica en el (Anexo 16).

Ilustración 52

Esquema de la estructura de soporte para el rotor Savonius



Fuente: (El Autor)

6.24.1. Modelo tridimensional del rotor Savonius

Una vez diseñado todos los componentes que conforman el aerogenerador se obtiene el conjunto tridimensional de la turbina Savonius, en la Ilustración 53 se muestra el diseño del prototipo y de igual manera en la

Tabla 20 se detalla una lista de los componentes principales que conforman el rotor, los detalles de todas las piezas mecánicas se verán más a detalle en sus respectivos planos.

Ilustración 53

Esquema general del rotor eólico Savonius (Diseño 3D)



Fuente: (El Autor)

Tabla 20*Componentes que conforman el rotor Savonius*

Posición	Cantidad	Denominación	Material
1	1	Estructura	Tubo estructurado 40X40X4 ASTM 500
2	2	Tapas circulares	Acrílico PMMA
3	2	Acople para el eje	Acero inoxidable AISI 304
4	2	Álabes	Acrílico PMMA
5	2	Pletina	Aluminio 6061-T6
6	1	Eje	Acero AISI-SAE 4340
7	2	Brida de dos agujeros	Hierro fundido
8	2	Engranajes rectos	Grilon
9	1	Generador (Dinamo)	Metal
10	4	Base de la estructura	Hierro fundido

Fuente: (El Autor)

6.25. Simulación de elementos finitos

Para llevar a cabo la simulación de elementos finitos se utiliza dos *softwares*, para realizar el análisis estático y de fatiga se utiliza el *software* SolidWorks, mientras que para la simulación CFD se hace uso del *software* ANSYS (2022 R1) en su versión estudiantil, el cual contiene varias características de modelado físico que se requieren para modelar flujos, turbulencias, transferencias de calor y reacciones para aplicaciones industriales.

A través de la simulación, se analiza los efectos del viento que actúan en el rotor a diferentes velocidades, así como el comportamiento que tienen los componentes al momento de encontrarse sometidos a esfuerzos, con el propósito de determinar si los materiales empleados son los adecuados.

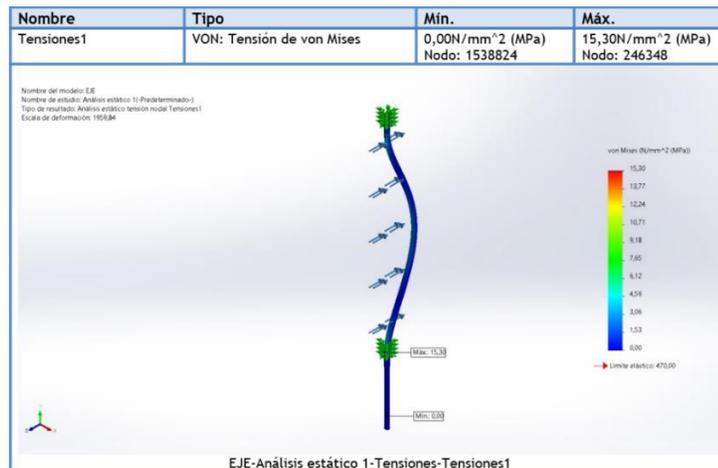
6.25.1. Análisis estático y de fatiga

Se realiza un análisis estático y un análisis de fatiga en el eje, tal como se indica en el (Anexo 17), considerando como una geometría fija apoyada en 2 extremos por acoples, el cual tiene una carga distribuida en el eje de 150,3 N.

Al aplicar la fuerza antes mencionada, se puede evidenciar en la Ilustración 54 una tensión máxima de Von Mises de 15,30 MPa, lo que representa alrededor del 0,03 % del límite elástico del acero AISI-SAE 4340 (470 MPa), lo que evidencia que el eje resistirá a las cargas sometidas.

Ilustración 54

Análisis estático en el eje

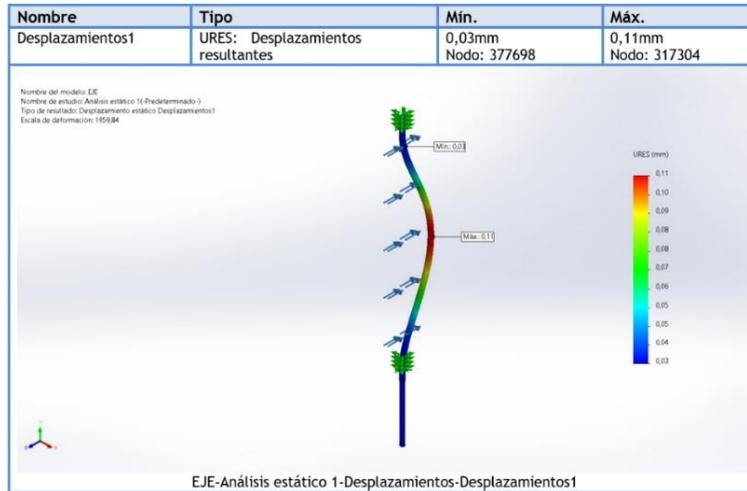


Fuente: (SolidWorks® Premium 2020 SP3.0, 2020)

Así mismo en la Ilustración 55 se muestra el desplazamiento máximo correspondiente a 0,11mm en el centro del eje, mientras que el desplazamiento mínimo del eje se encuentra en los apoyos de la estructura, lo que evidencia que el eje no sufrirá ningún desplazamiento ya que el valor máximo de desplazamiento es muy pequeño.

Ilustración 55

Desplazamiento en el eje

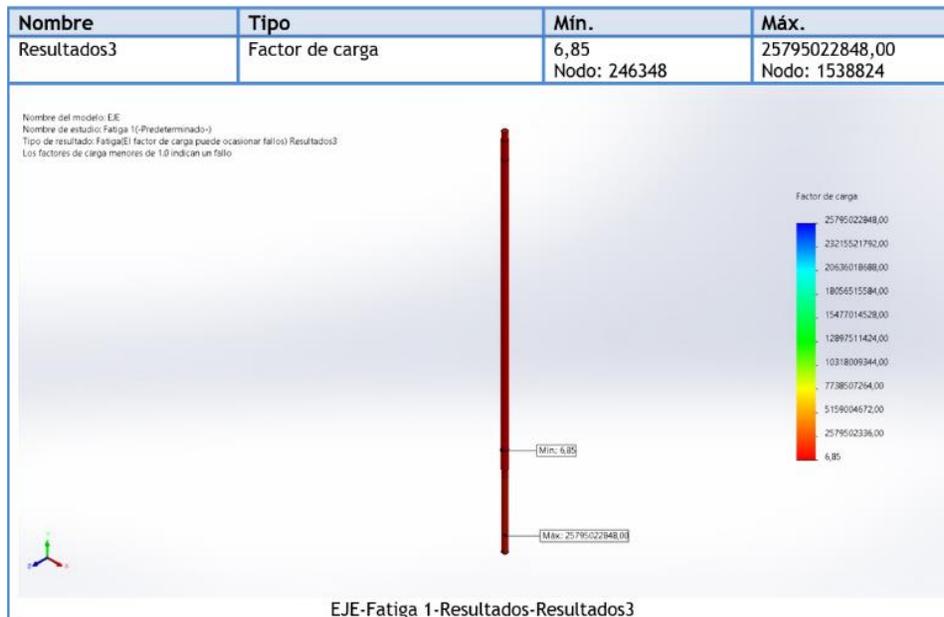


Fuente: (SolidWorks® Premium 2020 SP3.0, 2020)

De igual manera se procede a calcular el estudio por fatiga, tomando en consideración del análisis de fatiga el valor de K (Factor de reducción de resistencia a la fatiga) cuyo valor calculado es de 0,515, con este valor se determina el factor de carga para el eje, en la Ilustración 56 se evidencia que el valor mínimo del factor de carga es 6,85 valor mayor y cercano a 5, lo que significa que el eje no va a fallar por fatiga.

Ilustración 56

Factor de carga



Fuente: (SolidWorks® Premium 2020 SP3.0, 2020)

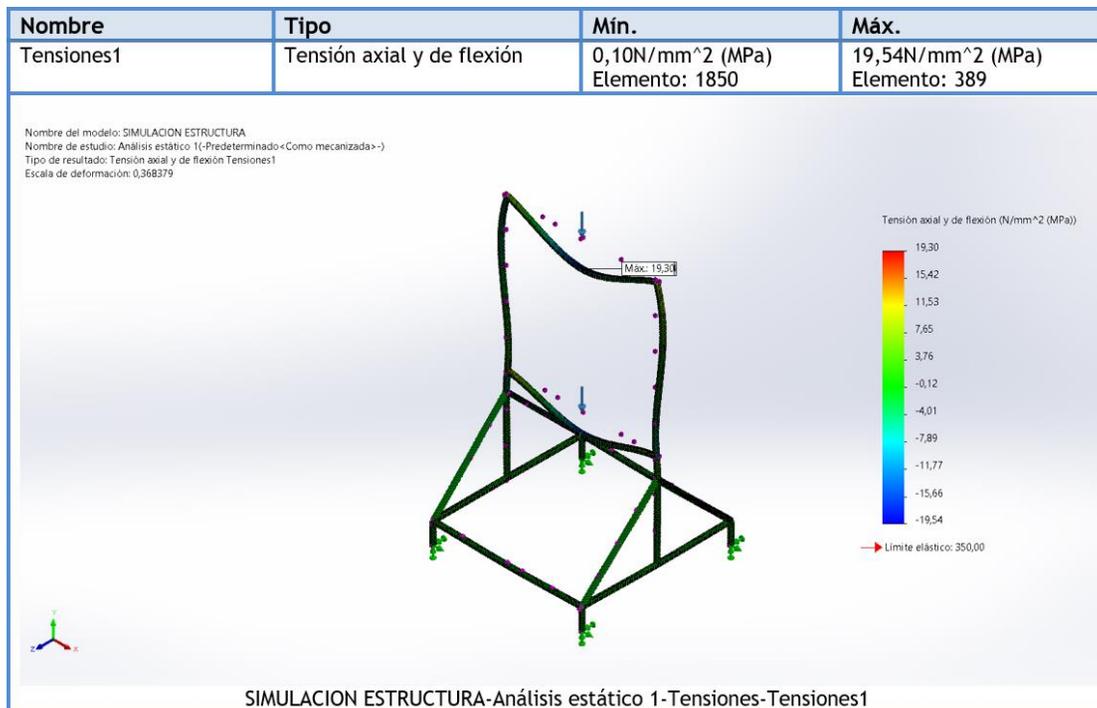
6.25.2. Análisis de esfuerzos en la estructura de soporte

Se lleva a cabo el análisis en la estructura de soporte, donde se toma en consideración las reacciones en los apoyos A y B tal como se indica en la Ilustración 52, cuyas reacciones son transmitidas desde el eje por la acción del viento, peso del rotor, peso de la estructura y la gravedad, con ello se define las cargas y el mallado correspondiente para realizar el análisis de elementos finitos en la estructura

En la Ilustración 57 se muestra la tensión axial y deflexión máxima correspondiente a 19,54 MPa, esto ocasiona una deflexión en el perfil de la estructura por consecuencia del eje y el peso del rotor, así mismo la tensión mínima se encuentra en las bases de la estructura, lo que da como resultado que la estructura soportará la carga ya que el límite elástico del material ASTM A 500 es de 350 MPa.

Ilustración 57

Tensión axial y deflexión máxima

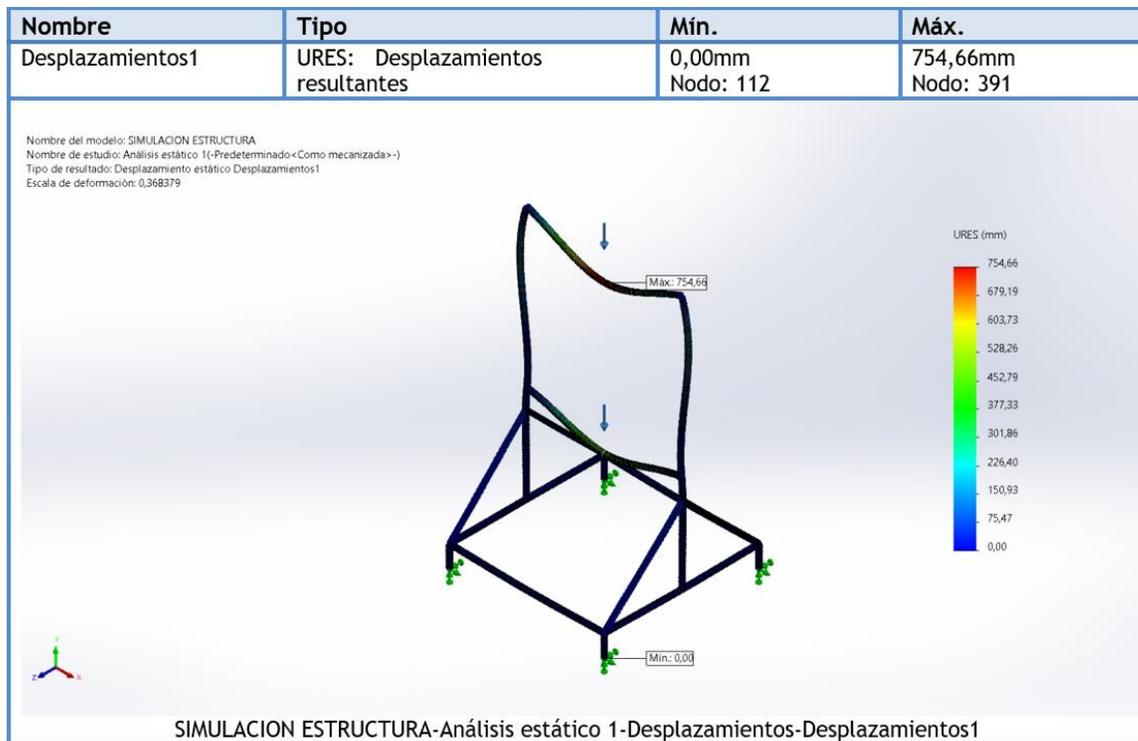


Fuente: (SolidWorks® Premium 2020 SP3.0, 2020)

En la Ilustración 58 se muestra el desplazamiento máximo correspondiente a 754,66mm presente en el perfil superior, mientras que el desplazamiento mínimo se encuentra en las bases de la estructura, los demás valores obtenidos de la simulación de la estructura se los puede apreciar en el (Anexo 18).

Ilustración 58

Desplazamientos resultantes en la estructura



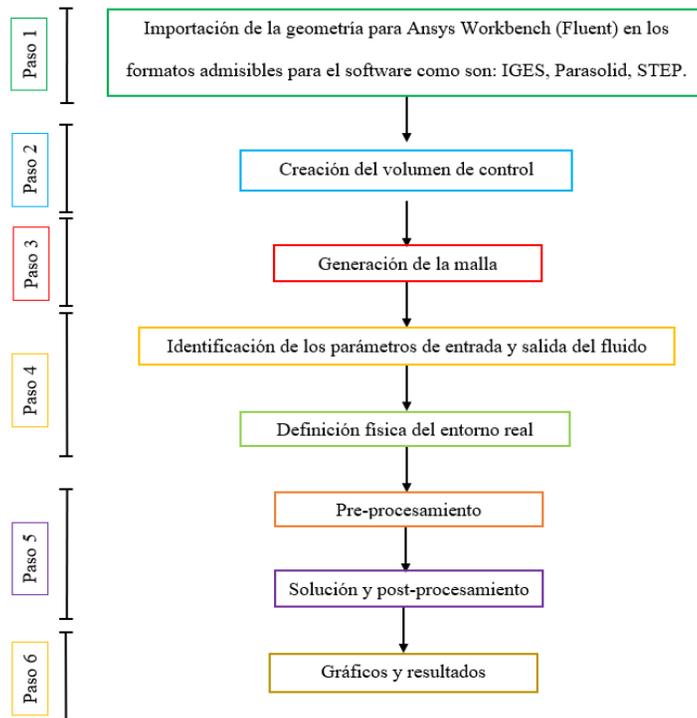
Fuente: (SolidWorks® Premium 2020 SP3.0, 2020)

6.25.3. Pasos a considerar para la simulación en el software Ansys

En la Ilustración 59 se muestra los pasos que se requiere para llevar a cabo la simulación del flujo del viento, que actúa en el rotor Savonius.

Ilustración 59

Flujograma que indica los pasos a considerar para la simulación en Ansys



Fuente: (El Autor)

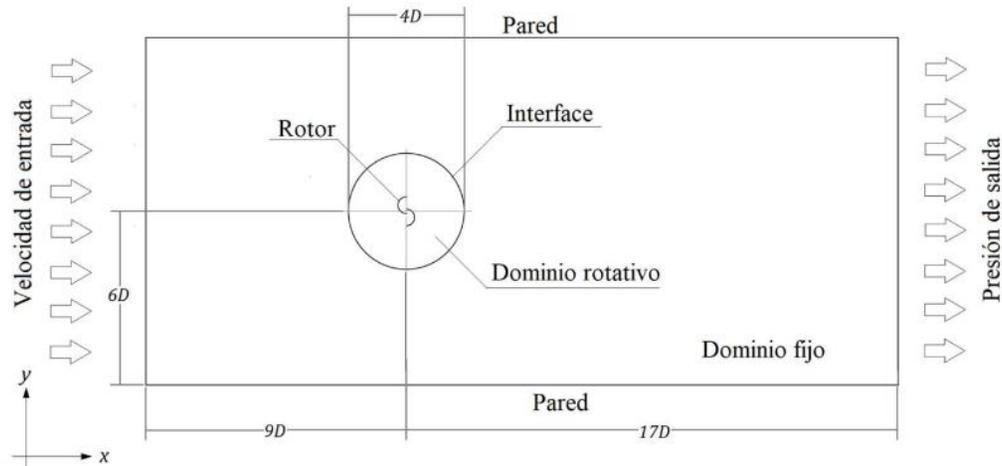
Para llevar a cabo esta simulación se toma en cuenta algunas consideraciones de autores que han realizado trabajos similares en este campo.

Primeramente, se establece el dominio de la solución teniendo en cuenta que este dominio no debe de ser muy grande para evitar cálculos innecesarios, pero debe de poseer un volumen apropiado que admita que los fenómenos de mecánica de fluidos se desenvuelvan al interior del mismo.

Según lo manifiesta (Ferrari et al., 2017), las dimensiones que debe poseer el dominio computacional tomando como referencia el diámetro del rotor (D) son: a) $9D$ para barlovento b) $17D$ para sotavento c) $6D$ tanto para la pared superior e inferior d) $4D$ para el diámetro del dominio rotativo, en la Ilustración 60 se observa lo antes mencionado.

Ilustración 60

Dominio computacional



Fuente: (Hidalgo et al., 2018)

6.25.4. Mallado para el dominio computacional

Para constituir un rotor Savonius se debe diferenciar los sub-dominios específicos dentro del dominio de cálculo.

La malla posee dos partes bien características, una estacionaria exterior que representa el flujo alrededor del rotor y una interna que gira representando el álabe del rotor, esta última debe ser más fina para obtener un resultado más preciso (Defaz Vizcaino & Pallasco Yugsi, 2017).

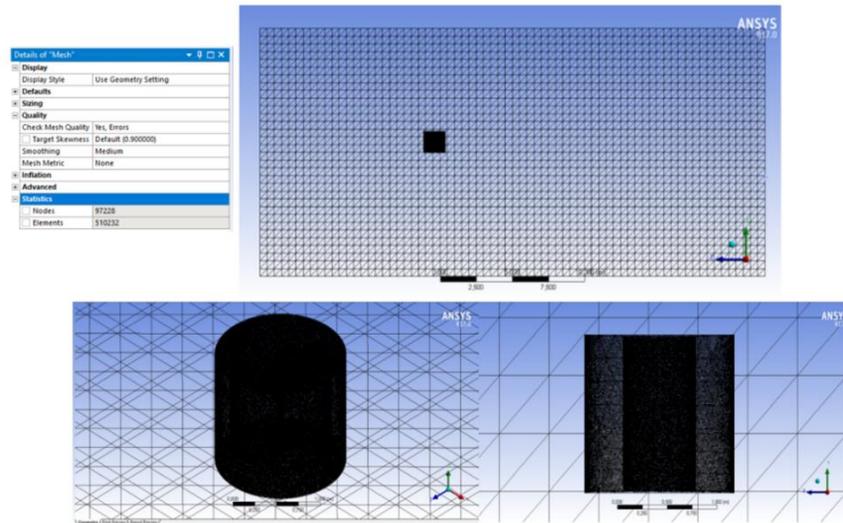
Para realizar el mallado se procede a cumplir con ciertos parámetros:

- Elemento "Sizing" se modifica para obtener mayor exactitud en la malla
- "Face Sizing" se añade para conseguir mayor exactitud en el dominio rotacional alrededor de los álabes respectivamente.

En la Ilustración 61 se muestra los resultados obtenidos de la constitución de la malla, para la parte del dominio rotacional se utilizó un tamaño de elemento (0,02) y para el resto del contorno el tamaño de elemento fue de (0,25), con lo que se obtuvo 510232 células/nodos, los demás resultados obtenidos como la calidad del mallado se muestran en el (Anexo 19).

Ilustración 61

Generación de malla al dominio computacional



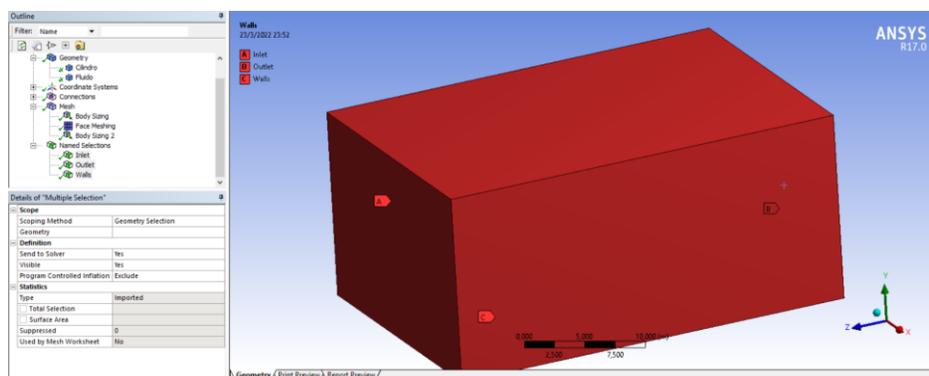
Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)

Así mismo se define las condiciones de contorno tanto de la entrada, salida y paredes del dominio computacional, tal como se aprecia en la Ilustración 62.

Para la velocidad de entrada (Inlet), se ingresó un valor de 4,68 m/s valor determinado para cuestiones de aprovechamiento energético, además se selecciona la salida del flujo (Outlet), y se determina las paredes que contendrán al fluido (Walls).

Ilustración 62

Definición de la entrada, salida y paredes del dominio computacional para la simulación



Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)

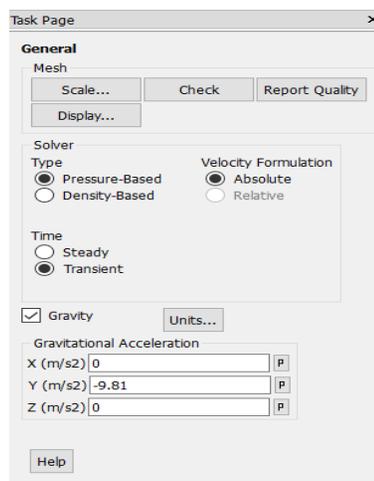
6.25.5. Método de solución

Para el caso del *Software Fluent* se determina elegir un solucionador basado en presión tal como se muestra en la Ilustración 63, esto llevará a obtener un costo computacional menor, según (RESTREPO, 2020) esto se debe a que a diferencia de una solución basada en densidad el cálculo para flujo incompresibles se aproxima el valor de Mach (0,02) a 0, tomando el valor del tiempo en función de la velocidad del flujo e ignorando escalas de tiempo acústicas.

De igual manera como se trata de una simulación transitoria y poseer pasos de tiempo relativamente extensos se da un enfoque de tipo acoplado para conseguir una alta tasa de convergencia (Ansys, n.d.).

Ilustración 63

Método de solución basado en presión



Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)

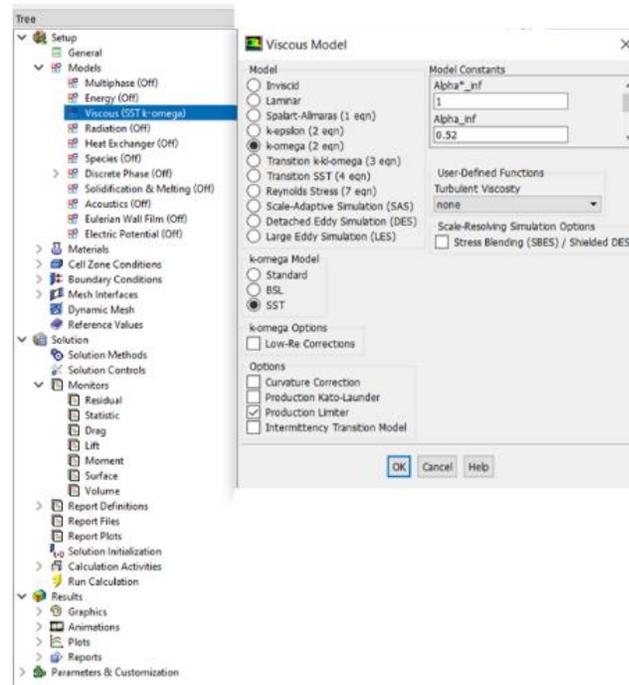
6.25.6. Modelo de turbulencia

Para el modelo de turbulencia se ha tomado como referencia lo que manifiesta (Amiri et al., 2017), el cual realizó 4 modelos de turbulencia para turbinas de eje vertical entre ellos $k-\epsilon$ *Realizable* y $k-\omega$ *SST*, logrando como conclusión que el modelo $k-\omega$ *SST* es el más indicado

para simular un modelo de flujo alrededor de un rotor Savonius, esto se debe a que es un modelo de combinación entre las ecuaciones de $k-\epsilon$ y $k-\omega$, que permite tener una obtención mayor del fenómeno lejos y cerca de la capa límite, consiguiendo una simulación de mayor exactitud, en la Ilustración 64 se muestra el método de solución seleccionado.

Ilustración 64

Modelo de turbulencia para el rotor Savonius



Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)

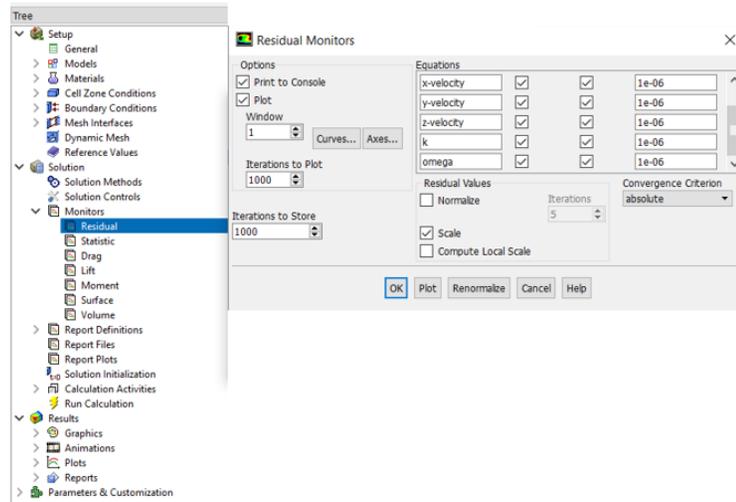
6.25.7. Criterios de convergencia de los residuales

A continuación, en la Ilustración 65 se muestra los criterios de convergencia asignados para llevar a cabo la simulación, algunos autores entre ellos (Rodríguez Buenestado, 2017) recomienda que se debe de asignar un valor de $1e^{-6}$ para la ecuación de continuidad, la velocidad en cada uno de los ejes y para el modelo de turbulencia, con esto se determina si se quiere que el

criterio de convergencia sea absoluto o relativo, aunque se debe tener en cuenta que se puede llegar a alcanzar la convergencia mucho antes.

Ilustración 65

Criterios de convergencia para los residuales



Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)

6.25.8. Cálculo del Time Step

Para realizar una simulación transitoria como es el caso de la presente investigación, se debe tener en cuenta que requiere el uso de la dependencia de tiempo, es decir la cantidad de grados que gira la malla por *Time Step*.

Según (Mosbahi et al., 2019), establece que cuando se realiza simulaciones de máquinas giratorias se delimita una relación entre grados de rotación de la malla deslizante por paso de tiempo (Ecuación 67), debido a que es un procedimiento con mayor facilidad de comprensión y uso.

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 67}$$

Donde:

$\Delta\theta$ = Ángulo que se requiere que la turbina recorra

Δt = Paso de tiempo

Así mismo la Ecuación 68 depende de la relación de velocidad de punta la cual es requerida para obtener los coeficientes, por lo tanto, el tiempo va a depender del diámetro de la turbina y de la velocidad del aire libre (Restrepo, 2020).

$$\Delta t_{\theta^\circ} = \frac{\theta}{\omega * \frac{180}{\pi}} \quad \text{Ecuación 68}$$

En la Tabla 21 se muestra tres diferenciaciones del ángulo que se pretenden para el estudio de independencia del tamaño del tiempo.

Tabla 21

Valores de Time Step para el rotor Savonius-Diámetro 1.342m-Velocidad 4,68 m/s

TSR	RPM	ω	$\Delta t (0,5^\circ)$ (seg)	$\Delta t (1^\circ)$ (seg)	$\Delta t (1,5^\circ)$ (seg)
0,80	53	5,6	0,00155	0,0031	0,0046
0,87	58,41	6,11	0,00143	0,0028	0,0043
0,99	66,61	6,97	0,00125	0,0025	0,0037

Fuente: (El Autor)

Una vez considerados estos parámetros se procede a realizar la simulación del rotor, para llevar a cabo este estudio se utiliza la velocidad promedio, calculada en el lugar de emplazamiento correspondiente a 4,68 m/s, con lo que se determinan contornos de velocidad, presión, líneas de flujo de aire y vectores de velocidad, todos estos contornos muestran la forma que adopta el fluido al interactuar con la turbina.

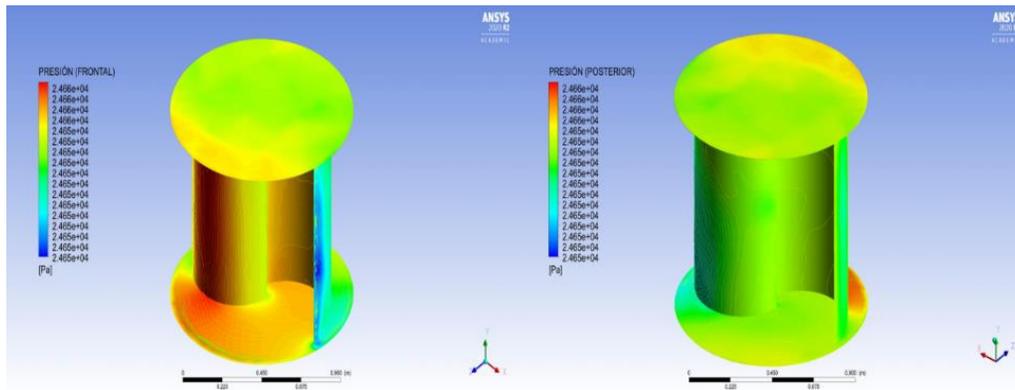
Con el desarrollo de la simulación CFD se determina el comportamiento aerodinámico que tiene el aerogenerador al encontrarse en contacto con el fluido, posteriormente se procede analizar los siguientes casos;

6.25.9. Contornos de presión

En la Ilustración 66 se aprecia los contornos de presión de la turbina en la entrada del flujo (Frontal) y en la salida (Posterior).

Ilustración 66

Contornos de presión, vista frontal y posterior



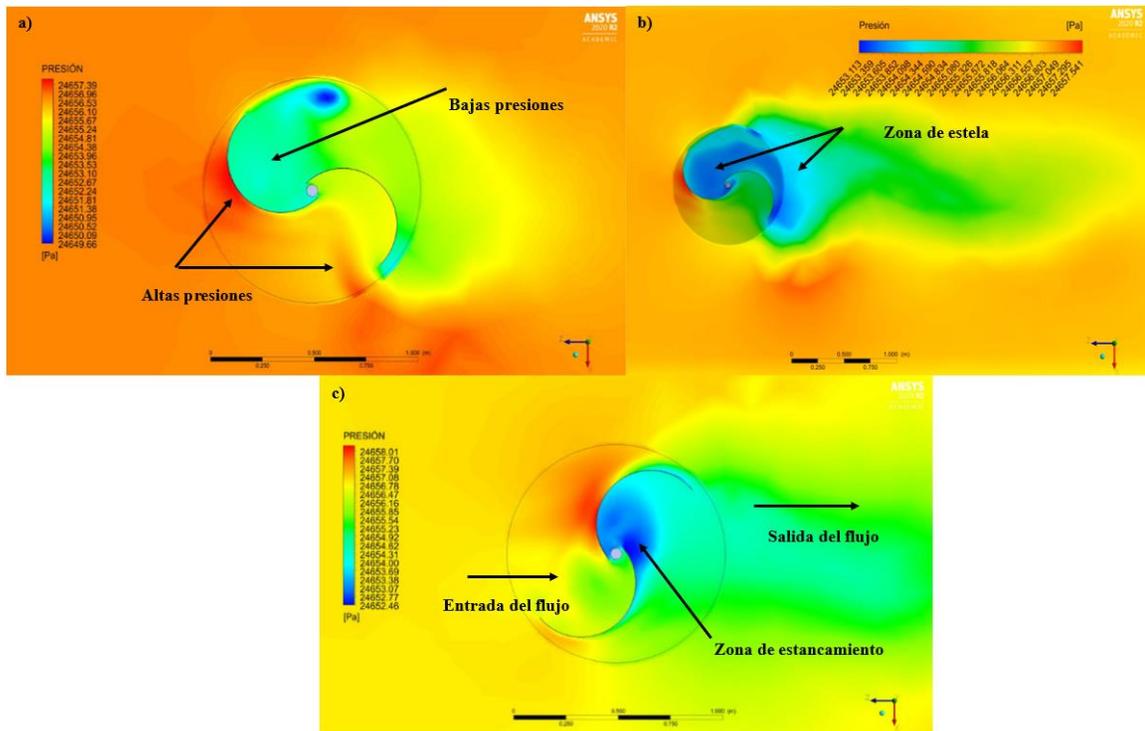
Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)

Debido a la geometría del aerogenerador se puede decir que, en la parte frontal donde interactúa el viento existen contornos de presión mayores que en la salida, esto permitirá que la turbina adopte el giro en sentido antihorario, debido principalmente a la aerodinámica que poseen los álabes, se debe tener en cuenta que la turbina puede girar en ambas direcciones, pero en este caso al realizar la simulación se determinó que la entrada del fluido sea en dirección del eje Z, es por tal razón que el fluido al ingresar por la parte cóncava de la turbina adquiere dicho sentido.

Seguidamente como se indica en la Ilustración 67 en los literales [a),b),c)], se analiza las presiones ejercidas por el viento en los álabes en el momento en que el rotor gira, en el literal a) se puede observar las zonas de alta y baja presión, en el literal b) se observa las zonas de estela y en el literal c) se muestra la entrada del flujo, la salida y la zona de estancamiento del fluido.

Ilustración 67

Contornos de presión



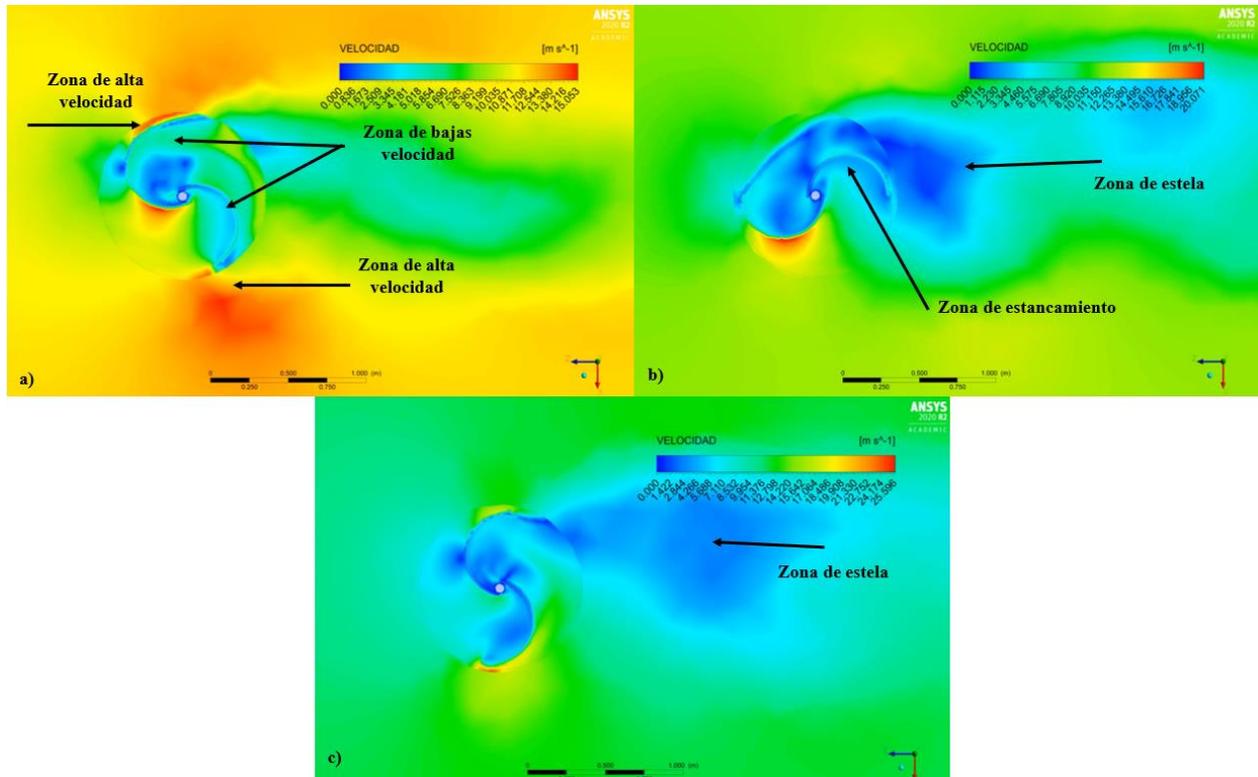
Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)

6.25.10. Contornos de velocidad

En la Ilustración 68 en los literales [a), b), c)] se muestra los contornos de velocidad de la turbina, en el cual en el literal "a" las zonas en la que se representa perfiles de alta velocidad son apreciadas en la punta de la pala del rotor, así mismo en el literal "b" se evidencia las zonas de estancamiento y aparición de la estela generada por el perfil aerodinámico que presenta valores inferiores a la entrada (4.68 m/s) mostrando un modelo de continuidad de turbulencia, la cual varía a medida que avanza el fluido y de igual manera en el literal "c" se evidencia como va adquiriendo el comportamiento la estela de turbulencia al pasar el fluido.

Ilustración 68

Contornos de velocidad del viento en los álabes del rotor



Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)

6.25.11. Análisis de resultados teóricos y valores obtenidos en la simulación

En el presente apartado se analizan los datos de las diferentes fuentes de información y los datos obtenidos de la simulación, todo esto con el objetivo de determinar cuanta potencia puede llegar a producir la turbina y a su vez realizar una comparación tanto de los valores teóricos como los arrojados en la simulación.

6.26. Potencia nominal y potencia teórica del aerogenerador

Primeramente, se analiza los resultados teóricos en donde se hace uso de la (Ecuación 1) y (Ecuación 18), determinando la potencia nominal del viento sin considerar pérdidas y la potencia teórica del aerogenerador.

En la Tabla 22 se indican las diferentes velocidades de viento que se utilizó para llevar a cabo la evaluación del rotor, tomando en consideración evaluar para una velocidad promedio de 4,68 m/s registrada en la zona de emplazamiento y cuya velocidad se utiliza por cuestiones de aprovechamiento energético.

Tabla 22

Potencia nominal y potencia teórica del aerogenerador para diferentes velocidades de viento

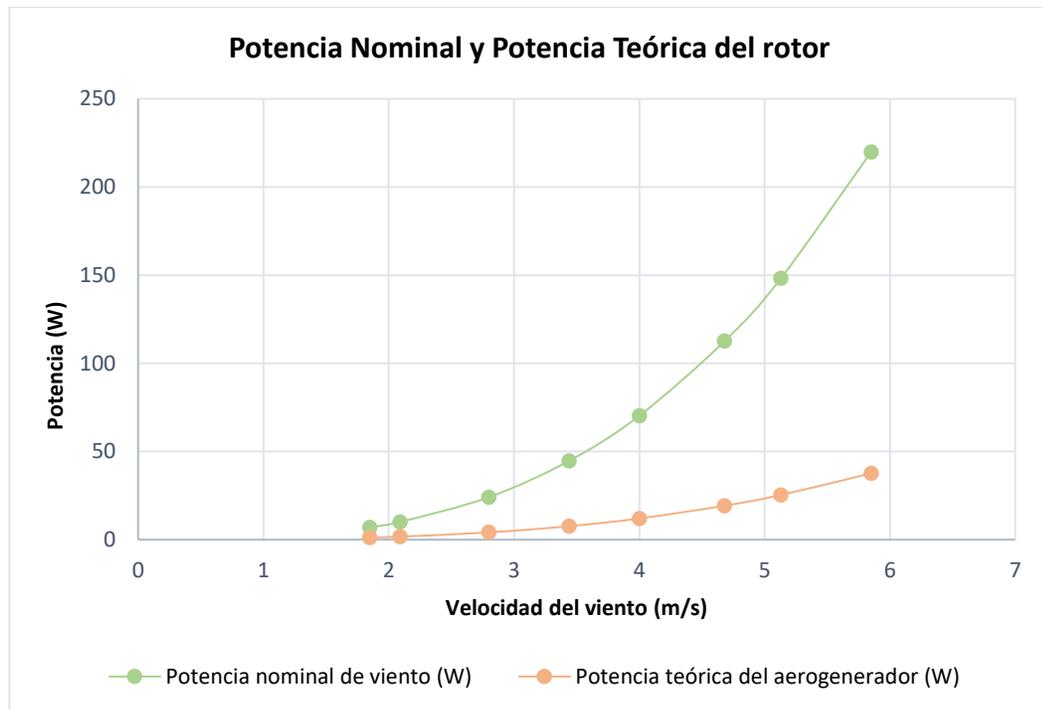
Velocidad del viento (m/s)	Potencia nominal de viento (W)	Potencia teórica del rotor (W)
1,85	6,95	1,19
2,09	10,02	1,71
2,80	24,10	4,12
3,44	44,69	7,64
4,00	70,27	12,02
4,68	112,54	19,25
5,13	148,23	25,35
5,85	219,8	37,59

Fuente: (El Autor)

En la Ilustración 69 se aprecia un aumento de potencia a medida que la velocidad del viento se incrementa, para el caso de estudio se evidencia una potencia nominal de 112,54 W y una potencia teórica de 19,25 W

Ilustración 69

Curva de potencia nominal y potencia teórica del rotor



Fuente: (El Autor)

Como se muestra en la Ilustración 69 existe una diferencia de potencia considerable, esto se debe a que el teorema de Betz dice que únicamente se puede aprovechar menos del 59% de la energía cinética y transformarla a energía mecánica, este valor varía según el tipo de turbina que se emplea, para el caso de la turbina Savonius se considera una eficiencia del 20%, esto quiere decir que la turbina puede aprovechar el 20% de la potencia nominal.

6.26.1. Potencia teórica del aerogenerador y área de barrido

Mediante la (Ecuación 20) se procede a calcular el área de barrido que tendrá el rotor para las diferentes velocidades de viento, la Tabla 23 muestra los resultados del cálculo del área de barrido, en donde se establece que cuando la velocidad del viento es mayor existe una disminución en el área de barrido y por ende la potencia que genera el rotor aumenta, mientras que al disminuir la velocidad del viento, el área de barrido aumenta y la potencia disminuye

Tabla 23

Cálculo del área de barrido para distintas velocidades de viento

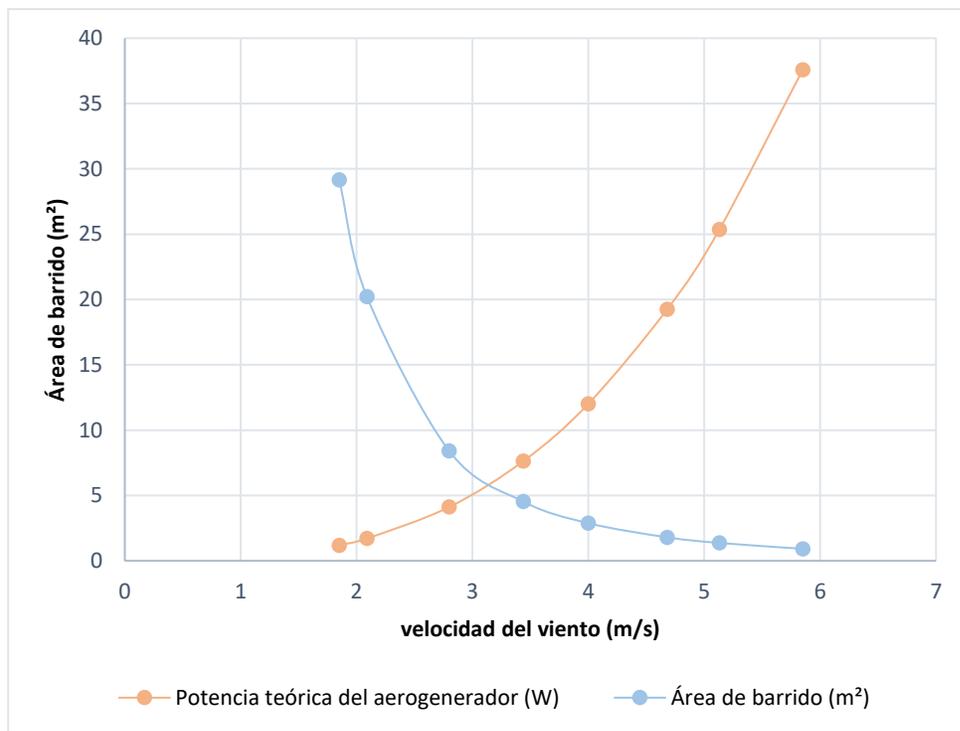
Velocidad de viento (m/s)	Potencia teórica del aerogenerador (W)	Área de barrido (m ²)
1,85	1,19	29,15
2,09	1,71	20,21
2,80	4,12	8,40
3,44	7,64	4,53
4,00	12,02	2,88
4,68	19,25	1,80
5,13	25,35	1,37
5,85	37,59	0,92

Fuente: (El Autor)

En la Ilustración 70 se puede observar de mejor manera que a menor velocidad de viento es mayor el área de barrido, por lo tanto, genera menor potencia; mientras que al aumentar la velocidad del viento el área de barrido disminuye y por ende aumenta la potencia.

Ilustración 70

Curvas de potencia y área de barrido



Fuente: (El Autor)

6.27. Análisis de resultados de la simulación CFD

Con la simulación de flujo de aire a través de los álabes se consigue el torque (τ), y la velocidad tangencial (V_t), los cuales varían a medida que la velocidad del viento aumenta, para determinar la potencia que genera la turbina se utiliza la siguiente ecuación.

$$P = \tau * \omega \quad \text{Ecuación 69}$$

Donde:

P : potencia

τ : torque

ω : velocidad angular

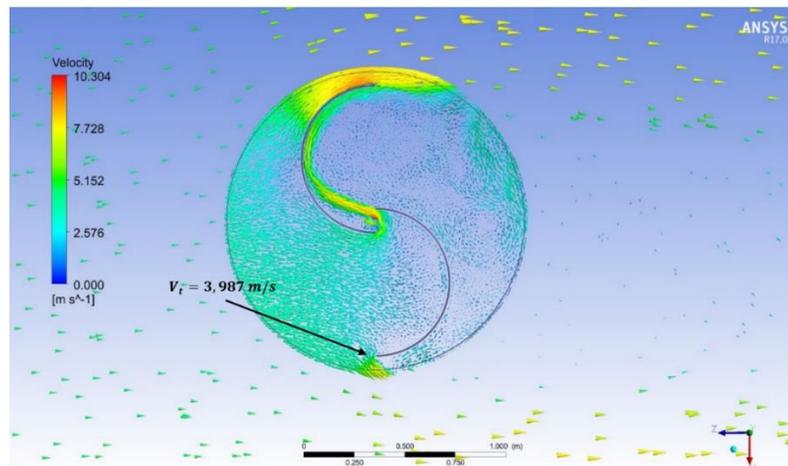
Para determinar la velocidad tangencial del rotor se utiliza la siguiente ecuación.

$$\omega = \frac{V_t}{R} \quad \text{Ecuación 70}$$

Mediante la simulación de flujo de aire a través de los álabes, se determina la velocidad tangencial y el torque para una velocidad promedio de 4,68 m/s, en la Ilustración 71 se muestra la velocidad tangencial en el extremo del álabes correspondiente a $V_t = 3,987 \text{ m/s}$.

Ilustración 71

Velocidad tangencial en los álabes del rotor



Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)

De igual manera en la Ilustración 72 se muestra el torque obtenido correspondiente a ($\tau = 3,875 N.m$), Los valores del ángulo de recorrido ($\Delta\theta = 0,5^\circ$) y paso de tiempo ($\Delta t = 0,00155$), se los determinó en la Tabla 21 de acuerdo a las dimensiones del rotor.

Todo esto se realizó en el lapso de 5500 iteraciones, hasta encontrar valor de convergencia en los residuales.

Ilustración 72

Valor de residuales de la simulación

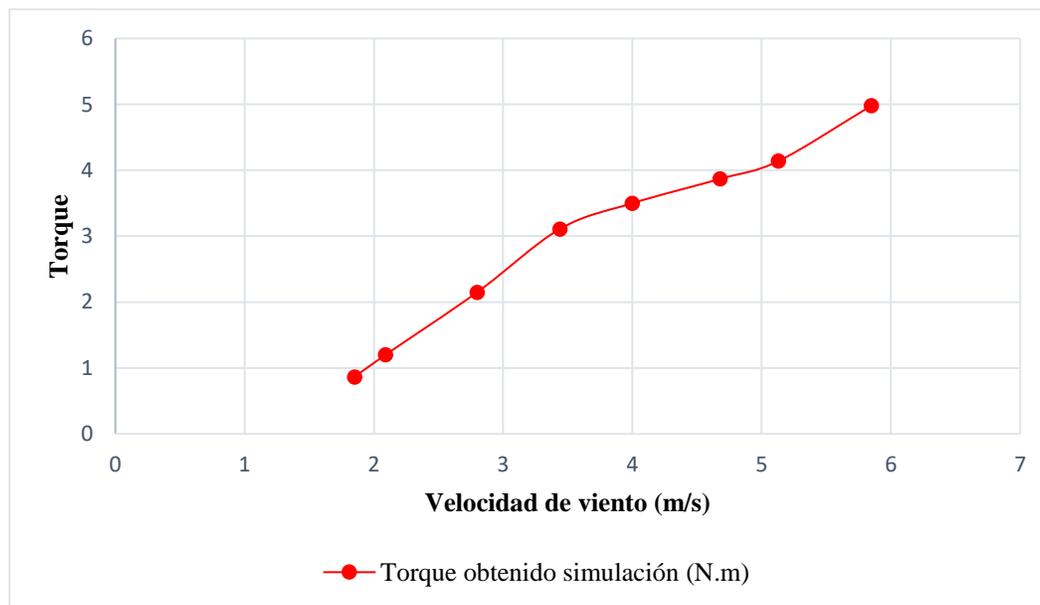


Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)

Los demás cálculos obtenidos para las diferentes velocidades de viento se los puede apreciar en el (Anexo 20).

Tabla 24*Resultados conseguidos de la simulación del rotor*

Velocidad del viento (m/s)	Velocidad tangencial (m/s)	Velocidad angular (rad/s)	TSR	Torque simulado (N.m)	Potencia simulada (W)	Potencia aprovechable (W)
1,85	1,57	2,34	0,85	0,865	2,02	1,73
2,09	1,76	2,62	0,85	1,2	3,15	2,69
2,8	2,44	3,63	0,85	2,15	7,8	6,7
3,44	2,92	4,35	0,85	3,11	13,53	11,57
4	3,45	5,14	0,85	3,5	18,04	15,42
4,68	3,98	5,94	0,85	3,87	23,02	19,68
5,13	4,36	6,49	0,85	4,14	26,86	22,97
5,85	4,97	7,4	0,85	4,98	36,85	31,51

Fuente: (El Autor)**Ilustración 73***Torque generado para las diferentes velocidades de viento***Fuente:** (El Autor)

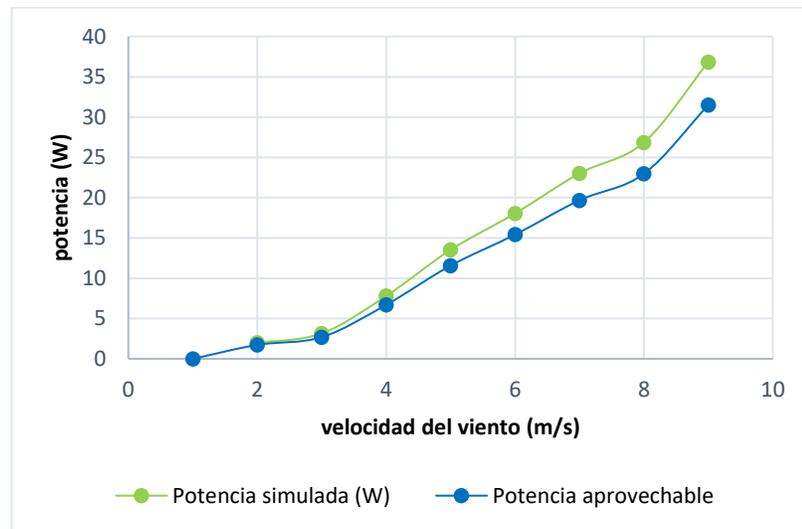
En la Tabla 24 y en la Ilustración 73 se muestra los valores obtenidos de la simulación del rotor, en la cual se determinó el torque para las distintas revoluciones del rotor, obteniendo que

para la velocidad promedio de 4,68 m/s se obtiene un torque equivalente a 3,87 N.m consiguiendo una potencia de 23,02 W, cabe recalcar que esta potencia seria la obtenida de la simulación a la salida del eje, pero para la potencia aprovechable se considera las pérdidas que van a existir tanto mecánicas como eléctricas ($n_t = 0,855$), con ello la potencia aprovechable será de 19,68W, lo que servirá para abastecer la demanda requerida.

Así mismo al determina la velocidad especifica (TSR = 0,85), se puede determinar en la Ilustración 12 el valor del rendimiento aerodinámico $C_p = 0,18$ (línea color rojo), valor muy cercano al establecido para el rotor Savonius (0,2), lo que comprueba que los valores obtenidos en la simulación son correctos, en la Ilustración 74 se aprecia las curvas de potencia que se generan al aumentar la velocidad del viento.

Ilustración 74

Curva de potencia simulada al aumentar la velocidad del viento



Fuente: (El Autor)

6.27.1. Comparación de resultados

En esta sección se lleva a cabo la comparación de los resultados obtenidos en los cálculos teóricos y simulados, para ello en la Tabla 25 se representa los valores calculados de potencia con las diferentes velocidades de viento.

Tabla 25

Comparación de resultados de potencia

Velocidad del viento (m/s)	Potencia teórica del aerogenerador (W)	Potencia simulada (W)	Potencia aprovechable (W)
1,85	1,19	2,02	1,73
2,09	1,71	3,15	2,69
2,8	4,12	7,8	6,7
3,44	7,64	13,53	11,57
4	12,02	18,04	15,42
4,68	19,25	23,02	19,68
5,13	25,35	26,86	22,97
5,85	37,59	36,85	31,51

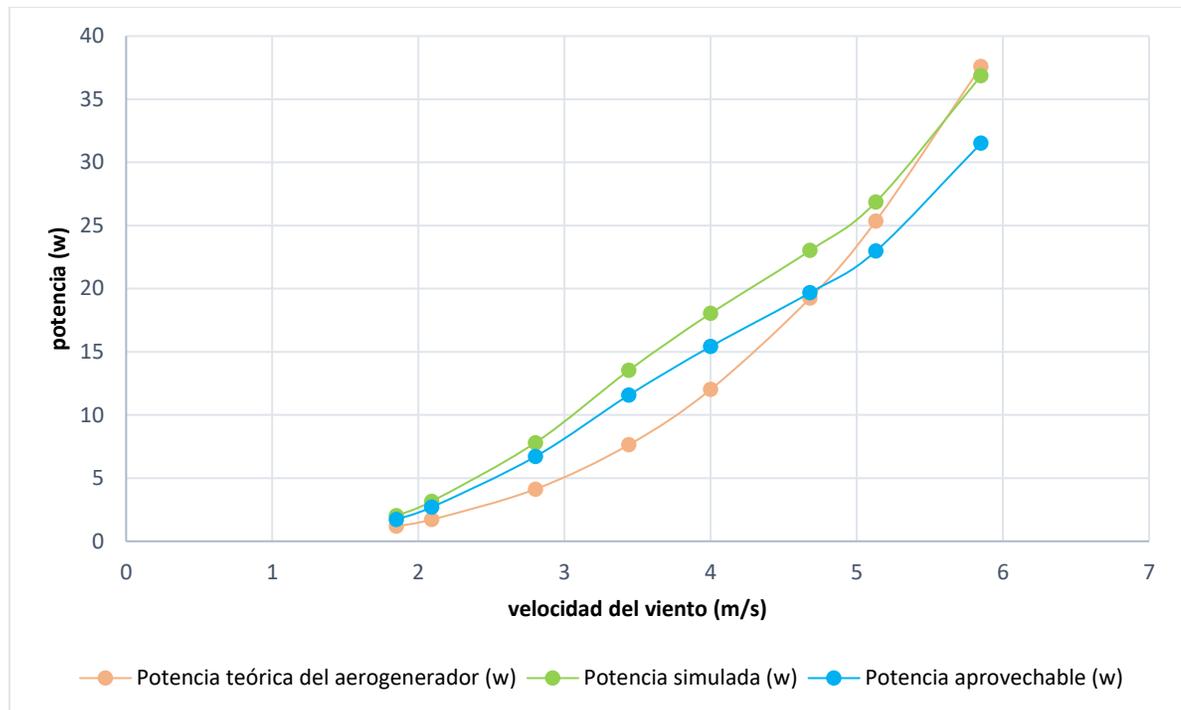
Fuente: (El Autor)

Como se muestra en la Tabla 25 se indica un valor de potencia para la velocidad promedio de 4,68 m/s, teniendo una potencia teórica de 19,25W, y una potencia al realizar la simulación de 23,02 W a la salida del eje, la cual al considerar las pérdidas eléctricas y mecánicas se transforma en la potencia aprovechable de 19,68 W.

Seguidamente se muestra las curvas de potencia generadas, la potencia generada varia al incrementar la velocidad del viento, como se observa en la Ilustración 75 se obtiene una potencia aprovechable de 19,68 W para la velocidad de estudio y de igual manera se obtiene una potencia máxima de 31,51W al alcanzar una velocidad de viento de 5,58 m/s.

Ilustración 75

Curvas de potencia



Fuente: (El Autor)

6.27.2. Tiempo de carga de la batería

Una vez que se ha obtenido la potencia del aerogenerador se establece el tiempo de carga de la batería, como se manifestó en el apartado f.6. (Cálculo de la potencia total extraída) se necesita una batería de 12V/100Ah para satisfacer la demanda requerida, una vez que se obtuvo la potencia aprovechable de 19,68 W del prototipo, se puede determinar el número de horas que se requiere para cargar el sistema.

Se determina en primera instancia la corriente que se requiere con la Ecuación 14

$$P = V * I$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{19,68 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 1,64 \text{ A}$$

Una vez obtenida la corriente se procede a calcular el tiempo de carga que requiere la batería

$$\text{Tiempo de carga} = T = \frac{Q}{I} = \frac{100 \text{ Ah}}{1,64 \text{ A}} = 61 \text{ horas}$$

Donde:

Q = Carga Q, (Amperios hora)

Se requiere un total de 61 horas para cargar por completo la batería, lo que equivale a 2,5 días de generación, por lo tanto, para reducir este lapso de tiempo se puede acoplar 3 turbinas en paralelo para lograr cumplir con la demanda en tan solo 20 horas de generación, de esa manera la batería se cargaría todos los días para cumplir con la demanda requerida.

Se debe de tener en cuenta que el tiempo de carga de la batería puede variar considerablemente al aumentar la velocidad del viento, debido a que existirá momentos en los que la velocidad del viento sea superior a la velocidad promedio, debido a estas circunstancias se podrá acortar el tiempo de carga de las baterías, y así mismo dado el caso de no producirse generación eléctrica, la batería está diseñada para satisfacer la demanda durante 3 días, que es un valor considerado para cuando se presente estas situaciones.

6.28. Análisis económico

En el presente apartado se lleva a cabo el análisis económico que tendría la ejecución de la turbina en el presente estudio, los componentes utilizados para este proyecto, se los especifica con su estimación económica de acuerdo a consultas en almacenes de distribución del medio, así como también a través de las páginas web de las empresas fabricante, en la Tabla 26 se indica los costos de los diferentes materiales y componentes empleados en el diseño del aerogenerador.

Tabla 26*Análisis económico considerado para el rotor Savonius*

Descripción	Denominaciones materiales	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Piezas normalizadas	Brida de dos agujeros	2	2,40	4,80
	Perno hexagonal M10x65x26-WS	54	0,40	21,60
	Arandelas planas M10	54	0,10	5,40
	Tuercas hexagonales M10	54	0,10	5,40
	Perno hexagonal M5x12x12-S	24	0,15	3,60
	Arandelas planas M5	24	0,10	2,40
	Tuercas hexagonales M5	24	0,10	2,40
	Perno hexagonal M8x20x20-S	20	0,20	4,00
	Arandelas planas M8	20	0,10	2,00
	Tuercas hexagonales M8	20	0,10	2,00
	Perno hexagonal M16x80---31-WS	4	0,45	1,80
	Arandelas planas M16	4	0,15	0,60
	Tuercas hexagonales M16	4	0,15	0,60
	Prisionero M4x4-S	8	0,12	0,96
	Engranaje grilon de 60 dientes	1	35,00	35,00
Piñón de grilon de 12 dientes	1	12,00	12,00	
Materiales de construcción	Eje principal de Ø32mm	1	32,00	32,00
	Plancha de acrílico 2400x1200mm	2	48,00	96,00
	Plancha de aluminio 1000x2000x6mm	1	43,00	43,00
	Tubo cuadrado 40x40x4mm	4	22,30	89,20
	Electrodo de tungsteno 1/8	1	5,32	5,32
Equipos eléctricos	Generador eléctrico dinamo	1	51,99	51,99
	Cable concéntrico 2x16	6 metros	0,69	4,14
			Total	426,01
Aerogeneradores		3	Total	1287,03
Equipos eléctricos	Batería 12V-100Ah	1	196,40	196,40
	Inversor Samlex PST-300-12	1	83,40	83,40
	Controlador de carga SHS-10	1	57,00	57,00
	Temporizador	1	16,99	16,99
Mano de obra	Corte y ensamblado de la estructura		50,00	50,00
	Conexión sistema eléctrico			
Gatos varios			50,00	50,00
			Gasto Total	1740,82

Fuente: (El Autor)**6.28.1. Ahorro anual**

Para determinar el ahorro anual se tiene la cantidad de kWh que produce el sistema eólico, para ello se determinó que una turbina puede generar 19,68 W de potencia, de tal manera que, al

acoplar 3 turbinas durante 24 horas de funcionamiento, se obtiene una potencia de 1,41696 kWh/día, lo que representa una cantidad de energía anual producida de 517,1904 kWh/año.

Obteniendo la energía anual producida por el sistema de generación, se determina el ahorro anual que se obtendría al aplicar el sistema, para ello se tiene que el costo de la tarifa de energía eléctrica de 0,096 USD/kWh (ARCONEL, 2022), con lo que se procede a calcular el ahorro anual.

$$\text{Ahorro electricidad} = \left(\frac{\text{Energía útil anual}}{\eta_{\text{sistema convencional}}} \right) * (\text{Precio})$$

$$\text{Ahorro electricidad} = \left(\frac{517,1904 \text{ kWh}}{100 \%} \right) * (0,096 \text{ USD/kWh})$$

$$\text{Ahorro electricidad} = 49,65 \text{ USD/año}$$

Se tiene un ahorro anual equivalente a 49,65 USD/año, puesto que, el potencial eólico en el lugar de emplazamiento para la generación de energía eléctrica es pobre, además el costo de los materiales de fabricación resultan elevados debido a que se tendría que adquirir por cantidades pequeñas y en comparación al conseguirlos al por mayor resulta mucho más costoso, todos estos antecedentes influyen el llevar a cabo el desarrollo del sistema, por tal razón el análisis económico resulta muy elevado y se estima que esto conllevaría a tener un período de amortización para la recuperación del capital de muchos años (aproximadamente 35 años), lo que no resulta satisfactorio.

7. Discusión

El objetivo de este proyecto fue diseñar y simular un aerogenerador de eje vertical de tipo Savonius, para la producción de energía eléctrica e iluminación exterior en el edificio de laboratorios de la FEIRNNR.

El diseño del aerogenerador Savonius fue considerado para llevar a cabo este estudio debido a que en el lugar de emplazamiento las velocidades de viento son bajas y este tipo de rotor es apropiado ya que puede arrancar a velocidades de viento pequeñas, su rendimiento aerodinámico es del (20%) considerado dentro de los rotores de eje vertical.

Para realizar el análisis de los datos estadísticos del INAMHI, la casa autosustentable de la FEIRNNR, los datos meteorológicos de la NASA y de tesis relacionadas al recurso eólico en el lugar de emplazamiento, se recurrió al uso del *software* de programación Python, el cual a través de la librería Pandas permite utilizar ventanas deslizantes para determinar el comportamiento del viento, ya que al graficar los datos diarios aparecen puntos con picos elevados, intermedios y mínimos, los cuales dificultan saber el comportamiento exacto que tiene el viento, para ello se utilizó las medias deslizantes para 7 y 30 días, las cuales agrupan los datos en ese lapso de tiempo y sacan promedios intermedios, lo cual permite observar de mejor manera el comportamiento del viento en el transcurso del tiempo.

Una vez determinados los promedios de velocidad del viento se realizó una interpolación IDW en el *software* QGIS, para determinar la velocidad de viento existente en la zona de estudio la cual tiene un valor correspondiente a 3,85 m/s para los 10m de altura, la cual se procedió a extrapolar para una altura superior de 20m, que es el lugar donde se pondrá en marcha el sistema,

dando como resultado una velocidad de 4,68 m/s, valor que servirá para fines de aprovechamiento energético.

La metodología determinada para el diseño de los componentes del modelo del rotor está fundada en la teoría funcional de otras turbinas eólicas desarrolladas en otros proyectos de grado como por ejemplo: (Pazmiño & Silva, 2010), (Jaramillo & Ochoa, 2013) y (Defaz Vizcaino & Pallasco Yugsi, 2017), demostrando el diseño y creando un modelo funcional adecuado, cuyos elementos se validaron mediante la simulación de elementos finitos, dando resultados aproximados a los calculados teóricamente.

En lo que respecta al diseño y selección de los componentes del rotor se hizo en función del recurso eólico existente en el lugar del emplazamiento, para ello el diseño del rotor es de dos álabes de pasaje abierto ya que algunos autores como por ejemplo (Zemamou et al., 2017) y (Lorena et al., 2021) recomiendan utilizar este tipo de rotor debido a que si afecta el rendimiento de la turbina, y se ha determinado que el número óptimo para este tipo de rotores es recomendable de dos álabes. Esto, ya que con dos álabes se consigue un mayor coeficiente de potencia que con un rotor de tres álabes. El motivo es que aumentar el número de álabes aumenta a su vez el volumen de la superficie de arrastre, lo que hace que aumente el par inverso que conduce a reducir el par neto en los álabes de la turbina.

Con los cálculos matemáticos realizados y los resultados obtenidos mediante la simulación en el *software* ANSYS®, se puede afirmar que el diseño propuesto tendrá un satisfactorio rendimiento del recurso eólico en la zona de emplazamiento, debido a que se obtuvo de manera teórica una potencia de 19,25 W mientras que al realizar la simulación de elementos finitos se

determinó una potencia aprovechable de 19,68 W, estos resultados obtenidos de la simulación son más exactos, ya que imita el funcionamiento real del prototipo cuando evoluciona con el tiempo

Al realizar comparaciones de resultados de simulación expuestos en el proyecto de grado de (Defaz Vizcaino & Pallasco Yugsi, 2017) y el artículo científico (Hidalgo et al., 2018) mismos que utilizan la metodología planteada se encontró algunas igualdades y diferencias; el modelo de rotor con valores similares de velocidades de viento, sin embargo, en los dos casos los valores de TSRs igual a 0.65 y 0.7, el perfil propuesto tiene valores más elevados de eficiencia que el convencional, mientras que en valores de TSRs más altos como 0.85, 0.9, 1.0 y 1.1 el perfil convencional sigue siendo eficiente.

Al realizar el análisis económico se determinó el costo total que tendría la realización del proyecto, el cual representa un valor de 1740,82 USD puesto que se requiere de tres turbinas para satisfacer la demanda solicitada, por ello, las turbinas producirían una cantidad de energía de 517 kWh/año consiguiendo un ahorro de energía de 49,65 USD/año, ya que la tarifa de energía eléctrica en el Ecuador es de 0,096 USD/kWh; de igual manera se establece el tiempo estimado para recuperar la inversión que sería de 35 años, por consiguiente, el sistema no resultaría muy satisfactorio por su elevado costo y el extenso tiempo de recuperación del capital, ya que en el mercado existen turbinas eólicas de uso doméstico con precios más accesibles.

8. Conclusiones

En la presente investigación se concluyó lo siguiente:

- Se determinó de la tabulación, el análisis y la interpolación de los datos, una velocidad de viento promedio de 4,68 m/s (considerada con fines de aprovechamiento energético) y una velocidad máxima de 11,70 m/s (considerada para el diseño mecánico de los componentes), con estos valores de velocidad de viento se procedió al dimensionamiento del prototipo.
- Se realizó el diseño y selección de los diferentes componentes del aerogenerador en función del recurso eólico existente en el lugar del emplazamiento, para ello el diseño de los álabes fue de pasaje abierto, con este tipo de rotor se obtuvo un mejor control de la velocidad de rotación al igual que el torque producido en el eje, logrando aprovechar el viento sin importar la trayectoria que este lleve, lo cual es bueno donde existan corrientes de baja velocidad, debido a que no necesitará de métodos de orientación.
- Se utilizó ANSYS Fluent para llevar a cabo la simulación de elementos finitos en un dominio tridimensional, en el cual se utilizó el modelo $k-\omega$ SST para la turbulencia, que es el más indicado para simular un modelo de flujo alrededor de un rotor Savonius, debido a que es un modelo de combinación entre las ecuaciones de $k-\epsilon$ y $k-\omega$, que permiten tener una obtención mayor del fenómeno lejos y cerca de la capa límite, consiguiendo una simulación de mayor exactitud.
- De los resultados obtenidos de la simulación se obtuvo una velocidad específica de "TSR = 0,85" y un coeficiente de potencia de "Cp = 0,18" lo cual establece que el prototipo podrá captar hasta el 18% de la energía cinética del viento y transformarla en energía mecánica, lo cual es satisfactorio debido a que en la zona de emplazamiento las velocidades de viento son bajas.

- Se estableció de los resultados obtenidos teóricamente que para la velocidad promedio de viento de 4,68 m/s se consigue una potencia de 19,25 W, mientras que al realizar la simulación de elementos finitos se determinó una potencia de 19,68 W con un torque equivalente a 3,87 N.m, lo que permitió verificar que el diseño propuesto es adecuado.
- Se estableció que se requiere de tres turbinas conectadas en paralelo, con un lapso de 20 horas de generación diaria para completar la carga de la batería, para lograr satisfacer la demanda, lo que no resulta beneficioso económicamente debido al costo que conllevaría fabricar una turbina, y al tiempo que se tardaría en recuperar la inversión, por tal motivo se determina que este tipo de turbinas no es viable para abastecer grandes consumos de energía y se debería de utilizar esta potencia generada para iluminar las luces de emergencia del laboratorio, las cuales únicamente funcionan cuando se corta el suministro de energía eléctrica.

9. Recomendaciones

- Se recomienda considerar nuevas metodologías de diseño para turbinas eólicas de eje vertical, orientadas al aprovechamiento eólico en lugares de bajo potencial. Este tipo de indagaciones requieren ser analizadas detalladamente para obtener resultados óptimos.
- Con lo que respecta a la simulación, en ocasiones el *software* puede crear mallados erróneos, para evitar estos inconvenientes se debe de utilizar operaciones de refinado de malla, con la finalidad de obtener resultados más precisos, además en caso de que se configure erróneamente las condiciones de entrada y salida del dominio computacional, se debe de eliminar los dominios previamente establecidos y proceder a definirlos de manera correcta según corresponda.
- El software Ansys Fluent® presenta algunas restricciones debido a que se trata de la versión estudiantil, y al no contar con una licencia profesional es recomendable que, si se trata de analizar geometrías complejas o de grandes dimensiones, se las analice de forma bidimensional, de modo que se consiga ejecutar un mallado de calidad, obteniendo resultados mucho más precisos.
- Se recomienda a los estudiantes de nuestra carrera a seguir en las investigaciones de diferentes prototipos y mecanismos que aprovechen el recurso eólico que existe en el país ya que estos estudios son un pilar fundamental en la nueva era energética.

10. Bibliografía

- Akwa, J. V., Vielmo, H. A., & Petry, A. P. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3054–3064.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.056>
- Álvarez O, Maldonado J, Montaña T, & Tenechagua L. (2014). Análisis Climático de la Velocidad del Viento en la Región Sur del Ecuador. *Revista Politécnica*, 35(3).
<http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen35/tomo3/AnalisisClimaticodelaVelocidaddelViento.pdf>
- Amiri, M., Teymourash, A. R., & Kahrom, M. (2017). Experimental and numerical investigations on the aerodynamic performance of a pivoted Savonius wind turbine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 231(2), 87–101.
<https://doi.org/10.1177/0957650916677428>
- Ansys. (n.d.). *ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide*. 2009-01-29.
https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm
- ARCONEL. (2022). *SUSTENTO DEL PROYECTO DE REGULACIÓN “ TRATAMIENTO Y REPORTE DE SUBSIDIOS ECUATORIANO EN EL SECTOR ELÉCTRICO .”*
- Asociación Municipal de Colonos del Pato - AMCOP. (2017). Informe de calculos para sistema solar fotovoltaico. *Abb*.
- AZO MATERIALS. (n.d.). Aleación de Acero AISI 4340 (UNS G43400).
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6772>
- Bernardo Estrella Evia. (2008). Prototipo experimental : turbina eólica de eje vertical. *Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Ciudad de México*.
- Bernardo, R. de la calle. (2018). *Estudio aerodinámico de un aerogenerador de eje vertical mediante técnicas de cálculo cfd*. 1–135.
- BOHORQUEZ, C., & ENCISO, M. (2019). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ANEMÓMETRO PARA ESTUDIOS DE VIABILIDAD DE IMPLEMENTACION DE GENERADORES EÓLICOS EN LUGARES REMOTOS. *UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA FACULTAD DE INGENIERÍAS PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA BUCARAMANGA 2019, 0*, 135.
- BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, K. J. (2014). Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. *Igarss 2014, 1*, 1–5.
- Calderón, D. X. F., & Díaz, J. P. L. (2012). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR VERTICAL CON ROTOR ESPIRAL TIPO VELETA PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, A IMPLEMENTARSE EN EL LABORATORIO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS DEL AEIRNNR DE LA UNL*.
- Cimbala, J., & Cengel, Y. (n.d.). *Mecánica de Fluidos, Fundamentos y Aplicaciones*.

- Defaz Vizcaino, A. L., & Pallasco Yugsi, M. A. (2017). *ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERADOR EÓLICO DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA VELOCIDADES ENTRE 5 Km/h Y 20 Km/h*.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13627/3/UPS-KT00523.pdf>
- Fernández, P. (2008). Fundamentos aerodinámicos. *Energía Eólica*, 1–135.
<http://www.termica.webhop.info/>
- Ferrari, G., Federici, D., Schito, P., Inzoli, F., & Mereu, R. (2017). CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis. *Renewable Energy*, 105, 722–734.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.077>
- Ferroaceros. (n.d.). *Manual de Aceros*. 48.
- Ficha técnica lámina PMMA (Acrílico). (n.d.). IdePlas. <https://studylib.es/doc/4805777/lámina-pmma>
- García, L. (2012). Simulación de un rotor eólico horizontal mediante métodos de dinámica de fluidos computacional. *Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas*, 68.
- Generador manual de manivela, Generador portátil de alta potencia de carga manual*. (n.d.).
https://www.banggood.com/IPRee-Outdoor-20W-Manual-Hand-Generator-DIY-USB-Electric-Dynamo-Power-Emergency-Phone-Charger-p-1225105.html?imageAb=2&cur_warehouse=CN&akmClientCountry=EC
- Hernandez, J. A. (2009). *Diseño y construcción de un aerogenerador de eje vertical de baja potencia. Prototipo I*.
- Hidalgo, I. R., Rojas, I. O., Riano, A. B., Morales, C. C., & Arias, A. R. (2018). Evaluation of a Geometric Modification in Savonius Rotor Using CFD Evaluación de Modificación Geométrica en Rotor Savonius Usando CFD. *2018 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2018 - Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2018.8564608>
- IMPORT ACEROS. (n.d.). *TUBO ESTRUCTURAL Y GRANDES DIMENSIONES*.
- JARAMILLO, N., & OCHOA, D. (2013). *Diseño En Detalle De Un Generador Eólico Tipo Savonius*. 155.
- Lorena, S., Tapia, P., Sepúlveda, Á. P., Ph, D., Sc, M., & Mec, I. (2021). *DISEÑO Y PRUEBA DE DESEMPEÑO DE UN ROTOR TIPO SAVONIUS PARA EXTRACCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DEL FLUJO VEHICULAR Proyecto de grado Presentado por : Profesor Asesor :*
- Menet, J. L. (2004). A double-step Savonius rotor for local production of electricity: A design study. *Renewable Energy*, 29(11), 1843–1862. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.02.011>
- Mosbahi, M., Ayadi, A., Chouaibi, Y., Driss, Z., & Tucciarelli, T. (2019). Performance study of a Helical Savonius hydrokinetic turbine with a new deflector system design. *Energy Conversion and Management*, 194(February), 55–74. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.080>
- Nadya Ximena Rivera Vásquez. (2014). *CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LA ILUMINACIÓN EN LOS LABORATORIOS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA DE*

ALIMENTOS DE UNA INSTITUCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR. *UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL DIRECCIÓN GENERAL DE POSGRADOS MAESTRÍA.*

Nueva, V., Un, E. D. E., & Diente, E. D. E. (2016). *Instituto tecnológico superior “vida nueva.”*

OLADE. (1981). *Aerogeneración de energía.* 121.

Ollague, H., & Crespo, H. (2014). *Estudio Y Evaluación De Los Parámetros De Operación Del Proyecto Eólico Villonaco De La Provincia De Loja - Ecuador* [Politécnica Salesiana Sede Cueca].
<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6284/1/UPS-CT002841.pdf>

Pazmiño, L. R. C., & Silva, P. A. P. (2010). *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL CON ROTOR TRIPALA PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS DEL A.E.I.R.N.N.R.*

PESCA, E. A. G., & ARDILA, G. F. T. (2014). ANÁLISIS AERODINÁMICO DE UNA MICROTURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA ZONA URBANA DE BOGOTÁ, COLOMBIA. *UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA INGENIERÍA MECÁNICA BOGOTÁ D.C, 0.*

Quevedo Cueva, N. P. (2008). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL PARA EL ACOPLAMIENTO DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN ELÉCTRICA CON GENERADOR DE DESPLAZAMIENTO LINEAL DE IMANES PERMANENTES. In *Universidad Nacional De Loja. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.*

Ramón, J. (2017). *Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical tipo “darrieus-h” para el aprovechamiento del recurso eólico en el edificio de laboratorios del área de la energía, las industrias y los recursos naturales no renovables.* 114.

RESTREPO, T. Y. (2020). EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE POTENCIA DE UNA TURBINA TIPO SAVONIUS MEDIANTE DOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL. *UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS DIVISIÓN DE INGENIERÍAS FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA DIVISIÓN DE INGENIERÍAS*, 25(1), 1–9.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jss.2014.12.010>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.03.034>
<https://www.iiste.org/Journals/index.php/JPID/article/viewFile/19288/19711>
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.678.6911&rep=rep1&type=pdf>

Rivera, A. trujillo. (2012). Diseño e un generador eólico vertical de 1/2 KW para velocidades de 7 m/s. *Universidad Veracruzana*, 1–67.

Rodríguez Buenestado, J. F. (2017). *Análisis Y Diseño De Un Aerogenerador Mediante Simulación 3D De Dinámica.* 24. <https://docplayer.es/200629056-Analisis-y-diseno-de-un-aerogenerador-mediante-simulacion-3d-de-dinamica-computacional-de-fluidos.html>

Saavedra Chimal, A., & Alejos Palomares, R. (2019). Diseño de la geometría de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius. *Memorias Del Xxv Congreso Internacional Anual De La Somim.*
http://somim.org.mx/memorias/memorias2019/articulos/A1_101.pdf

Sola, L. A., & Zurita, J. (2012). Diseño De Un Aerogenerador De Eje Vertical Tipo Savonius Para

Electrificación Rural. *Universidad Pública de Navarra*, 5, 169. <http://academic-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/6667/57946.pdf?sequence=1>

Vanegas Useche, L. V. (2018). Diseño de Elementos de Máquinas. In *Diseño de Elementos de Máquinas*. <https://doi.org/10.22517/9789587223019>

Zemamou, M., Aggour, M., & Toumi, A. (2017). Review of savonius wind turbine design and performance. *Energy Procedia*, 141(December), 383–388. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.047>

11. Anexos

Anexo 1: Compromiso de confidencialidad INAMHI

INSTITUTO NACIONAL DE
METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA



Oficio Nro. INAMHI-INAMHI-2020-0157-O

Quito, D.M., 26 de junio de 2020

Asunto: Requerimiento atendido. Trámite INAMHI-DAF-2020-0304-EX.
Usuario JorgeLuis Maldonado Correa. Universidad Nacional de Loja

Señor Ingeniero
Jorge Luis Maldonado Correa **Representante**
Facultad de Energía UNIVERSIDAD
NACIONAL DE LOJA

En su Despacho

De mi consideración:

En atención a su requerimiento mediante oficio s/n del 16 de junio de 2020, en el cual solicita "*de la manera más comedida, autorice a quién corresponda facilitar los datos: Diarios (o mensuales) de los parámetros de la VELOCIDAD DEL VIENTO, DIRECCIÓN Y TEMPERATURA de la estación meteorológica: LA ARGELIA (M0033) correspondiente a la provincia de Loja, Cantón Loja, Parroquia Punzara, período: 2010 hasta el 2020. Información que será aplicada en la elaboración de: Estudio de Investigación para el proyecto de titulación denominado: "Diseño y simulación de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, accionado por vientos de baja velocidad para la iluminación exterior del laboratorio de energías renovables, de la FEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja". Asimismo, se indica que el suscrito se compromete a entregar un ejemplar del documento final sin costo al INAMHI". Y una vez remitida la carta de confidencialidad suscrita con fecha 24 de junio de 2020, al respecto el Inamhi envía los datos de VIENTO VELOCIDAD, DIRECCIÓN Y TEMPERATURA de la estación M0033 LA ARGELIA - LOJA de acuerdo a la disponibilidad de la misma, período 2015 hasta la actualidad.*

Cualquier aclaratoria con respecto a lo indicado favor solicitar al representante legal del INAMHI, PhD. Vicente David Vásquez Granda.

Con sentimientos de distinguida consideración.

Atentamente,

Dr. Vicente David Vásquez Granda

Dirección: Núñez de Vela N36-15 y Corea
Código postal: 170507 / Quito – Ecuador
Teléfono: 593-2-3971100 – www.serviciometeorologico.gob.ec





Oficio Nro. INAMHI-INAMHI-2020-0157-O

Quito, D.M., 26 de junio de 2020

DIRECTOR EJECUTIVO

Referencias:

- INAMHI-DAF-2020-0304-EX

Anexos:

- m0033.rar

- compromiso_de_confidencialidad_inamhi_informacion-signed.pdf

Copia:

Señor Doctor

Luis Rigoberto Maisincho Guagrilla

Director Información Hidrometeorológico (E)

Señor Ingeniero

Diego Andrés Hinojosa Tinoco

Especialista en Gestión de la Información Hidrometeorológica 2

Señorita Ingeniera

Lourdes Carmen Suárez López

Oficinista

Is/LM

Dirección: Núñez de Vela N36-15 y Corea
Código postal: 170507 / Quito – Ecuador
Teléfono: 593-2-3971100 – www.serviciometeorologico.gob.ec

Lenin



Anexo 2: Especificaciones generales del material seleccionado para el eje del aerogenerador.

VCN	AISI : ~ 4340 H DIN : 34 Cr Ni Mo 6 W N°: 1.8582
-----	--

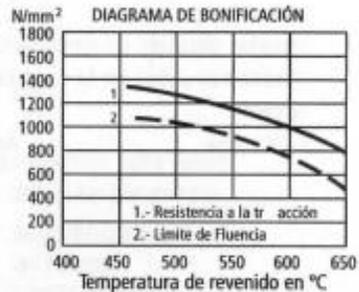
Tipo de aleación : C0,34 Cr1,5 Ni1,5 Mo0,2 Si0,30 Mn0,50%
 Color de identificación : Verde
 Estado de suministro : Bonificado 240-380 HB Típico. Ver tabla inf.
 Largo Standard : 3,5 - 5 metros.

Acero especial de bonificación al cromo níquel molibdeno, altamente resistente a la tracción, a la torsión y a cambios de flexión. Insensible al sobrecalentamiento en el forjado y libre de propensión a fragilidad de revenido. Por su estado de suministro permite en la mayoría de los casos su aplicación, sin necesidad de tratamiento térmico adicional.

APLICACIONES: Partes de maquinaria y repuestos de mayores dimensiones, sometidas a muy altos esfuerzos dinámicos y otras altas exigencias mecánicas. Cigüeñales, ejes de leva, árboles de transmisión, barras de torsión, ejes cardán, ejes para bombas, ejes para hélice de aviones, pernos y tuercas de alta tensión, rodillos de transportadora, vástagos y pines, muñones; brazos de dirección, ciertos engranajes, discos de embrague, etc.

INDICACIONES PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO

Forjado: 1050 - 850 °C
Recocido: 650 - 700 °C
 Enfriamiento lento en el horno
Temple: al aceite 830 - 860 °C
Dureza Obtenible: 52 - 56 HRC
Revenido: 540 - 680 °C
Normalizado: 850 - 880 °C
Nitrurar: 580 °C



Resistencia en estado Recocido		CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS EN ESTADO BONIFICADO						
máx. N/mm²	Dureza Brinell máx.	Diámetro mm.		Limite de fluencia N/mm²	Resistencia a la tracción N/mm²	Elongación (Lo = 5σ) % mín.	Estricción % mín.	Resiliencia según DVM Joule
		desde	hasta					
800	248	16	16	980	1180 - 1380	9	40	41
			40	885	1080 - 1280	10	45	48
		40	100	785	980 - 1180	11	50	48
		100	160	685	880 - 1080	12	55	48
		160	250	590	780 - 930	13	55	48

Soldadura: Consultar con nuestro Departamento Técnico

Fuente: (Ferroaceros, n.d.)

Anexo 3: Análisis de datos utilizando el lenguaje de programación Python.

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
=====
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA, FACULTAD DE ENERGÍA LAS INDUSTRIAS
    Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES
Proyecto : Trabajo de titulación previo a la obtención del título
    de Ingeniero Electromecánico
Autor    : Héctor Manuel Carrillo Sisalima
Fecha    : Marzo 2021
=====

Script de Python, para el análisis del recurso eólico en la Facultad
de la ENERGÍA, de la Universidad Nacional de Loja, correspondiente a
las bases de datos proporcionados por el INAMHI, SATELITE de la NASA
y CASA AUTOSUSTENTABLE de la Facultad de la Energía de la UNL. Haciendo
uso de la librería pandas.
=====
"""

#Importación de librerías necesarias

import pandas as pnd                # librería para leer los diferentes
archivos csv que conforman la base de datos
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as mplt    # Librería utilizada para mostrar los
gráficos
from matplotlib import pyplot as plt # Librería para graficas
import numpy as np                  # Librerria para operaciones con
matrices
from math import pi                 # pi = 3.1416...
from windrose import WindroseAxes  # Librería para graficar la Rosa de
vientos
from windrose import WindAxes
import matplotlib.cm as cm
from collections import Counter

"""
=====
ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS PROPORCIONADA POR EL INAMHI
=====
"""

#Ruta del archivo csv con el cual se trabaja
ruta = 'C:/Users/hmcar/Desktop/TESIS HECTOR CARRILLO/CORRECCIONES FINALES
TESIS 2021-2022/Archivos_Tesis/datos_interpolados.csv'

#Guardamos el archivo csv en una variable llamada datos_INAMI_diarios
```

```

# Y tomamos como índice del dataframe la columna en donde se encuentran la
fecha de cada muestra
datos_INAMI_diarios = pd.read_csv(ruta, index_col=3, parse_dates=True)

total_datos = datos_INAMI_diarios.shape

#Impresión del total de filas y columnas del dataframe (f, c)
print("El total de filas y columnas del archivo INAMHI es: "+
str(total_datos))

# Creamos una columna nueva en el datafreme llamada Año y Mes Respectivamente
datos_INAMI_diarios['Año'] = datos_INAMI_diarios.index.year
datos_INAMI_diarios['Mes'] = datos_INAMI_diarios.index.month

# Imprimimos las 4 primeras filas y las 4 últimas filas del nuevo dataframe
print(datos_INAMI_diarios.head(4))
print(datos_INAMI_diarios.tail(4))

# Guardamos en la variable columnas los datos de mayor interés en el presente
estudio
columnas = ['V_VIENTO_PROM', 'DIR_VIENTO_PROM']

# Fechas desde dónde comienza y termina el análisis de los datos (periodo de
estudio modificable)
# para ésta base de base de datos en concreto, se lo puede hacer en el
intervalo desde
# 28/Sep/2015 hasta el 18/Junio/2020

inicio = '2015-09-28'
final = '2020-06-18'

# creación de una ventana de graficación
mplt.style.use('classic') # Descomentar para visualizar gráfica detallada
por meses
fig,eje = mplt.subplots()

#===== GRAFICACIÓN DE LA VELOCIDAD DE VIENTO PROMEDIO =====
# muestras diarias
mplt.title('Velocidad de viento promedio Estación Meteorológica Argelia M0033
periodo 2015-2020')
eje.plot(datos_INAMI_diarios.loc[inicio:final,
'V_VIENTO_PROM'],color='gray',alpha=1.0, marker='.',
markersize=5, linestyle='-',linewidth=0.55,label='Muestras diarias
INAMHI')
eje.set_ylabel('Velocidad (m/s)')

# media deslizando 30 días
datos_INAMI_30d = datos_INAMI_diarios[columnas].rolling(30,
center=True).mean()
eje.plot(datos_INAMI_30d.loc[inicio:final,'V_VIENTO_PROM'],color =
'green',alpha=1.0,marker='.',

```

```

        markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55, label='Media Deslizante
de 30 Días')

# media deslizante 365 días
datos_INAMI_365d = datos_INAMI_diarios[columnas].rolling(365,
center=True).mean()
eje.plot(datos_INAMI_365d.loc[inicio:final, 'V_VIENTO_PROM'], color =
'blue', alpha=1.0, marker='.',
        markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55, label='Tendencia (Media
deslizante anual)')

mplt.grid()
eje.legend()
mplt.show()

# creación de una ventana de graficación
#mplt.style.use('classic') # Descomentar para visualizar gráfica detallada
por meses
fig, eje = mplt.subplots()
#===== GRAFICACIÓN DE LA VELOCIDAD DE VIENTO MAXIMO =====

columnas = ['V_VIENTO_MAX', 'DIR_VIENTO_PROM']

inicio = '2015-09-28'
final = '2020-06-18'

mplt.title('Velocidad de viento máxima Estación Meteorológica Argelia M0033
periodo 2015-2020')
eje.plot(datos_INAMI_diarios.loc[inicio:final,
'V_VIENTO_MAX'], color='gray', alpha=1.0, marker='.',
        markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55, label='Muestras diarias
INAMHI')
eje.set_ylabel('Velocidad (m/s)')

datos_INAMI_30d = datos_INAMI_diarios[columnas].rolling(30,
center=True).mean()
eje.plot(datos_INAMI_30d.loc[inicio:final, 'V_VIENTO_MAX'], color =
'green', alpha=1.0, marker='.',
        markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55, label='Media Deslizante
de 30 Días')

datos_INAMI_365d = datos_INAMI_diarios[columnas].rolling(365,
center=True).mean()
eje.plot(datos_INAMI_365d.loc[inicio:final, 'V_VIENTO_MAX'], color =
'orange', alpha=1.0, marker='.',
        markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55, label='Tendencia (Media
deslizante anual)')

mplt.grid()
eje.legend()
mplt.show()

```

```

#resumen datos
velocidad_promedio_INAMHI = datos_INAMI_diarios['V_VIENTO_PROM'].mean()
velocidad_promedio_MAX_INAMHI = datos_INAMI_diarios['V_VIENTO_MAX'].mean()

"""
=====
ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS PROPORCIONADO POR EL VISOR
DE ACCESO A DATOS DE LA NASA POWER v2.0.0
=====
"""
# Ruta del archivo cvs de la NASA
ruta = 'C:/Users/hmcar/Desktop/TESIS HECTOR CARRILLO/CORRECCIONES FINALES
TESIS 2021-2022/Archivos_Tesis/DATOS_SATELITE_NASA.csv'
#Guardamos el archivo csv en una variable llamada datos_NASA
datos_NASA = pnd.read_csv(ruta)

total_datos = datos_NASA.shape

#Impresión del total de filas y columnas del dataframe (f, c)
print("El total de filas y columnas del archivo SATELITE DE LA NASA es: "+
str(total_datos))

# Imprimimos las primeras 4 filas del dataframe
print(datos_NASA.head(4))
print(datos_NASA.info())

#Cambiamos formatos de fechas del archivo que se encuentre es día/mes/año a
año/mes/día
datos_NASA['Fecha'] =pnd.to_datetime(datos_NASA['FECHA'], dayfirst=True)

#Tomamos como indice a la columna Fecha creada
datos_NASA.index = datos_NASA['Fecha']
print(datos_NASA.head(4))

#Agregamos al dataframe las columnas Mes y Año
datos_NASA['Año'] = datos_NASA.index.year
datos_NASA['Mes'] = datos_NASA.index.month

print(datos_NASA.head(4))
print(datos_NASA.tail(4))

# Columnas que contienen los datos de mayor interés
columnas = ['V_VIENTO_PROM', 'V_VIENTO_MAX']

# Fechas desde dónde comienza y termina el análisis de los datos
# Para esta base de datos en particular se puede hacer el análisis desde
# el 01/Enero/2015 hasta el 31/Dic/2020

inicio = '2015-01-01'

```

```

final = '2020-12-31'

#matplotlib.style.use('classic') # Descomentar para visualizar gráfica detallada
#por meses
fig,eje = plt.subplots()

#===== VELOCIDAD DE VIENTO PROMEDIO =====
# Muestra diaria
plt.title('Velocidad de viento promedio NASA POWER v2.0.0 periodo 2015-2020')
eje.plot(datos_NASA.loc[inicio:final, 'V_VIENTO_PROM'],color='gray',alpha=1.0,
marker='.',
        markersize=5, linestyle='-',linewidth=0.55,label='Muestras diarias
NASA')
eje.set_ylabel('Velocidad (m/s)')

# Media deslizando 30 días
datos_NASA_30d = datos_NASA[columnas].rolling(30, center=True).mean()
eje.plot(datos_NASA_30d.loc[inicio:final, 'V_VIENTO_PROM'],color =
'green',alpha=1.0,marker='.',
        markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55,label='Media Deslizando
de 30 Días')

# Media deslizando 365 días
datos_NASA_365d = datos_NASA[columnas].rolling(365, center=True).mean()
eje.plot(datos_NASA_365d.loc[inicio:final, 'V_VIENTO_PROM'],color =
'blue',alpha=1.0,marker='.',
        markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55,label='Tendencia (Media
deslizando anual)')

plt.grid()
eje.legend()
plt.show()

#===== VELOCIDAD DE VIENTO MAXIMA =====

#matplotlib.style.use('classic') # Descomentar para visualizar gráfica detallada
#por meses
fig,eje = plt.subplots()

plt.title('Velocidad de viento máxima NASA POWER v2.0.0 periodo 2015 - 2020')
eje.plot(datos_NASA.loc[inicio:final, 'V_VIENTO_MAX'],color='gray',alpha=1.0,
marker='.',
        markersize=5, linestyle='-',linewidth=0.55,label='Muestras diarias
NASA')
eje.set_ylabel('Velocidad (m/s)')

datos_NASA_30d = datos_NASA[columnas].rolling(30, center=True).mean()
eje.plot(datos_NASA_30d.loc[inicio:final, 'V_VIENTO_MAX'],color =
'green',alpha=1.0,marker='.',

```

```

        markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55, label='Media Deslizante
de 30 Días')

datos_NASA_365d = datos_NASA[columnas].rolling(365, center=True).mean()
eje.plot(datos_NASA_365d.loc[inicio:final, 'V_VIENTO_MAX'], color =
'orange', alpha=1.0, marker='.',
        markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55, label='Tendencia (Media
deslizante anual)')

mplt.grid()
eje.legend()
mplt.show()

#resumen datos
velocidad_promedio_NASA = datos_NASA['V_VIENTO_PROM'].mean()
velocidad_promedio_MAX_NASA = datos_NASA['V_VIENTO_MAX'].mean()

"""
=====
ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS PROPORCIONADA POR LA CASA AUTOSUSTENTABLE
DE LA FACULTAD DE LA ENERGÍA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA
=====
"""

# Ruta del archivo
ruta = 'C:/Users/hmcar/Desktop/TESIS HECTOR CARRILLO/CORRECCIONES FINALES
TESIS 2021-2022/Archivos_Tesis/Casa_sustentable_ENERGIA_UNL.csv'

#Guardamos el archivo csv en una variable llamada datos_UNL_ENERGIA
datos_UNL_ENERGIA = pnd.read_csv(ruta)

total_datos = datos_UNL_ENERGIA.shape

#Impresión del total de filas y columnas del documento (f, c)
print("El total de filas y columnas del archivo UNL-ENERGIA es: "+
str(total_datos))
print(datos_UNL_ENERGIA.head(4))
print(datos_UNL_ENERGIA.info())

#Cambiamos formatos de fechas del archivo que se encuentre es día/mes/año a
año/mes/día
datos_UNL_ENERGIA['Fecha'] =pnd.to_datetime(datos_UNL_ENERGIA['FECHA'],
dayfirst=True)

#Tomamos como indice a la columna Fecha creada
datos_UNL_ENERGIA.index = datos_UNL_ENERGIA['Fecha']
print(datos_UNL_ENERGIA.head(4))
datos_UNL_ENERGIA['Año'] = datos_UNL_ENERGIA.index.year
datos_UNL_ENERGIA['Mes'] = datos_UNL_ENERGIA.index.month

print(datos_UNL_ENERGIA.head(4))
print(datos_UNL_ENERGIA.tail(4))

```

```

# Columnas que contienen los datos de mayor interés
columnas = ['V_VIENTO_PROM', 'V_VIENTO_MAX']

# Creamos un dataframe con el remuestreo de los datos, agrupados por el valor
medio
# del total de muestras diarias
datos_UNL_ENERGIA_diarios = datos_UNL_ENERGIA[columnas].resample('D').mean()

# Fechas desde dónde comienza y termina el análisis de los datos
# proporcionados por la base de datos de la casa sustentable
# para este caso en particular el análisis se lo puede realizar en el
# periodo 01/Sep/2020 hasta el 26/Sep/2021

inicio = '2020-09-01'
final = '2021-09-26'

#mplt.style.use('classic') # Descomentar para visualizar gráfica detallada
# por meses
fig,eje = mplt.subplots()

#===== VELOCIDAD DE VIENTO PROMEDIO =====

mplt.title('Velocidad de viento promedio casa autosustentable FEIRNNR periodo
Sep 2020-Sep 2021')
eje.plot(datos_UNL_ENERGIA_diarios.loc[inicio:final,
'V_VIENTO_PROM'],color='gray',alpha=1.0, marker='.',
markersize=5, linestyle='-',linewidth=0.55,label='Muestras diarias')
eje.set_ylabel('Velocidad (m/s)')

datos_INAMI_30d = datos_UNL_ENERGIA_diarios[columnas].rolling(30,
center=True).mean()
eje.plot(datos_INAMI_30d.loc[inicio:final, 'V_VIENTO_PROM'],color =
'green',alpha=1.0,marker='.',
markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55,label='Media Deslizante
de 30 Días')

datos_INAMI_365d = datos_UNL_ENERGIA_diarios[columnas].rolling(180,
center=True).mean()
eje.plot(datos_INAMI_365d.loc[inicio:final, 'V_VIENTO_PROM'],color =
'blue',alpha=1.0,marker='.',
markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55,label='Tendencia (Media
deslizante semestral)')

mplt.grid()
eje.legend()
mplt.show()

#===== VELOCIDAD DE VIENTO MAXIMO =====
#mplt.style.use('classic') # Descomentar para visualizar gráfica detallada
# por meses

```

```

fig,eje = plt.subplots()
plt.title('Velocidad de viento máxima casa autosustentable FEIRNNR periodo
Sep 2020- Sep 2021')
eje.plot(datos_UNL_ENERGIA_diarios.loc[inicio:final,
'V_VIENTO_MAX'],color='gray',alpha=1.0, marker='.',
markersize=5, linestyle='-',linewidth=0.55,label='Muestras diarias')
eje.set_ylabel('Velocidad (m/s)')

datos_INAMI_30d = datos_UNL_ENERGIA_diarios[columnas].rolling(30,
center=True).mean()
eje.plot(datos_INAMI_30d.loc[inicio:final,'V_VIENTO_MAX'],color =
'green',alpha=1.0,marker='.',
markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55,label='Media Deslizante
de 30 Días')

datos_INAMI_365d = datos_UNL_ENERGIA_diarios[columnas].rolling(180,
center=True).mean()
eje.plot(datos_INAMI_365d.loc[inicio:final,'V_VIENTO_MAX'],color =
'orange',alpha=1.0,marker='.',
markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55,label='Tendencia (Media
deslizante semestral)')

plt.grid()
eje.legend()
plt.show()

#resumen datos
velocidad_promedio_UNL_ENERGIA =
datos_UNL_ENERGIA_diarios['V_VIENTO_PROM'].mean()
velocidad_promedio_MAX_UNL_ENERGIA =
datos_UNL_ENERGIA_diarios['V_VIENTO_MAX'].mean()

"""
=====
ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS PROPORCIONADA POR EL INAMHI PERIODO
SEP 2020 - SEP 2021
=====
"""

ruta = 'C:/Users/hmcar/Desktop/TESIS HECTOR CARRILLO/CORRECCIONES FINALES
TESIS 2021-2022/Archivos_Tesis/INAMHI_2020_2021.csv'

#Guardamos el archivo csv en una variable llamada datos_INAMI_2020_2021
datos_INAMI_2020_2021 = pd.read_csv(ruta)

total_datos = datos_INAMI_2020_2021.shape

#Impresión del total de filas y columnas del dataframe (f, c)
print("El total de filas y columnas del archivo INAMHI 2020-2021 es: "+
str(total_datos))
print(datos_INAMI_2020_2021.head(4))

```

```

print(datos_INAMI_2020_2021.info())

#Cambiamos formatos de fechas del archivo que se encuentre es día/mes/año a
año/mes/día
datos_INAMI_2020_2021['Fecha']
=pnd.to_datetime(datos_INAMI_2020_2021['FECHA'], dayfirst=True)

#Tomamos como indice a la columna Fecha creada
datos_INAMI_2020_2021.index = datos_INAMI_2020_2021['Fecha']
print(datos_INAMI_2020_2021.head(4))
datos_INAMI_2020_2021['Año'] = datos_INAMI_2020_2021.index.year
datos_INAMI_2020_2021['Mes'] = datos_INAMI_2020_2021.index.month

print(datos_INAMI_2020_2021.head(4))

print(datos_INAMI_2020_2021.tail(4))

# Columnas que contienen los datos de mayor interés
columnas = ['V_VIENTO_PROM', 'V_VIENTO_MAX']

# Se aplica un remuestreo al total de las muestras para agruparlas por
promedios diarios
datos_INAMI_2020_2021_diarios =
datos_INAMI_2020_2021[columnas].resample('D').mean()
# Debido a que existen días que no tienen información se procede hace uso de
la
# interpolación lineal
datos_INAMI_2020_2021_diarios_interpolados =
datos_INAMI_2020_2021_diarios.interpolate()
#Guardamos el nuevo dataframe con los valores promedio diarios
f = open('C:/Users/hmcar/Desktop/TESIS HECTOR CARRILLO/CORRECCIONES FINALES
TESIS 2021-2022/Archivos_Tesis/Datos_INAMHI_2020_2021_diarios.csv', 'a')
f.write(datos_INAMI_2020_2021_diarios_interpolados.to_csv())
#Impresión del total de filas y columnas del documento (f, c)
total_datos_diarios = datos_INAMI_2020_2021_diarios_interpolados.shape
print("El total de filas y columnas del archivo INAMHI 2020-2021 diarios es:
"+ str(total_datos_diarios))

print(datos_INAMI_2020_2021_diarios_interpolados.head(4))

print(datos_INAMI_2020_2021_diarios_interpolados.tail(4))

# Fechas desde dónde comienza y termina el análisis de los datos
# proporcionados por el INAMHI, para este caso se puede realizar el analisis
desde
# el 01/Sep/2020 hasta el 26/Sep/2021

inicio = '2020-09-01'
final = '2021-09-26'

```

```

#matplotlib.style.use('classic') # Descomentar para visualizar gráfica detallada
por meses
fig,eje = plt.subplots()

#===== VELOCIDAD DE VIENTO PROMEDIO =====
plt.title('Velocidad de viento promedio Estación Meteorológica Argelia M0033
periodo Sep 2020- Sep 2021')
eje.plot(datos_INAMI_2020_2021_diarios_interpolados.loc[inicio:final,
'V_VIENTO_PROM'],color='gray',alpha=1.0, marker='.',
markersize=5, linestyle='-',linewidth=0.55,label='Muestras diarias
INAMHI')
eje.set_ylabel('Velocidad (m/s)')

datos_INAMI_30d =
datos_INAMI_2020_2021_diarios_interpolados[columnas].rolling(30,
center=True).mean()
eje.plot(datos_INAMI_30d.loc[inicio:final,'V_VIENTO_PROM'],color =
'green',alpha=1.0,marker='.',
markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55,label='Media Deslizante
de 30 Días')

datos_INAMI_365d =
datos_INAMI_2020_2021_diarios_interpolados[columnas].rolling(90,
center=True).mean()
eje.plot(datos_INAMI_365d.loc[inicio:final,'V_VIENTO_PROM'],color =
'blue',alpha=1.0,marker='.',
markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55,label='Tendencia (Media
deslizante semestral)')

plt.grid()
eje.legend()
plt.show()

#===== VELOCIDAD DE VIENTO MAXIMO =====
#matplotlib.style.use('classic') # Descomentar para visualizar gráfica detallada
por meses
fig,eje = plt.subplots()
plt.title('Velocidad de viento máxima Estación Meteorológica Argelia M0033
periodo Sep 2020- Sep 2021')
eje.plot(datos_INAMI_2020_2021_diarios_interpolados.loc[inicio:final,
'V_VIENTO_MAX'],color='gray',alpha=1.0, marker='.',
markersize=5, linestyle='-',linewidth=0.55,label='Muestras diarias
INAMHI')
eje.set_ylabel('Velocidad (m/s)')

datos_INAMI_30d =
datos_INAMI_2020_2021_diarios_interpolados[columnas].rolling(30,
center=True).mean()

```

```

eje.plot(datos_INAMI_30d.loc[inicio:final, 'V_VIENTO_MAX'], color =
'green', alpha=1.0, marker='.',
        markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55, label='Media Deslizante
de 30 Días')

datos_INAMI_365d =
datos_INAMI_2020_2021_diarios_interpolados[columnas].rolling(180,
center=True).mean()
eje.plot(datos_INAMI_365d.loc[inicio:final, 'V_VIENTO_MAX'], color =
'orange', alpha=1.0, marker='.',
        markersize=5, linestyle='-', linewidth=0.55, label='Tendencia (Media
deslizante semestral)')

mplt.grid()
eje.legend()
mplt.show()

#resumen datos
velocidad_promedio_INAMHI_2020_2021 =
datos_INAMI_2020_2021_diarios_interpolados['V_VIENTO_PROM'].mean()
velocidad_promedio_MAX_INAMHI_2020_2021 =
datos_INAMI_2020_2021_diarios_interpolados['V_VIENTO_MAX'].mean()

"""
=====
RESUMEN DE LAS BASES DE DATOS
=====
"""
print('===== RESUMEN DE DATOS =====')
print('La velocidad promedio de la base de datos del INAMHI es: '+
str(velocidad_promedio_INAMHI))
print('La velocidad promedio máxima de la base de datos del INAMHI es: '+
str(velocidad_promedio_MAX_INAMHI))
print('La velocidad promedio de la base de datos de la NASA es: '+
str(velocidad_promedio_NASA))
print('La velocidad promedio máxima de la base de datos de la NASA es: '+
str(velocidad_promedio_MAX_NASA))
print('La velocidad promedio de la base de datos UNL ENERGIA es: '+
str(velocidad_promedio_UNL_ENERGIA))
print('La velocidad promedio máxima de la basede datos UNL ENERGIA es: '+
str(velocidad_promedio_MAX_UNL_ENERGIA))
print('La velocidad promedio de la base de datos INAMHI 2020-2021 es: '+
str(velocidad_promedio_INAMHI_2020_2021))
print('La velocidad promedio máxima de la basede datos INAMHI 2020-2021 es: '+
str(velocidad_promedio_MAX_INAMHI_2020_2021))

"""
=====
ANÁLISIS DE LOS PROMEDIOS
=====

```

```

"""

Bases_de_Datos = ['INAMHI', 'NASA', 'UNL-ENERGIA', 'INAMHI 2020-2021']
DB_prom = [velocidad_promedio_INAMHI, velocidad_promedio_NASA,
velocidad_promedio_UNL_ENERGIA, velocidad_promedio_INAMHI_2020_2021 ]
DB_prom_max = [ velocidad_promedio_MAX_INAMHI, velocidad_promedio_MAX_NASA,
velocidad_promedio_MAX_UNL_ENERGIA,
                velocidad_promedio_MAX_INAMHI_2020_2021]

#creacion de un nuevo dataframe con los valores promedio
data_frame_promedios = {'Base_Datos':Bases_de_Datos, 'V_PROM': DB_prom,
'V_MAX_PROM':DB_prom_max}
df = pd.DataFrame(data_frame_promedios)
df['Valor_medio'] = (df['V_PROM']+df['V_MAX_PROM'])/2.0
print(df)

#Dibujamos las gráficas de velocidades promedios acorde a cada base de datos
def bar_graph():
    fig = plt.figure(figsize=(10,6))
    plt.bar(df["Base_Datos"], df["V_PROM"],label="Velocidad promedio
m/s",align="edge",width=0.3,)
    plt.bar(df["Base_Datos"], df["V_MAX_PROM"], label="Velocidad promedio
máxima m/s",
            align="edge", width=-0.3)
    plt.xlabel("Bases de Datos")
    plt.ylabel("Velocidad de Viento (m/s)")
    plt.title("Promedios de Velocidad de viento registrados")
    plt.legend()
    plt.show()
bar_graph()

#Dibujamos las gráficas de velocidades medias entre promedio y maximo
def bar_graph():
    fig = plt.figure(figsize=(10,6))
    plt.bar(df["Base_Datos"], df["Valor_medio"], label="Velocidad media m/s",
            align="center", width=0.3, color='green')
    plt.xlabel("Bases de Datos")
    plt.ylabel("Velocidad de Viento (m/s)")
    plt.title("Velocidad de viento media entre promedio y máxima registrada")
    plt.legend()
    plt.show()
bar_graph()

Valor_para_estudio = df['Valor_medio'].mean()

#Resultado del análisis
print('El valor de velocidad de viento recomendado para el diseño del
aerogenerador tipo SAVONIUS es: '+ str(Valor_para_estudio))

```

Anexo 4: Especificaciones técnicas de la luminaria.

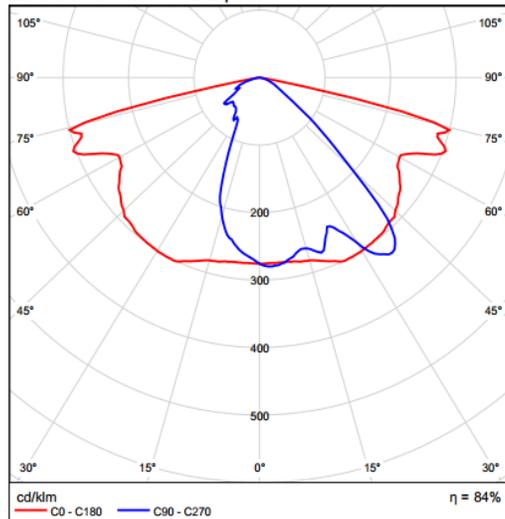
Schröder AMPERA MINI / 5238 / 8 LEDs 900mA WW 727 25,4W // 426632 1x8
LEDs 900mA WW 727



Grado de eficacia de funcionamiento: 83.75%
Flujo luminoso de lámparas: 2981 lm
Flujo luminoso de las luminarias: 2496 lm
Potencia: 25.4 W
Rendimiento lumínico: 98.3 lm/W

Indicaciones colorimétricas
1x8 LEDs 900mA WW 727: CCT 2700 K, CRI 70

Emisión de luz 1 / CDL polar



CONCEPTO

Familia de 3 luminarias LED para calles: Mini, Midi, Maxi
Aplicación: Carreteras y calles urbanas, Plazas y zonas peatonales, Rotondas, Carreteras y autopistas, Parques, Grandes áreas, Parkings, Puentes, Carriles bici
Dimensiones (mm):
•Ancho: 340
•Alto: 90
•Largo: 583
Peso (kg): 7,8
Altura recomendada de instalación: entre 4m y 12mm
Para una óptima disipación termina, el driver y el motor fotométrico LED están en compartimientos separados y yuxtapuestos en sección horizontal.
Compartimiento óptico independiente del spigot asegura una fácil instalación.

CUBIERTA & ACABADO

•CUBIERTA en inyección de alta presión de aluminio, cubierto por pintura en polvo poliéster.
•Acceso directo y libre de herramientas al compartimiento eléctrico y óptico, soltando los anclajes laterales y pivateando el bloque óptico hacia abajo. Desconectores eléctricos (tipo cuchilla) permiten una fácil remoción libre de riesgos.
•Color: AKZO grey 900 arenado
•Superficie proyectada de luminaria Cd.S (viento): 0.078m²; Cs.S (lateral): 0.036m²; Cl.S (alzamiento): 0.115m²
•Estanqueidad - driver & compartimiento Óptico: IP 66
•Resistencia a impactos: IK 09

INSTALACION

•Fijación reversible realizada en inyección de aluminio de alta presión.
•Diámetro 32-48, 48-60mm o 76mm, sujetado con dos tornillos de acero inoxidable.
•Permite la inclinación (poste para entrada vertical) desde 0 a +15°; y de 0 a -15° en pasos de 5°, para postes de entrada horizontal.
•Acceso sin herramientas para mantenimiento.

UNIDAD OPTICA

•"FutureProof", reemplazable en el sitio retirándolo de la cubierta con una junta removible - Shore50.
•Protege los lentes de la degradación con un vidrio de 5mm de espesor, temperado y extra claro.
•PCB plana, con lentes acrílicos superpuestos.
•Varias distribuciones fotométricas: estrecha, calles, autopistas, medias y grandes áreas.
•CRI > 70
•ULR: 0%
DEPRECIACION LUMINOSA DEL LED
•Flujo residual luminoso @ Tq=25°C @ 100.000 hrs: 350mA & 500mA: 90%; 700mA: 80%

ELECTRICO

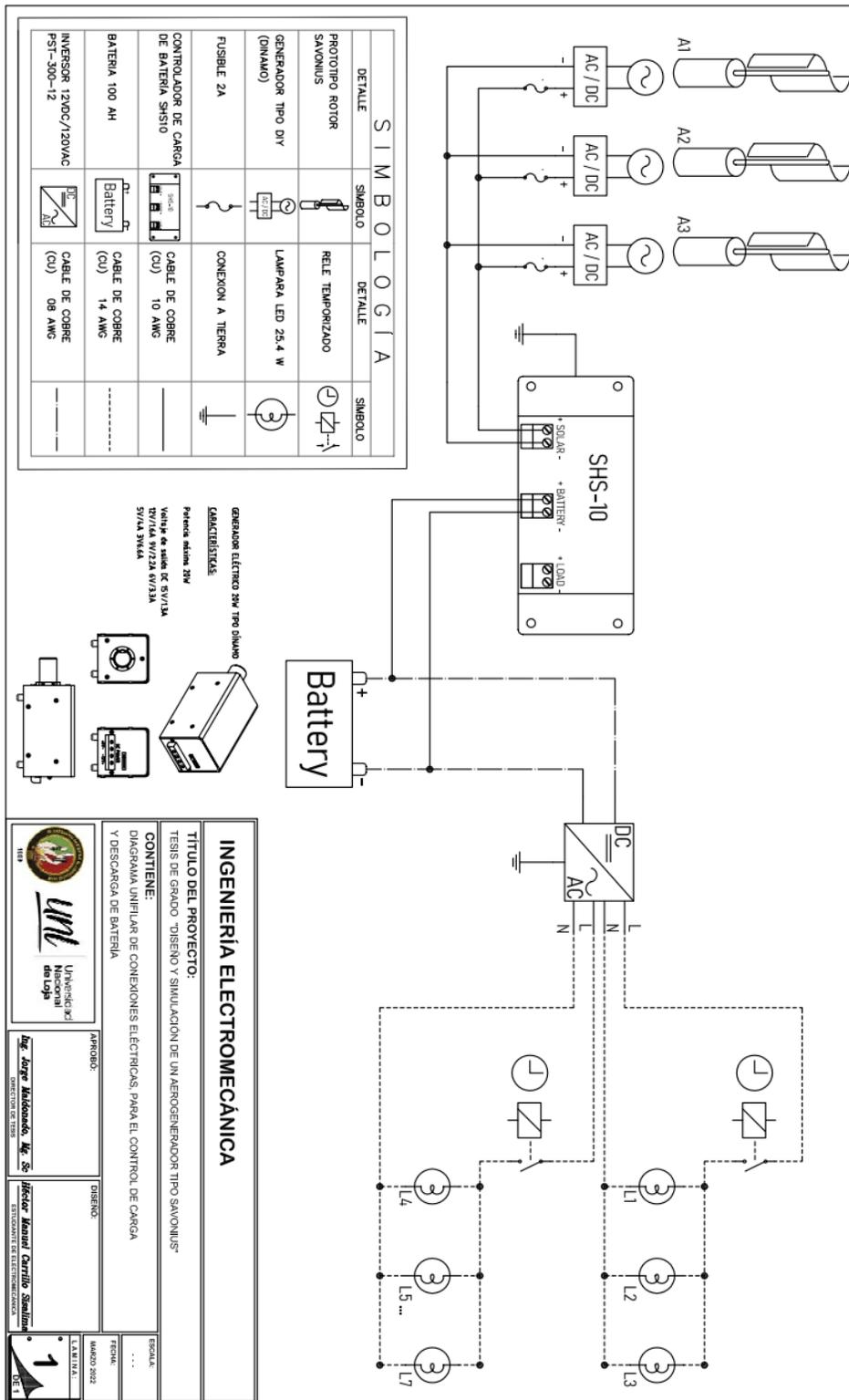
•Clase I o Clase II
•Voltaje de entrada: 120-277V - 50-60Hz
•Factor de potencia > 90% a máxima carga
•10kV, 10kA Protección contra sobretensiones
•Automáticamente desconecta la energía al ser abierta, para más seguridad
•Protección térmica en los LEDs de la PCB

ESTANDARDS Y CERTIFICACIONES

•CE
•ENEC
•LM79-80
•ETL
•ROHS
•Todas las mediciones son certificadas en laboratorios acreditados con ISO17025

Fuente: (Schröder, s.f.)

Anexo 5: Diagrama de conexión eléctrica para la carga y descarga de la batería.



INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

TÍTULO DEL PROYECTO:
 TESIS DE GRADO "DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN AEROGENERADOR TIPO SAMONIUS"

CONTIENE:
 DIAGRAMA UNIFILAR DE CONEXIONES ELÉCTRICAS PARA EL CONTROL DE CARGA Y DESCARGA DE BATERÍA

APROBADO: _____
DISEÑO: _____

ESCALA:
 ...
 FECHA:
 MARZO 2022

UNIVERSIDAD NACIONAL del Litoral
 Lic. Jorge Maldonado, Mg. Sc.
 Director Manuel Carrillo Sosa
 DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTROMECÁNICA

1
 DE 1

Fuente: (El Autor)

Anexo 6: Isolíneas, colores falsos y valores en luxes, de la iluminación exterior del Laboratorio de Energías Renovables de la FEIRNNR.

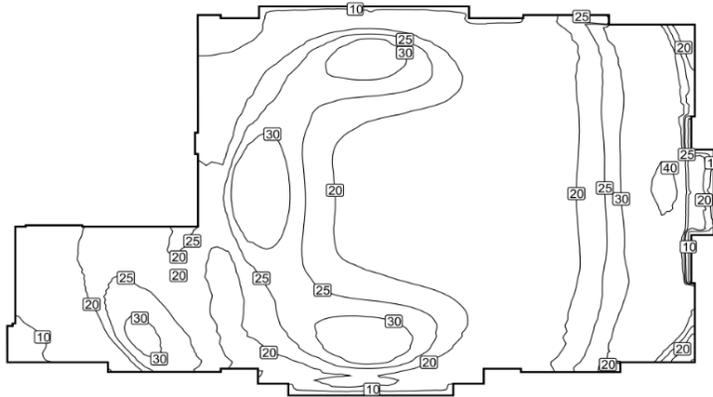
ILUMINACIÓN EDIFICIO FEIRNNR

18/1/2021

DIALux

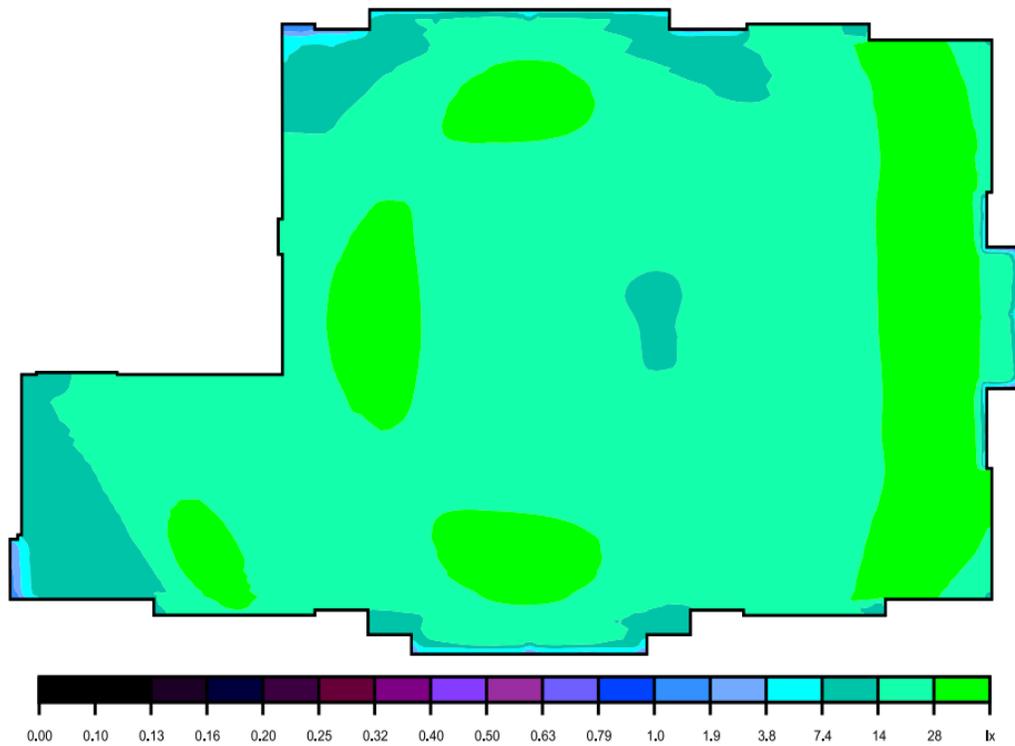
Terreno 1 / Terraza Edificio / Iluminancia perpendicular (Adaptativamente)

Isolíneas [lx]

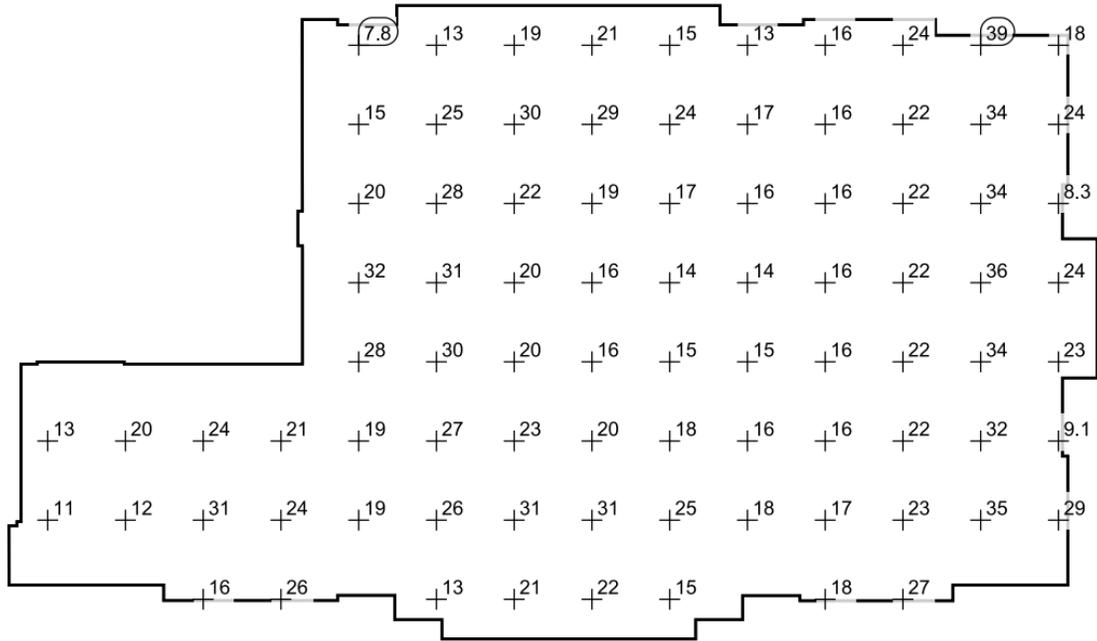


Escala: 1 : 200

Colores falsos [lx]



Sistema de valores [lx]



Escala: 1 : 200

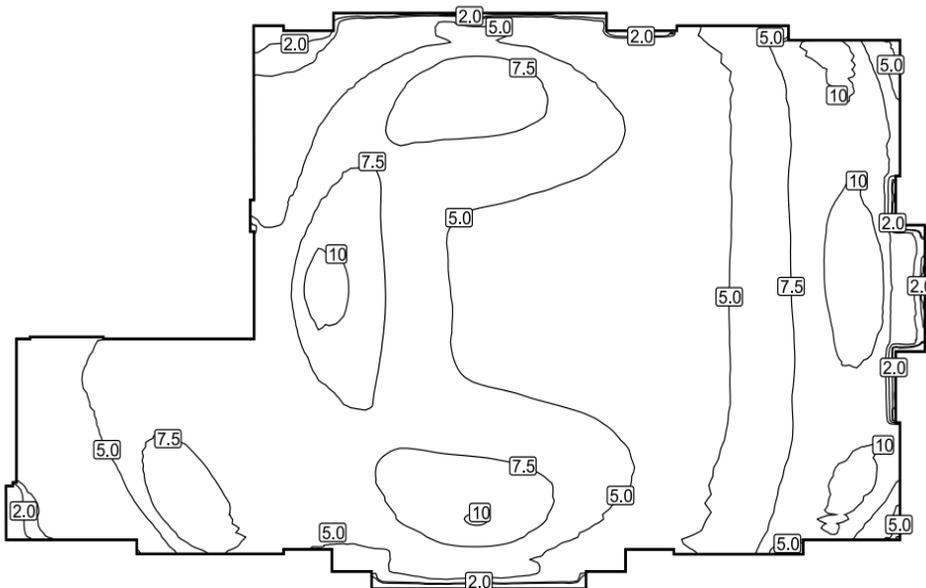
ILUMINACIÓN EDIFICIO FEIRNNR

18/1/2021

Terreno 1 / Terraza Edificio / Densidad luminica

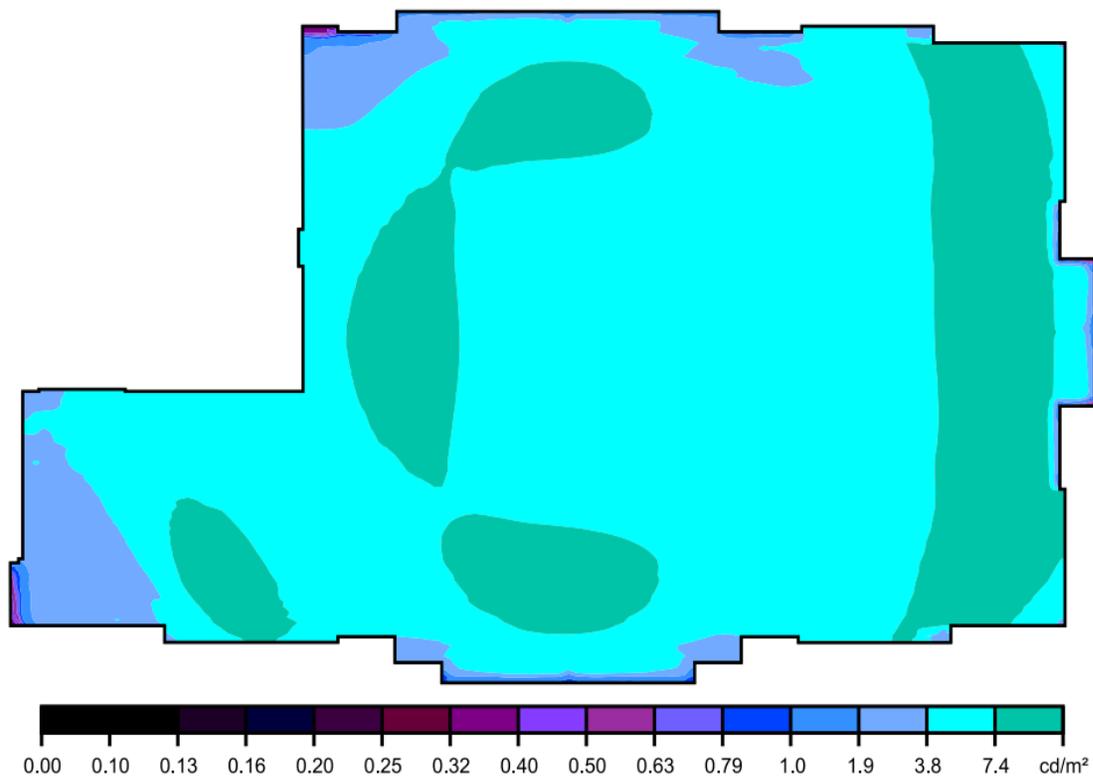
DIALux

Isolíneas [cd/m²]

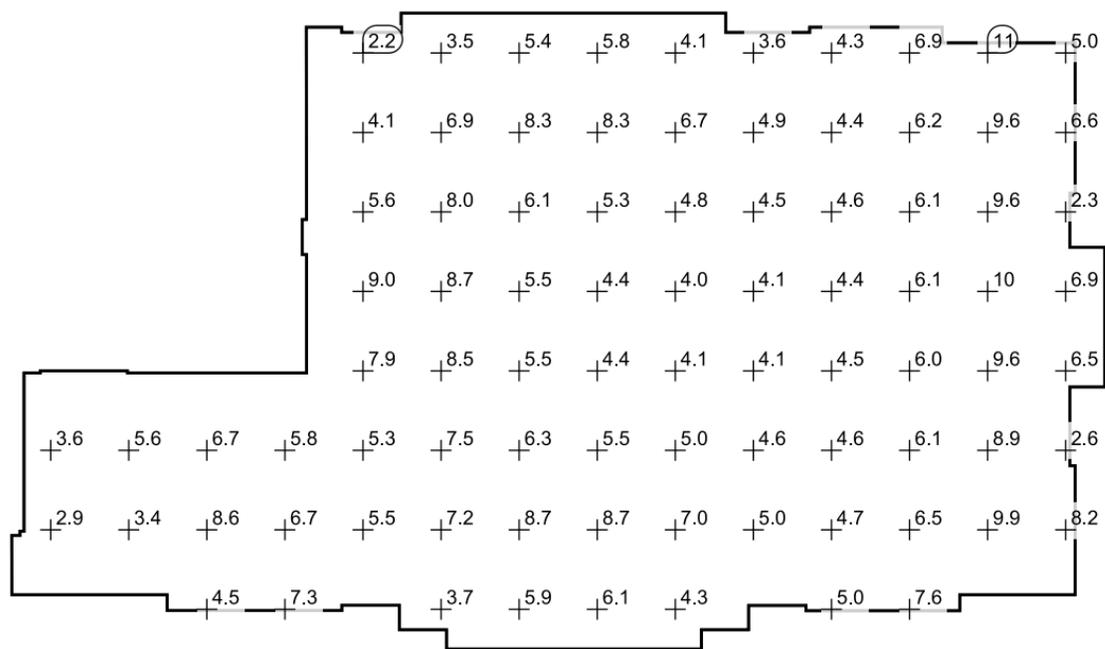


Escala: 1 : 200

Colores falsos [cd/m²]

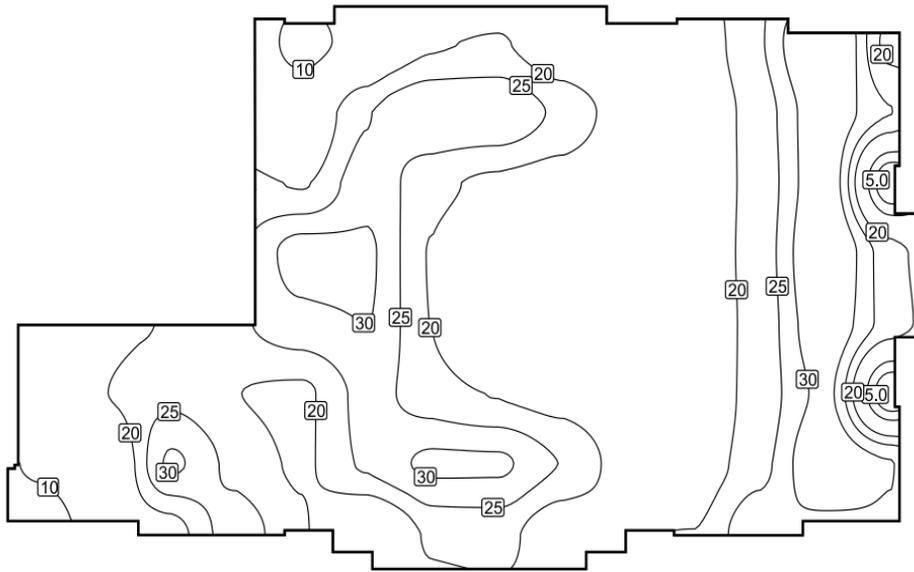


Sistema de valores [cd/m²]



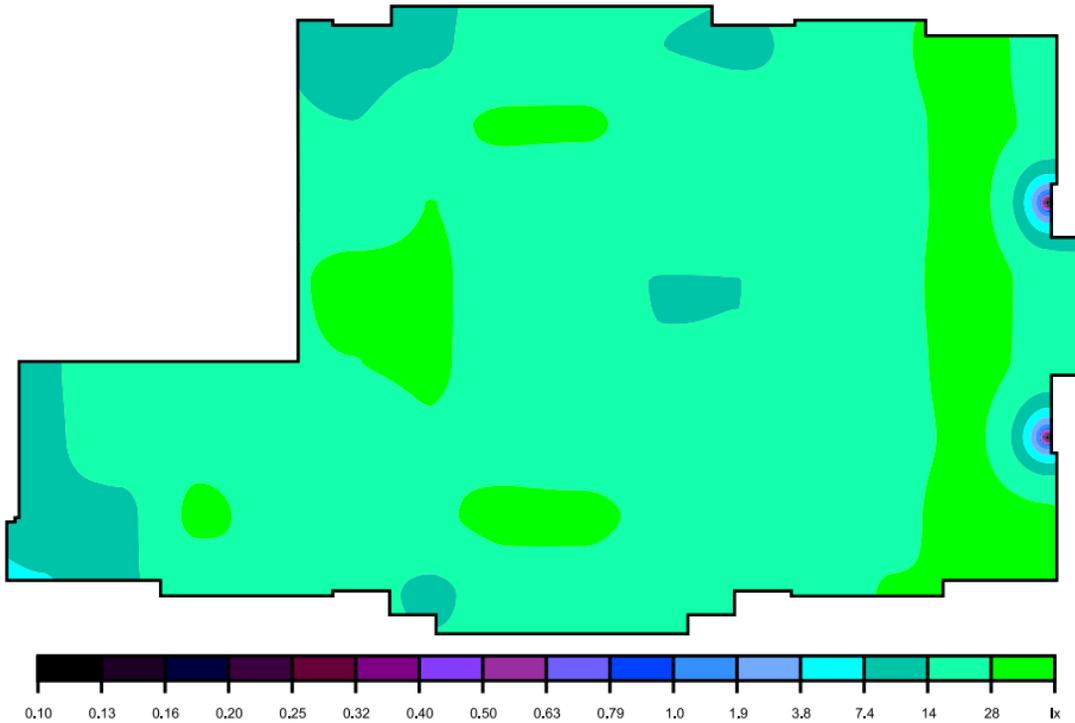
Escala: 1 : 200

Isolíneas [lx]



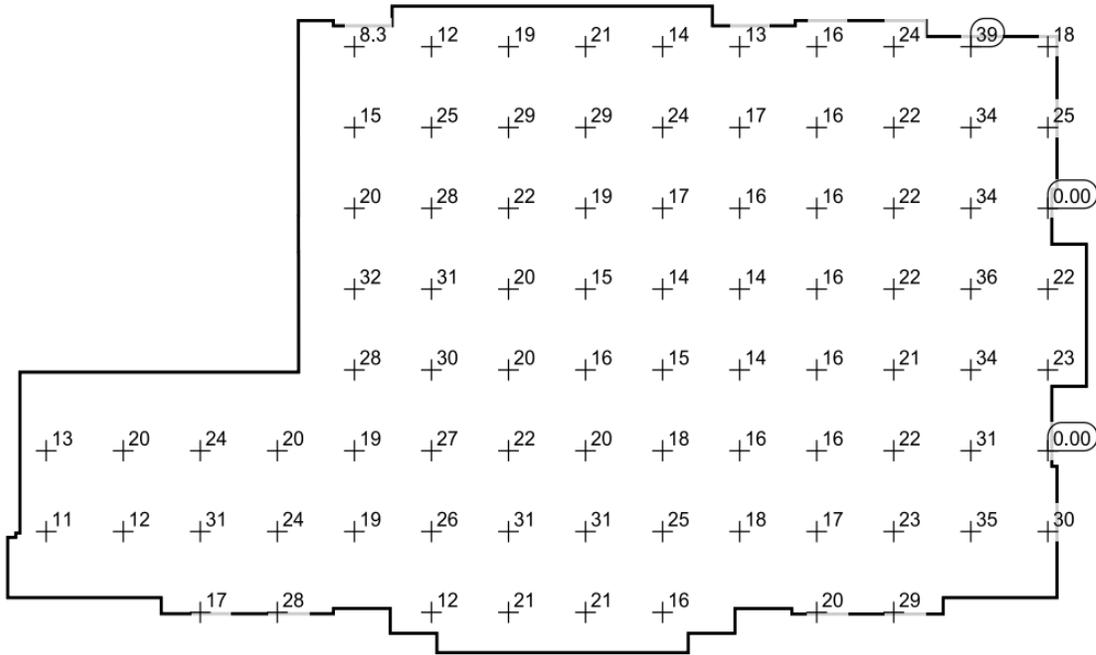
Escala: 1 : 200

Colores falsos [lx]



Escala: 1 : 200

Sistema de valores [lx]



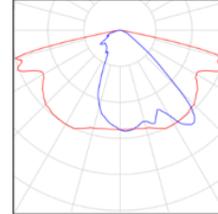
Escala: 1 : 200

Tabla de valores [lx]

m	-16.184	-13.948	-11.712	-9.476	-7.240	-5.004	-2.768	-0.532	1.704	3.940	6.176	8.411	10.647	12.883
9.464	/	/	/	/	8.34	12.2	19.2	20.5	14.4	13.5	15.6	24.3	39.3	18.2
7.189	/	/	/	/	14.6	24.6	29.5	29.4	23.9	17.4	15.5	22.0	34.0	25.1
4.914	/	/	/	/	19.6	28.2	21.7	18.8	17.1	15.9	16.2	21.5	34.0	0.00
2.639	/	/	/	/	32.2	30.8	19.6	15.5	14.4	14.4	15.7	21.8	36.2	22.4
0.364	/	/	/	/	27.9	30.0	19.9	15.7	14.5	14.5	15.8	21.4	34.2	23.0
-1.911	12.6	19.8	23.8	20.1	19.2	26.7	22.5	19.8	18.0	16.4	16.3	21.6	31.3	0.00
-4.186	10.6	11.9	30.8	23.7	19.3	25.7	31.0	30.8	24.8	17.9	16.7	23.0	35.1	30.3
-6.461	/	/	17.3	27.6	/	12.1	20.8	21.5	15.8	/	20.2	29.2	/	/

Terreno 1

Número de unidades	Luminaria (Emisión de luz)
7	<p>Schröder - AMPERA MINI / 5238 / 8 LEDs 900mA WW 727 25,4W // 426632 Emisión de luz 1 Lámpara: 1x8 LEDs 900mA WW 727 Grado de eficacia de funcionamiento: 83.75% Flujo luminoso de lámparas: 2981 lm Flujo luminoso de las luminarias: 2496 lm Potencia: 25,4 W Rendimiento lumínico: 98.3 lm/W</p> <p>Indicaciones colorimétricas 1x8 LEDs 900mA WW 727: CCT 2700 K, CRI 70</p>



Flujo luminoso total de lámparas: 20867 lm, Flujo luminoso total de luminarias: 17472 lm, Potencia total: 177.8 W, Rendimiento lumínico: 98.3 lm/W

Factor de degradación: 0.80

General

Superficie	Resultado	Media (Nominal)	Min	Max	Mín./medio	Mín./máx.
2 Superficie de cálculo 4	Iluminancia perpendicular [lx] Altura: 9.000 m	21.2	0.00	39.3	0.00	0.00

Objetos de resultado de superficies

1 Terraza Edificio	Iluminancia perpendicular (Adaptativamente) [lx]	21.7	0.077	42.3	0.004	0.002
	Densidad lumínica [cd/m²]	6.08	0.022	11.8	0.004	0.002

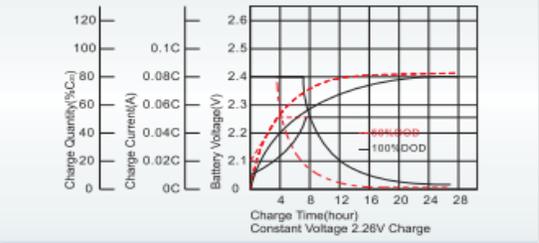
Fuente: (DIALux evo 8.2)

Anexo 7: Características de la batería de ciclo profundo SSB.

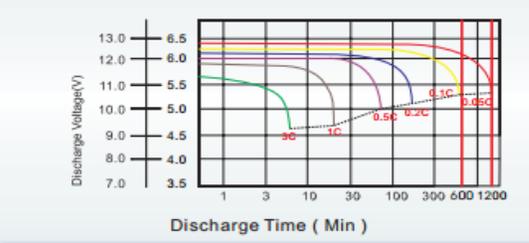


Ficha Técnica	
Dimensiones	330 x 173 x 217 mm
Peso	31 kg
Tecnología	GEL
Voltaje	12V
Capacidad	100Ah
Ciclos De Vida Útil A 30% DOD	2400
Ciclos De Vida Útil A 50% DOD	1200
Ciclos De Vida Útil A 100% DOD	600

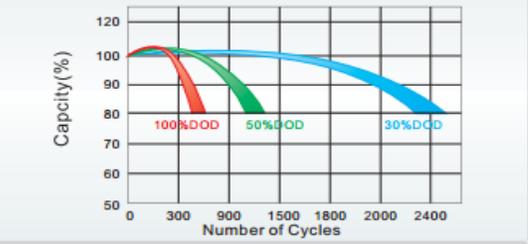
Charge Characteristics for Float Use @ 25°C/77°F



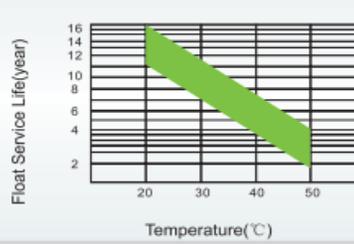
Discharge Characteristics at Various Rates @ 25°C/77°F



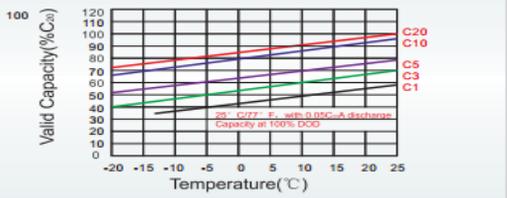
Cycle Life in Relation to Depth of Discharge



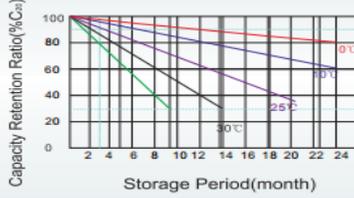
Float Service Life



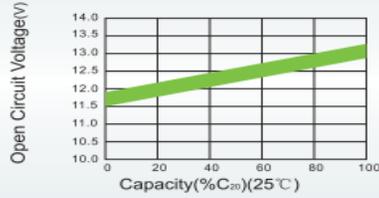
Temperature and Valid Capacity



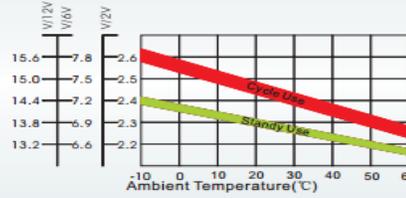
Self Discharge Characteristics



Capacity and Open Circuit Voltage



Relationship between Charging Voltage and Temperature



Fuente: (ProVientoSA, s.f.)

Anexo 8: Tablas de las propiedades del aire a 1 at de presión.

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico c_p $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Fuente: (Cimbala & Cengel)

Anexo 9: Ficha técnica del acrílico.

FICHA TÉCNICA LAMINA PMMA (ACRILICO)



Producto	LÁMINA DE PMMA POLIMETILMETACRILATO
Aplicaciones	Señalización, cubiertas, domos, protecciones en maquinaria, lámparas separadoras decorativas y de protección, acuarios y piscinas, obras de arte entre otros, exhibidores en punto de venta P.O.P.
Características	Se destaca frente a otros plásticos transparentes en cuanto a resistencia a la intemperie, transparencia y resistencia al rayado.
Material *	Su componente el MMA (monómero de metacrilato de metilo) sí lo es en fase líquida.
Dimensiones y calibre	Lámina de 122cm x 180 ò 245cm; Calibre C60 (2.5mm) hasta C320 (8mm), +/-3%.
Color	Natural.
Acabado	Liso.
Acabado Superficial	Brillante
Tratamientos	De acuerdo a los requerimientos del cliente.

**Propiedades del material*

Propiedades mecánicas	UNIDADES	NORMAS ASTM	COLADO	EXTRUIDO	EXTRUIDO ALTO IMPACTO
Resistencia en el límite elástico	kg/cm ²	D-638			
Resistencia a la rotura	kg/cm ²	D-638	562-773	492-773	386
Elongación a la rotura	%	D-638	4,5	5,0	
Módulo de elasticidad	kg/cm ²	D-638	24.600-31.000	23000-31.000	
Flexión					
Resistencia en el límite elástico o rotura	kg/cm ²	D-790	840-1.300	740-1.300	562
Módulo de elasticidad	kg/cm ²	D-790	27.500-33.400	22.800-32.300	17.500
Compresión					
Resistencia a la compresión(ruptura)	kg/cm ²	D-695	773-1.330	740-1260	
Módulo de compresión	kg/cm ²	D-695	27.500-33.300	26.000-32.300	
Impacto					
Resistencia al impacto IZOD	kg/cm ²	D-256 A	1,9	2,4	6,52
Dureza					
Rockwell		D-795	M-80-M-100	M-68 M-105	R-99
Barcol		D-2583	50	50	35

Fuente: (Ficha Técnica Lámina PMMA (Acrílico), n.d.)

Anexo 10: Dimensiones de los diámetros normalizados para el eje.

Libardo Vicente Vanegas Useche

Tabla A-6.2 Dimensiones preferidas SI

Rango de la medida (mm)	Dimensionar estandarizando cada (mm)	Dimensiones preferidas (mm)
0.5 a 1	0.5	0.5, 1
1 a 6	1	1, 2, 3, 4, 5, 6
6 a 28	2	6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28
28 a 96	4	28, 32, 36, 40, 44, 48, 52, 56, 60, 64, 68, 72, 76, 80, 84, 88, 92, 96
96 a 192	8	96, 104, 112, 120, 128, 136, 144, 152, 160, 168, 176, 184, 192
más de 192	16	208, 224, 240, 256, 272, 288, 304, 320, etc.

Dimensiones preferidas en unidades inglesas se dan en la tabla A-6.3.

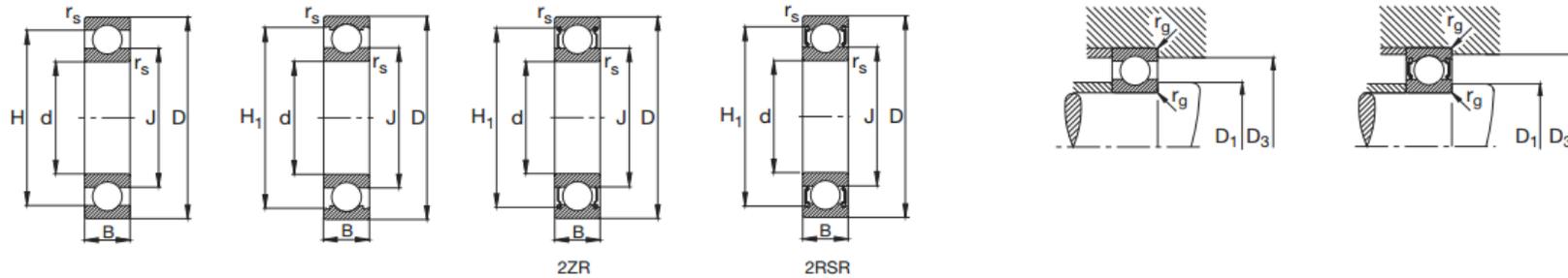
Tabla A-6.3 Dimensiones preferidas – Unidades inglesas

Rango de la medida (in)	Dimensionar estandarizando cada (in)	Dimensiones preferidas (in)
1/64 a 1/32	1/64	1/64, 1/32
1/32 a 3/16	1/32	1/32, 1/16, 3/32, 1/8, 5/32, 3/16
3/16 a 7/8	1/16	3/16, 1/4, 5/16, 3/8, 7/16, 1/2, 9/16, 5/8, 11/16, 3/4, 13/16, 7/8
7/8 a 3	1/8	7/8, 1, 1 1/8, 1 1/4, 1 3/8, 1 1/2, 1 5/8, 1 3/4, 1 7/8, 2, 2 1/8, 2 1/4...3
3 a 6	1/4	3, 3 1/4, 3 1/2, 3 3/4, 4, 4 1/4, 4 1/2, 4 3/4, 5, 5 1/4, 5 1/2, 5 3/4, 6
más de 6	1/2	6, 6 1/2, 7, 7 1/2, 8, 8 1/2, 9, 9 1/2, 10, etc.

Fuente: (Vanegas Useche, 2018)

Anexo 11: Especificaciones generales de los rodamientos FAG.

Rodamientos FAG rígidos de bolas de una hilera



Eje	Dimensiones							Peso ≈ kg	Capacidad de carga		Velocidad límite min ⁻¹	Velocidad de referencia	Denominación abreviada Rodamiento FAG
	d mm	D	B	r _s min	H ≈	H ₁ ≈	J ≈		dyn. C kN	stat. C ₀			
25	25	47	8	0,3	39,7	41,1	32,2	0,055	7,2	4,65	19000	14000	16005
	25	47	12	0,6	40,2	42,5	32	0,08	10	5,85	36000	17000	6005
	25	47	12	0,6	40,2	42,5	32	0,082	10	5,85	36000	17000	S6005.W203B
	25	47	12	0,6	40,2	42,5	32	0,083	10	5,85	15000	17000	6005.2ZR
	25	47	12	0,6	40,2	42,5	32	0,084	10	5,85	10000		6005.2RSR
	25	47	12	0,6	40,2	42,5	32	0,083	10	5,85	10000		S6005.2RSR.W203B

Fuente: (FAG, 2000)

▼ Factor f_0 para rodamientos rígidos de bolas

Número característico del agujero	Factor f_0								
	Serie de rodamientos 618	160	161	60	62	622	63	623	64
3					12,9				
4					12,2		13,2		
5					13,2		13		
6					13				
7				13	12,4				
8				12,4	13				
9				13	12,4				
00			12,4	12,4	12,1	12,1	11,3		
01			13	13	12,3	12,2	11,1		
02		13,9		13,9	13,1	13,1	12,1	12,1	
03		14,3		14,3	13,1	13,1	12,3	12,2	12,4
04		14,9		13,9	13,1	13,1	12,4	12,1	11
05		15,4		14,5	13,8	13,8	12,4	12,4	12,1
06		15,2		14,8	13,8	13,8	13	13	12,2
07		15,6		14,8	13,8	13,8	13,1	13,1	12,1
08		16		15,3	14	14	13	13	12,2
09		15,9		15,4	14,3	14,1	13	13	12,1
10		16,1		15,6	14,3	14,3	13	13	13,1
11		16,1		15,4	14,3		12,9		13,2
12		16,3		15,5	14,3		13,1		13,2
13		16,4		15,7	14,3		13,2		12,3
14		16,2		15,5	14,4		13,2		12,1
15		16,4		15,7	14,7		13,2		12,2
16		16,4		15,6	14,6		13,2		12,3
17		16,4		15,7	14,7		13,1		12,3
18		16,3		15,6	14,5		13,9		12,2
19		16,5		15,7	14,4		13,9		
20		16,5		15,9	14,4		13,8		
21		16,3		15,8	14,3		13,8		
22		16,3		15,6	14,3		13,8		
24		16,5		15,9	14,8		13,5		
26		16,4		15,8	14,5		13,6		
28		16,5		16	14,8		13,6		
30		16,4		16	15,2		13,7		
32		16,5		16	15,2		13,9		
34		16,4		15,7	15,3		13,9		
36		16,3		15,6	15,3		13,9		
38		16,4		15,8	15		14		
40		16,3		15,6	15,3		14,1		
44		16,3		15,6	15,2		14,1		
48		16,5		15,8	15,2		14,2		
52		16,4		15,7	15,2				
56		16,5		15,9	15,3				
60		16,4		15,7					
64	15,9	16,5		15,9					
68	15,9	16,3		15,8					
72	15,8	16,4		15,9					
76	16	16,5							
80	15,9								
84	15,9								
88	15,8								
92	16								
96	16								
/500	15,9								
/530	15,9								
/560 . . .									
/850	15,8								

Fuente: (FAG, 2000)

▼ Valores f_n para rodamientos de bolas

$$f_n = \sqrt[3]{\frac{33 \frac{1}{3}}{n}}$$

n	f_n								
min ⁻¹									
10	1,49	55	0,846	340	0,461	1800	0,265	9500	0,152
11	1,45	60	0,822	360	0,452	1900	0,26	10000	0,149
12	1,41	65	0,8	380	0,444	2000	0,255	11000	0,145
13	1,37	70	0,781	400	0,437	2200	0,247	12000	0,141
14	1,34	75	0,763	420	0,43	2400	0,24	13000	0,137
15	1,3	80	0,747	440	0,423	2600	0,234	14000	0,134
16	1,28	85	0,732	460	0,417	2800	0,228	15000	0,131
17	1,25	90	0,718	480	0,411	3000	0,223	16000	0,128
18	1,23	95	0,705	500	0,405	3200	0,218	17000	0,125
19	1,21	100	0,693	550	0,393	3400	0,214	18000	0,123
20	1,19	110	0,672	600	0,382	3600	0,21	19000	0,121
22	1,15	120	0,652	650	0,372	3800	0,206	20000	0,119
24	1,12	130	0,635	700	0,362	4000	0,203	22000	0,115
26	1,09	140	0,62	750	0,354	4200	0,199	24000	0,112
28	1,06	150	0,606	800	0,347	4400	0,196	26000	0,109
30	1,04	160	0,593	850	0,34	4600	0,194	28000	0,106
32	1,01	170	0,581	900	0,333	4800	0,191	30000	0,104
34	0,993	180	0,57	950	0,327	5000	0,188	32000	0,101
36	0,975	190	0,56	1000	0,322	5500	0,182	34000	0,0993
38	0,957	200	0,55	1100	0,312	6000	0,177	36000	0,0975
40	0,941	220	0,533	1200	0,303	6500	0,172	38000	0,0957
42	0,926	240	0,518	1300	0,295	7000	0,168	40000	0,0941
44	0,912	260	0,504	1400	0,288	7500	0,164	42000	0,0926
46	0,898	280	0,492	1500	0,281	8000	0,161	44000	0,0912
48	0,886	300	0,481	1600	0,275	8500	0,158	46000	0,0898
50	0,874	320	0,471	1700	0,27	9000	0,155	50000	0,0874

Fuente: (FAG, 2000)

Anexo 12: Valor del factor de esfuerzos dinámicos.

▼ Valores f_L para rodamientos de bolas

$$f_L = \sqrt[3]{\frac{L_h}{500}}$$

L_h	f_L	L_h	f_L	L_h	f_L	L_h	f_L	L_h	f_L
h		h		h		h		h	
100	0,585	420	0,944	1700	1,5	6500	2,35	28000	3,83
110	0,604	440	0,958	1800	1,53	7000	2,41	30000	3,91
120	0,621	460	0,973	1900	1,56	7500	2,47	32000	4
130	0,638	480	0,986	2000	1,59	8000	2,52	34000	4,08
140	0,654	500	1	2200	1,64	8500	2,57	36000	4,16
150	0,669	550	1,03	2400	1,69	9000	2,62	38000	4,24
160	0,684	600	1,06	2600	1,73	9500	2,67	40000	4,31
170	0,698	650	1,09	2800	1,78	10000	2,71	42000	4,38
180	0,711	700	1,12	3000	1,82	11000	2,8	44000	4,45
190	0,724	750	1,14	3200	1,86	12000	2,88	46000	4,51
200	0,737	800	1,17	3400	1,89	13000	2,96	48000	4,58
220	0,761	850	1,19	3600	1,93	14000	3,04	50000	4,64
240	0,783	900	1,22	3800	1,97	15000	3,11	55000	4,79
260	0,804	950	1,24	4000	2	16000	3,17	60000	4,93
280	0,824	1000	1,26	4200	2,03	17000	3,24	65000	5,07
300	0,843	1100	1,3	4400	2,06	18000	3,3	70000	5,19
320	0,862	1200	1,34	4600	2,1	19000	3,36	75000	5,31
340	0,879	1300	1,38	4800	2,13	20000	3,42	80000	5,43
360	0,896	1400	1,41	5000	2,15	22000	3,53	85000	5,54
380	0,913	1500	1,44	5500	2,22	24000	3,63	90000	5,65
400	0,928	1600	1,47	6000	2,29	26000	3,73	100000	5,85

Fuente: (FAG, 2000)

Anexo 13: Especificaciones de los soportes para los rodamientos.

Eje Díá. d		Designación de bridas de dos pernos	Referencia del rodamiento	Índices de carga básicos		Dimensiones										Tamaño del perno	Peso	
				Dinámico	Estático	H	J	A ₁	A	A ₀	L	A ₂	S	B	N			
				C _r	C _{0r}	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in	mm in			mm in
12		UCFL201	UC201															
	½	UCFL201-8	UC201-8															
15		UCFL202	UC202	12,8 2878	6,7 1495	113 4 7/16	90 3 35/64	11 7/16	25,5 1	33,3 1 5/16	60 2 3/8	15 1 1/32	12,7 0,500	31,0 1,220	12 15/32	M10 3/8	0,5 1,1	
	5/8	UCFL202-10	UC202-10															
17		UCFL203	UC203															
	3/4	UCFL204-12	UC204-12															
20		UCFL204	UC204															
	7/8	UCFL205-14	UC205-14															
	15/16	UCFL205-15	UC205-15	14,0	7,9	130	99	13	27,0	35,8	68	16	14,3	34,1	16	M14	0,6	
25		UCFL205	UC205	3147	1765	5 1/8	3 57/64	1/2	1 1/16	1 13/32	2 11/16	5/8	0,563	1,343	5/8	1/2	1,3	
	1	UCFL205-16	UC205-16															

Fuente: (TIMKEN, s.f.)

Anexo 14: Características del inversor.



samlexamerica®

300W

Inversor CD-CA
 ⚡ Onda Sinusoidal Pura

Modelo
 PST-300-12
 12 VCD- 120 VCA
 PST-300-24
 24 VCD- 120 VCA

Características del Diseño

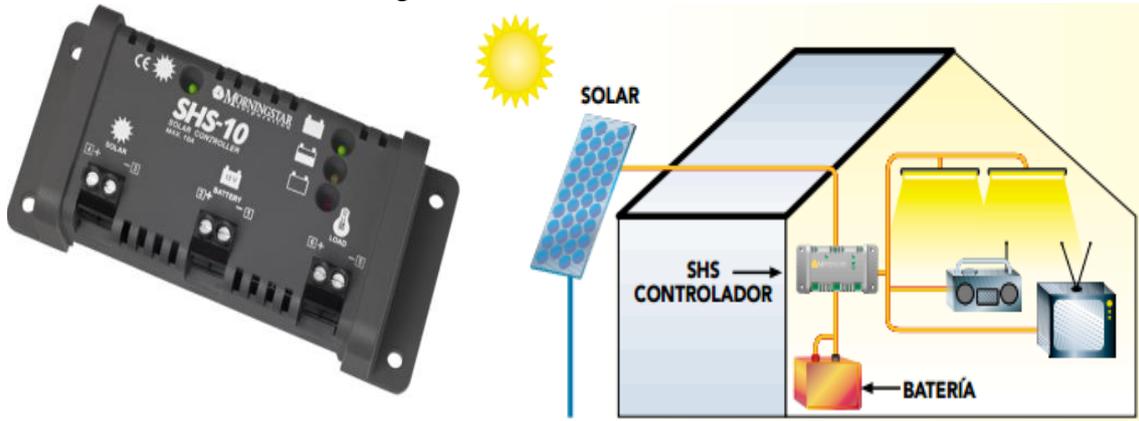
- Alta eficiencia
- Ventilador controlado por la temperatura – reduce el consumo de energía
- Baja interferencia
- Amplio rango de funcionamiento de CD de entrada: 10.5 - 16.5 VCD / 21.0 - 33.0 VCD
- Indicadores LED para potencia y protecciones
- Bajo consumo de energía cuando esta en reposo
- Doble toma de CA protegida con GFCI
- Diseño de grado comercial adecuado para cargas de uso rudo por largos periodos de funcionamiento continuo y para respaldo de emergencia
- CPU – Circuito de Protección Universal: bajo voltaje, alto voltaje, sobre temperatura, sobrecarga y corto circuito.
- Cable desprendible con adaptador de 12V
- Cable desprendible con pinzas para batería
- Certificado de seguridad con los estándares UL y CSA, compatible con FCC (Federal Communications Commission)
- Entrada remota - Se usa para encender o apagar el inversor con el switch de Inicio o cualquier otro switch remoto de Encendido/Apagado



	MODELO NO.	PST-300-12	PST-300-24
SALIDA	VOLTAJE DE SALIDA	120 VCA ± 3%	120 VCA ± 3%
	CORRIENTE DE SALIDA MÁXIMA	2.54A	2.54A
	FRECUENCIA DE SALIDA	60 Hz ± 1%	60 Hz ± 1%
	TIPO DE ONDA A LA SALIDA	Onda Sinusoidal Pura	Onda Sinusoidal Pura
	DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL EN LA SALIDA DE LA ONDA	< 3%	< 3%
	SALIDA DE CORRIENTE CONTINUA (A Factor de Poder = 1)	300 Watts	300 Watts
	SALIDA DE CORRIENTE PARA PICOS	500 Watts (< 8 milisegundos)	500 Watts (< 8 milisegundos)
	PUNTO MÁS ALTO DE EFICIENCIA	87%	89%
	CONEXIÓN DE SALIDA CA	NEMAS-20R GFCI Duplex Outlets	NEMAS-20R GFCI Duplex Outlets
ENTRADA	VOLTAJE NOMINAL DE ENTRADA	12V	24V
	RANGO DEL VOLTAJE DE ENTRADA	10.5 - 16.5 VCD	21 - 33 VCD
	CORRIENTE DE ENTRADA MÁXIMA	40A	20A
	CORRIENTE DE ENTRADA SIN ENERGÍA	< 500 mA	< 400 mA
	CONEXIÓN DE ENTRADA CC	Diámetro del orificio: 5mm ; Juego de tornillos: #10, 24TPI	
VISUALIZACIÓN	LED	Encendido, Anormal	Encendido, Anormal
PROTECCIONES	ALARMA DE ENTRADA DE BAJO VOLTAJE DE CD	10.5V	21V
	APAGADO DE ENTRADA DE BAJO VOLTAJE DE CD	10V ; Reinicio automático a 11.5V	20V ; Reinicio automático a 23V
	APAGADO DE ENTRADA DE ALTO VOLTAJE DE CD	16.5V ; Reinicio automático a < 16.5V	33V ; Reinicio automático a < 33V
	APAGADO DE CORTO CIRCUITO	Cuando el voltaje de salida se reduce a 80VAC o menos durante 5 segundos	
	APAGADO DE SOBRECARGA	En la sobrecarga del 110% al 115% de 2 a 2.5 segundos	
	APAGADO DE FALLA DE ATERRIZAJE	A través de NEMAS-20R GFCI Duplex Outlets	
	APAGADO DE ALTA TEMPERATURA	A una temperatura interna de 95°C. Reinicio automático a 70°C	
	REVERSO DE POLARIDAD DE ENTRADA CC	El fusible interno del lado de CD se botará	
ENFRIAMIENTO	AIRE FORZADO	Ventilador controlado por la temperatura - ENCENDIDO a una temperatura interna de ≥ 48°C. APAGADO a 42°C.	
COMPLIMIENTO	SEGURIDAD	Aparece en la lista de inspección del Intertek. Cumple con los estándares ANSI/UL 458; Certificado por CSA STD. C22-2 Nº 107,1-01.	
	INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA (EMI)	En conformidad con la Parte 15 Clase B del estándar FCC	
AMBIENTE	RANGO DE TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	Temperatura de funcionamiento: -20 to 40°C / -4 to 104°F Temperatura de almacenamiento: -30 to 70°C / -22 to 158°F 90% de humedad relativa sin condensación	
DIMENSIONES	MM (L X Anch X Alt)	155 x 246 x 65.5	155 x 246 x 65.5
	PULGADAS (L X Anch X Alt)	6.1 x 9.69 x 2.58	6.1 x 9.69 x 2.58
PESO	KG / LBS	1.57 / 3.46	1.57 / 3.46

Fuente: (SamlexAmerica, 2020)

Anexo 15: Controlador de carga SHS-10.



INFORMACIÓN TÉCNICA

CAPACIDADES NOMINALES: (TODOS A 12 VOLTIOS)

SHS-6	100 W ó 6 A PARA EL SISTEMA DE CARGA SOLAR Y LA CARGA
SHS-10	170 W ó 10 A PARA EL SISTEMA DE CARGA SOLAR Y LA CARGA

• Punto de regulación	14.3 V	• Indicaciones de los LED	Verde: en carga Niveles de batería: verde, amarillo y rojo Rojo: advertencia de bajo voltaje y desconexión Los 3 LED destellando — indicación de errores
• Desconexión por bajo voltaje	11.5 V	• Terminales	Para tamaños de cable de hasta 4 mm ²
• Reconexión por bajo voltaje	12.6 V	• Dimensiones	15.1 x 6.6 x 3.6 cm
• Tipo de carga	PWM Serie (modulación de ancho de pulso) 4 etapas: En bruto, PWM, por incremento o "Boost" y flotante Carga compensada en temperatura	• Peso	113 g
• Protecciones electrónicas	Cortocircuito y exceso de corriente — sistema de carga solar y carga Polaridad inversa — en sistema de carga solar, en la carga y en la batería Corriente inversa por la noche Alto voltaje — en la carga Rayos — en sistema solar, en la carga y en la batería	• Consumo propio	8 mA máximo
• Tropicalización	Placa de circuito — recubrimiento según norma Terminales — protegidos contra corrosión	• Temperatura	-25°C a +50°C
		• Humedad	100% sin condensación
		• Encapsulado	IP 22
		• Cumple con normas de	CE, Banco Mundial

GARANTÍA : Período de dos años de garantía. Póngase en contacto con Morningstar o su distribuidor autorizado para conocer los términos completos.

DISTRIBUIDOR MORNINGSTAR AUTORIZADO:



1098 Washington Crossing Road
Washington Crossing, PA 18977 EUA
Tel: +1 215-321-4457 Fax: +1 215-321-4458
E-mail: info@morningstarcorp.com
Website: www.morningstarcorp.com

IMPRESO EN LOS ESTADOS UNIDOS 2135-R1-804

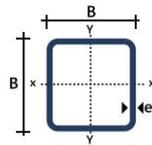
Fuente: (SUN, s.f.)

Anexo 16: Características del tubo estructurado cuadrado.

DESCRIPCIÓN

Especificaciones Generales:

Largo Normal:	6 metros
Recubrimiento:	Negro y Galvanizado
Norma de Calidad:	ASTM A 500 Gr. A, B o C
Norma de Fabricación:	NTE INEN 2415
Espesores:	Desde 1,50 a 6,00 mm
Observaciones:	Otras dimensiones y largos, previa consulta

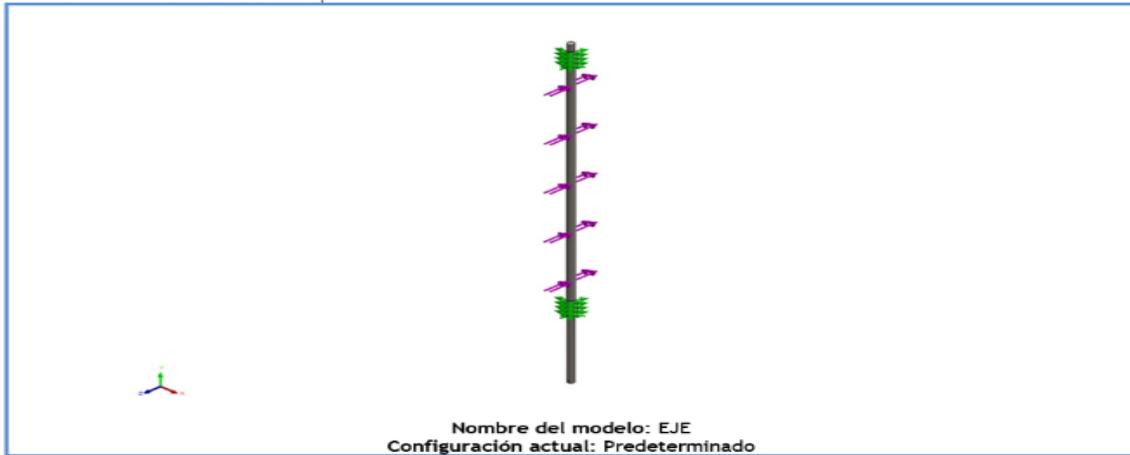


Designaciones		Área	Peso	Propiedades Estáticas		
				Eje x-x = y-y		
				Momento de inercia	Módulo de resistencia	Radio de giro
B	e	A	P	I	W	I
mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm
20	1,40	0,99	0,78	0,56	0,56	0,75
	1,50	1,05	0,83	0,58	0,58	0,75
	1,80	1,23	0,96	0,66	0,66	0,73
	2,00	1,34	1,05	0,70	0,70	0,72
25	1,40	1,27	1,00	1,16	0,93	0,95
	1,50	1,25	1,06	1,22	0,97	0,95
	1,80	1,59	1,25	1,39	1,11	0,94
	2,00	1,74	1,36	1,49	1,19	0,93
30	1,40	1,55	1,22	2,08	1,39	1,16
	1,50	1,65	1,30	2,20	1,47	1,15
	1,80	1,95	1,53	2,53	1,68	1,14
	2,00	2,14	1,68	2,73	1,82	1,13
40	1,40	2,11	1,66	5,18	2,59	1,57
	1,50	2,25	1,77	5,49	2,75	1,56
	1,80	2,67	2,09	6,39	3,19	1,55
	2,00	2,90	2,31	6,95	3,47	1,54
	2,50	3,59	2,82	8,23	4,12	1,51
	3,00	4,21	3,30	9,36	4,68	1,49
	4,00	5,35	4,20	11,18	5,59	1,45

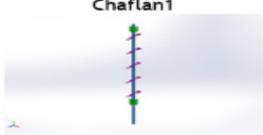
Fuente: (IMPORT ACEROS, n.d.)

Anexo 17: Análisis de esfuerzos en el eje del aerogenerador.

Información de modelo



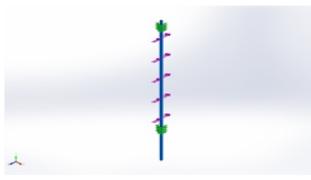
Sólidos

Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
 <p>Chaflán1</p>	Sólido	Masa: 11,5378 kg Volumen: 0,00146978 m ³ Densidad: 7.850 kg/m ³ Peso: 113,07 N	C:\Users\hmcarr\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-2022\PIEZAS AEROGENERADOR SAVONIUS 2022\EJE.SLDPRT Mar 7 01:06:20 2022

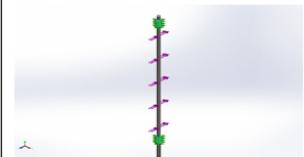
Unidades

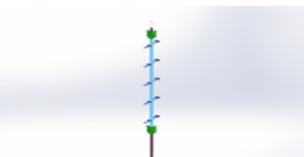
Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: AISI 4340 Acero recocido Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 4,7e+08 N/m ² Límite de tracción: 7,45e+08 N/m ² Módulo elástico: 2,05e+11 N/m ² Coeficiente de Poisson: 0,285 Densidad: 7.850 kg/m ³ Módulo cortante: 8e+10 N/m ² Coeficiente de dilatación térmica: 1,23e-05 /Kelvin	Sólido 1(Chaflán1)(EJE)
Datos de curva: N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Sobre caras cilíndricas-1		Entidades: 2 cara(s) Tipo: Sobre caras cilíndricas Traslación: 0; 0 rad.; --- Unidades: mm		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	0,00297089	0	150,309	150,309
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		Entidades: 1 cara(s), 1 plano(s) Referencia: Alzado Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---; ---; -.150,3 N

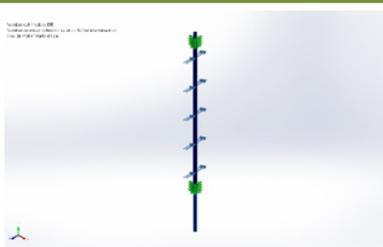
Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño máximo de elemento	2 mm
Tamaño mínimo del elemento	0,66666 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	1835252
Número total de elementos	1277959
Cociente máximo de aspecto	10,338
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	99,7
El porcentaje de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0,000156
Porcentaje de elementos distorsionados	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:01:03
Nombre de computadora:	

Información sobre el control de malla:

Nombre del control de malla	Imagen del control de malla	Detalles del control de malla
Control-1		Entidades: 4 cara(s) Unidades: mm Tamaño: 2,84306 Cociente: 2,84306

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	0,00297089	0	150,309	150,309

Momentos de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

Fuerzas de cuerpo libre

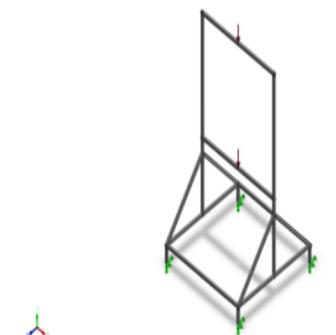
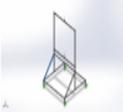
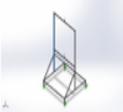
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	0,0164065	0,0481745	-0,0717771	0,0879882

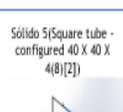
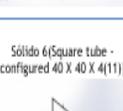
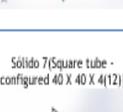
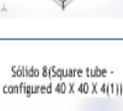
Momentos de cuerpo libre

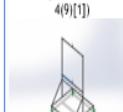
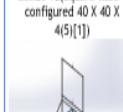
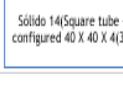
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	1e-33

Fuente: (SolidWorks® Premium 2020 SP3.0, 2020)

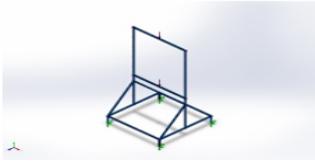
Anexo 18: Análisis de esfuerzos en la estructura del aerogenerador.

 <p>Nombre del modelo: SIMULACION ESTRUCTURA Configuración actual: Predeterminado-Como mecanizada></p>			
Sólidos de viga:			
Nombre de documento y referencia	Formulación	Propiedades	Ruta al documento/Fecha de modificación
 <p>Sólido 1(Square tube - configured 40 X 40 X 4(10))</p>	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-weldment profiles/iso/square tube Área de sección: 0,000534796m ² Longitud: 1,131,37mm Volumen:0,000605053m ³ Densidad: 7,880kg/m ³ Masa:4,7682kg Peso:46,7246N	C:\Users\hmcari\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-2022\PIEZAS AEROGENERADOR SAVONIUS 2022\SIMULACION ESTRUCTURA\SLDPRT Mar 7 01:03:01 2022
 <p>Sólido 2(Square tube - configured 40 X 40 X 4(4))</p>	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-weldment profiles/iso/square tube Área de sección: 0,000534796m ² Longitud:200mm Volumen:0,000106959m ³ Densidad:7,880kg/m ³ Masa:0,842839kg Peso:8,25982N	C:\Users\hmcari\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-2022\PIEZAS AEROGENERADOR SAVONIUS 2022\SIMULACION ESTRUCTURA\SLDPRT Mar 7 01:03:01 2022
 <p>Sólido 3(Square tube - configured 40 X 40 X 4(6))</p>	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-weldment profiles/iso/square tube Área de sección: 0,000534796m ² Longitud:2,600mm Volumen:0,00139047m ³ Densidad:7,880kg/m ³	C:\Users\hmcari\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-2022\PIEZAS AEROGENERADOR SAVONIUS 2022\SIMULACION ESTRUCTURA\SLDPRT Mar 7 01:03:01 2022

 <p>Sólido 4(Square tube - configured 40 X 40 X 4(8)[1])</p>	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-weldment profiles/iso/square tube Área de sección: 0,000534796m ² Longitud:800mm Volumen:0,000427837m ³ Densidad: 7,880kg/m ³ Masa:3,37136kg Peso:33,0393N	C:\Users\hmcari\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-2022\PIEZAS AEROGENERADOR SAVONIUS 2022\SIMULACION ESTRUCTURA\SLDPRT Mar 7 01:03:01 2022
 <p>Sólido 5(Square tube - configured 40 X 40 X 4(8)[2])</p>	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-weldment profiles/iso/square tube Área de sección: 0,000534796m ² Longitud:800mm Volumen:0,000427837m ³ Densidad: 7,880kg/m ³ Masa:3,37136kg Peso:33,0393N	C:\Users\hmcari\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-2022\PIEZAS AEROGENERADOR SAVONIUS 2022\SIMULACION ESTRUCTURA\SLDPRT Mar 7 01:03:01 2022
 <p>Sólido 6(Square tube - configured 40 X 40 X 4(11))</p>	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-weldment profiles/iso/square tube Área de sección: 0,000534796m ² Longitud: 1,131,37mm Volumen:0,000605053m ³ Densidad: 7,880kg/m ³ Masa:4,7682kg Peso:46,7246N	C:\Users\hmcari\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-2022\PIEZAS AEROGENERADOR SAVONIUS 2022\SIMULACION ESTRUCTURA\SLDPRT Mar 7 01:03:01 2022
 <p>Sólido 7(Square tube - configured 40 X 40 X 4(12))</p>	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-weldment profiles/iso/square tube Área de sección: 0,000534796m ² Longitud: 1,131,37mm Volumen:0,000605053m ³ Densidad: 7,880kg/m ³ Masa:4,7682kg Peso:46,7246N	C:\Users\hmcari\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-2022\PIEZAS AEROGENERADOR SAVONIUS 2022\SIMULACION ESTRUCTURA\SLDPRT Mar 7 01:03:01 2022
 <p>Sólido 8(Square tube - configured 40 X 40 X 4(1))</p>	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-weldment profiles/iso/square tube Área de sección: 0,000534796m ² Longitud:200mm Volumen:0,000106959m ³ Densidad:7,880kg/m ³ Masa:0,842839kg Peso:8,25982N	C:\Users\hmcari\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-2022\PIEZAS AEROGENERADOR SAVONIUS 2022\SIMULACION ESTRUCTURA\SLDPRT Mar 7 01:03:01 2022

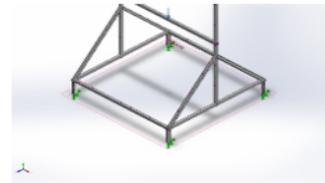
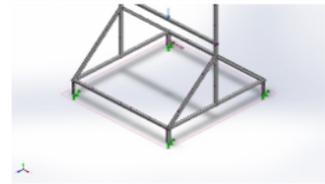
 <p>Sólido 9(Square tube - configured 40 X 40 X 4(5)[3])</p>	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-weldment profiles/iso/square tube Área de sección: 0,000534796m ² Longitud:1,560mm Volumen:0,000834297m ³ Densidad:7,880kg/m ³ Masa:6,57426kg Peso:64,4278N	C:\Users\hmcari\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-2022\PIEZAS AEROGENERADOR SAVONIUS 2022\SIMULACION ESTRUCTURA\SLDPRT Mar 7 01:03:01 2022
 <p>Sólido 10(Square tube - configured 40 X 40 X 4(9)[1])</p>	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-weldment profiles/iso/square tube Área de sección: 0,000534796m ² Longitud:800mm Volumen:0,000427837m ³ Densidad: 7,880kg/m ³ Masa:3,37136kg Peso:33,0393N	C:\Users\hmcari\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-2022\PIEZAS AEROGENERADOR SAVONIUS 2022\SIMULACION ESTRUCTURA\SLDPRT Mar 7 01:03:01 2022
 <p>Sólido 11(Square tube - configured 40 X 40 X 4(9)[2])</p>	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-weldment profiles/iso/square tube Área de sección: 0,000534796m ² Longitud:800mm Volumen:0,000427837m ³ Densidad: 7,880kg/m ³ Masa:3,37136kg Peso:33,0393N	C:\Users\hmcari\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-2022\PIEZAS AEROGENERADOR SAVONIUS 2022\SIMULACION ESTRUCTURA\SLDPRT Mar 7 01:03:01 2022
 <p>Sólido 12(Square tube - configured 40 X 40 X 4(5)[1])</p>	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-weldment profiles/iso/square tube Área de sección: 0,000534796m ² Longitud:1,560mm Volumen:0,000834297m ³ Densidad:7,880kg/m ³ Masa:6,57426kg Peso:64,4278N	C:\Users\hmcari\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-2022\PIEZAS AEROGENERADOR SAVONIUS 2022\SIMULACION ESTRUCTURA\SLDPRT Mar 7 01:03:01 2022
 <p>Sólido 13(Square tube - configured 40 X 40 X 4(7))</p>	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-weldment profiles/iso/square tube Área de sección: 0,000534796m ² Longitud:2,600mm Volumen:0,00139047m ³ Densidad: 7,880kg/m ³ Masa:10,9569kg Peso:107,378N	C:\Users\hmcari\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-2022\PIEZAS AEROGENERADOR SAVONIUS 2022\SIMULACION ESTRUCTURA\SLDPRT Mar 7 01:03:01 2022
 <p>Sólido 14(Square tube - configured 40 X 40 X 4(3))</p>	Viga - Sección transversal uniforme	Estándar de sección-weldment profiles/iso/square tube	C:\Users\hmcari\Desktop\TESIS HECTOR CARRILLO\CORRECCIONES FINALES TESIS 2021-

Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: ASTM A 500 Tubo cuadrado</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.</p> <p>Límite elástico: 3,5e+08 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 4,2e+08 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 2e+08 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0,29</p> <p>Densidad: 7.880 kg/m³</p> <p>Módulo cortante: 7,75194e+10 N/m²</p>	<p>Sólido 1(Square tube - configured 40 X 40 X 4(10))(SIMULACION ESTRUCTURA),</p> <p>Sólido 2(Square tube - configured 40 X 40 X 4(4))(SIMULACION ESTRUCTURA),</p> <p>Sólido 3(Square tube - configured 40 X 40 X 4(6))(SIMULACION ESTRUCTURA),</p> <p>Sólido 4(Square tube - configured 40 X 40 X 4(8)[1])(SIMULACION ESTRUCTURA),</p> <p>Sólido 5(Square tube - configured 40 X 40 X 4(8)[2])(SIMULACION ESTRUCTURA),</p> <p>Sólido 6(Square tube - configured 40 X 40 X 4(11))(SIMULACION ESTRUCTURA),</p> <p>Sólido 7(Square tube - configured 40 X 40 X 4(12))(SIMULACION ESTRUCTURA),</p> <p>Sólido 8(Square tube - configured 40 X 40 X 4(1))(SIMULACION ESTRUCTURA),</p> <p>Sólido 9(Square tube - configured 40 X 40 X 4(5)[3])(SIMULACION ESTRUCTURA),</p> <p>Sólido 10(Square tube - configured 40 X 40 X 4(9)[1])(SIMULACION ESTRUCTURA),</p>

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción
Fijo-1		<p>Entidades: 4 Juntas</p> <p>Tipo: Geometría fija</p>

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		<p>Entidades: 1 plano(s), 2 Juntas</p> <p>Referencia: Planta</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza</p> <p>Valores: ---; ---; -.396,42 N</p> <p>Momentos: ---; ---; --- N.m</p>
Gravedad-1		<p>Referencia: Planta</p> <p>Valores: 0 0 -9,81</p> <p>Unidades: m/s²</p>

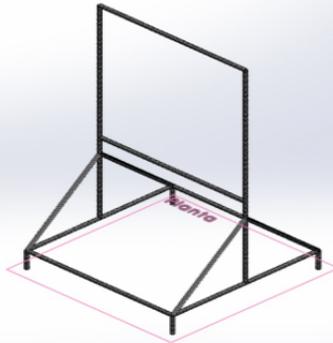
Información de malla

Tipo de malla	Malla de viga
---------------	---------------

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	1988
Número total de elementos	1976
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:04
Nombre de computadora:	

Nombre del modelo: SIMULACION ESTRUCTURAL
 Nombre de estudio: Analisis estatico 1: «Piedeterminado«Como mecanizada»-3
 Tipo de malla:



Nombre del control de malla	Imagen del control de malla	Detalles del control de malla
Control-3		Entidades: 18 Viga(s) Unidades: mm Tamaño: 10 Cociente: 10
Control-4		Entidades: 4 Viga(s) Unidades: mm Tamaño: 10 Cociente: 10

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-3,8147e-06	1.610,25	-3,8147e-06	1.610,25

Momentos de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	-2,6226e-05	-3,8147e-06	-4,29153e-06	2,68472e-05

Fuerzas de cuerpo libre

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	0	0	0	0

Momentos de cuerpo libre

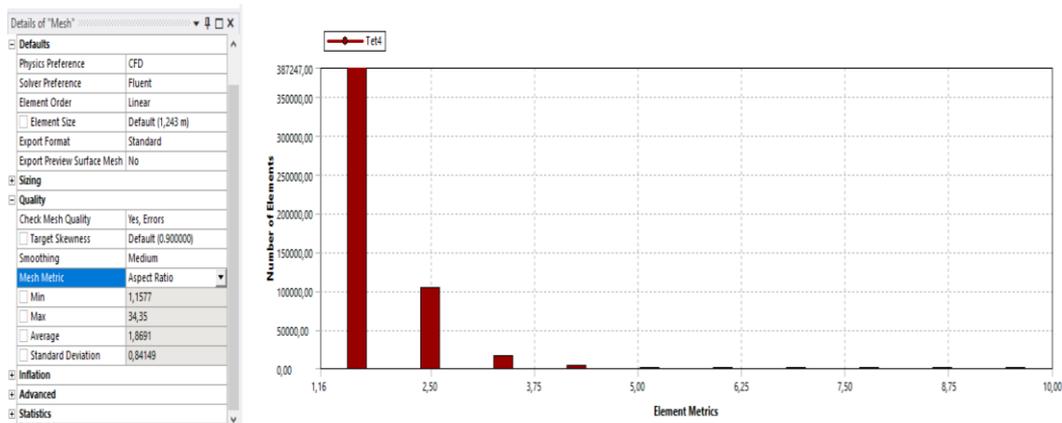
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

Fuente: (SolidWorks® Premium 2020 SP3.0, 2020)

Anexo 19: Calidad del mallado.

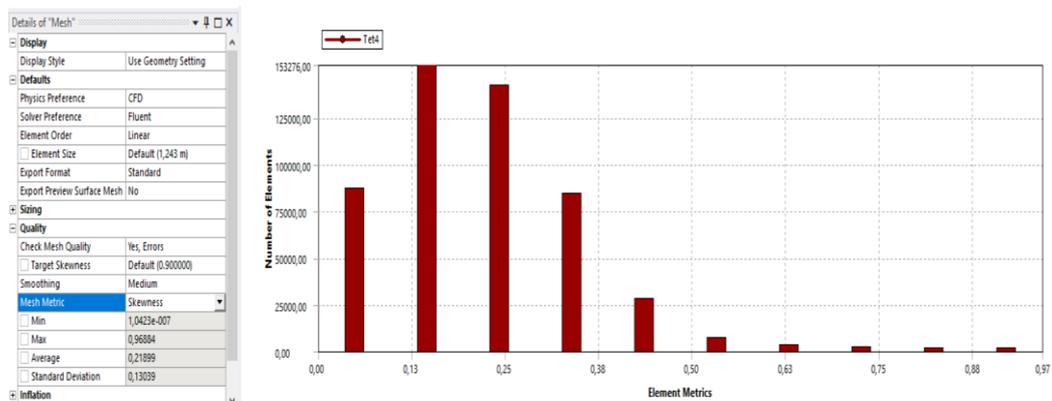
Una vez generado el mallado se debe considerar si cumple ciertos parámetros, para ello se va al apartado de calidad "Quality" y se marca la casilla de "Mesh Metric", la cual despliega los diferentes indicadores que detallan la calidad del mallado tales como;

- Relación de aspecto "Aspect Ratio" de una figura geométrica, es la relación entre sus tamaños en diferentes dimensiones, es decir el lado más largo con su lado más corto, debe de ser menor a 10 (Gómez, 2017), el cual vemos que si cumple.



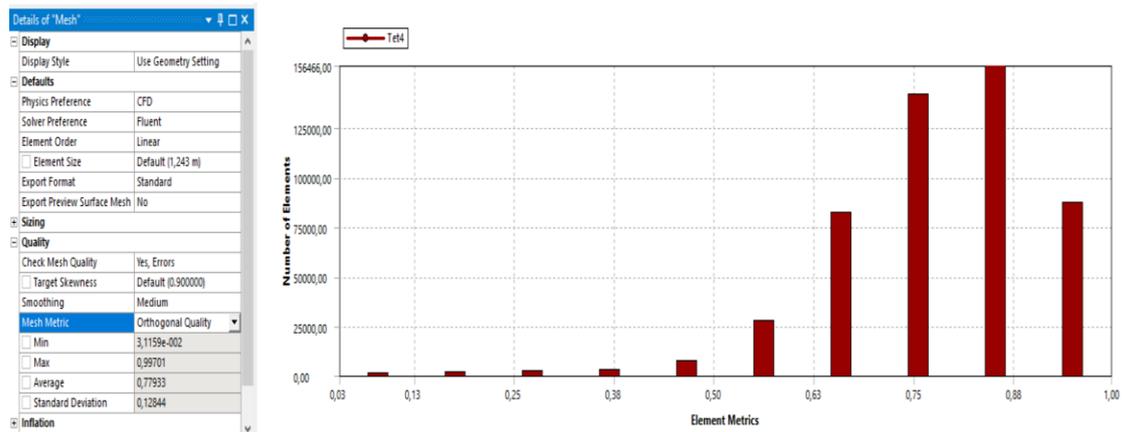
Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)

- Oblicuidad "Skewness"; en cambio mide el grado de similitud entre el elemento y el elemento ideal descrito por su circunferencia circunscrita en 2D o esfera en 3D (Gómez, 2017). Este elemento debe de estar por debajo de 0,75 y cercano a 0, el cual vemos que si cumple.



Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)

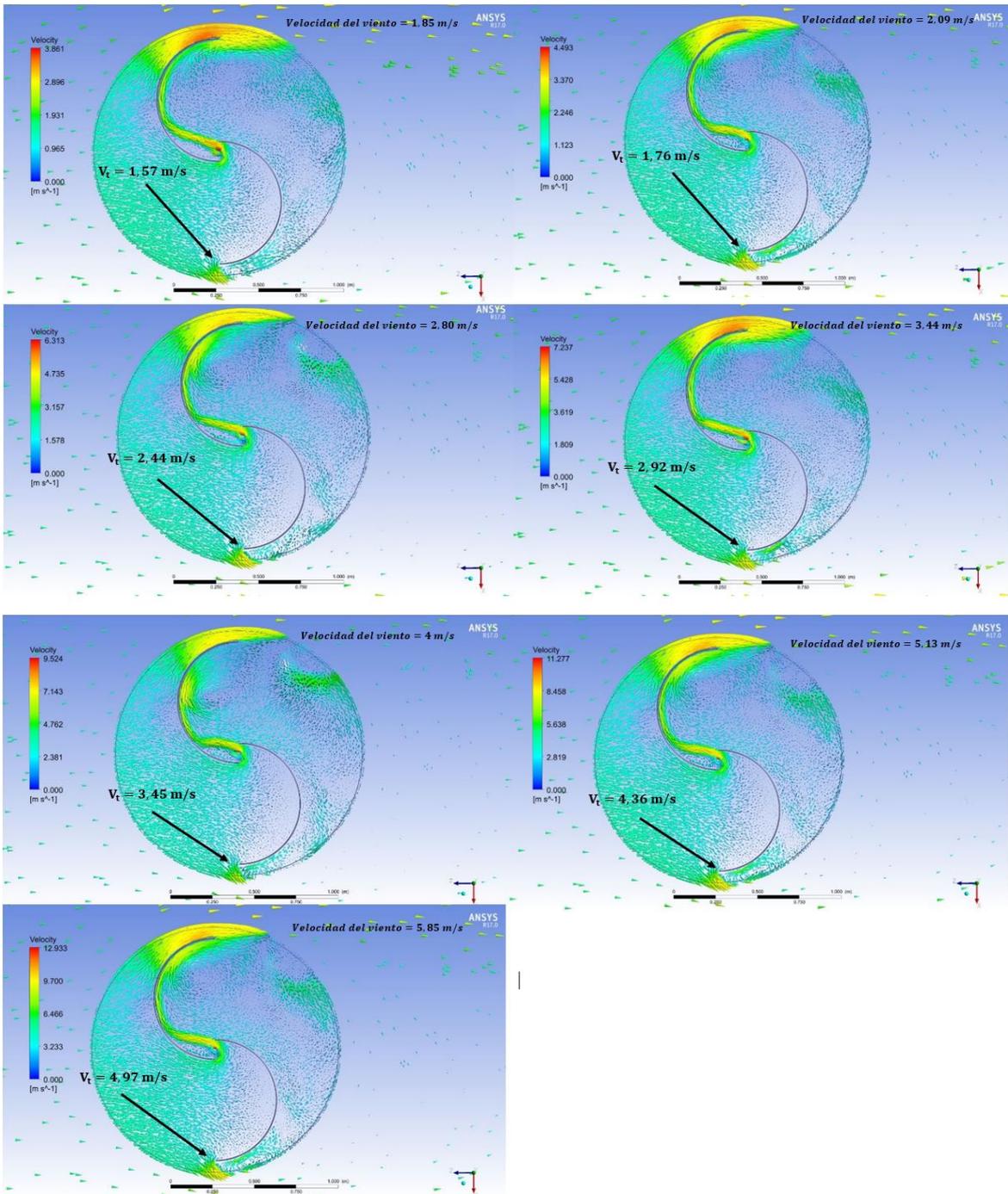
- Calidad ortogonal “*Orthogonal Quality*”; es una generalización de la noción geométrica de perpendicularidad (Gómez, 2017). Este elemento debe estar en un parámetro de 0.95 – 1 como excelente y de 0.70 – 0.95 como muy bueno, para nuestro estudio es cercano a 0,88 el cual vemos que si cumple.



Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)

Con los datos que se muestran en las figuras anteriores, se puede indicar que la malla está dentro de los parámetros admisibles.

Anexo 20: Cálculo de la velocidad tangencial y el torque simulado.



Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)



Fuente: (ANSYS® Student 2020 R2, 2020)

Anexo 21: Certificado de traducción del resumen.

CERTIFICADO DE TRADUCCIÓN

Rosa Susana Saritama Díaz, Licenciada en Ciencias de la Educación, Idioma Inglés.

CERTIFICA:

Que la traducción al idioma inglés del resumen de la tesis denominado **"Diseño y simulación de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, accionado por vientos de baja velocidad para la iluminación exterior del Laboratorio de Energías Renovables, de la FEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja"**, correspondiente al señor egresado: **Héctor Manuel Carrillo Sisalima**, con cédula de identidad **1105766263**, ha sido revisado y supervisado según se me ha solicitado, por lo cual cumple con la correcta traducción al idioma inglés.

Esto es lo que puedo mencionar y certificar en honor a la verdad para fines pertinentes.

Loja, 30 de mayo de 2022



Lic. Rosa Susana Saritama Díaz

C.I: 1104531767

Anexo 22: Planos mecánicos (Ubicado en el CD-R Nro 1)