

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE- QUITO

CARRERA INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de

INGENIEROS MECÁNICOS

TEMA

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERADOR
EÓLICO DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA VELOCIDADES
ENTRE 5 Km/h Y 20 Km/h**

AUTORES

ANA LUCIA DEFAZ VIZCAINO

MARCO ANTONIO PALLASCO YUGSI

TUTOR

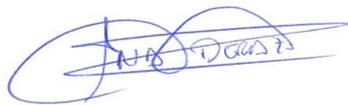
LUIS FERNANDO TOAPANTA

Quito, febrero del 2017

Cesión de derechos de autor

Nosotros, Ana Lucia Defaz Vizcaíno con documento de identidad N° 100286244-7 y Marco Antonio Pallasco Yugsi, con documento de identidad N° 050297575-8, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: “Análisis y simulación de un prototipo de generador eólico de eje vertical tipo Savonius para velocidades entre 5 km/h y 20 km/h”, el mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autores reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Ana Defaz

C.I. 100286244-7



Marco Pallasco

C.I. 050297575-8

Declaración de coautoría del docente tutor

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación, “Análisis y simulación de un prototipo de generador eólico de eje vertical tipo Savonius para velocidades entre 5 km/h y 20 km/h“, realizado por Ana Lucia Defaz Vizcaíno y Marco Antonio Pallasco Yugsi, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, febrero del 2017.



Luis Fernando Toapanta Ramos

CI: 172111375-9

Dedicatoria

Este proyecto dedico a toda mi familia, a mis padres, hermanos y sobrinos quienes siempre han estado conmigo brindándome su apoyo incondicional.

A mis amigos y compañeros por brindarme su apoyo en los buenos y malos momentos.

En especial a mi hijo Benjamín, quien es mi razón de ser.

Ana Defaz

Dedicatoria

El presente Trabajo de Titulación lo dedico:

A mi madre, por su apoyo y confianza, lo que me ha permitido cumplir mis objetivos como persona y estudiante.

A mi padre, el cual a pesar de haberlo perdido a muy temprana edad, ha estado siempre cuidándome y guiándome desde del cielo.

A mis hermanos y hermanas, por su apoyo incondicional, por estar siempre presentes, acompañándome en cada etapa de mi vida.

A mi esposa, por estar a mi lado en los buenos y malos momentos, y que gracias a su aliento me han motivado para alcanzar esta meta.

Marco Pallasco

Agradecimiento

Agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana, en especial, a la Carrera de Ingeniería Mecánica por habernos dado la oportunidad de adquirir los mejores conocimientos durante todo nuestro período de formación académica.

Al Ingeniero Fernando Toapanta, por habernos guiado durante el desarrollo de este Proyecto de Investigación.

Ana Defaz y Marco Pallasco

Índice

Introducción	21
CAPÍTULO 1	22
ESTADO DEL ARTE Y ASPECTOS TEÓRICOS.....	22
1.1 Estado del arte	22
1.1.1 Simuladores eólicos	24
1.1.2 Funcionamientos de los simuladores de recurso eólico	25
1.2 Aspectos teóricos de la investigación.....	25
1.2.1 Recurso eólico.....	25
1.2.2 Energía eólica.....	29
1.2.3 Generador eólico	32
1.2.4 Generadores de eje horizontal.....	32
1.2.5 Generadores de eje vertical	32
1.2.5.1 Generadores tipo Savonius.....	33
1.2.5.2 Rotor Savonius.....	33
1.2.5.3 Principio de funcionamiento	34
1.3 Conclusiones del capítulo.....	36
CAPÍTULO 2	37
DISEÑO Y CÁLCULOS GENERALES DEL PROTOTIPO	37
2.1 Consideraciones de diseño	37
2.1.1 Condiciones externas	37
2.1.1.1 Cálculo de la velocidad nominal del viento.....	37
2.1.1.2 Temperatura en la ciudad de Quito.....	38
2.1.1.3 Densidad relativa del aire	38
2.1.2 Evaluación del potencial eólico	39
2.1.3 Condiciones internas.....	39
2.2 Alternativas para rotor Savonius	39
2.2.1 Parámetros geométricos de las aspas.....	40
2.3 Diseño del rotor Savonius	41
2.3.1 Coeficiente de potencia (C_p)	41
2.3.2 Números de álabes y módulos	42
2.3.3 Parámetros de diseño	43

2.3.3.1	Potencia nominal del viento.....	43
2.3.3.2	Potencia total extraída.....	44
2.3.3.3	Cálculo de la potencia total extraída.....	44
2.3.4	Cálculo de la forma de los álabes	45
2.4	Dimensionamiento del rotor	46
2.4.1	Cálculo de las dimensiones del rotor	47
2.5	Área de barrido	48
2.5.1	Cálculo de los parámetros geométricos del rotor.....	48
2.6	Velocidad de punta de álabe “TSR”	49
2.6.1	Calculo de la velocidad angular.....	49
2.7	Torque	50
2.7.1	Cálculo del torque.....	50
2.8	Diseño de tapas.....	50
2.8.1	Cálculo de las dimensiones de las tapas	52
2.9	Selección del material para los álabes y tapas del rotor	52
2.10	Fuerzas que actúan sobre los álabes	53
2.10.1	Cálculo de las fuerzas que actúan sobre los álabes.....	54
2.11	Diseño del eje del rotor	55
2.11.1	Selección del material para el eje	55
2.11.2	Fuerzas que actúan sobre el eje.....	56
2.11.3	Cálculo del diámetro previo.....	58
2.11.4	Análisis estático	59
2.11.5	Análisis a fatiga	59
2.11.5.1	Cálculos del límite de fatiga corregido “Sn”	60
2.11.6	Resistencia del eje a la deflexión máxima	63
2.11.7	Calculo de número de ciclos del eje del rotor.....	63
2.12	Diseño de la estructura para el aerogenerador.....	66
2.12.1	Esquema de la estructura de soporte.....	66
2.12.2	Calculo de momentos y fuerzas axiales máximas	67
2.12.3	Calculo de esfuerzo máximo en el perfil más solicitado	68
2.12.4	Análisis por deslizamiento.....	69
2.12.5	Análisis por volcamiento	70
2.13	Selección del sistema eléctrico.....	71

2.13.1	Selección del generador	71
2.13.2	Selección del controlador de carga	72
2.13.3	Selección de la batería	72
2.14	Selección de rodamientos.....	73
2.14.1	Selección de rodamientos para los apoyos A y B del eje	74
2.14.2	Selección de chumacera de brida ovalada.	74
2.15	Conclusiones de capítulo.....	74
CAPÍTULO 3		75
MODELADO Y SIMULACIÓN DEL AEROGENERADOR.....		75
3.1	Software empleado	75
3.1.1	Proceso para el modelado y simulación de esfuerzos en Inventor	75
3.1.2	Componentes modelados en Inventor 2014.....	75
3.1.1.1	Ensamblaje del sistema eólico	77
3.1.3	Componentes para simulación de esfuerzos	77
3.1.3.1	Rotor eólico.....	78
3.1.3.2	Eje del rotor	79
3.1.3.3	Estructura de soporte	80
3.1.4	Proceso para simulación de viento en ANSYS Fluent	80
3.1.4.1	Simulación de flujo de aire en ANSYS Fluent 16.2	81
3.1.4.2	Consideraciones del fluido para el análisis.....	81
3.1.4.3	Modelos matemáticos usados para el análisis.....	81
3.1.4.4	Ecuaciones para el análisis del modelo matemático.....	81
3.1.4.5	Volúmenes finitos	82
3.1.4.6	Parámetros para la simulación	83
3.1.4.7	Creación o importación de la geometría	84
3.1.4.8	Generación de la malla	84
3.1.4.9	Pre-procesamiento	86
3.1.4.10	Post procesamiento.....	87
3.1.4.11	Realización de la simulación.....	87
3.1.5	Conclusiones del capítulo	91
CAPÍTULO 4		92
ANÁLISIS DE RESULTADOS		92
4.1	Análisis de resultados teóricos	92

4.1.1	Potencia nominal del viento vs potencia del aerogenerador.....	92
4.1.2	Área de barrido vs potencia del aerogenerador	93
4.2	Análisis de resultados de la simulación computacional	95
4.3	Análisis de resultados del prototipo	97
4.4	Comparación de resultados	99
4.5	Análisis de costos	101
4.6	Análisis de factibilidad.....	102
4.6.1	Análisis económico.....	102
4.6.2	Análisis técnico.....	102
4.7	Conclusiones del capítulo.....	103
	Conclusiones generales	104
	Recomendaciones generales.....	105
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y NETGRÁFICAS	106
	ANEXOS	
	PLANOS	

Índice de figuras

Figura 1. Países con políticas y objetivos para usar energía eólica	23
Figura 2. Uso de diferentes tipos de energías en el Ecuador.	24
Figura 3. Esquema general de un viento particular tierra-mar y viceversa.....	26
Figura 4. Variación de la velocidad del viento	28
Figura 5. Pérdidas aerodinámicas según el límite de Betz.....	31
Figura 6. Efecto Magnus sobre un objeto redondo	31
Figura 7. Esquema general del aerogenerador tipo Savonius	33
Figura 8. Líneas de corriente de aire en un rotor Savonius.....	34
Figura 9. Dirección del viento en un álabes cerrado.	34
Figura 10. Dirección del viento en un álabes abierto.	35
Figura 11. Configuración de rotores tipo Savonius	35
Figura 12. Parámetros geométricos para el rotor tipo Savonius	40
Figura 13. Curva característica de C_p vs TSR.....	41
Figura 14. Curvas de C_p según el número de álabes	42
Figura 15. Curvas de C_p según el número de módulos	42
Figura 16. Rotor Savonius 2 módulos y 2 álabes.....	43
Figura 17. Fuerzas producidas por el viento sobre los álabes.....	45
Figura 18. Dimensiones del rotor tipo Savonius, módulo 1.....	49
Figura 19. Rotor Savonius con tapas vs. Rotor sin tapas.....	51
Figura 20. Parámetros geométricos de las tapas del rotor Savonius.....	51
Figura 21. Número de tapas de rotor Savonius	52
Figura 22. Diagrama de cuerpo libre del eje del rotor	56
Figura 23. Fracción de resistencia a la fatiga.....	64
Figura 24. Diagrama S-N	65
Figura 25. Esquema general y fuerzas de la estructura de soporte	67
Figura 26. Cálculos de momentos y fuerzas axiales	67
Figura 27. Diagrama de fuerzas para el análisis de deslizamiento y volcamiento....	69
Figura 28. Generador eléctrico 12 V/AC – 15 W	72

Figura 29. Batería tureon 12V - 4Ah	73
Figura 30. Rotor de dos módulos	76
Figura 31. Estructura de soporte del rotor.....	76
Figura 32. Eje con chumaceras y abrazaderas para el rotor.....	77
Figura 33. Generador eólico tipo Savonius.....	77
Figura 34. Esfuerzo de Von Mises y desplazamiento máximo en los álabes	78
Figura 35. Esfuerzo y desplazamiento máximo en el eje del rotor	79
Figura 36. Esfuerzo y desplazamiento máximo en la estructura de soporte	80
Figura 37. Volumen de control en 3 dimensiones.....	83
Figura 38. Geometría del rotor dentro del volumen de control.....	84
Figura 39. Detalles para una malla estructurada	85
Figura 40. Generación de malla al dominio computacional	85
Figura 41. Definición de entrada, salida y pared para la simulación	86
Figura 42. Condiciones ambientales para la simulación.....	86
Figura 43. Número de iteraciones	87
Figura 44. Presión por acción del viento sobre el rotor	87
Figura 45. Líneas de viento al pasar por el rotor.....	88
Figura 46. Líneas de viento a pasar por el rotor en un plano	88
Figura 47. Líneas de viento a pasar por el rotor en un plano	89
Figura 48. Vectores de velocidad al pasar a través del módulo 2 y módulo 1.....	89
Figura 49. Vectores de velocidad al pasar a través del módulo 2 y módulo 1.....	90
Figura 50. Turbulencia de la energía cinética después de pasar el rotor.....	90
Figura 51. Curvas de potencia teórica para el aerogenerador eólico tipo Savonius ..	93
Figura 52. Curva del área de barrido y potencia del aerogenerador	94
Figura 53. Velocidad tangencial según la velocidad de viento	95
Figura 54. Curva para el rotor Savonius de TSR vs C_p	96
Figura 55. Curva de potencia según aumenta la velocidad de viento.	97
Figura 56. Voltaje generado por el prototipo.	98
Figura 57. Curva de potencia generada por el rotor Savonius	99
Figura 58. Curvas de voltaje teórico, simulado y real del prototipo	100

Índice de tablas

Tabla 1. Valores del exponente de Hellmann	28
Tabla 2. Condiciones ambientales.....	38
Tabla 3. Cálculo de peso del rotor y tapas	53
Tabla 4. Propiedades del acero AISI-SAE 4340.....	56
Tabla 5. Factor de la superficie del eje	61
Tabla 6. Factor de tamaño de la pieza sometida a flexión o torsión	61
Tabla 7. Límite de resistencia a la fatiga.....	64
Tabla 8. Características del generador eléctrico	71
Tabla 9. Especificaciones de la batería	73
Tabla 10. Parámetros de selección de rodamientos.	73
Tabla 11. Datos de entrada para la simulación de esfuerzos.....	78
Tabla 12. Datos de entrada para la simulación de flujo	83
Tabla 13. Cantidad de mallado para el rotor	85
Tabla 14. Potencia nominal de viento y potencia del aerogenerador.....	92
Tabla 15. Cálculo del área de barrido	94
Tabla 16. Resultado obtenidos de la simulación.....	96
Tabla 17. Intensidad y voltaje necesaria para la batería.....	97
Tabla 18. Potencia generada por el prototipo.....	98
Tabla 19. Comparación de potencias teórica, simulada y real.....	99
Tabla 20. Costos generados para la construcción	101

Índice de anexos

- Anexo 1. Densidad a 30 m en el Ecuador
- Anexo 2. Clasificación de los generadores eólicos
- Anexo 3. Velocidad nominal de viento
- Anexo 4. Temperatura en la ciudad de Quito
- Anexo 5. Condiciones ambientales en la ciudad de Quito
- Anexo 6. Parámetros de selección de batería
- Anexo 7. Características de diferentes materiales
- Anexo 8. Propiedades del acrílico PMMA
- Anexo 9. Tubo estructural cuadrado
- Anexo 10. Selección de rodamientos
- Anexo 11. Selección de rodamientos
- Anexo 12. Selección de chumacera
- Anexo 13. Análisis de esfuerzos del rotor eólico
- Anexo 14. Análisis de esfuerzos del eje del rotor
- Anexo 15. Análisis de esfuerzos de la estructura de soporte
- Anexo 16. Reporte de la construcción del aerogenerador eólico tipo Savonius
- Anexo 17. Catalogo acero AISI SAE 4340
- Anexo 18. Pruebas de campo realizado al prototipo
- Anexo 19. Licencia Inventor Professional 2014
- Anexo 20. Licencia ANSYS Fluent 16.2

Glosario de términos

Álabe. Son las aspas o palas, parte fundamental en una turbina eólica, realizan varias tareas y están preparadas para resistir grandes cargas.

Anemómetro. Aparato meteorológico que se usa para la predicción del clima y, específicamente, para medir la velocidad del viento.

Barlovento. Se refiere de donde sopla el viento.

Carga dinámica. Carga que se aplica a una estructura, a menudo acompañada de cambios repentinos de intensidad y posición.

Carga muerta. Son aquellas cargas que actúan durante toda la vida de la estructura. Incluyen todos aquellos elementos de la estructura.

Carga. Efecto de una fuerza o un par que actúan sobre un objeto, produciendo una deformación o un cambio de volumen.

Deformación. Es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo o la ocurrencia de dilatación térmica.

Densidad. Se refiere a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia, usualmente se simboliza mediante la letra rho “ ρ ” del alfabeto griego.

Eficiencia. La eficiencia es aquel factor que indica el máximo rendimiento de una máquina. También se puede decir que es aquel índice o grado de perfección alcanzado.

Emplazamiento. Colocación o situación en un determinado lugar.

Energía eólica. Es una fuente de energía renovable que utiliza la fuerza del viento para generar electricidad.

Energía mecánica. Se define como la capacidad de producir un trabajo mecánico que posee un cuerpo debido a causas de origen mecánico.

Flexión mecánica. Se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal.

Flujo laminar. Se refiere al movimiento de un fluido cuando éste es ordenado, estratificado, suave y se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse y cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave.

Flujo turbulento. Se refiere al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, las partículas se mueven desordenadamente formando pequeños remolinos periódicos.

Intensidad. Es el flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material. Se debe al movimiento de las cargas en el interior del material.

Número de Reynolds. Es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido.

Ralentizar. Hacer lenta una actividad o proceso, disminuir su velocidad.

Sotavento. Se refiere a donde se dirige el viento.

Torsión. Es la sollicitación que se presenta cuando se aplica un momento sobre el eje longitudinal de un elemento constructivo o prisma mecánico, como pueden ser ejes o, en general, elementos donde una dimensión predomina sobre las otras dos.

TSR. La relación de velocidad específica o periférica Tip-Speed-Ratio, es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto “n” del rotor, sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se le suele denominar velocidad específica.

Viento. Corriente de aire que se produce en la atmósfera al variar la presión.

Voltaje. Magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

Simbología

A:	Área del rotor
d_e :	Diámetro del eje
Ec:	Energía cinética
F_c :	Fuerza producida en las aspas
g:	Gravedad
H:	Altura del álabe
h:	Altura del terreno
I:	Corriente
i :	Relación de transmisión
K:	Factor concentrador de esfuerzos
M:	Momento flector
m_r :	Masa del rotor
m_t :	Masa de las tapas
m_e :	Masa del eje
N:	Factor de seguridad
n:	Número de revoluciones
Pv:	Presión de viento
P_n :	Potencia nominal
P:	Potencia
RPM:	Revoluciones por minuto
R:	Constante específica del aire
R_{AX} :	Reacción en el punto A en el plano X
R_{BX} :	Reacción en el punto B en el plano X
R_{BY} :	Reacción en el punto B en el plano Y

r_1 :	Radio de polea conductora
S_n :	Resistencia a la fatiga modificada
S_y :	Resistencia a la fluencia
T_v :	Torque de viento
T :	Temperatura
TSR :	Relación de velocidad en la punta
V :	Voltaje nominal
V_h :	Velocidad del viento a la altura
V_{10} :	Velocidad del viento a 10 m de altura
v :	Velocidad del viento
W_T :	Peso total del eje
ω_1 :	Velocidad angular del rotor y polea conductora
ω :	Velocidad angular
α :	Exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno
ρ :	Densidad del aire
η_e :	Eficiencia eléctrica
η_m :	Eficiencia mecánica
η_{rod} :	Eficiencia mecánica de los rodamientos
η_t :	Eficiencia de transmisión
η_{gen} :	Eficiencia eléctrica del generador
η_{con} :	Eficiencia del controlador

Resumen

El presente proyecto investigativo de análisis y simulación de un prototipo de generador eólico de eje vertical tipo Savonius, es desarrollado y planteado para un rango de velocidad de 5 y 20 Km/h, con el cual se realiza la comprobación de resultados teóricos, simulados y reales.

Según la potencia y eficiencia presentada en estos tipos de aerogeneradores se realiza una selección adecuada del tipo de álabes y número de módulos.

Al observar desde una vista superior la sección transversal tiene una forma de S. Como es un dispositivo de arrastre; extrae menor potencia comparada con aerogeneradores de similar tamaño movidos por sustentación.

El prototipo propuesto está compuesto por un rotor que consta de dos módulos, cada uno está integrado por dos álabes de forma semicircular que convertirán la energía eólica, en energía mecánica, y, posteriormente, en energía eléctrica.

El funcionamiento del rotor está sujeto a condiciones externas e internas, adicional se realiza el análisis teórico con la ayuda de softwares donde se evalúan los componentes que conforma el prototipo y las líneas de flujo de viento bajo un entorno real. Los datos teóricos y simulados serán comparados con las pruebas reales realizadas al prototipo al someter a diferentes velocidades de viento.

Para realizar la simulación del flujo del viento se utilizó el software de ingeniería ANSYS Fluent 16.2, apropiado para la resolución de problemas de fluidos, el mismo que ha permitido conocer las zonas críticas del prototipo que estarán sometidas a un flujo turbulento o vórtice.

Por la sencillez, los componentes del sistema eólico son fabricados con materiales livianos, resistentes, económicos y asequibles que permitan una fácil construcción y ensamblaje.

Palabras claves:

Energía renovable, energía eólica, aerogenerador, flujo del viento, ANSYS Fluent.

Abstract

The present research project of analysis and simulation of a prototype vertical axis wind turbine Savonius type, is developed and raised for a speed range of 5 and 20 km/h, with which the verification of theoretical results, simulated and real.

According to the power and efficiency presented in these wind turbines types an appropriate selection of the type of blades and number module is made.

When viewed from a top view the cross-section has a S-shape. As it is a drag device, it extracts less power compared to similarly sized wind turbines powered by lift.

The proposed prototype is composed of a rotor consisting of two modules each is composed of two semicircular-shaped blades that will convert wind energy, in mechanical energy and later electrical energy.

Rotor operation is subject to external and internal conditions, additional theoretical analysis is performed with the help of softwares where the components are evaluated that forms the prototype and the wind flow lines under a real environment, the theoretical and simulated data will be compared with the real tests, the theoretical and simulated data will be compared with the real tests made to the prototype when subjected to different wind speeds.

To realize the simulation of the flow of the wind there was in use the software of engineering ANSYS Fluent 16.2, adapted for the resolution of problems of fluids, the same one that has allowed knowing the critical zones of the prototype that will be submitted to a turbulent flow or vortex.

For simplicity, the components of the wind system are manufactured with light, resistant, inexpensive and affordable materials that allow easy construction and assembly.

Keywords:

Renewable energy, wind energy, wind turbine, wind flow, ANSYS Fluent.

Introducción

Las energías renovables se definen como provenientes de fuentes naturales e inagotables. Bajo esta definición, se reconocen diferentes tipos tales como energía solar, energía hidráulica y para este estudio en específico se utiliza la energía eólica, que ha sido utilizada por la humanidad desde tiempos remotos.

Los sistemas energéticos tradicionales empleados en estos últimos siglos utilizan recursos no renovables para la generación de energía, el impacto ambiental negativo de estas ha ocasionado que los gobiernos busquen otras alternativas para generación de energía eléctrica y que sea amigable con el medio ambiente.

Notando el crecimiento que ha tenido el uso de la energía eólica en los últimos tiempos, en el Ecuador ha crecido el interés por el desarrollo de proyectos tecnológicos, siendo un país rico en este recurso, ha desarrollado un cambio en la matriz energética construyendo estaciones eólicas de aerogeneradores de ejes horizontales, no obstante, no existe un análisis detallado para el uso de aerogeneradores de ejes verticales.

Considerando dicho antecedente, en el presente proyecto de investigación se pretende analizar el prototipo de aerogenerador eólico de eje vertical tipo Savonius, sometiendo a diferentes velocidades de viento con el fin de comprobar los resultados teóricos, simulados y reales.

En el proyecto se analizan los principales aspectos teóricos y físicos que gobiernan el funcionamiento del aerogenerador tipo Savonius, permitiendo establecer los parámetros necesarios para su dimensionamiento y construcción.

El análisis y la comparación de los resultados obtenidos del prototipo, permiten realizar una selección correcta del tipo de aerogenerador a utilizar, ya sea para el uso industrial o para el consumo en lugares apartados de la red eléctrica, produciendo energía limpia y de bajo costo.

Se analizan los materiales y costos necesarios para la construcción. Estos dependen directamente de la velocidad del viento disponible en el lugar y de la potencia que necesitan generar.

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE Y ASPECTOS TEÓRICOS

En el presente capítulo se describe una reseña histórica, antecedentes, evolución, principios de funcionamiento y aspectos teóricos; en particular de los generadores de eje vertical tipo Savonius que es la parte fundamental del presente proyecto de investigación.

El objetivo del capítulo es conocer los tipos de aerogeneradores existentes a nivel mundial, su capacidad instalada y los principios fundamentales, de los aerogeneradores verticales para la generación de corriente eléctrica a través de energías renovables.

1.1 Estado del arte

La industria de la energía eólica en tiempos modernos comenzó en 1979 con la producción en serie de turbinas de viento, en aquellos años las turbinas eran pequeñas para los estándares actuales, con capacidades de 20 a 30 kW cada una. Desde entonces la turbina ha crecido enormemente y la producción se ha expandido a muchos países.

En los últimos años, las grandes compañías han construido aerogeneradores con potencias mayores desde los 500 kW a 6000 kW, lo que demuestra el alto grado de madurez alcanzado por esta tecnología.

La demanda de electricidad irá incrementándose no sólo por el aumento de la población, la tendencia acelerada a la urbanización y al crecimiento industrial, sino por la necesidad de la sociedad de mejorar los estándares de calidad de vida. La energía producida por el viento, el sol, la biomasa y las olas de mar entre otras, son las opciones limpias y seguras para sustituir el modelo energético actual. En la figura 1 se observa países a nivel mundial que cuentan con políticas y objetivos para usar energía eólica hasta el año 2015.

La potencia eólica instalada en el mundo al cierre del 2015 superó los 400 GW, según estimaciones provisionales de la consultora Navigant_BTM, que preveé que crecerá más del 40 % hasta 2019, cuando sobrepasará los 600 GW.

Aunque la implantación eólica se ha ralentizado en los últimos años, España sigue siendo, con 23 GW instalados al cierre de 2015, el segundo país europeo por

potencia eólica operativa después de Alemania con 43 GW, y el quinto del mundo, tras China con 138 GW, EE.UU. con 71 GW e India con 25 GW, según las estimaciones de la citada consultora, (Acciona , 2015).

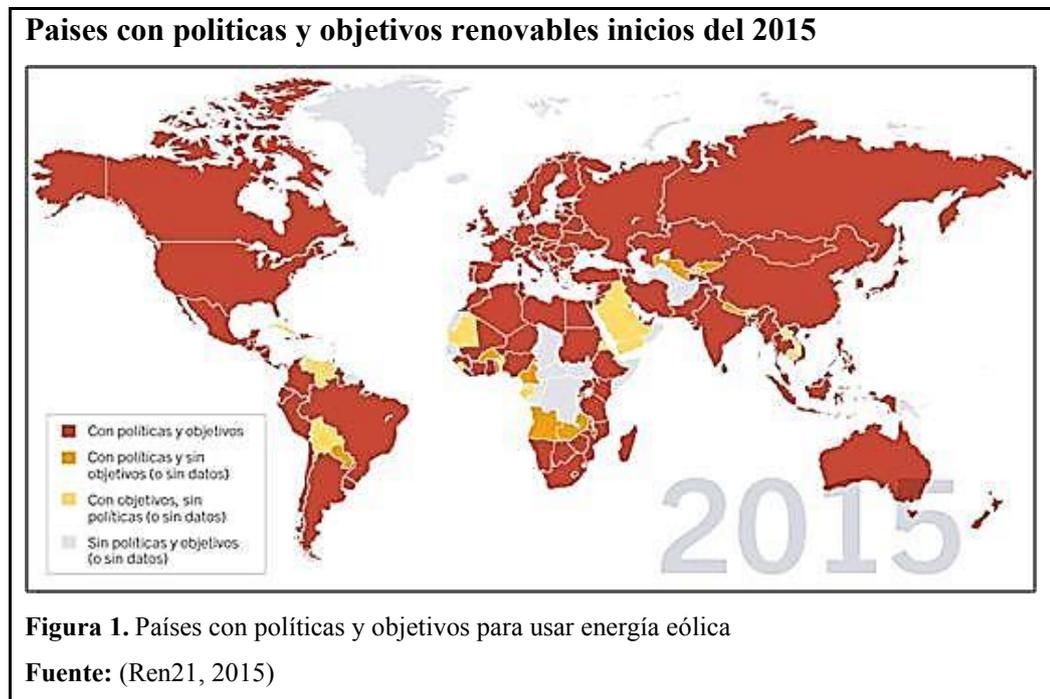


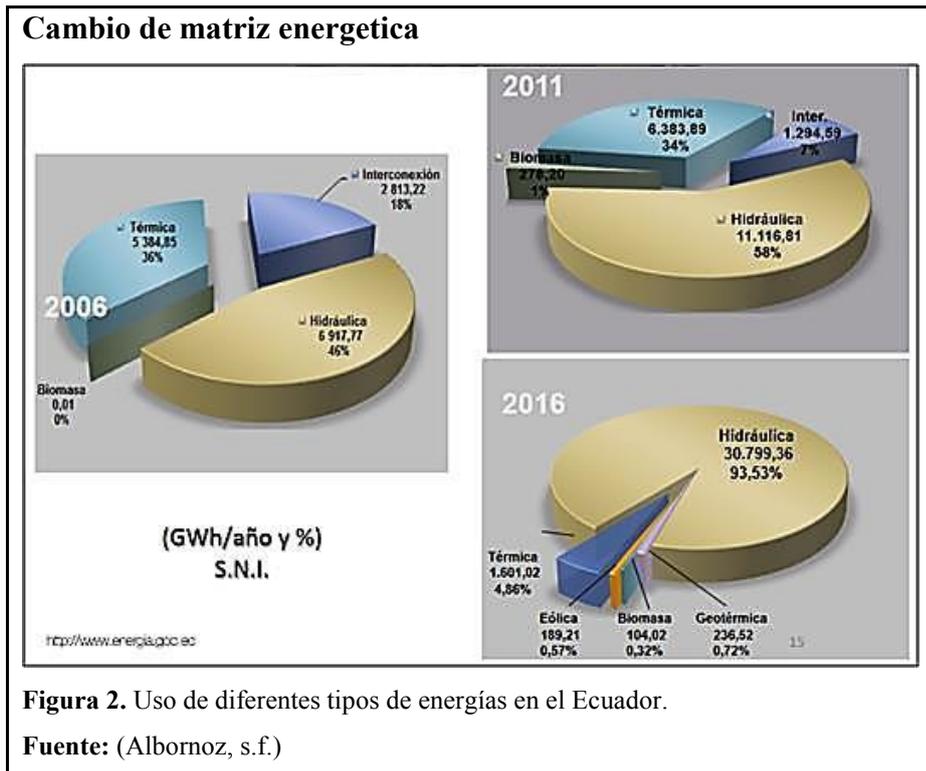
Figura 1. Países con políticas y objetivos para usar energía eólica

Fuente: (Ren21, 2015)

El Ecuador, siendo un país rico en fuentes de energía renovable, históricamente ha dependido en gran medida de los combustibles fósiles como fuente de energía, en la figura 2 se observa como el gobierno a través de las adecuadas políticas públicas busca revertir esta situación con el radical cambio en la matriz energética donde la energía renovable sea la protagonista.

Las estaciones eólicas operativas en el Ecuador son las siguientes:

- La primera central inicio sus operaciones en octubre del 2007, se encuentra ubicado en la isla San Cristóbal, con una potencia instalada de 2.4 MW.
- La segunda central inicio sus operaciones en enero del 2013, se encuentra en la zona Villonaco, en la Provincia de Loja con una potencia instalada de 16.5 MW.
- La tercera central inicio sus operaciones en diciembre del 2014, se encuentra en la isla Baltra con una capacidad de 2.25 MW.
- La cuarta central está en evaluación ambiental y estudios de factibilidad, está ubicada en la parroquia San Sebastián de Yuluc, cantón Saraguro a 84 km de Cuenca con una capacidad de 50 MW (Arrega, 2014).



El crecimiento de las instalaciones eólicas a nivel mundial, ha obligado al ser humano a desarrollar herramientas informáticas cada vez más sofisticadas que permiten modelizar el comportamiento del viento.

Los simuladores eólicos permiten conocer con mayor precisión el comportamiento que tendrá el viento en un emplazamiento, lo que permite diseñar adecuadamente los parques eólicos con el fin de obtener el mayor rendimiento (Sitiosolar, s.f.).

1.1.1 Simuladores eólicos

Actualmente, el Instituto de Eficiencia Energética y Energía Renovable (INER), desarrolló un software que permite realizar análisis de los datos de explotación de los aerogeneradores de un parque eólico y el comportamiento de las variables de viento tales como densidad de aire, intensidad de turbulencias y otras.

El software ha sido desarrollado en el proyecto, “Análisis del comportamiento de un parque eólico en condiciones extremas” y está compuesto de tres herramientas que se menciona a continuación:

- Análisis de alarmas.
- Caracterización de curvas de potencia.
- Análisis de viento.

El software realiza todos los cálculos de forma automatizada, de manera que el usuario puede realizar informes mensuales, semanales e incluso diarios de los datos de explotación de un parque eólico. Actualmente, se ha desarrollado la tercera versión del programa. Estos cálculos permiten evaluar de una manera instantánea, las condiciones meteorológicas en las que Villonaco se encuentra (Espinoza, 2015).

1.1.2 Funcionamientos de los simuladores de recurso eólico

Los simuladores modernos se basan en complicadas fórmulas físicas que se aplican en CFD “Dinámica de fluidos computacional”. Estas aplicaciones modela el comportamiento del viento en un determinado lugar, ante los obstáculos del terreno y de otros aerogeneradores.

Dependiendo de su función existen dos tipos básicos de software para el diseño de centrales eólicas.

- Simuladores de recurso eólico.
- Programas de diseño y de optimización del rendimiento.

La finalidad de los simuladores es evaluar la potencia del recurso eólico en un emplazamiento determinado y conocer aspectos del viento como la aceleración, ángulo de incidencia, perfil vertical, cizalladura y la intensidad de turbulencia ambiental.

Existen diferentes subtipos de simuladores en función del medio, tales como, simuladores para la energía eólica terrestre “on shore”, y para las instalaciones eólicas marinas “off shore”.

Entre estos programas se encuentran simuladores como WAsP, Meteodyn WT, Meteodyn Urbanwind o WindSim. (Sitiosolar, s.f.).

1.2 Aspectos teóricos de la investigación

1.2.1 Recurso eólico

El viento es un proceso muy complejo; sin embargo puede ser descrito en términos muy sencillos. El sol calienta la superficie de la Tierra en diferente medida, dependiendo de si la superficie está cubierta de nubes, si está directamente expuesta a la luz solar o si se trata de la superficie del océano. En la figura 3 se observa que el aire que sube crea una zona de baja presión y hace que el aire frío adyacente a

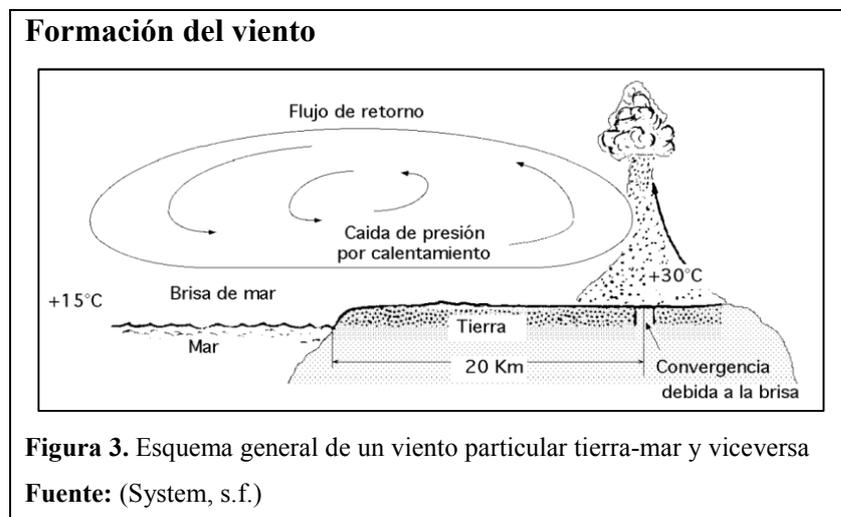
alta presión se mueva a las zonas de baja presión. Este movimiento de aire se llama viento.

La energía del viento es más estable y fuerte en el mar que en la tierra, y los parques eólicos marinos tienen un impacto visual menor; sin embargo sus costes de construcción y mantenimiento son considerablemente mayores (Méndez & Rodríguez, 2012).

1.2.1.1 Velocidad del viento

El viento viene definido por dos parámetros esenciales como son dirección y velocidad. La dirección se comprueba mediante una veleta, y la velocidad se mide con un anemómetro.

Los registros anemométricos muestran que la velocidad instantánea del viento varía continuamente en magnitud y dirección. En intervalos de tiempo muy cortos, como un segundo, la velocidad puede duplicarse y la dirección variar considerablemente. El movimiento del aire puede considerarse con la superposición de un viento de velocidad uniforme y de turbulencias.



Con anemómetros de precisión se han determinado variaciones de la velocidad de viento de 23 m/s a 37 m/s en un cuarto de segundo, acompañada de una variación de dirección de 20° “14 m/s con 20° en 0.25 s” (Villarrubia, 2013).

Para aprovechar la energía del viento es necesario que alcance una velocidad mínima, depende del aerogenerador que se vaya a utilizar. Esta suele empezar entre los 3 m/s y los 4 m/s, velocidad llamada "cut-in speed", y que no supere los 25 m/s, velocidad llamada "cut-out speed" (Coast, s.f.).

1.2.1.2 Variación de la velocidad del viento con la altura

La velocidad del viento varía con la altura debido a las turbulencias tanto de origen mecánico por efectos de las irregularidades de la superficie del terreno, como de origen térmico causado por el gradiente de temperatura del aire que provoca corrientes convectivas en sentido vertical. Como en general la influencia del gradiente de temperatura del aire en una diferencia de altura de 100 m es pequeña no se tendrán en cuenta los efectos de las turbulencias térmicas, y solamente se tendrán en cuenta los efectos de las irregularidades de la superficie del terreno.

Conforme se separa del terreno, los efectos de rozamiento disminuyen y por lo tanto, la velocidad aumenta. Así, se tiene un gradiente o variación de la velocidad con la altura, se habla del perfil vertical de la velocidad del viento. En la tabla 1 se observa que si se tienen superficies lisas con agua, terrenos llanos, llanuras nevadas entre otros, el gradiente de velocidad es suave. Sin embargo, si se tienen superficies con gran rugosidad, terrenos con edificaciones urbanas, superficies boscosas entre otras, el gradiente de velocidad será mayor. La velocidad del viento varía con la altura, siguiendo aproximadamente la ecuación 1 de tipo estadístico, conocida como Ley Exponencial de Hellmann: (Fernández, 2008).

$$V_h = V_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

V_h = Velocidad del viento a la altura, [m/s]

V_{10} = Velocidad del viento a 10 metros de altura, [m/s]

α = Exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno, [adimensional]

h = altura, [m]

En la figura 4 se muestra el incremento significativo que tiene la velocidad del viento al aumentar la altura, en la que se mide según la Ley Exponencial de Hellmann.

Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción, para el diseño de edificios la presión de viento sobre una superficie determinada cambia a partir de los 10 metros de altura (NEC, 2014).

Variación de la velocidad del viento según la ley exponencial de Hellmann

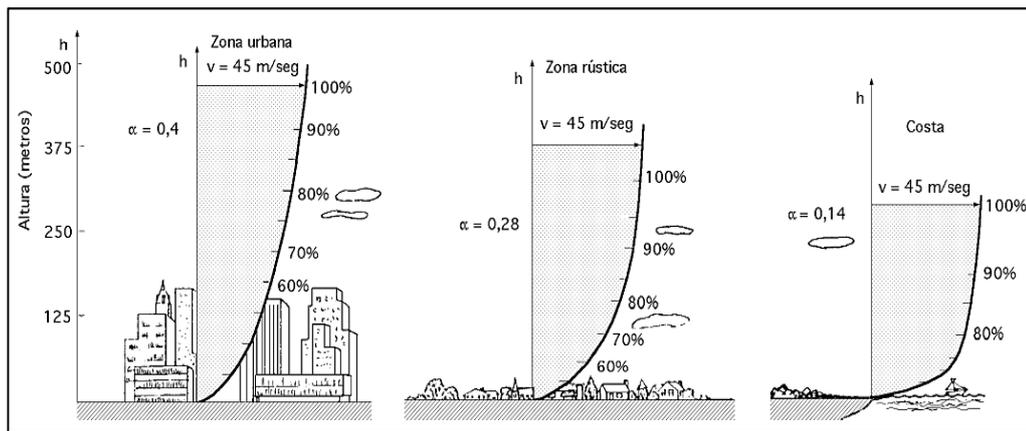


Figura 4. Variación de la velocidad del viento

Fuente: (Fernández, 2008)

Tabla 1.

Valores del exponente de Hellmann

Descripción	Exp. de Hellmann (α)
Lugares llanos con hielo o hierba	0.08 / 0.12
Lugares llanos (mar, costa)	0.14
Terrenos poco accidentados	0.13 / 0.16
Zonas rústicas	0.2
Terrenos accidentados o bosques	0.2 / 0.26
Terrenos muy accidentados y ciudades	0.25 / 0.4

Nota: Exponente de Hellmann según rugosidad del terreno.

Fuente: (Fernández, 2008)

1.2.1.3 Densidad del aire

La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa o peso. Así, la energía cinética del viento depende de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen. En otras palabras, cuanto "más pesado" sea el aire más energía recibirá la rotor.

A presión atmosférica normal y a 15 °C el aire pesa alrededor de 225 kg/m³, aunque la densidad disminuye ligeramente con el aumento de la humedad. Además, el aire es más denso cuando hace frío que cuando hace calor. A grandes altitudes la presión del aire es más baja y el aire es menos denso (Focer, 2002).

En el anexo 1, se observa valores de la densidad en todo el Ecuador a 30 m de altura, valores que son obtenidos para proyectar plantas eólicas a nivel nacional.

1.2.2 Energía eólica

Para aprovechar la energía eólica es importante conocer las variaciones diurnas, nocturnas, estacionales, la variación de la velocidad con la altura sobre el suelo, la cantidad de las ráfagas en espacios de tiempo y los valores máximos ocurridos en series históricas de datos con una duración mínima de 20 años.

Si el viento puede aprovecharse para la producción de energía es porque la contiene en forma de energía cinética, las máquinas respectivas permiten transformarla en energía mecánica, y mediante un generador en energía eléctrica.

La cantidad de energía que puede ser extraída del viento se relaciona con el tiempo de funcionamiento del generador eólico y la velocidad de viento existente en el lugar, la energía del viento existente en el sitio no es totalmente disponible para el usuario final, debido a limitaciones impuestas por los elementos que lo componen y por las consideraciones de diseño.

La fuente de energía con la que se alimenta una turbina eólica es la llamada “energía cinética” del viento, es decir la del movimiento de aire y se determina mediante la ecuación 2 (Lara & Hernández, 2013).

$$E_c = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde:

E_c = Energía cinética, [KJ]

ρ = Densidad del aire, [kg/m³]

A = Área expuesta al viento, [m²]

v = Velocidad del viento, [m/s]

La energía eólica presenta varias ventajas, entre las cuales se pueden destacar las siguientes:

- Su impacto al medio ambiente es mínimo, no emite sustancias tóxicas o gases, por lo que no causa contaminación al aire, agua y suelo, además no contribuye al efecto invernadero y al calentamiento global.

- El viento es una fuente de energía inagotable y abundante. Se estima que teóricamente existe el potencial eólico para suplir 15 veces la demanda actual de energía en el mundo.
- Proyectos de energía eólica se pueden construir en un plazo relativamente rápido; por ejemplo, un parque eólico de 50 MW se puede instalar en un año; si la etapa de pre-construcción ha sido cuidadosamente planificada y ejecutada (Focer, 2002).

Como toda fuente de energía, la eólica tiene sus desventajas:

- La variabilidad del viento para proyectos aislados requieren de un mecanismo de almacenamiento para disponer de la energía eléctrica cuando no exista suficiente viento, generando un costo adicional al sistema.
- Para parques eólicos la variabilidad del viento impacta en la estabilidad del voltaje y la frecuencia que se pueda entregar a la red eléctrica.
- Un proyecto eólico tiene un alto costo inicial. Si bien, a lo largo de su vida útil puede resultar más económico por sus bajos costos de operación y mantenimiento, la inversión inicial requerida puede ser una barrera para la realización del proyecto, sobre todo en zonas rurales aisladas.
- Cantidad de viento es una opción factible y rentable sólo en sitios con suficiente viento, lo cual significa que no se puede instalar en cualquier lugar (Focer, 2002).

1.2.2.1 Ley de Betz

La Ley de Betz fue formulada por el físico alemán Albert Betz en 1919. En su libro “Wind energy” se define la potencia captada por un obstáculo que frena el libre movimiento del viento, en este caso se consideran las aspas del aerogenerador como obstáculo. Como muestra la figura 5, la Ley de Betz dice que solo puede convertirse hasta el 59 % de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador (Lara & Hernández, 2013).

Por ello, las turbinas reales podrán extraer una energía inferior a la planteada por Betz. El coeficiente entre la potencia extraída y la potencia total del fluido, se denomina coeficiente de potencia C_p , el cual será siempre inferior a 0.59, como se observa en la figura 13.

Límite de Betz

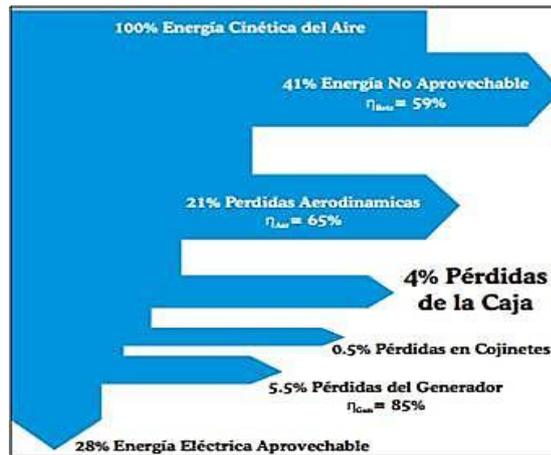


Figura 5. Pérdidas aerodinámicas según el límite de Betz.

Fuente: (Lara & Hernández, 2013)

1.2.2.2 Efecto Magnus

Fenómeno físico por el cual la rotación de un objeto modifica a la trayectoria del mismo a través de un fluido. Se debe entre otros al principio de Bernoulli. Un objeto al rotar crea un remolino de fluido a su alrededor sobre un lado del objeto como se observa en la figura 6. El movimiento del remolino tendrá la misma dirección que la corriente de fluido a la que el objeto está expuesto, en este caso la velocidad se incrementará en el otro lado; por lo tanto el movimiento del remolino se produce en la dirección opuesta de la corriente de fluido disminuyendo la velocidad, la presión del fluido se reduce proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad, con lo cual la presión será menor en un lado que en otro, causando una fuerza perpendicular a la dirección de la corriente de aire, esta fuerza desplaza al objeto de la trayectoria.

Efecto Magnus

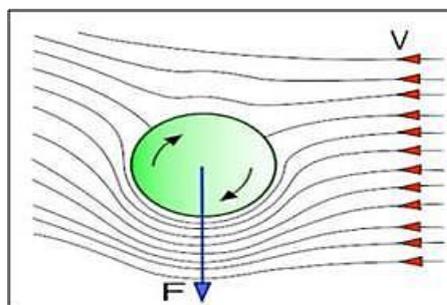


Figura 6. Efecto Magnus sobre un objeto redondo

Fuente: (López, 2016)

Por lo tanto, las fuerzas de sustentación y de arrastre se presentan por el efecto Magnus, las aspas frenan al viento por una parte “sotavento”, mientras lo acelera por la parte contraria “barlovento” (Fernández, 2008).

1.2.3 Generador eólico

Un aerogenerador es una máquina formada, principalmente, por una turbina eólica y un generador eléctrico. La turbina eólica transforma la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional, la cual es transformada en energía eléctrica por el generador.

La cantidad de energía que se pueda producir depende de las características del viento. Los generadores permiten utilizar dicha energía para crear electricidad, dependiendo de la posición del eje de giro de los aerogeneradores respecto a la dirección del viento, estos se pueden clasificar como muestra en el anexo 2.

1.2.4 Generadores de eje horizontal

También conocidos como HAWT “Horizontal Axis Wind Turbine”, se trata de la primera configuración de molinos de viento construidos para generación de energía eléctrica. Cuentan con el registro de la mayor eficiencia en la transformación de energía mecánica a eléctrica. Los aerogeneradores de eje horizontal suelen clasificarse según su velocidad de giro o el número de palas del rotor, los lentos poseen hasta 24 y se utiliza para el bombeo de agua, por el contrario los aerogeneradores rápidos poseen menos de 4 palas y son usados para la generación de energía eléctrica.

1.2.5 Generadores de eje vertical

También conocidos como VAWT “Vertical Axis Wind Turbine”, su principal característica es que el eje principal es perpendicular al nivel del piso, se suelen diferenciar por el tipo de aspa o hélice sobre la que incide el viento, siendo notables tres configuraciones:

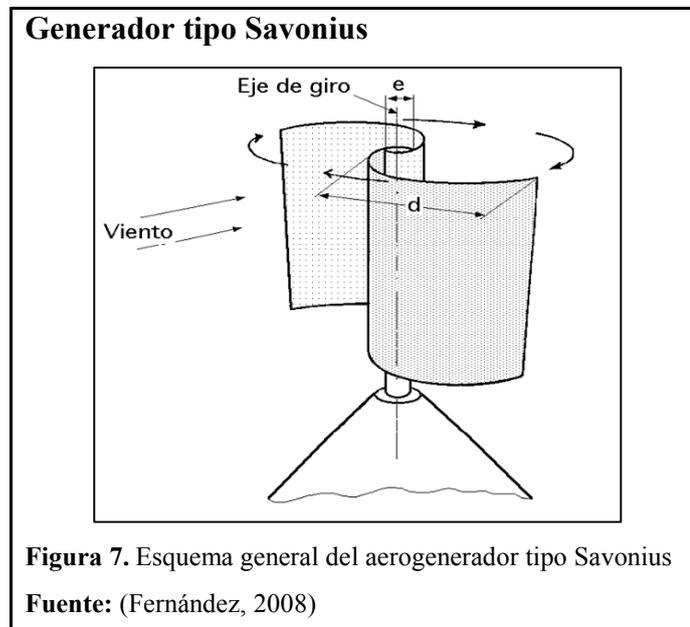
- Darrieus.
- Windside
- Savonius.

Debido a su importancia para este proyecto de investigación, los generadores tipo Savonius se discutirán, en detalle, a continuación.

1.2.5.1 Generadores tipo Savonius

En 1924 el ingeniero finlandés Sigurd Savonius diseñó un rotor conformado por dos palas con forma de semicírculos alrededor del eje vertical, como se muestra en la figura 7. Este tipo de generador puede trabajar con velocidades de viento muy bajas debido a la diferencia del coeficiente de arrastre presente entre los dos semicírculos, por sus características aerodinámicas tiene un buen rendimiento a la hora del arranque y en la autorregulación.

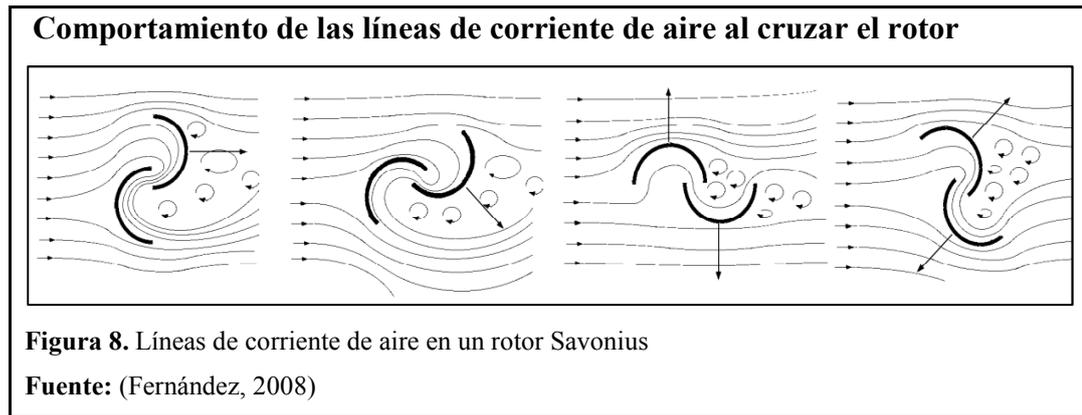
El diseño de Sigurd Savonius presenta ventajas en cuanto a que el sistema soporta vientos turbulentos y frena por si solo al llegar a una velocidad límite. Debido a su simetría vertical no necesita de un sistema de orientación, disminuyendo costos de fabricación (Cuesta, Martínez, & Cabrera, 2008).



1.2.5.2 Rotor Savonius

El rotor Savonius trabaja esencialmente por arrastre, tiene un alto par de arranque sin embargo su eficiencia es limitada. Por su sencillez y bajo costo es fácil de construir con técnicas artesanales.

No obstante, la baja circulación de aire en cercanías del eje de rotación reduce la eficiencia del rotor, por lo tanto resta momento de rotación. Además, el viento que choca por detrás de las aspas como se muestra en la figura 8, puede generar paros repentinos en operaciones de alta velocidad (di Prátula, 2009).



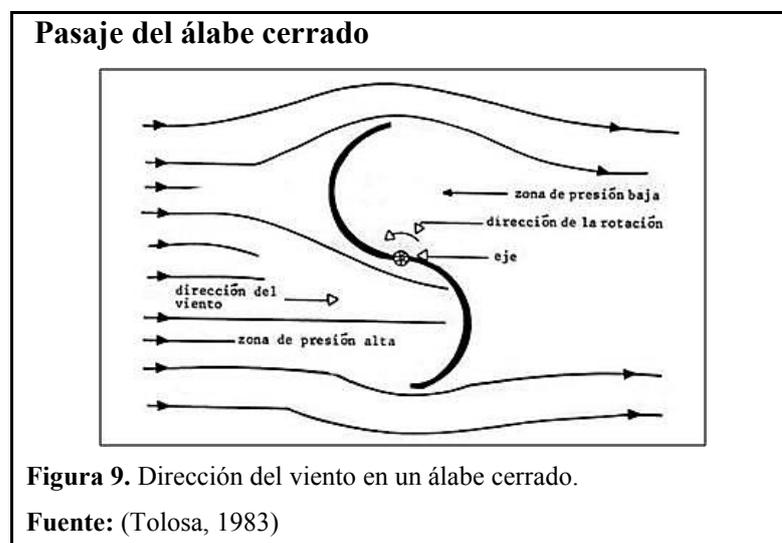
De modo particular, las dimensiones y configuración de las aspas, son los aspectos más importantes, puesto que, suponen mejoras en el rendimiento de la turbina (Sheldahi & Klimas, 1981).

Hasta la actualidad existen múltiples diseños desarrollados a partir del diseño original que mejoran la eficiencia del dispositivo, estos varían de acuerdo al número de álabes, ángulo entre ellos, número de módulos que presente el rotor, distancia existente entre las aspas y el eje del rotor, la longitud y forma de los álabes.

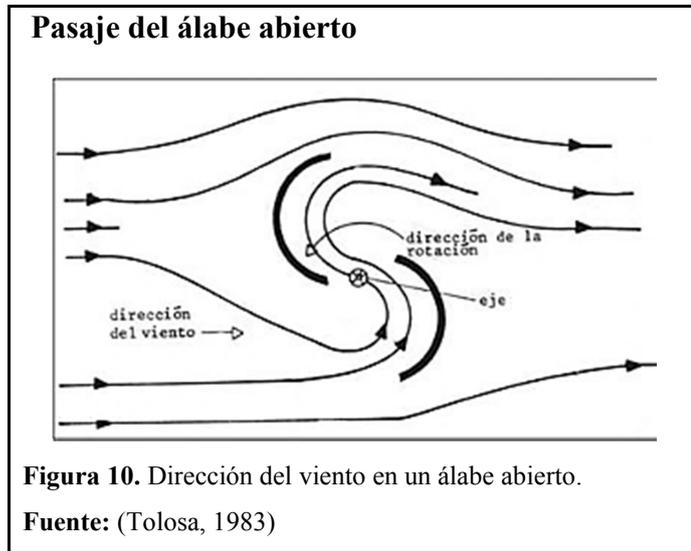
1.2.5.3 Principio de funcionamiento

Para el principio de funcionamiento se toma en cuenta las disposiciones de los álabes del rotor, para el diseño del aerogenerador se tiene dos tipos de disposiciones que se describen a continuación.

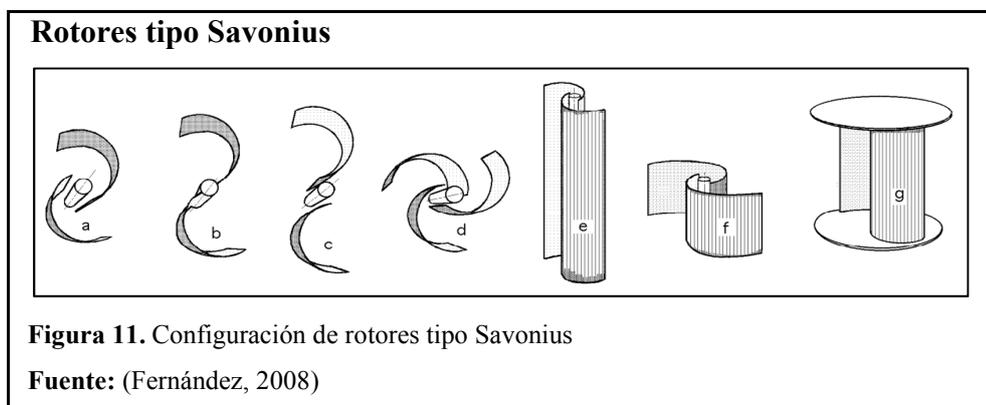
- Pasaje del álabes cerrado. Es cuando los álabes están conectados entre sí al eje, como se observa en la figura 9, este sistema impide la circulación del flujo de aire, ocasionando un vacío por debajo del álabes (Tolosa, 1983).



- Pasaje del álabe abierto. Es cuando los álaves no están conectados entre sí, como se observa en la figura 10, debido a la separación. La región de vacío es remplazado por una zona de presión, por lo tanto aumenta el torque, por la regulación de apertura es posible controlar la velocidad de rotación y el torque que produce en el eje (Tolosa, 1983).



La configuración del rotor resulta decisiva para satisfacer las necesidades puntuales, se debe tener presente el diámetro, su área de barrido, el número de aspas y la velocidad nominal de giro. La disminución en el peso de este componente aumenta el rendimiento del generador, sin embargo resulta conveniente agregar un poco de inercia al sistema para mantener el rotor en movimiento cuando el impulso del viento descende, en la figura 11 se observa diferentes configuración de aspas para el rotor Savonius.



- a) Cs interior, b) C simple, c) Cs externo, d) Cs a tres aspas e) Configuración de altura, f) Configuración de diámetro g) Configuración de tapas

Para el diseño del número de etapas y álabes de un generador eólico Savonius se debe tener en cuenta la relación entre la velocidad del viento y el coeficiente de potencia y mediante pruebas, determinar que configuración satisface más las condiciones existentes, en el capítulo 2 se realizará la adecuada selección del rotor y configuración de los álabes para un diseño ideal. (Fernández, 2008)

1.3 Conclusiones del capítulo

- Una vez detallada la energía eólica: ventajas, desventajas y definición de sus conceptos más relevantes, se concluye que es una fuente interminable de energía frente al agotamiento de combustibles fósiles contribuyendo a evitar el cambio climático.
- El viento es una fuente de energía gratuita, limpia e inagotable, lo que da como resultado una buena opción para producir electricidad, siendo los parámetros fundamentales la dirección y la velocidad.
- La disposición de los álabes es fundamental para la generación de energía. Esto dependerá si el pasaje del álabe es cerrado o abierto, siendo el mejor de los dos, el pasaje abierto porque permite el control de velocidad de rotación al igual que el torque producido en el eje.

CAPÍTULO 2

DISEÑO Y CÁLCULOS GENERALES DEL PROTOTIPO

En el presente capítulo, se realiza el diseño del prototipo de aerogenerador, se identifica las diferentes condiciones internas y externas a las que se encuentra expuesto el mismo. El proceso de diseño se divide en varios componentes claves, cada uno de ellos serán expuestos más adelante.

El objetivo principal es diseñar y analizar las dimensiones generales del prototipo de aerogenerador y de las partes que lo componen como son: rotor, álabes, eje, tapas circulares, sistema de transmisión, rodamientos y estructura de sujeción, considerando las variables que influyen en un sistema eólico.

2.1 Consideraciones de diseño

El prototipo a desarrollar debe cumplir con las siguientes características generales de diseño:

- Los componentes del sistema eólico deben estar fabricados con materiales livianos, resistentes, económicos y asequibles que permitan una fácil construcción y ensamblaje.
- El prototipo debe ser de fácil transporte de tal manera que la instalación en distintos sitios durante la fase de prueba se lo realice por medio de anclajes provisionales.

2.1.1 Condiciones externas

Para el diseño del aerogenerador es importante tener en cuenta las condiciones ambientales que se presentan en el lugar a realizar las pruebas, tales como la altitud, densidad del aire y potencial eólico.

2.1.1.1 Cálculo de la velocidad nominal del viento

Para dimensionar el prototipo de rotor se debe conocer la velocidad nominal de viento, con la cual se realiza todos los cálculos necesarios. Mediante datos obtenidos por el INAMHI “Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología” en la provincia de Pichincha, ciudad de Quito, se tiene una velocidad de viento de 4 m/s, como se observa en el anexo 3.

2.1.1.2 Temperatura en la ciudad de Quito

Los datos de la temperatura máxima y mínima durante un año se observa en el anexo 4, la temperatura promedio en el mes de junio es de 13.8 °C, como valor aproximado se tiene una temperatura de 14 °C en la Ciudad de Quito.

2.1.1.3 Densidad relativa del aire

El producto de la energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa o peso. Por lo tanto la energía cinética del viento depende de la densidad del aire, en el anexo 5, se observa la presión atmosférica y velocidad de viento para el día 28 de junio del 2016, que se toma como referencia para el análisis.

En la tabla 2, se muestran los valores obtenidos de las condiciones ambientales en la ciudad de Quito, sitio donde se realizará las pruebas al aerogenerador Savonius.

Tabla 2.
Condiciones ambientales

Condiciones ambientales	
Altitud sobre el nivel del mar	2850 msnm
Velocidad promedio de viento	4 m/s
Temperatura de ambiente	14 °C
Presión atmosférica	72943 Pa
Constante del aire	0.287 kJ/kg·K

Nota: Condiciones ambientales en el sitio de pruebas

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

Para el cálculo de la densidad del aire en la ciudad de Quito, se utiliza la ecuación 3.

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde:

P= Presión, [Pa]

R= Constante específica del aire, $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right]$

T= Temperatura, [K]

$$\rho = \frac{72943 \frac{N}{m^2}}{0.2869 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (14 + 273)K}$$

$$\rho = 0.886 \frac{kg}{m^3}$$

2.1.2 Evaluación del potencial eólico

Para diseñar una máquina eólica de forma tal que entregue la energía que se necesita y que opere de manera eficiente en las condiciones locales, es necesario evaluar el potencial eólico de la zona donde se va realizar las pruebas, para esto se usa tres opciones:

- Realizando mediciones en el sitio.
- Determinando las velocidades a partir de mediciones en lugares cercanos.
- Aprovechando las mediciones de otras investigaciones o proyectos

Para este proyecto de investigación se utiliza la tercera opción, donde se aprovechan mediciones tomadas en el desarrollo de otros proyectos, se emplea con frecuencia cuando en la zona hay instaladas otros aerogeneradores (Moreno & Herrera, 2008).

2.1.3 Condiciones internas

Las condiciones que se debe tener en cuenta son el diseño del rotor, eje del rotor, estructura de soporte, sistema de transmisión, así como los elementos normalizados, otro factor importante a tener en cuenta es considerar la facilidad de mantenimiento y remplazo de componentes, estos deben ser de materiales livianos, resistentes y económicos.

2.2 Alternativas para rotor Savonius

Para diseñar un rotor Savonius se debe conocer las opciones que pueden existir, que incluyen, espaciados y número de álabes, esbeltez y discos laterales que conforman las bases de apoyo.

En la figura 11 se observa que el rotor “f” tiene una mayor esbeltez mientras que el rotor “g” tiene mayor rendimiento a bajas revoluciones por minuto “rpm”. Debido a las bajas velocidades de viento existente en la ciudad de Quito.

El proyecto de investigación se realiza con el rotor tipo “g”, configuración que se conoce como pasaje de álabes abiertos descrito en el capítulo 1.

2.2.1 Parámetros geométricos de las aspas

Los parámetros geométricos más importantes de un rotor Savonius que se debe considerar para un diseño se puede observar en la figura 12.

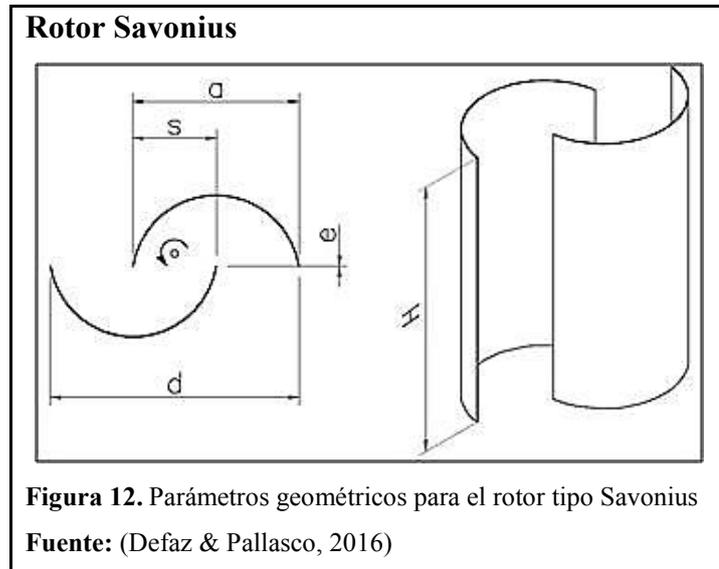


Figura 12. Parámetros geométricos para el rotor tipo Savonius

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

Donde:

s = Traslape.

d = Distancia comprendida entre los puntos extremos de un ala o diámetro.

a = Ancho de cada ala.

e = Distancia entre alas.

H = Altura o largo del ala.

Para determinar los parámetros geométricos del rotor eólico se debe considerar lo siguiente:

- La relación s/d va de 0.1 a 0.15
- La relación $s/a = 1/6$
- La relación $H/d = 2$
- Distancia entre alas “ e ” debe ser igual a 0
- Los extremos del rotor deben estar cubiertos
- La curvatura de los alas debe ser simétrica (Rodríguez, 1985).

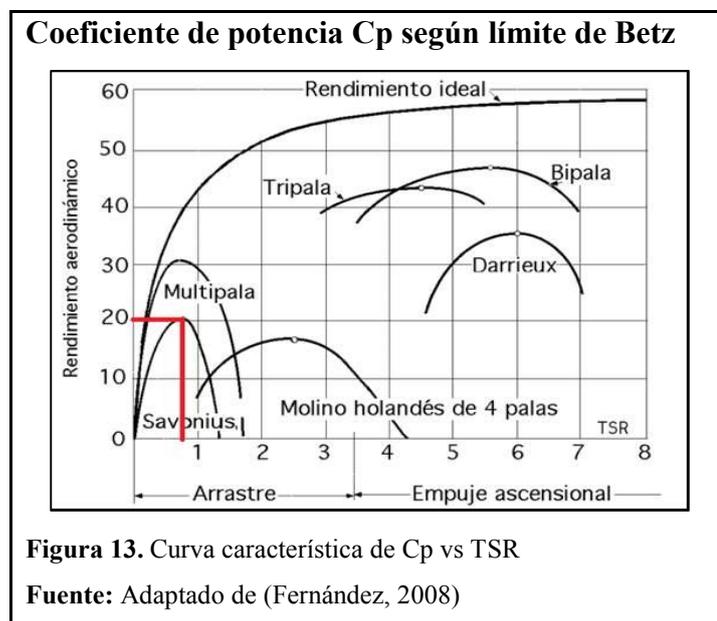
2.3 Diseño del rotor Savonius

El rotor eólico es el primer componente que tiene contacto con el viento para llevar a cabo la conversión de energía, el rotor a diseñar consta de dos módulos compuestos cada uno de dos semicilindros con una tapa inferior y una superior cuyos ejes están desplazados entre sí, como se observa en la figura 16. El desplazamiento facilita el cambio de dirección del flujo por lo que además de la acción de las fuerzas del origen aerodinámico se aprovecha la variación de la cantidad de movimiento de fluido, todos los componentes deben ser de un material de baja densidad, con el fin de obtener un rotor liviano.

2.3.1 Coeficiente de potencia (C_p)

La potencia extraída por el aerogenerador dependerá de su coeficiente de potencia, que a su vez obedece en gran medida de la forma de los álabes.

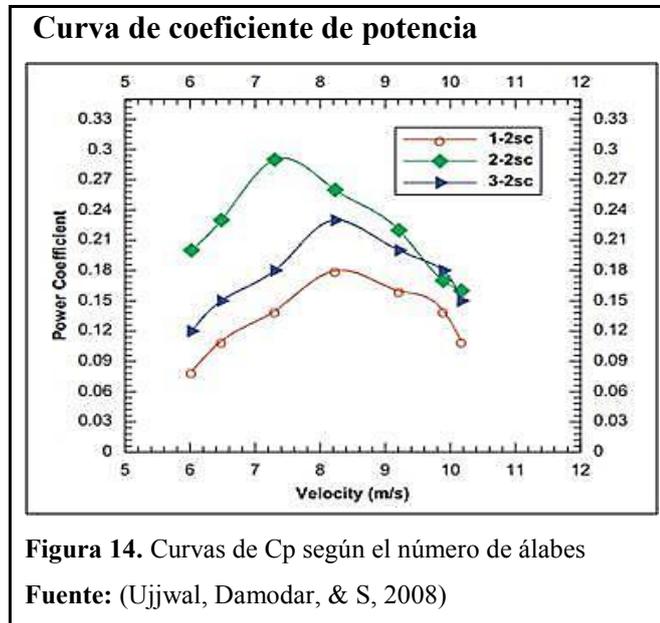
El valor de C_p no puede superar el límite de Betz, y se obtiene en las curvas presentadas en la figura 13, para diseñar un rotor Savonius, se tiene aproximadamente un “ $C_p = 0.20$ ” y un valor para el Tip Speed Ratio “ $TSR = 0.8$ ”.



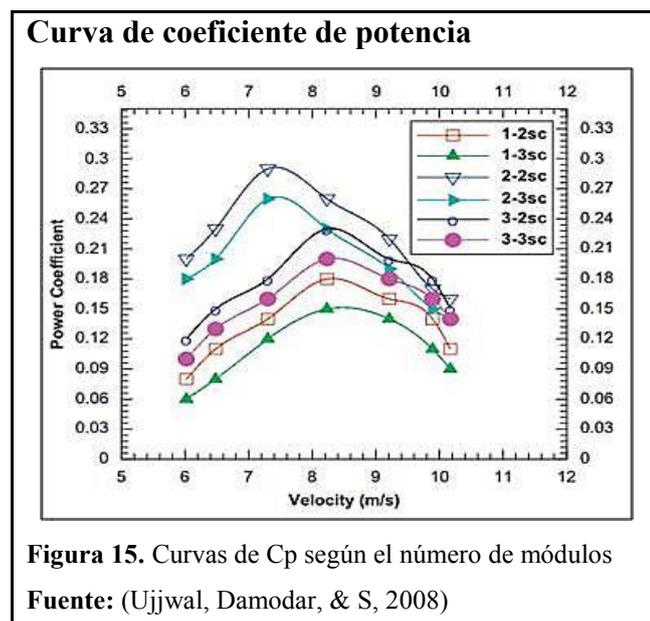
Teóricamente no se han desarrollado muchas ecuaciones que relacionen el coeficiente de potencia con las características del rotor Savonius. Experimentalmente se han construido curvas que relacionan el coeficiente de potencia con la velocidad de punta de álabes, se ha encontrado que el máximo coeficiente de potencia para un rotor alcanza el valor de $C_p=0.33$ (Team, 2012).

2.3.2 Números de álabes y módulos

Las características de los rotores Savonius han sido estudiadas por diferentes autores, por lo que se conoce que a mayor número de álabes, el C_{pmax} tiende a bajar.



Según estudios hallaron que el coeficiente de potencia máximo para un rotor de 2 aspas es de 30 a 50 % mayor que el de 3 aspas, como se observa en la figura 14, con el fin de obtener un C_p mayor se elige la opción con dos álabes; sin embargo esta opción presenta un par más variable, por lo que recomienda minimizar esta desventaja colocando dos rotores cada uno de ellos con dos álabes desfasados 90° entre sí, como se observa la figura 15 (Ujjwal, Damodar, & S, 2008).



El prototipo de generador eólico que se va a diseñar tiene dos módulos cada uno compuesto por dos alabes, la configuración se observa en la figura 16.

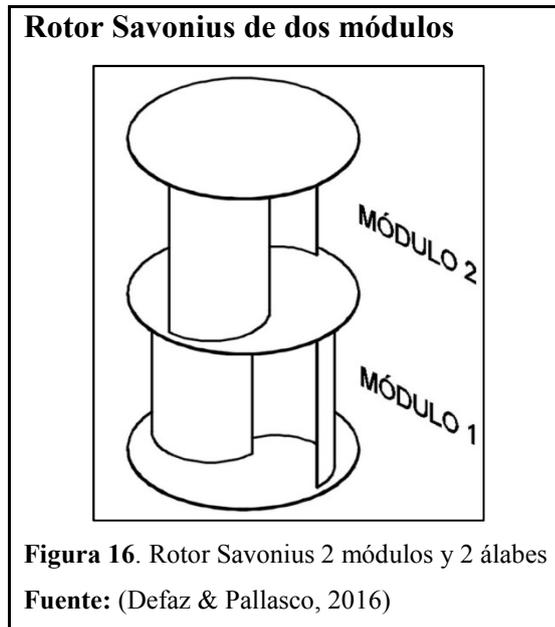


Figura 16. Rotor Savonius 2 módulos y 2 álabes
Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

2.3.3 Parámetros de diseño

Los parámetros en términos de comportamiento sustentan las principales características geométricas y aerodinámicas del rotor. Esta es seleccionada de acuerdo a la bibliografía e investigaciones desarrolladas para este tipo de aerogenerador.

2.3.3.1 Potencia nominal del viento

La potencia nominal es la potencia máxima que va a entregar el aerogenerador eólico, considerando las diferentes pérdidas de energía presentes en el sistema, pérdidas del rotor, generador y transmisión, esta viene dada por la ecuación 4 (Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009).

$$P_n = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_n)^3 \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde:

P_n = Potencia nominal, [W]

A = Área barrida por el rotor, de la ecuación 2, [m²]

v_n = Velocidad nominal del viento, [m/s]

Para hallar la potencia máxima extraída por el generador eólico se debe tener en cuenta el coeficiente de potencia que tenga cada componente del aerogenerador y se calcula mediante la ecuación 5 (Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009).

$$P_{\text{máx}} = C_{\text{máx}} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_n)^3 \quad [\text{Ec. 5}]$$

2.3.3.2 Potencia total extraída

La cantidad de energía que puede transformar un generador eólico en electricidad, depende de la velocidad del viento existente en el lugar a realizar las pruebas. Por lo tanto la potencia total extraída viene dada por la ecuación 6 (Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009).

$$P_e = \eta_m \cdot \eta_e \cdot C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde:

η_e = Eficiencia eléctrica [adimensional]

η_m = Eficiencia mecánica [adimensional]

2.3.3.3 Cálculo de la potencia total extraída

Para este proyecto de investigación, como parámetro inicial se considera la potencia eólica total que debe extraer el aerogenerador, en este caso es la potencia necesaria para alimentar una batería de 12 V, las características de la batería se puede observar en el anexo 6.

La capacidad de la batería elegida es de 4 Amperios por cada 20 horas, la corriente calculada es igual a 0,20 Amperios, la potencia que el aerogenerador debe entregar se calcula mediante la ecuación 7.

$$P = V \cdot I \quad [\text{Ec. 7}]$$

Donde:

P = Potencia, [W]

V = Voltaje nominal, [V]

I = Corriente, [A]

Según datos obtenidos del anexo 6. Donde V = 12 V, I = 0.20 A, se tiene.

$$P = 12V \cdot 0.20A$$

$$P = 2.4 \text{ W}$$

La potencia total extraída por el prototipo debe ser 2,4 W, a una velocidad de viento de 4 m/s, análisis que se realiza a detalle más adelante.

2.3.4 Cálculo de la forma de los álabes

El aerogenerador Savonius es de arrastre y el funcionamiento de este se basa en las distintas fuerzas aerodinámicas que ejerce un flujo de aire sobre sólidos de diferentes formas, como se observa en la figura 17, esta fuerza se calcula mediante la ecuación 8.

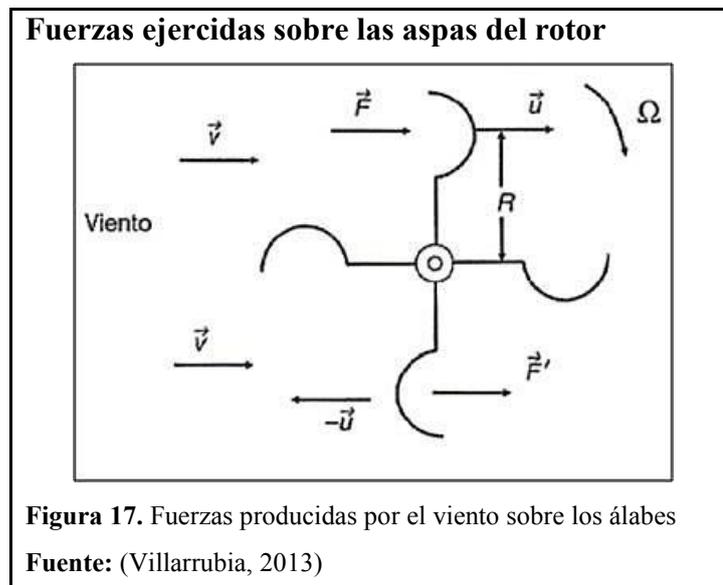
$$F = C \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot \omega^2 \quad [\text{Ec. 8}]$$

Donde:

C = Coeficiente aerodinámico [adimensional]

ω = Velocidad angular, [rad/s]

Las aspas tienen la forma de tipo “S”, la acción del viento origina fuerzas distintas en la parte cóncava y convexa de los álabes, lo que provoca que se origine un par que ocasionará el giro del rotor.



Para un rotor Savonius de dos álabes, el coeficiente de arrastre para la parte cóncava es de 0.12 y para la parte convexa de 0.25, estos valores se dan por la interferencia de los álabes, ya que el rotor, por acción de viento siempre se encuentra sometido a

un par aerodinámico, debido a las desviaciones que experimenta el viento por efecto de la forma de los álabes (Fernández, 2008).

Estos se denominan vectores de velocidad, las cuales se aprecia en la simulación de flujo de aire que se realiza en el capítulo 3.

2.4 Dimensionamiento del rotor

El dimensionamiento del rotor se realiza en base a la velocidad nominal y la potencia total que debe entregar el aerogenerador, considerando los parámetros de entrada se inicia la formulación mediante la ecuación 4 mencionado anteriormente.

Aplicando la Ley de Betz, donde dice que es imposible que una máquina extraiga toda la potencia del viento, se tiene la ecuación 9. (Paraschivoiu, 2002)

$$P_{\text{aerogenerador}} = C_p \cdot P_v \quad [\text{Ec. 9}]$$

Donde:

P_v = Potencia del viento, [kW]

Remplazando la ecuación 4 en la ecuación 9 se tiene la ecuación 10.

$$P_{\text{aerogenerador}} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \quad [\text{Ec. 10}]$$

La potencia final depende del rendimiento eléctrico y mecánico que se calcula más adelante, por lo que la expresión de la potencia eléctrica está dada según la ecuación 11.

$$P_{\text{eléctrica}} = \eta_m \cdot \eta_e \cdot P_{\text{aerogenerador}} \quad [\text{Ec. 11}]$$

Donde:

$P_{\text{eléctrica}}$ = Potencia eléctrica, [W]

Remplazando la ecuación 10 en la ecuación 11 se tiene la ecuación 12.

$$P_{\text{eléctrica}} = \eta_m \cdot \eta_e \cdot C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \quad [\text{Ec. 12}]$$

Despejando A de la ecuación 12, se tiene el área necesaria para producir la potencia planteada y está dada por la ecuación 13.

$$A = \frac{2 \cdot P_{\text{eléctrica}}}{\eta_m \cdot \eta_e \cdot C_p \cdot \rho \cdot v^3} \quad [\text{Ec. 13}]$$

2.4.1 Cálculo de las dimensiones del rotor

Para determinar las dimensiones del rotor se debe considerar los rendimientos eléctrico y mecánico, así como el coeficiente de potencia del aerogenerador.

La eficiencia mecánica está dada por la ecuación 14.

$$\eta_m = \eta_{rod} \cdot \eta_t \quad [\text{Ec. 14}]$$

Donde:

η_{rod} = Eficiencia mecánica de los rodamientos, [adimensional]

η_t = Eficiencia de transmisión del generador, [adimensional]

Usando la ecuación 14 y tomando en cuenta lo siguiente: $\eta_{rod}=0.99$ y $\eta_t=0.95$, se calcula la eficiencia mecánica (Ocampo Gil, 1993).

$$\eta_m = 0.94 \cdot 0.95 = 0.94$$

La eficiencia eléctrica está dada por la ecuación 15.

$$\eta_e = \eta_{gen} \cdot \eta_{con} \quad [\text{Ec. 15}]$$

Donde:

η_{gen} = Eficiencia eléctrica del generador, [adimensional]

η_{con} = Eficiencia del controlador, [adimensional]

Aplicando la ecuación 15 y considerando lo siguiente $\eta_{gen}=0.85$ y $\eta_{con}=0.85$, se calcula la eficiencia eléctrica (Barreira Pazos, 2009).

$$\eta_e = 0.85 \cdot 0.85 = 0.72$$

Teniendo en cuenta los datos calculados anteriormente y mediante la ecuación 13, se calcula el área necesaria para producir la potencia que debe generar el sistema eólico.

$$A = \frac{2 \cdot 2.4 \text{ W}}{0.94 \cdot 0.723 \cdot 0.20 \cdot 0.886 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(4 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3}$$
$$A = 0.622 \text{ m}^2$$

2.5 Área de barrido

El área de barrido del rotor está determinada por el tamaño de rotor eólico, longitud del álabe y el diámetro total del rotor. El área de barrido para un rotor de eje vertical es rectangular y para el cálculo se utilizan la ecuación 16 (Lysen, Bos, & Cordes, 1978).

$$A = d \cdot H \quad [\text{Ec. 16}]$$

Donde:

A= Área de barrido, [m²]

d= Diámetro del rotor, [m]

H= Altura del álabe, [m]

Entre mayor sea el área, mayor será la energía producida, para el caso de los rotores Savonius, el área calculada en el numeral 2.4.1 es el área de barrido por el rotor.

2.5.1 Cálculo de los parámetros geométricos del rotor

La relación entre el diámetro y la altura es $H = 2d$, por lo tanto reemplazando en la ecuación 17 y despejando d se tiene.

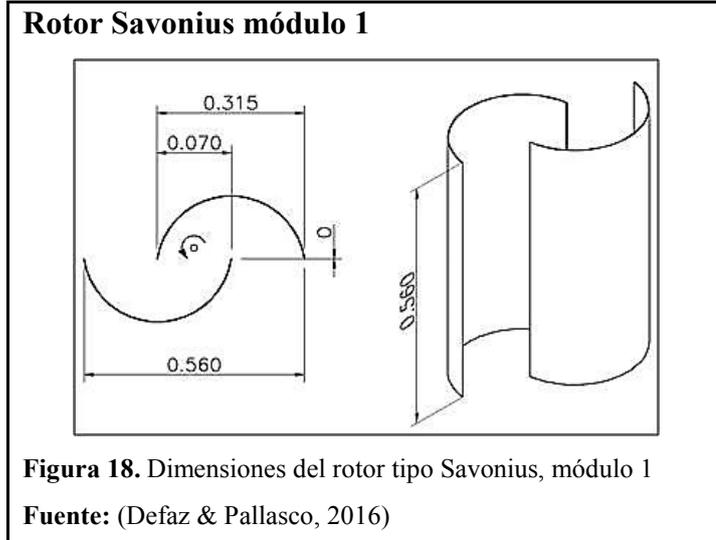
$$d = \sqrt{\frac{A}{2}} \quad [\text{Ec. 17}]$$

$$d = \sqrt{\frac{0.622}{2}} = 0.560 \text{ m}$$

Considerando que el diámetro del rotor es igual a 0.560 m, se determina las demás condiciones de los parámetros geométricos descritas en el numeral 2.2.1.

- H total = 1.120 m, $H_{\text{modulo 1 y 2}} = 0.560 \text{ m}$
- s = 0.070 m
- a = 0.315 m
- Distancia entre álabes e debe ser igual a 0

En la figura 28 se muestran las dimensiones del prototipo de rotor Savonius para el proyecto de investigación.



Se debe tener en cuenta que para el análisis del prototipo se considera un generador de dos etapas, cada uno tienen las mismas dimensiones, teóricamente el rotor genera 2.4 W de potencia, como se describe anteriormente.

2.6 Velocidad de punta de ábabe “TSR”

Sus siglas significan “Tip Speed Ratio”, relaciona la velocidad tangencial del ábabe y la del viento. Es conocida como velocidad específica, y se calcula con la ecuación 18 (Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009)

$$TRS = \frac{\omega \cdot r}{v} \quad [\text{Ec. 18}]$$

Donde:

TSR= Relación de velocidad en la punta, [adimensional]

r= Radio del rotor, [m]

Como se describe en el numeral 2.3.1, mediante la figura 13 y considerando un $C_p = 0.2$, se obtiene un valor aproximado para el $TRS = 0.8$.

2.6.1 Cálculo de la velocidad angular

Mediante la ecuación 18 y despejando ω se tiene.

$$\omega = \frac{TRS \cdot v}{r}$$

$$\omega = \frac{0.8 \cdot 4 \text{ m/s}}{0.279 \text{ m}}$$

$$\omega = 11.47 \text{ rad/s}$$

Para calcular el número de revoluciones del rotor se realiza con la ecuación 19 (Carta, Calero, Colmenar, & Castro, 2009).

$$n = \frac{60 \cdot \omega}{2 \cdot \pi} \quad [\text{Ec. 19}]$$

Donde:

n= Número de revoluciones.

$$n = \frac{60 \cdot 11.47 \text{ rad/s}}{2 \cdot \pi}$$

$$n = 109.55 \text{ rev/min}$$

2.7 Torque

Como consecuencia de la rotación del rotor por acción del viento y la transformación de energía mecánica en eléctrica, se tiene el torque en el eje del rotor, y se calcula mediante la ecuación 20.

$$T = \frac{P}{\omega} \quad [\text{Ec. 20}]$$

Donde:

T= Torque, [N·m]

2.7.1 Cálculo del torque

Considerando que la potencia eléctrica es 2.4 W y la velocidad angular es 11.47 rad/s y mediante la ecuación 20 se tiene.

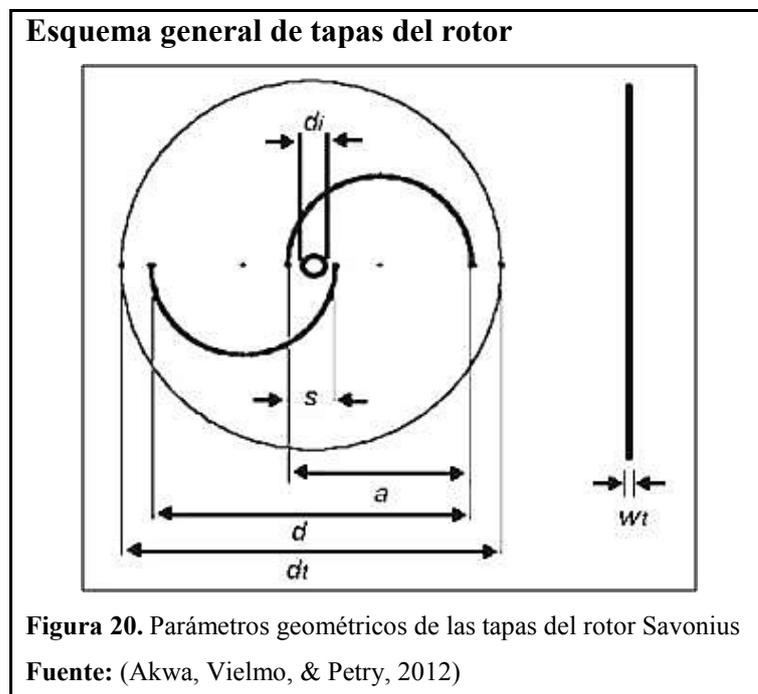
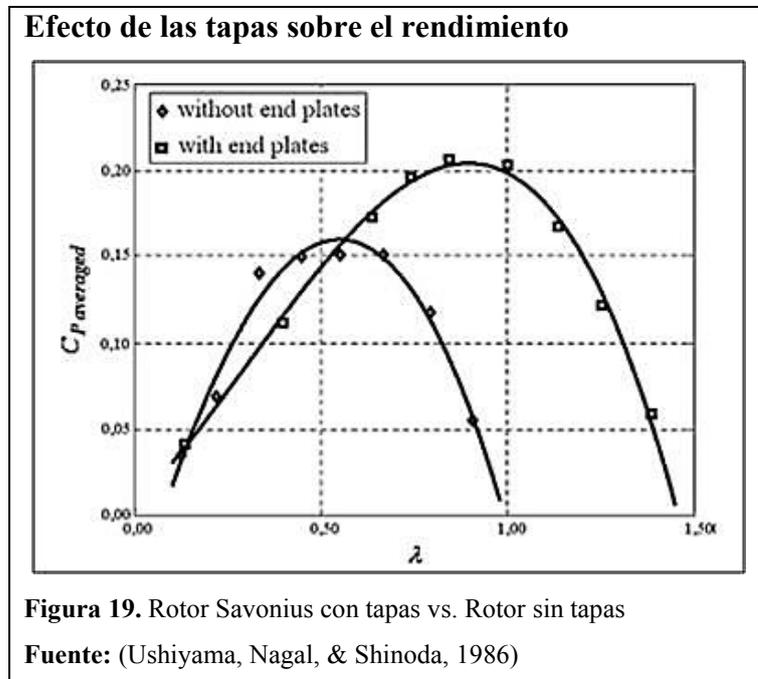
$$T = \frac{2.4 \text{ W}}{11.47 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}$$

$$T = 0.22 \text{ Nm}$$

2.8 Diseño de tapas

Como se observa en la figura 19, las tapas del rotor aumentan el valor promedio del coeficiente de potencia, ayuda a operar el aerogenerador con mayor eficiencia en términos de TSR. Las tapas en los extremos evitan que escape el aire desde el lado cóncavo de los álabes hacia el exterior, manteniendo la presión entre los lados convexo y cóncavo (Akwa, Vielmo, & Petry, 2012).

Para diseñar las tapas se debe tener en cuenta los parámetros geométricos mostrados en la figura 20. Si se considera un diámetro muy grande para las tapas se provoca el aumento de la inercia del rotor. Se recomienda un grosor insignificante, con respecto a la altura del aerogenerador. (Akwa, Vielmo, & Petry, 2012)



Donde:

d_t = Diámetro de la tapa, [m]

W_t = Espesor de la tapa, [m]

2.8.1 Cálculo de las dimensiones de las tapas

Las tapas están definidas por un diámetro exterior, diámetro interior y un espesor (Akwa, Vielmo, & Petry, 2012).

Se ha determinado la relación del diámetro d_t con respecto al diámetro "d" del rotor como se muestra en la ecuación 21. Con un d_t aproximadamente 10 % mayor que el diámetro d se obtiene un valor mayor del coeficiente de potencia (Menet, 2004).

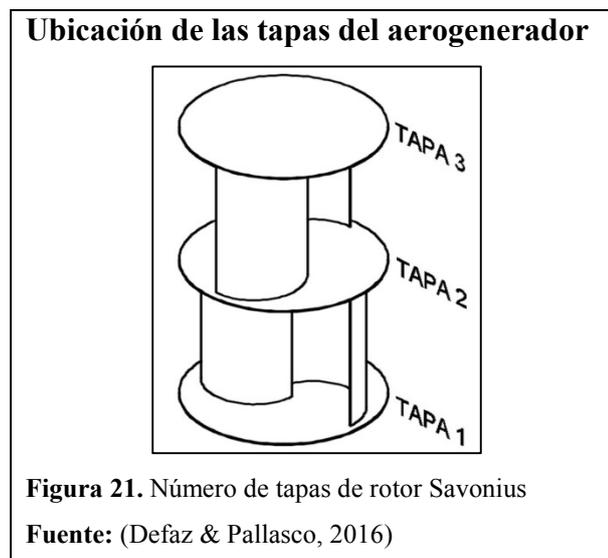
$$d_t = (1.1) \cdot d \quad [\text{Ec. 21}]$$

Mediante la ecuación 21 se calcula el diámetro de las tapas.

$$d_t = 1.1 \cdot 0.560 \text{ m}$$

$$d_t = 0.615 \text{ m}$$

El rotor eólico del proyecto de investigación tendrá 3 tapas con un diámetro de 0.615 m, como se muestra en la figura 21, mismas que sirven de elementos de unión entre los álabes y el eje del rotor y poseen las mismas dimensiones.



Considerando que las tapas son los elementos de unión entre el eje y los álabes, se realiza una simulación de esfuerzos para analizar el espesor recomendado con respecto a la altura del aerogenerador, como se observa en el anexo 13.

2.9 Selección del material para los álabes y tapas del rotor

Uno de los aspectos importantes para el diseño del rotor es la correcta selección del material, considerando como factor importante el peso que afecta al desempeño del aerogenerador así como su vida útil.

Debido a la existencia de una gran variedad de materiales que se pueden utilizar para el diseño del aerogenerador, es necesario seleccionar el material con las mejores características y lo más liviano posible, para ver las características principales de diferentes láminas ver el anexo 7.

Mediante la comparación de diferentes materiales, donde se analiza el peso y comportamiento mecánico durante su vida útil, y considerando que el rotor debe ser liviano, la mejor opción a utilizar es la lámina de acrílico “PMMA” de espesor 4 mm para los álabes y tapas, en el anexo 8, se muestra las características del acrílico a utilizar.

Considerando el material seleccionado, sus propiedades y las dimensiones, en la tabla 3, se calcula la masa total de los álabes y tapas.

Tabla 3.
Cálculo de peso del rotor y tapas

Datos de rotor	
Diámetro	0.560 m
Espesor	0.004 m
Número de aspas	4
Altura	0.558 m
Densidad	$1.19 \times 10^6 \text{ kg/m}^3$
Masa de álabes	9.31 kg
Datos de tapas	
Diámetro	0.614 m
Espesor	0.004 m
Número de tapas	3
Densidad	$1.19 \times 10^6 \text{ kg/m}^3$
Masa de tapas	4.22 kg
Masa total de álabes y tapas	13.53 kg

Nota: Cálculo del peso del rotor usando acrílico PMMA como material de construcción

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

2.10 Fuerzas que actúan sobre los álabes

Es necesario estudiar las dimensiones de los álabes del generador eólico y conocer todas las fuerzas que actúan sobre ellas, con el propósito de prevenir las deformaciones plásticas que se puedan presentar. Estas fuerzas se calculan teniendo en cuenta las condiciones críticas, es decir aplicando velocidades de vientos más altas. Las fuerzas que actúan sobre los álabes son:

- Presión del viento. El viento ejerce una fuerza sobre el álabe esta presión viene dada por la ecuación 22.

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad [\text{Ec. 22}]$$

- Fuerza centrífuga. Esta fuerza se debe a la rotación del rotor, misma que hace que los álabes se tiendan a separar del eje y se incrementa mientras aumenta el radio del rotor, esta se calcula con la ecuación 23.

$$F_c = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot d}{2} \quad [\text{Ec. 23}]$$

Donde:

F_c = Fuerza producida en las aspas, [N]

m = Masa del cuerpo, [Kg]

- Fuerza de arrastre. Se presenta en objetos que se mueven a través de un fluido. Actúa en la dirección del movimiento relativo al fluido y se calcula con la ecuación 24.

$$F_D = C_p \frac{v^2 \cdot \rho \cdot A}{2} \quad [\text{Ec. 24}]$$

Donde:

F_D = Fuerza de arrastre, [N]

2.10.1 Cálculo de las fuerzas que actúan sobre los álabes

El cálculo de las fuerzas se realiza para las condiciones más críticas, en este caso se analiza para una velocidad de viento máxima registrada en el mes de septiembre en la ciudad de Quito de “14 m/s”, como se observa en el anexo 3, reemplazando los datos y mediante la ecuación 22 se tiene la presión del viento sobre el álabe.

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot 0.886 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(14 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$P_v = 86.80 \text{ Pa}$$

Mediante la ecuación 18 se tiene una velocidad angular para la velocidad máxima de 14 m/s.

$$\omega = \frac{0.8 \cdot 14 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.279 \text{ m}} = 40.15 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Remplazando los datos y mediante la ecuación 23 se tiene la fuerza centrífuga producida en las palas del rotor.

$$F_c = \frac{13.53 \text{ kg} \cdot \left(40.15 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^2 \cdot 0.558 \text{ m}}{2}$$

$$F_c = 6084.67 \text{ N}$$

Remplazando los datos y mediante la ecuación 24 se tiene la fuerza de arrastre en las palas del rotor.

$$F_D = 0.2 \cdot \frac{(14 \text{ m/s})^2 \cdot 0.886 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.620 \text{ m}^2}{2}$$

$$F_D = 10.80 \text{ N}$$

Estos valores son necesarios para dimensionar las tapas y álabes del rotor, el análisis de esfuerzos para el rotor se puede observar en el capítulo 3 o el anexo 13.

2.11 Diseño del eje del rotor

El eje es un componente primordial, ya que, el mismo soporta las cargas transmitidas por los álabes, este se encuentra sometido a flexión y torsión con cargas estáticas como consecuencia de la acción del viento. Debido a las cargas aerodinámicas transmitidas desde el rotor al eje es conveniente que estén soportadas en dos puntos y el eje se encuentre apoyado en la estructura de soporte.

Para el diseño se considera como una viga que se encuentra apoyada en dos puntos, la fuerza del viento se considera como una carga distribuida a lo largo de la longitud del rotor, para el cálculo del eje se debe considerar la velocidad máxima de viento de 14 m/s, para la condición más crítica de funcionamiento.

2.11.1 Selección del material para el eje

Para la selección del material se ha tomado en consideración un material comúnmente utilizado para ejes, de buenas características de resistencia a la fatiga y rigidez, por lo tanto el material seleccionado para la fabricación del eje es acero AISI-SAE 4340 laminado en frío, las características se observa en la tabla 4, y en el anexo 17 (Vanegas, 2016).

Tabla 4.

Propiedades del acero AISI-SAE 4340

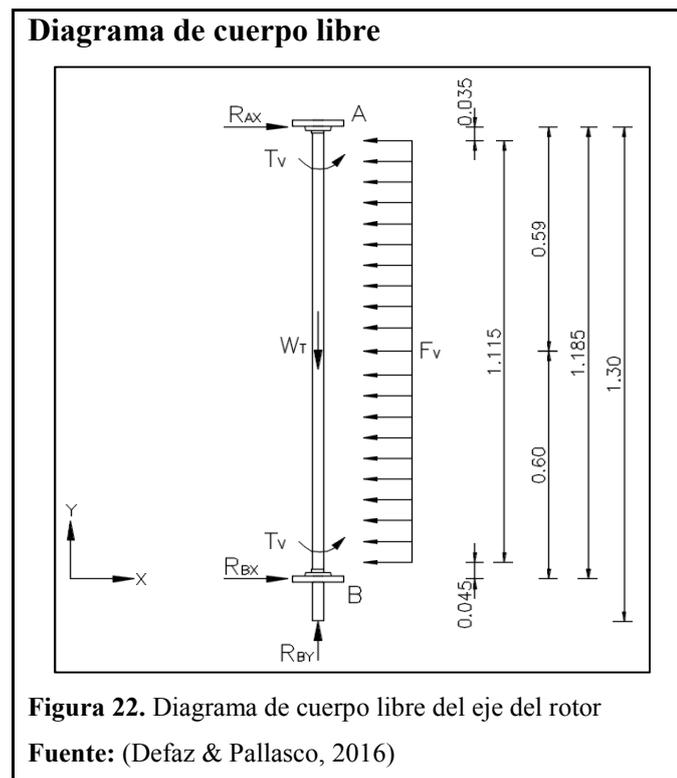
Descripción	Propiedades
Densidad	7850 kg/m ³
Esfuerzo último a tracción (Su)	745 MPa
Esfuerzo de fluencia (Sy)	470 MPa
Módulo de elasticidad	205 GPa
Reducción de área	36 %

Nota: Especificaciones del acero para el eje del rotor.

Fuente: (Bohler, 2015)

2.11.2 Fuerzas que actúan sobre el eje

Para el análisis y cálculo del eje se realiza el diagrama de cuerpo libre, como se observa la figura 22, con el propósito de conocer los puntos de apoyo, pares de torsión, fuerzas axiales y momentos flectores que actúan sobre el eje.



Como consecuencia de la acción del viento al rotor, se tiene la fuerza del viento y esta será considerada como una carga distribuida a lo largo del eje del rotor, esto debido a que la presión de viento sobre una superficie determinada cambia a partir de los 10 metros de altura (NEC, 2014)

Por lo tanto, la fuerza de viento se calcula mediante la ecuación 25.

$$F_v = P_v \cdot A \quad [\text{Ec. 25}]$$

Mediante la presión del viento y el área de barrido calculado anteriormente se obtiene la fuerza de viento en el rotor.

$$F_v = 86.80 \text{ Pa} \cdot 0.622 \text{ m}^2$$

$$F_v = 54 \text{ N}$$

Por medio de la sumatoria de fuerzas:

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

$$R_{BY} = W_T$$

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]

Realizando sumatoria de momentos en el punto A, e igualando a cero:

$$\sum M_B = 0$$

$$L \cdot R_{BX} - \frac{L}{2} \cdot F_v = 0$$

$$R_{BX} = 27 \text{ N}$$

$$R_{AX} = F_v - R_{BX}$$

$$R_{AX} = 27 \text{ N}$$

Donde:

L = Longitud del eje \overline{AB} , [m]

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

Mediante la ecuación 26, se calcula el momento flector en el punto B.

$$M_B = F_v \cdot \frac{L}{2} \quad [\text{Ec. 26}]$$

$$M_B = 54 \text{ N} \cdot 0,6 \text{ m}$$

$$M_B = 32 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Donde:

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

Para obtener la potencia máxima en las condiciones críticas se utiliza la ecuación 12.

$$P_{\max} = 0.94 \cdot 0.723 \cdot 0.2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0.622 \text{ m}^2 \cdot 0.886 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(14 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3$$
$$P_{\max} = 102.90 \text{ W}$$

Empleando la ecuación 27, se calcula el par torsional del eje producido por el viento.

$$T_v = \frac{P_{\max}}{\omega} \quad [\text{Ec. 27}]$$
$$T_v = \frac{102.90 \text{ W}}{40.15 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}$$
$$T_v = 2.56 \text{ N} \cdot \text{m}$$

2.11.3 Cálculo del diámetro previo

Para el presente proyecto se propone que el eje del aerogenerador sea compacto, sin discontinuidades y los apoyos se ubiquen en los extremos.

Para obtener un diámetro previo se realiza el cálculo en base al par torsional máximo, adicional se considerará el esfuerzo cortante de la ecuación 28, esta debe ser menor al esfuerzo admisible S_{sd} el cual es igual a la resistencia del material seleccionado (Vanegas, 2016).

$$d_e \geq \left(\frac{16T_N}{\pi \cdot S_{sd}} \right)^{1/3} \quad [\text{Ec. 28}]$$

Remplazando valores en la ecuación 25 se tiene.

$$d_e \geq \left(\frac{16 \cdot 2.56 \text{ N} \cdot \text{m}}{\pi \cdot 22.5 \text{ MPa}} \right)^{1/3}$$
$$d_e \geq 0.0083 \text{ m}$$

Mediante el cálculo se tiene un diámetro de 8 mm, este diámetro es el mínimo que debe tener el eje del rotor, teniendo en cuenta que estudios similares utilizan diámetros superiores a 15 mm, se escoge un diámetro normalizado de 16 mm.

2.11.4 Análisis estático

Con el propósito de comprobar que el eje no fallara después de recibir las cargas de viento, se realiza un análisis estático sometiendo a las cargas máximas, y se calcula mediante la ecuación 29.

$$d_e = \left[\frac{16 \cdot N}{\pi \cdot S_y} (4M^2 + 3T^2)^{1/2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad [\text{Ec. 29}]$$

Remplazando valores en la ecuación 29 y considerando un factor de seguridad de 2 se tiene.

$$d_e = \left[\frac{16 \cdot 2}{\pi \cdot 470 \text{ MPa}} (4 \cdot (32 \text{ Nm})^2 + 3 \cdot (2.56 \text{ Nm})^2)^{1/2} \right]^{\frac{1}{3}}$$
$$d_e = 0.007 \text{ m}$$

El diámetro calculado de 7 mm es el mínimo para un análisis estático, dado que es menor al diámetro previo obtenido se comprueba que el eje soportara las cargas máximas producidas por el viento.

2.11.5 Análisis a fatiga

Durante la vida útil del eje, este debe estar en la capacidad de soportar las cargas normales de trabajo y las cargas eventuales máximas, durante el arranque el eje será sometido a cargas dinámicas.

Para el cálculo del diámetro del eje se realiza mediante el método propuesto por la ASME “American Society of Mechanical Engineers”, donde el análisis del eje se realiza considerando lo siguiente:

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

Esta ecuación está basada en datos experimentales, por lo que es un método de cálculo adecuado y se determina mediante la ecuación 30 (ASME.106.1M, 1985).

$$d_e = \left\{ \frac{32 \cdot N}{\pi} \left[\left(K_f \frac{M}{S_n} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad [\text{Ec. 30}]$$

Donde:

d_e = Diámetro del eje, [m]

N= Factor de seguridad, [Adimensional]

S_n = Resistencia a la fatiga, [MPa]

M= Momento flector [N·m]

T= Par torsional, [N·m]

S_y = Resistencia a la fluencia, [MPa]

K= Factor concentrador de esfuerzos, [Adimensional]

2.11.5.1 Cálculos del límite de fatiga corregido " S_n "

Se realiza el cálculo de los coeficientes modificados para la sección del eje, con el cual se obtiene el límite de fatiga corregido " S_n ", y se calcula mediante ecuación 31 (Budynas & Nisbett, 2008).

$$S_n = K S_e \quad [\text{Ec. 31}]$$

Donde:

S_n : Fatiga corregida, [MPa]

K: Coeficiente que modifican la resistencia a la fatiga, [Adimensional]

S_e : Límite de fatiga, [MPa]

Para el cálculo de los coeficientes K se realiza mediante la ecuación 32.

$$K = K_a + K_b + K_c + K_d + K_e + K_{car} \quad [\text{Ec. 32}]$$

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 concentrador de esfuerzos, [Adimensional]
- K_f : Factor de efectos diversos, [Adimensional]

Selección del coeficiente K

K_a : Factor de superficie

Para el factor de la superficie se utiliza el maquinado en frío, como se observa en la tabla 5.

Tabla 5.
Factor de la superficie del eje

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

Nota: Factor de la superficie para el acero

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

$$K_a = a \cdot S_{ut}^b$$

$$K_a = 4.51 \cdot 745^{-0.265} = 0.781$$

K_b : Factor de tamaño

El factor de tamaño se obtiene usando la condición para diámetros que se encuentren entre 2.79 y 51 mm, como se observa en la tabla 6.

Tabla 6.
Factor de tamaño de la pieza sometida a flexión o torsión

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

Nota: Factor de tamaño

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

$$K_b = 1.24 \cdot d^{-0.107}$$

$$K_b = 1.24 \cdot (16)^{-0.107} = 0.921$$

K_c: Factor de confiabilidad

Para el factor de confiabilidad se selecciona el 99% por lo tanto se tiene $k_c = 0,814$

K_d: Factor de temperatura

La temperatura es de $20^\circ\text{C} < 50^\circ\text{C}$. Se selecciona $K_d = 1$

K_e: Factor de efectos varios

Se considera que no existe corrosión y esfuerzo 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, $K_{car} = 1$

Remplazando valores en la ecuación 32 se tiene.

$$K = 0.781 \cdot 0.921 \cdot 0.814 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$K = 0.590$$

Mediante la ecuación 33 se calcula el esfuerzo último del material para este caso es $S_u 745 \text{ MPa} < 1380 \text{ MPa}$ (200 Ksi) (Budynas & Nisbett, 2008).

$$S'_e = 0.5 \cdot S_u \quad [\text{Ec. 33}]$$

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

$$S'_e = 372.5 \text{ MPa}$$

Remplazando valores en la ecuación 31, se tiene.

$$S_n = 0.590 \cdot 372.5 \text{ MPa} = 219.78 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, reemplazando valores en la ecuación 25, se tiene.

$$d_e = \left\{ \frac{32 \cdot 2}{\pi} \left[\left(\frac{32 \text{ N} \cdot \text{m}}{219.78 \text{ MPa}} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{2.56 \text{ N} \cdot \text{m}}{470 \text{ MPa}} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

$$d_e = 0.01443 \text{ m}$$

Se comprueba que el eje soporta las cargas a fatiga a las cuales será sometido, por lo tanto se verifica el diámetro seleccionado de 16 mm.

2.11.6 Resistencia del eje a la deflexión máxima

La condición para que el eje soporte esta máxima deflexión se calcula mediante la ecuación 34 (Vanegas, 2016).

$$\frac{M_B}{W_x} \leq \frac{S_y}{N} \quad [\text{Ec. 34}]$$

Donde:

W_x : Momento de resistencia de la sección, [Pa]

$$W_x = \frac{\pi d_e^3}{32} \quad [\text{Ec. 35}]$$

$$W_x = \frac{\pi(0,016)^3}{32} = 4,021 \cdot 10^{-7} Pa$$

Remplazando valores en la ecuación 34 se tiene.

$$\frac{32 Nm}{4,021 \times 10^{-7} Nm^2} \leq \frac{470 \times 10^6 Pa}{1,5}$$
$$76172339 \leq 313333333$$

El resultado indica que el eje soportará la máxima deflexión a la cual estará sometido.

2.11.7 Calculo de número de ciclos del eje del rotor

En este numeral se calcula el número de ciclos que tendrá el eje antes de fallar por fatiga, durante un tiempo determinado, se entiende por ciclos bajos cuando van desde $N=1$ hasta casi 10^3 ciclos, para que un eje se considere de ciclos altos este debe ir desde 10^3 hasta 10^7 ciclos, para el cálculo de la vida del eje es necesario las siguientes ecuaciones (Budynas & Nisbett, 2008).

$$S_f = a \cdot N^b \quad [\text{Ec. 36}]$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{f \cdot S_{ut}}{S'_e} \right) \quad [\text{Ec. 37}]$$

$$a = \frac{(f \cdot S_{ut})^2}{S'_e} \quad [\text{Ec. 38}]$$

$$N = \left(\frac{\sigma_a}{a} \right)^{1/b} \quad [\text{Ec. 39}]$$

Mediante el esfuerzo ultimo del material seleccionado y la tabla 7, donde se utiliza la segunda condición.

Tabla 7.

Límite de resistencia a la fatiga

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1 400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1 400 \text{ MPa} \end{cases}$$

Nota: Límite de resistencia

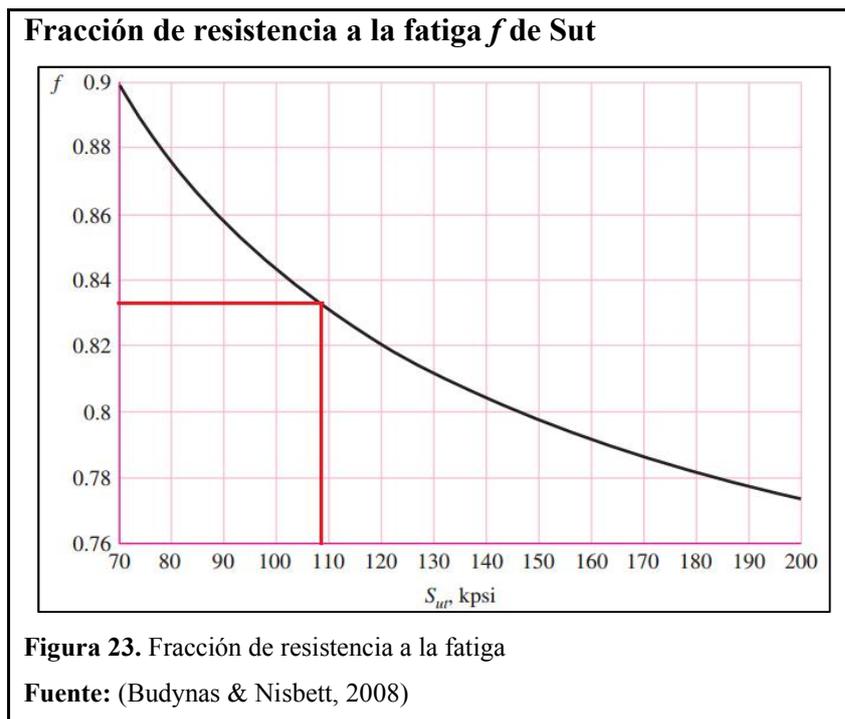
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

$$S'_e = 0.5 \cdot S_{ut}$$

$$S'_e = 0.5 \cdot 745 \text{ MPa}$$

$$S'_e = 372.5 \text{ MPa}$$

Mediante la ecuación 38 y la figura 23 donde $f=0.835$, Se calcula "a".



$$a = \frac{(0.835 \cdot 745 \text{ MPa})^2}{372.5 \text{ MPa}} = 1038.8 \text{ MPa}$$

Mediante la ecuación 37, se calcula "b".

$$b = -\frac{1}{3} \log \cdot \left(\frac{0.835 \cdot 745 \text{ MPa}}{372.5 \text{ MPa}} \right) = -0.0742$$

Remplazando valores en la ecuación 39, se calcula "N"

$$N = \left(\frac{62.1 \text{ MPa}}{1038.8 \text{ MPa}} \right)^{\frac{1}{-0.0742}}$$

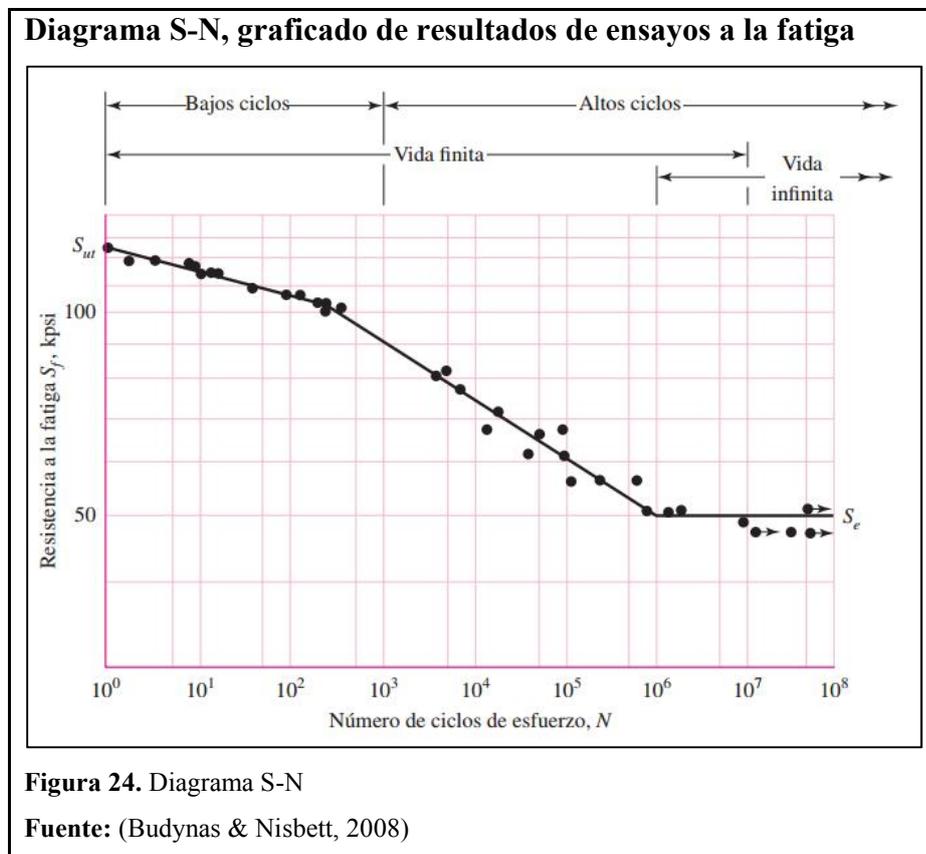
$$N = 3.08 \times 10^{16}$$

Remplazando valores en la ecuación 36 se tiene.

$$S_f = 1038.8 \text{ MPa} \cdot 3.08 \times 10^{16^{-0.0742}}$$

$$S_f = 62.1 \text{ MPa}$$

Mediante el S_f calculado y la figura 24, se obtiene que la vida del eje será infinita.



Con estos cálculos realizados se garantiza que el eje no fallara, por lo tanto se comprueba el diámetro seleccionado de 16 mm es el correcto.

La masa para el eje seleccionado se calcula mediante la ecuación 40 y los valores presentados en el numeral 2.11.1.

$$m_e = \frac{\rho \cdot (\pi \cdot r^2 \cdot h)}{1000000} \quad [\text{Ec. 40}]$$

$$m_e = \frac{7.87 \frac{g}{cm^3} \cdot (\pi \cdot (8 \text{ mm})^2 \cdot 1300 \text{ mm})}{1000000}$$

$$m_e = 2.05 \text{ kg}$$

$$W_T = (m_r + m_t + m_e) \cdot g \quad [\text{Ec. 41}]$$

Donde:

W_T = Peso total del eje, [N]

m_r = Masa del rotor, [kg]

m_t = Masa de las tapas, [kg]

m_e = Masa del eje, [kg]

g = Gravedad, [m/s²]

Mediante la ecuación 41 se calcula el peso total del rotor y eje.

$$W_T = (9.31 \text{ kg} + 4.22 \text{ kg} + 2.05 \text{ kg}) \cdot 9.8 \frac{m}{s^2}$$

$$W_T = R_{BY} = 152.7 \text{ N}$$

El análisis de esfuerzos para el eje considerando el material seleccionado se puede observar en el capítulo 3 o el anexo 14.

2.12 Diseño de la estructura para el aerogenerador

Uno de los elementos importantes del sistema eólico es la estructura que va soportar el rotor, proporcionando la firmeza que requiere, a continuación se detalla las dimensiones, perfiles y materiales de la estructura de soporte.

2.12.1 Esquema de la estructura de soporte

El pre-diseño de la estructura se realiza según las dimensiones del rotor, las cuales fueron calculadas en el numeral 2.5.1, esta consiste en un marco formado por un tubo estructural cuadrado, como se observa en la figura 25, facilitando la unión de los perfiles, adicional contiene una plancha corrugada que sirve como base para el generador eléctrico, batería y controlador de carga.

Esquema de la estructura para rotor Savonius

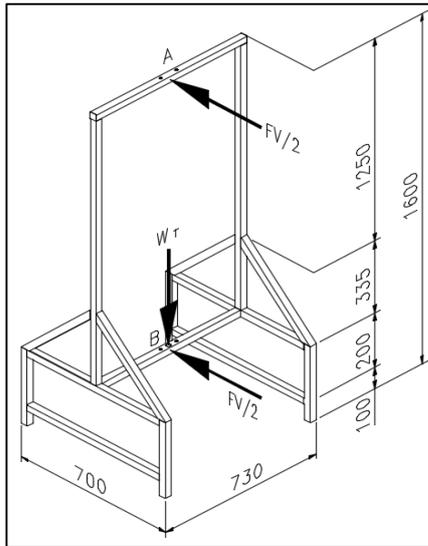


Figura 25. Esquema general y fuerzas de la estructura de soporte

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

2.12.2 Cálculo de momentos y fuerzas axiales máximas

Para obtener los valores de los momentos y fuerzas axiales máximas en la estructura de soporte, se utiliza un software de análisis estructural “SAP2000”. Las fuerzas ingresadas para el cálculo son las mostradas en la figura 25. Los diagramas de momentos y fuerzas axiales resultantes se observan en la figura 26.

Análisis de momentos y fuerzas axiales de la estructura de soporte

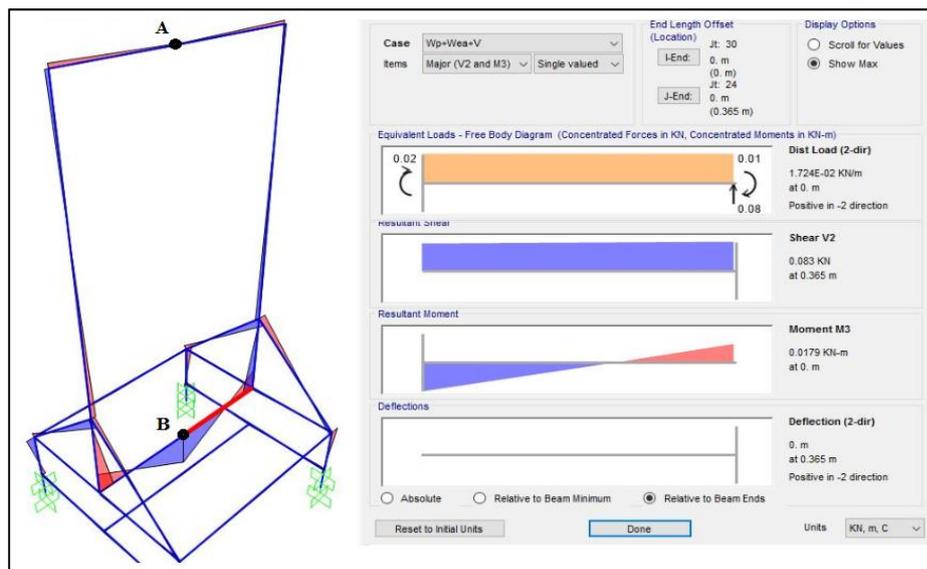


Figura 26. Cálculos de momentos y fuerzas axiales

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

El momento y las fuerzas axiales máximas se encuentran presentes en el perfil horizontal inferior "punto B" en el cual se apoya el eje y los alabes, según el análisis se obtiene los siguientes valores.

Momento máximo en el punto B = 17.9 N·m

Fuerza a tracción en el punto B = 14 N

2.12.3 Calculo de esfuerzo máximo en el perfil más solicitado

Para calcular el esfuerzo máximo se utiliza la ecuación 42, y se realiza una selección previa del perfil, para este caso se elige un perfil cuadrado de 30 x 30 x 2 mm, bajo la norma ASTM A-500, como se observa en anexo 9.

$$\sigma_{est} = \frac{M \cdot d}{I} + \frac{F}{A} < \sigma_{acero} \quad [\text{Ec. 42}]$$

Donde:

σ_{est} = Esfuerzo máximo de la estructura en el punto B, [MPa]

M = momento máximo en el punto B, [N·m]

d = Distancia desde el punto medio del perfil hasta la fibra más solicitada, [m]

I = Inercia del perfil pre-seleccionado, [m⁴]

F = Fuerza a tracción en el punto B, [N]

A = Área del perfil pre-seleccionado, [m²]

Remplazando valores en la ecuación 36 se tiene:

$$\sigma_{est} = \frac{(-17.9 \text{ Nm}) \cdot (-0.015 \text{ m})}{2.71 \times 10^{-8} \text{ m}^4} + \frac{14 \text{ N}}{2.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$\sigma_{est} = 9.97 \text{ MPa}$$

El esfuerzo permisible del acero A-36 es de 250 MPa, para obtener el esfuerzo reducido del acero al carbono se utiliza a ecuación 43.

$$\sigma_{reducido} = 0.6 \cdot \sigma_{permisible} > \sigma_{est} \quad [\text{Ec. 43}]$$

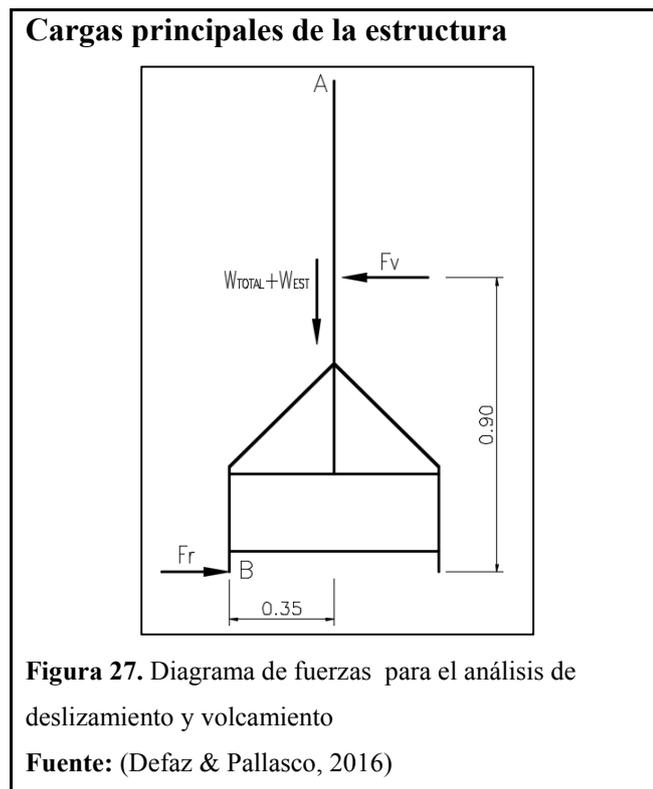
$$\sigma_{reducido} = 0.6 \cdot 250 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{reducido} = 150 \text{ MPa} > 9.97 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, el perfil seleccionado cumple con el esfuerzo máximo solicitado por la fuerza producida por el viento, se puede utilizar un perfil de menor dimensión, sin embargo es necesario realizar un análisis al deslizamiento y volcamiento; que se presenta a continuación.

2.12.4 Análisis por deslizamiento

Las fuerzas que afectan a la estructura para un posible deslizamiento se indican en la figura 27.



La fuerza que desestabiliza a la estructura es el empuje del viento $F_v = 54 \text{ N}$, y la fuerza que se opone a este empuje es la fuerza de rozamiento F_r , que se calcula mediante la ecuación 44 (Mott, 2009).

$$F_r = \mu \cdot N \quad [\text{Ec. 44}]$$

Donde:

μ = coeficiente de fricción, [adimensional]

N = Normal, [N]

El coeficiente de fricción para el hormigón y el acero varía de 0.57 a 0.70, en este caso el $\mu = 0.57$ (Rabbat, ASCE, & Russell, 2008).

Mediante la ecuación 38 se calcula la fuerza de fricción, donde la normal es igual al peso total del equipo.

$$F_r = 0.70 \cdot 346.90$$

$$F_r = 242.83 \text{ N}$$

Para garantizar que la estructura no deslice es necesario obtener el factor de seguridad al deslizamiento ≥ 1.5 y se obtiene mediante la ecuación 45 (INEN, 2001).

$$FS_{DEZ} = \frac{F_r}{F_v} > 1.5 \quad [\text{Ec. 45}]$$

Donde:

FS_{DEZ} = Factor de seguridad al deslizamiento, [adimensional]

Remplazando valores en la ecuación 45 se tiene:

$$F_s = \frac{242.83 \text{ N}}{54 \text{ N}} = 3.66$$

$$4.5 > 1.5$$

Por lo tanto, la estructura no desliza.

2.12.5 Análisis por volcamiento

Para asegurar que la estructura no vuelque por acción de la fuerza del viento se calcula el factor de seguridad de volcamiento, mediante la ecuación 46 (INEN, 2001)

$$FS_{VOL} = \frac{M_{est}}{M_{dest}} > 1 \quad [\text{Ec. 46}]$$

Donde:

FS_{VOL} = Factor de seguridad al volcamiento, [adimensional]

M_{est} = Momento estabilizador, [N·m]

M_{dest} = Momento desestabilizador, [N·m]

Mediante la figura 27, se calcula los momentos estabilizadores y desestabilizadores en el punto B, remplazando valores en la ecuación 46 se tiene.

$$FS_{VOL} = \frac{346.82N \cdot 0.35m}{54N \cdot 0.9m}$$

$$FS_{VOL} = 2.50 > 1$$

Por lo tanto, se comprueba que la estructura no vuelca por acción del viento y se ratifica la correcta selección del perfil, ya que un perfil de dimensiones menores podría no cumplir con los coeficientes de seguridad antes calculados.

Toda la estructura debe ser cubierta con pintura anticorrosiva para evitar las condiciones ambientales presentes en la ciudad de Quito, el análisis de esfuerzos sobre la estructura se puede observar en el capítulo 3 o el anexo 15.

2.13 Selección del sistema eléctrico

2.13.1 Selección del generador

Para la transformación de energía mecánica a eléctrica, es importante determinar el tipo de generador eléctrico, su función es convertir la energía mecánica producida por el rotor en energía eléctrica. El generador va unido al rotor eólico mediante un acople y soportado en la placa de la estructura, por lo que se busca un generador de elevada tensión con pocas revoluciones.

Los datos de entrada para la selección del generador son 109.55 rev/min, potencia nominal de 3 W y voltaje de salida de 12 V.

Considerando las características descritas anteriormente, se elige un generador eléctrico con un voltaje de salida de 12 V, como se muestra en la tabla 8 y la figura 28.

Tabla 8.

Características del generador eléctrico

Descripción	Características
Tipo	3 fases AC
Modelo	SAV-15W
Voltaje de salida	12 V AC
Potencia de carga máxima	15 W
Eficiencia	95 %
Revoluciones	0-400 rpm

Nota: Especificaciones del generador seleccionado

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

Esquema del generador eléctrico



Figura 28. Generador eléctrico 12 V/AC – 15 W

Fuente: (ELECROW, s.f.)

2.13.2 Selección del controlador de carga

La regulación y control es necesario en un sistema eólico, de este modo poder almacenar en las baterías. Su función es controlar en caso de sobrecarga, protegiendo las baterías y resto de la instalación.

Como parámetro inicial para elegir el tipo de controlador se tiene la tensión que entrega el generador eléctrico, en el caso de este proyecto de investigación el voltaje que entrega el generador eléctrico es de 12 V, mediante este valor se elige un controlador, que permite ajustar las condiciones de salida.

Con el propósito de conocer las variaciones de voltaje al cambiar la velocidad de viento, el día de las pruebas no se realiza la conexión del controlador de carga y la batería.

2.13.3 Selección de la batería

La gran ventaja de un sistema de almacenamiento es la capacidad de volver a cargar las baterías, garantizando la disponibilidad de energía eléctrica en ausencia de viento.

La batería para el proyecto es una de ciclo profundo, esto quiere decir, que entrega poca corriente por periodos de tiempo de varias horas descargando hasta el 90 %, que es lo recomendable antes de volver a cargarla. Debido a que sus celdas internas se encuentran cubiertas por un electrolito gelatinizado, este previene el cortocircuito y amplía su ciclo de vida, las características de la batería se observan en la tabla 9 y la figura 29.

Tabla 9.
Especificaciones de la batería

Descripción	Características
Voltaje nominal (V)	12
Capacidad nominal (A/h)	4 / 20
Ciclo de vida a 20 °C (años)	5
Rango de operación (°C)	15 a 50
Dimensiones (mm)	90 x 70 x 101mm

Nota: Especificaciones principales de la batería de 12 V

Fuente: (Ultracell, s.f.)



2.14 Selección de rodamientos.

Los rodamientos utilizados en el presente proyecto, son elementos que aseguran la unión entre la estructura de soporte y el eje mediante una chumacera. Para la selección se debe tener en cuenta los siguientes aspectos: espacio disponible para los rodamientos, tipo de cargas a soportar, diámetro del eje, tiempo de vida, número de ciclos, fuerzas axiales y radiales, adicional se considera las cargas que afectan los rodamientos y su dirección, en la tabla 10, se observa los tipos de cargas y sus valores respectivos, calculados anteriormente

Tabla 10.
Parámetros de selección de rodamientos.

Rodamiento	Tipo de carga	Carga Axial [N]	Carga Radial [N]	Diámetro Nominal del eje [mm]
A	Radial	-	27	15.87
B	Radial y axial	152.7		

Nota: Selección de rodamientos según las cargas del rotor

Fuente: (Defáz & Pallasco, 2016)

2.14.1 Selección de rodamientos para los apoyos A y B del eje

El rodamiento del apoyo A, se encuentra en la parte superior del rotor y soporta una carga radial, mientras que el rodamiento del apoyo B, se encuentra ubicado en la parte inferior del eje y soporta una carga radial y axial, como se observa en la figura 22 y tabla 10.

Para seleccionar los rodamientos se realiza la evaluación según las cargas dinámicas y estáticas equivalentes, para ver el tipo de rodamiento, observar el anexo 10.

En el anexo 11 se observa los rodamientos seleccionados para los apoyos A y B, los cuales se puede adquirir localmente.

2.14.2 Selección de chumacera de brida ovalada.

Las chumaceras de pared son elementos mecánicos que aseguran un enlace móvil entre el eje del rotor y la estructura de soporte, su función es permitir que el rotor gire libremente bajo una carga aplicada por el viento.

Con los cálculos realizados anteriormente se debe seleccionar una chumacera que se adapte al sistema motriz, como parámetros iniciales se toma en consideración el diámetro del eje incluyendo la carga axial y radial, que afectan a los rodamientos. Según el diámetro del eje se ha seleccionado la chumacera FYTB 15TF, para ver el tipo de chumacera, se puede observar el anexo 12.

2.15 Conclusiones de capítulo

- El prototipo fue diseñado para trabajar con la velocidad promedio de 4 m/s, sin embargo se conoce que esta varía en el rango planteado de 1.39 m/s hasta 5.56 m/s.
- Los generadores Savonius obtienen su máximo rendimiento aerodinámico para $TSR = 0.8$ con el cual se obtiene un coeficiente de potencia máximo de 0.2 o el 20 % de la potencia nominal del viento.
- La potencia considerada para el diseño del prototipo es de 2.4 W, necesario para cargar una batería de 12 V, misma que se espera comprobar en las pruebas simuladas y reales.

CAPÍTULO 3

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL AEROGENERADOR

En el presente capítulo, se realiza el modelado en tres dimensiones de cada componente del aerogenerador y la simulación del viento al pasar por el rotor.

Los objetivos principales son simular y analizar los efectos del viento sobre el rotor a diferentes velocidades, así como el comportamiento de los diferentes componentes que se encuentran sometidos a esfuerzos, con el propósito de encontrar fallas en el aerogenerador y buscar una solución reemplazando materiales más resistentes.

3.1 Software empleado

En el presente proyecto se emplean dos softwares:

- Para el modelado y simulación de esfuerzos del aerogenerador se utiliza el software asistido por computador Autodesk Inventor 2014.
- Para la simulación del viento al pasar por el rotor se emplea el software ANSYS Fluent 16.2, permitiendo predecir el flujo del viento a través del prototipo bajo un entorno real.

3.1.1 Proceso para el modelado y simulación de esfuerzos en Inventor

Para realizar el modelado y la simulación de los esfuerzos sobre el sistema eólico es necesario realizar el siguiente proceso:

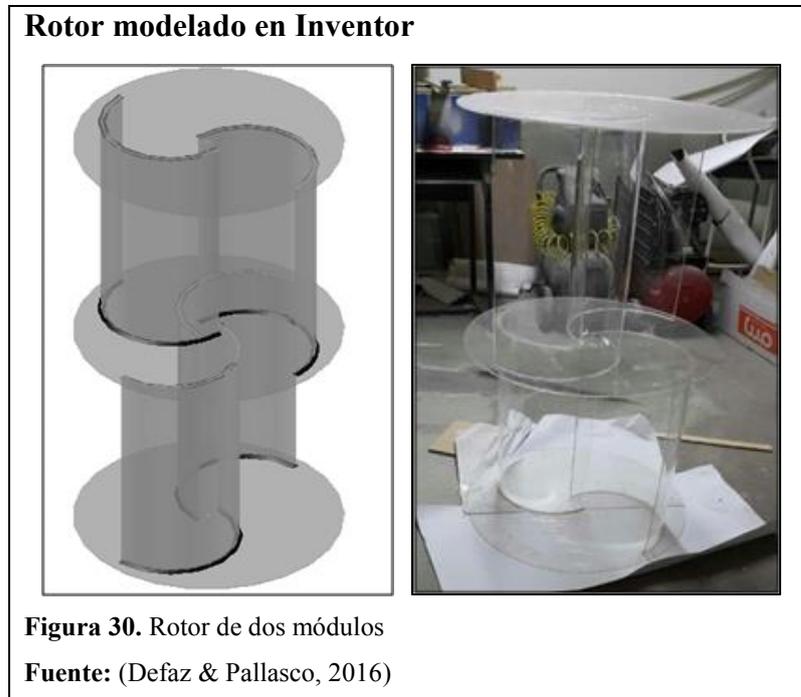
- Determinación de las dimensiones de los componentes del sistema eólico.
- Modelado de los componentes en tres dimensiones.
- Ensamblaje del sistema eólico.
- Definición de cargas sobre el sistema eólico.
- Análisis de esfuerzos de cada componente.

3.1.2 Componentes modelados en Inventor 2014

Mediante las dimensiones geométricas determinadas en el capítulo 2, se obtiene los modelos tridimensionales para el sistema eólico, los elementos modelados en Inventor se observa a continuación.

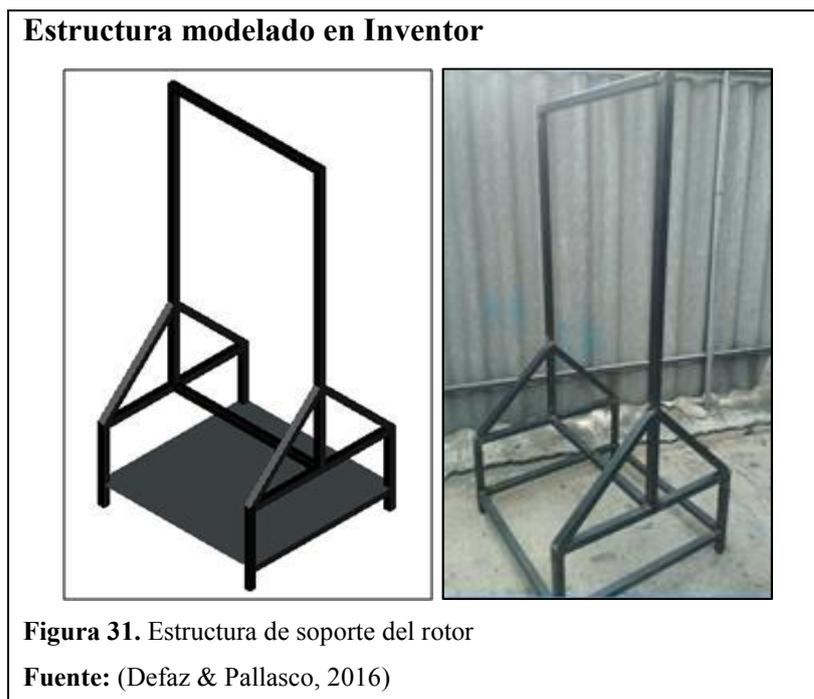
Modelo tridimensional del rotor eólico

En la figura 30 se observa el rotor del aerogenerador, el material para los álabes y tapas es de acrílico de espesor 4 mm.



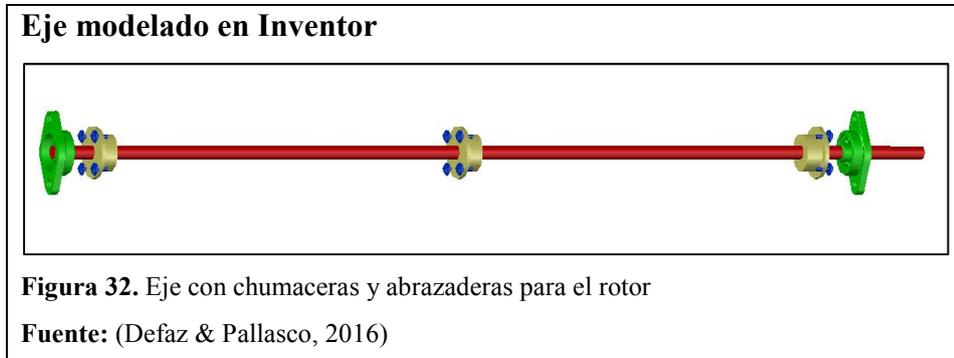
Modelo tridimensional de la estructura de soporte

En la figura 31 se observa la estructura de soporte para el rotor, el material para la estructura es de tubo cuadrado de acero ASTM-A36.



Modelo tridimensional del eje del rotor

En la figura 32 se observa el eje para el rotor, el material para el eje es de acero SAE-4340.



3.1.1.1 Ensamblaje del sistema eólico

Inventor presenta un ambiente amigable para realizar el ensamblaje, se define por medio de relaciones geométricas entre piezas, en la figura 33, se observa el ensamblaje del generador eólico.



3.1.3 Componentes para simulación de esfuerzos

Inventor 2014 permite simular y analizar los esfuerzos sobre los componentes del sistema eólico, para la simulación se realiza un análisis estático a los elementos que se encuentre sometido a fuerzas producidas por acción del viento.

Para la simulación de esfuerzos se realiza mediante la condición más crítica que va soportar el aerogenerador, en este caso es a la velocidad de viento de 14 m/s, en la tabla 11, se muestran los datos de entrada que fueron calculadas en el capítulo 2.

Tabla 11.

Datos de entrada para la simulación de esfuerzos

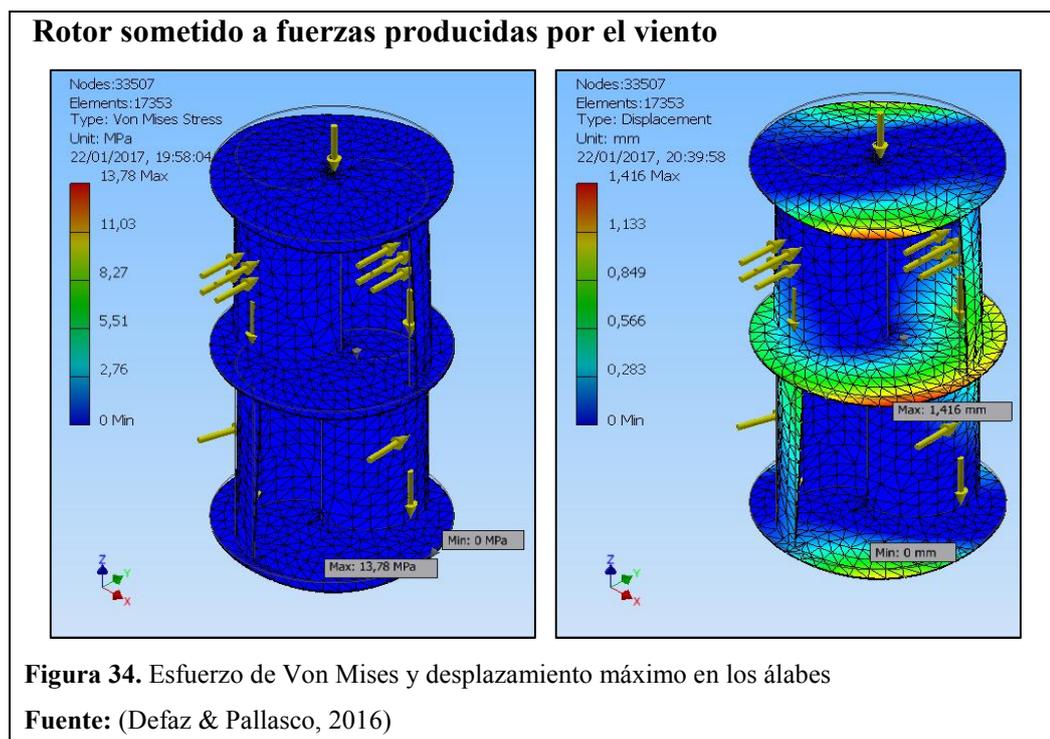
Datos de entrada para la simulación de esfuerzos	
Peso de álabes y tapas (N)	132.7
Peso del eje (N)	20.11
Peso de la estructura (N)	194.12
Presión de viento (Pa)	87
Fuerza de viento (N)	54
Reacción en el punto A eje x (N)	27
Reacción en el punto B eje x (N)	27
Reacción en el punto B eje y (N)	152.7
Torque de viento (N·m)	2.56
Fuerza de arrastre (N)	10.80

Nota: Datos de las fuerzas producidas por el viento sobre el rotor

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

3.1.3.1 Rotor eólico

Para el análisis del rotor se considera la presión de viento, el peso propio del rotor y la gravedad, una vez definido las cargas y el mallado se realiza el análisis de elementos finitos sobre el rotor.

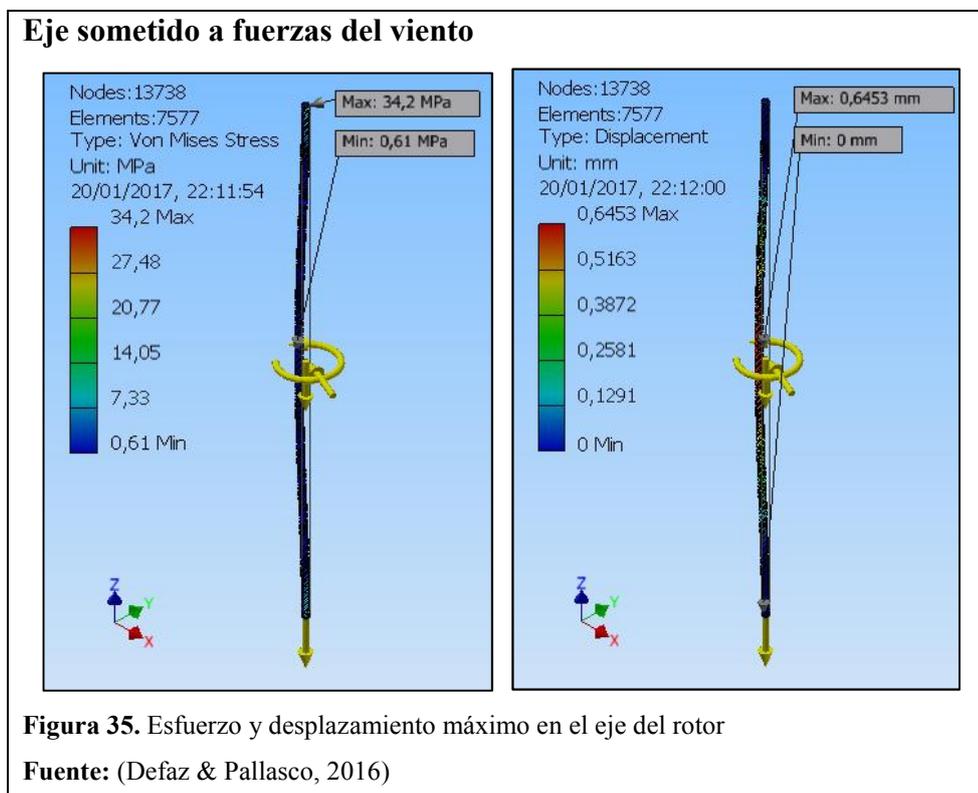


En la figura 34, se tiene el esfuerzo máximo de 13.78 MPa, presente en los apoyos de las tapas del rotor hacia el eje, mientras que el esfuerzo mínimo de 0.00 MPa se observa en los bordes de las tapas.

El desplazamiento máximo es de 1.416 mm presente en los bordes de las tapas, esto debido a la flexión que presentan los álabes, mientras que el desplazamiento mínimo se encuentra en los puntos de apoyo que tiene el rotor en el eje, para ver el reporte del análisis ver anexo 13.

3.1.3.2 Eje del rotor

Para el análisis del eje se considera la fuerza de viento, el peso del rotor, peso propio del eje, torque de viento y la gravedad, una vez definido las cargas y el mallado se realiza el análisis de elementos finitos sobre el eje del rotor.

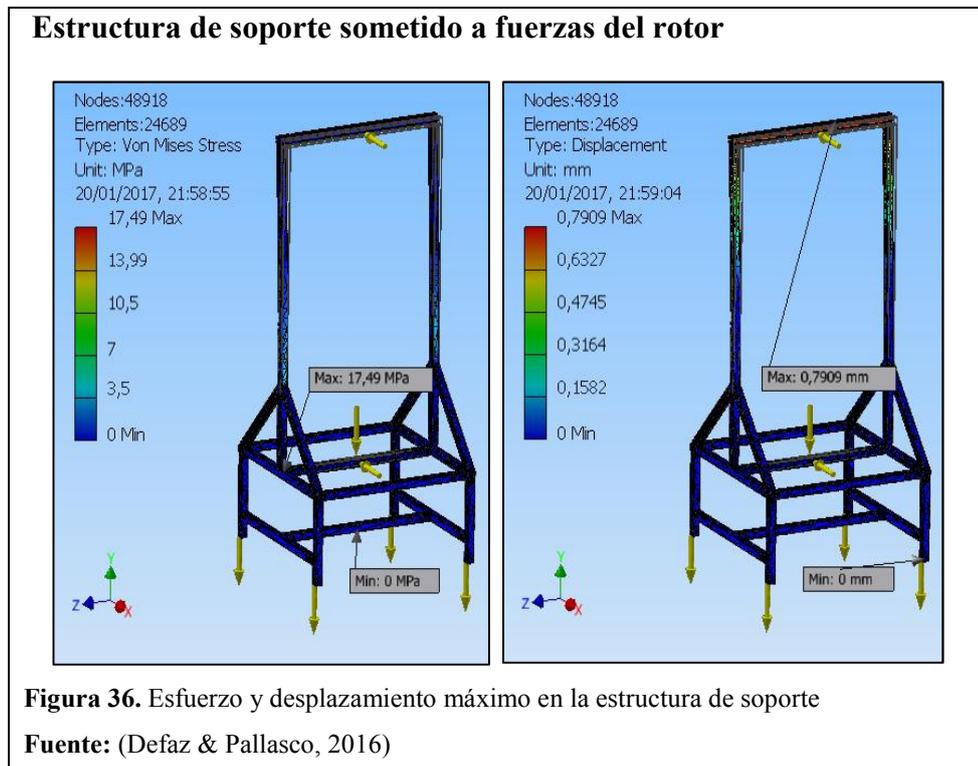


En la figura 35 se observa el esfuerzo máximo de 34.2MPa en los apoyos del eje y un esfuerzo mínimo de 0.61 MPa ubicado a 0.6 m desde los apoyos del eje.

El desplazamiento máximo es de 0.6453 mm presente en la mitad del eje, mientras que el desplazamiento mínimo de 0 mm en los apoyos del eje hacia la estructura, para ver el reporte del análisis ver anexo 14.

3.1.3.3 Estructura de soporte

Para el análisis de la estructura de soporte se considera las reacciones en los apoyos “A” y “B” que son transmitidas desde el eje por acción del viento, el peso propio de la estructura, peso del rotor y la gravedad, una vez definido las cargas y el mallado se realiza el análisis de elementos finitos sobre la estructura.



En la figura 36 se observa el esfuerzo máximo de 17.49 MPa, produciendo una flexión en el perfil de la estructura, por efecto del peso del rotor y eje. El esfuerzo mínimo de 0 MPa se presenta en la base del soporte.

El desplazamiento máximo es de 0.7909 mm presente en el perfil superior de apoyo del rotor, mientras que el desplazamiento mínimo de 0 mm y se presenta en las bases del soporte, para ver el reporte del análisis ver anexo 15.

3.1.4 Proceso para simulación de viento en ANSYS Fluent

Para realizar la simulación del flujo de viento a través del rotor Savonius es necesario realizar el siguiente proceso:

- Importación de la geometría para ANSYS Fluent.
- Creación del volumen de control
- Generación de la malla

- Identificar los parámetros de entrada y salida.
- Definición física del entorno real.
- Pre-procesamiento
- Solución y post-procesamiento
- Gráficos y resultados

3.1.4.1 Simulación de flujo de aire en ANSYS Fluent 16.2

Este software permite analizar el comportamiento del viento al pasar a través del rotor, utiliza el análisis de la dinámica de fluidos computacionales. Para la simulación del flujo el software utiliza el volumen de control o dominio computacional que abarca alrededor del rotor eólico.

3.1.4.2 Consideraciones del fluido para el análisis

Para analizar el flujo de aire al atravesar el rotor eólico en un determinado volumen de control, se debe tener en consideración lo siguiente:

- Aire a presión atmosférica
- El modelo se estudia en un régimen estacionario
- Variación de temperatura despreciable
- Fluido incompresible
- Propiedades físico químicas constantes del fluido en este caso del aire

3.1.4.3 Modelos matemáticos usados para el análisis

Para el análisis se considera el flujo de aire alrededor del rotor eólico, para la simulación es necesario el uso de las ecuaciones de mecánica de fluidos, y se considera lo siguiente:

- Flujo incompresible
- Flujo newtoniano
- Flujo laminar a la entrada
- Flujo turbulento a la salida

3.1.4.4 Ecuaciones para el análisis del modelo matemático

Para el análisis de flujo de viento en el rotor Savonius, ANSYS Fluent usa las ecuaciones que gobierna la mecánica de fluidos y se presentan a continuación (Xamán Villaseñor & Gijón Rivera , 2015).

- Ecuación de continuidad de fluidos incompresibles

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad [\text{Ec. 47}]$$

- Cantidad de momento en el eje x

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_d}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + g_x [\beta(T - T_x) + \beta_c(C - C_x)] \end{aligned} \quad [\text{Ec. 48}]$$

- Cantidad de momento en el eje y

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_d}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + g_y [\beta(T - T_x) + \beta_c(C - C_x)] \end{aligned} \quad [\text{Ec. 49}]$$

- Cantidad de momento en el eje z

$$\begin{aligned} & \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_d}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + g_z [\beta(T - T_x) + \beta_c(C - C_x)] \end{aligned} \quad [\text{Ec. 50}]$$

- Conservación de energía

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = + \frac{\lambda}{\rho C_p} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad [\text{Ec. 51}]$$

- Energía cinética turbulenta “TKE”

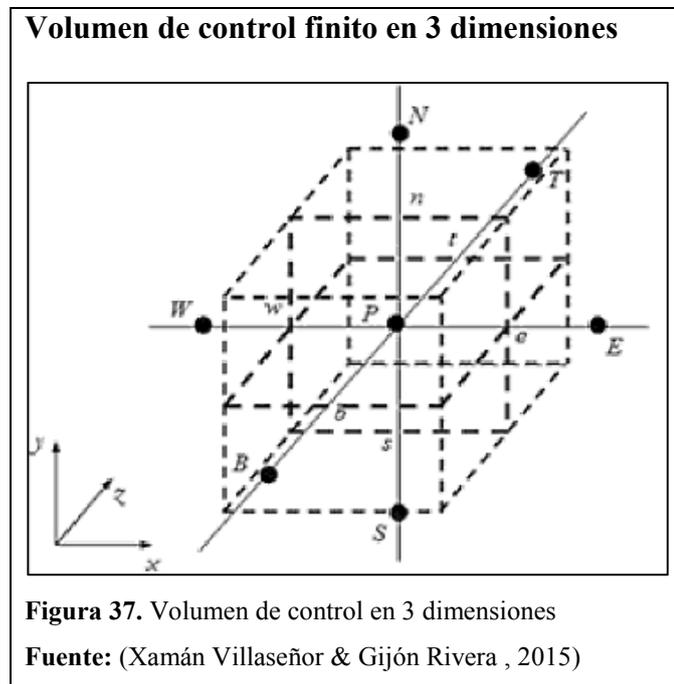
$$\frac{\partial(\rho uk)}{\partial x} + u \frac{\partial(\rho vk)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P_k + G_k - \rho \varepsilon - Y_M \quad [\text{Ec. 52}]$$

3.1.4.5 Volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos presta mayor flexibilidad debido a que se puede ejecutar con mallas estructuradas y no estructuradas, esto hace que este método sea el más utilizado en la resolución de flujos con geometrías complejas.

Permite resolver las ecuaciones de Euler / Navier Stokes, discretizando y resolviendo las ecuaciones diferenciales, por lo tanto, cada punto de la malla se convierte en un volumen de control y no permite el traslape de resultados, obteniendo un volumen total del fluido siendo igual a la suma de todos los volúmenes de control considerados en la malla construida, como se observa en la

figura 37. La ventaja de utilizar este método, es tener una solución más exacta al resolver las ecuaciones de la conservación, siendo independiente al tamaño de la malla (Xamán Villaseñor & Gijón Rivera , 2015).



3.1.4.6 Parámetros para la simulación

Para la elaboración del modelo es fundamental tener bien definido los elementos que intervienen en la simulación tales como; fluido y sus características, volumen de control y las condiciones de frontera.

Los parámetros necesarios para la simulación se obtienen de los cálculos realizados en el capítulo 2 y se observan en la tabla 12.

Tabla 12.

Datos de entrada para la simulación de flujo

Datos de entrada para simulación de flujo de viento	
Altitud (msnm)	2850
Temperatura (°K)	288
Presión atmosférica (KPa)	72.94
Velocidad de viento (m/s)	4
Densidad (kg/m ³)	0.886
Área del rotor (m ²)	0.622

Nota: Datos de las condiciones ambientales

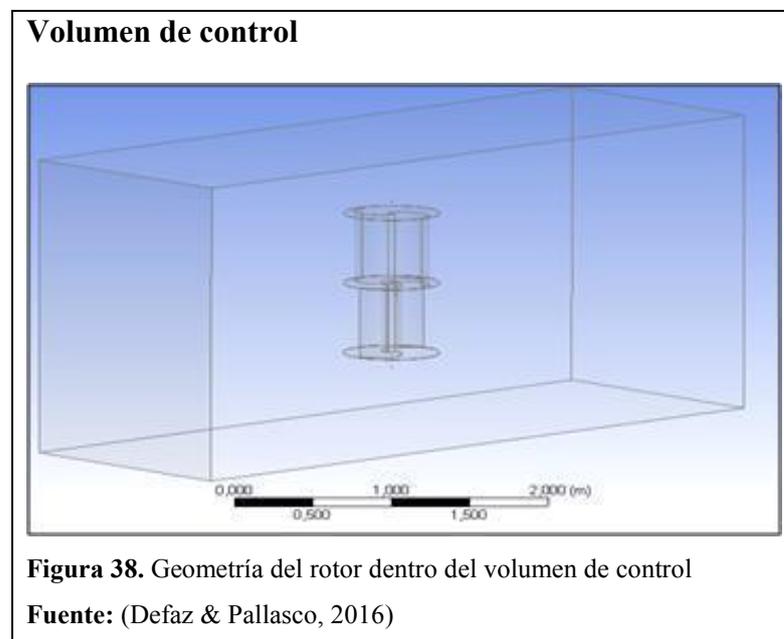
Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

3.1.4.7 Creación o importación de la geometría

Para el caso del proyecto de investigación se realiza la importación de la geometría desde el software Inventor, como se observa en la figura 38. En este proceso se define el volumen de control o dominio computacional.

Para definir el dominio de cálculo tiene que ser dimensionado de acuerdo a dos condiciones contradictorias:

- Tiene que ser lo suficientemente grande para que las paredes de dominio no tenga influencia en el campo de flujo del rotor.
- No demasiado grande como para sobreutilizar los recursos de la computadora.



3.1.4.8 Generación de la malla

La práctica común para modelar un rotor Savonius es distinguir los sub-dominios particulares dentro del dominio de cálculo.

La malla tiene dos partes bien diferenciadas una estacionaria externa, que representa el flujo alrededor del rotor y una interna, que gira representando el alabe del rotor, esta debe ser más fina para un resultado preciso (Nor Afzanizam, 2013).

ANSYS Fluent permite utilizar un mallado estructurado por defecto, mismo que permite cambiar el tamaño, en la figura 39, se observa la malla por defecto usado para el análisis del rotor Savonius.

Detalles de la malla

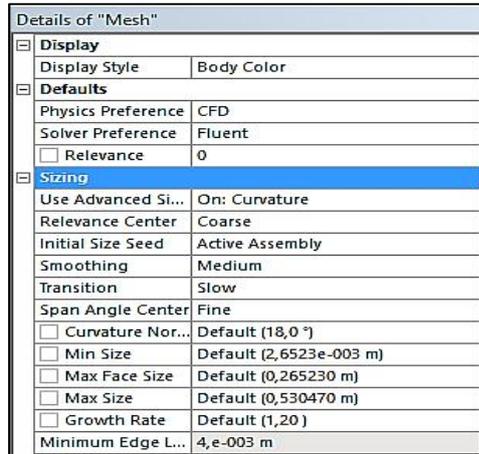


Figura 39. Detalles para una malla estructurada

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

El número total de nodos y elementos generados para el rotor se muestran en la tabla 13.

Tabla 13.

Cantidad de mallado para el rotor

Parámetro	Valor
Nodos	116335
Elementos	641148

Nota: Cantidad de nodos y elementos generados

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

Una malla bien construida es una de las características clave del modelo, evitando situaciones de inestabilidad o falta de convergencia para tener una simulación más precisa de resultados, en la figura 40, se observa la malla creada para la simulación.

Generación de malla

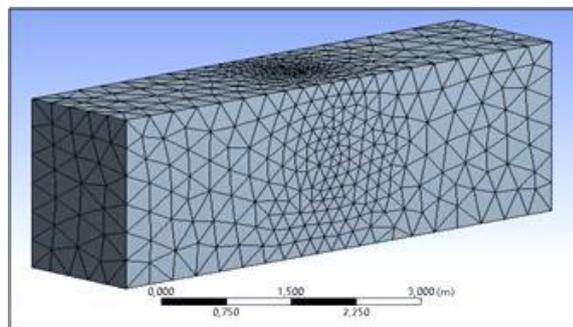
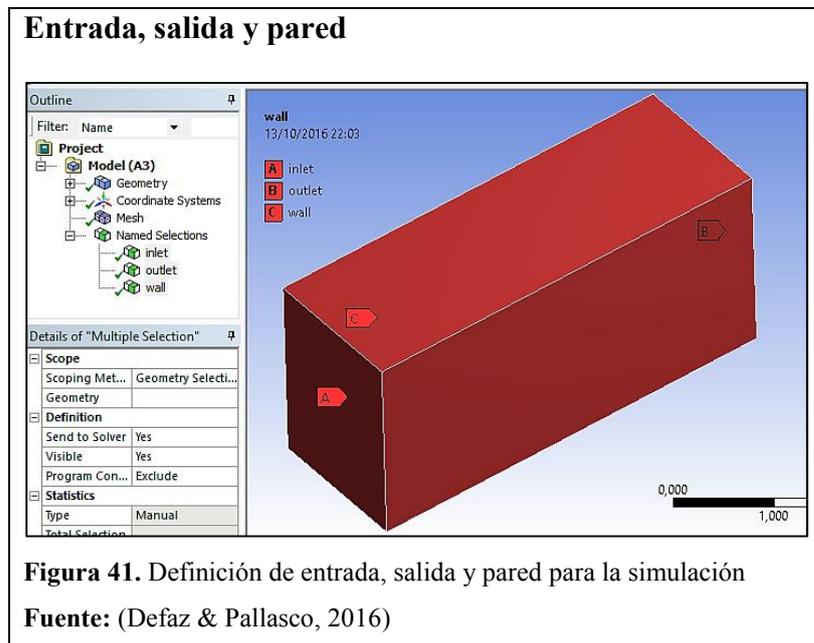


Figura 40. Generación de malla al dominio computacional

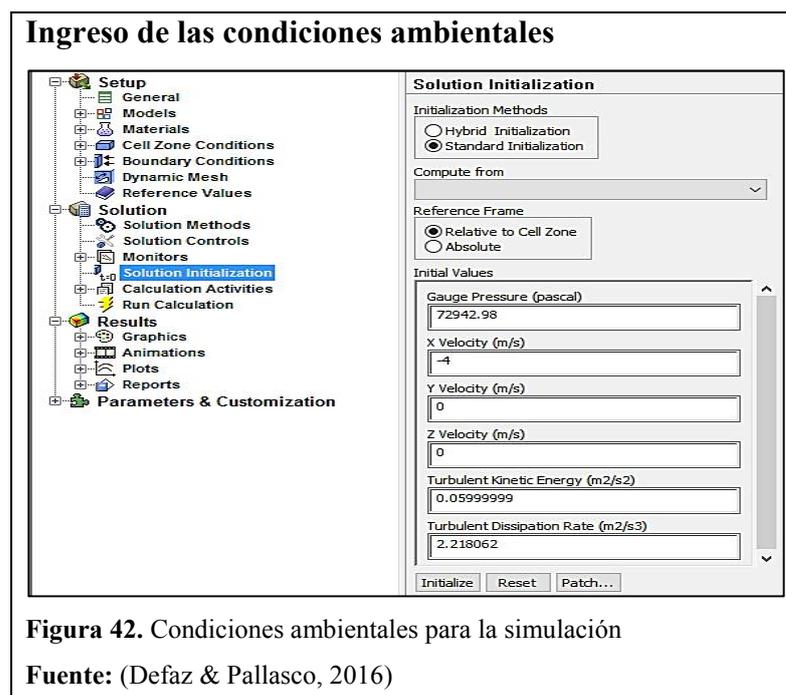
Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

En este paso se define la entrada, salida y paredes para el dominio computacional, como se muestra en la figura 41.



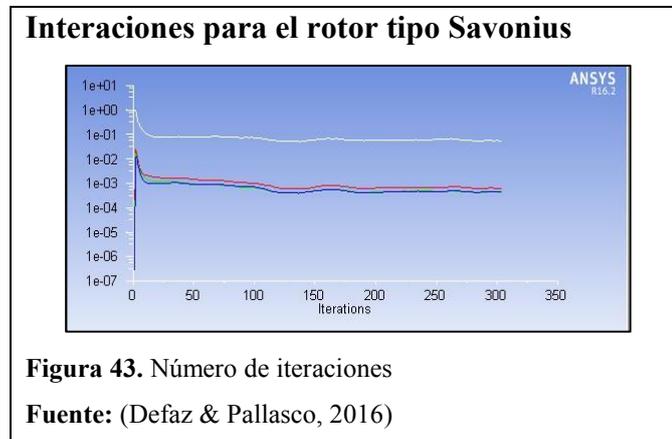
3.1.4.9 Pre-procesamiento

Consiste en ingresar los valores de las propiedades físicas del fluido, como se observa en la figura 42, con las cuales se realizará las simulaciones, en esta parte se realiza la correcta selección de los modelos que usará el software para la resolución numérica del problema.



3.1.4.10 Post procesamiento

En la etapa de post-proceso se muestra los resultados luego de la solución del problema, en la figura 43, se muestra el número de iteraciones realizadas para encontrar una solución adecuada, en este caso se realiza 300 iteraciones.

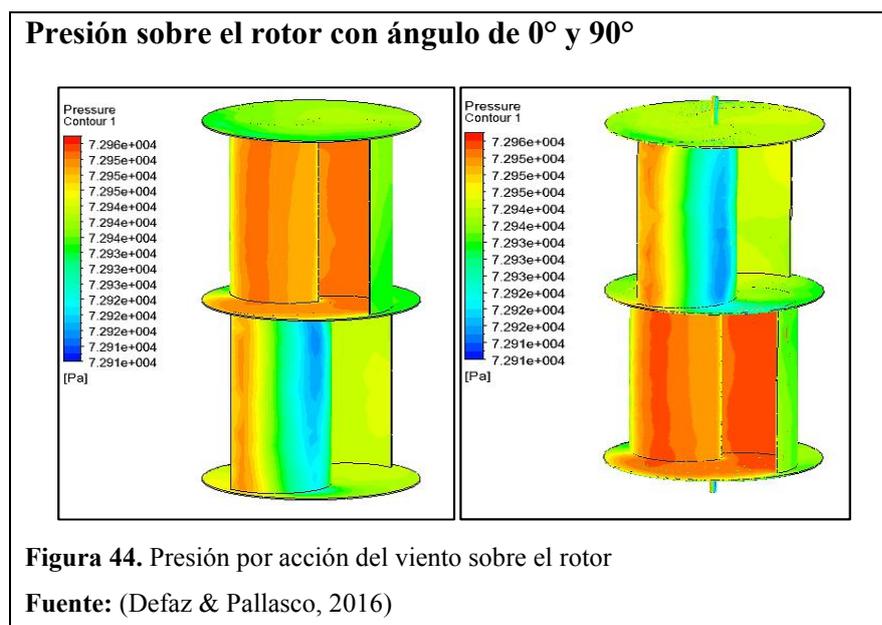


3.1.4.11 Realización de la simulación

Para la simulación del flujo de aire se considera los datos de entrada indicado en la tabla 9, las gráficas obtenidas del análisis de flujo se muestran a continuación:

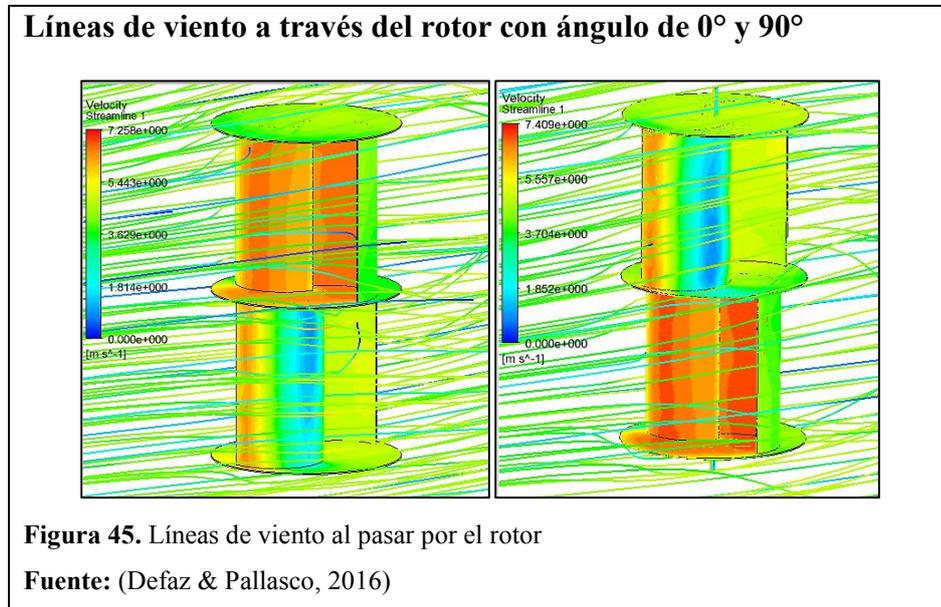
- Presión ejercida por el viento en el rotor Savonius

En la figura 44, se observa la presión ejercida por el viento sobre los álabes, como resultado se tiene una presión máxima de 72.96 KPa en el módulo 2, mientras que al girar el rotor 90°, la presión máxima se presenta en el módulo 1.



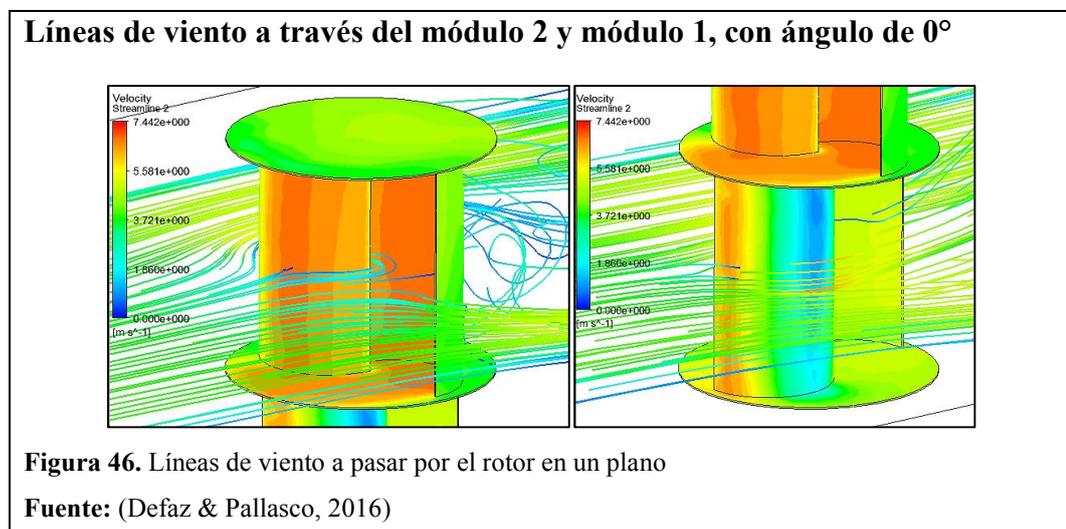
- Líneas de flujo en el rotor Savonius

En la figura 45, se observa el recorrido que realiza el flujo de viento a través de los álabes, como resultado se tiene una velocidad máxima de 7.258 m/s en el módulo 1, mientras que al girar 90° la velocidad máxima se presenta en el módulo 2.



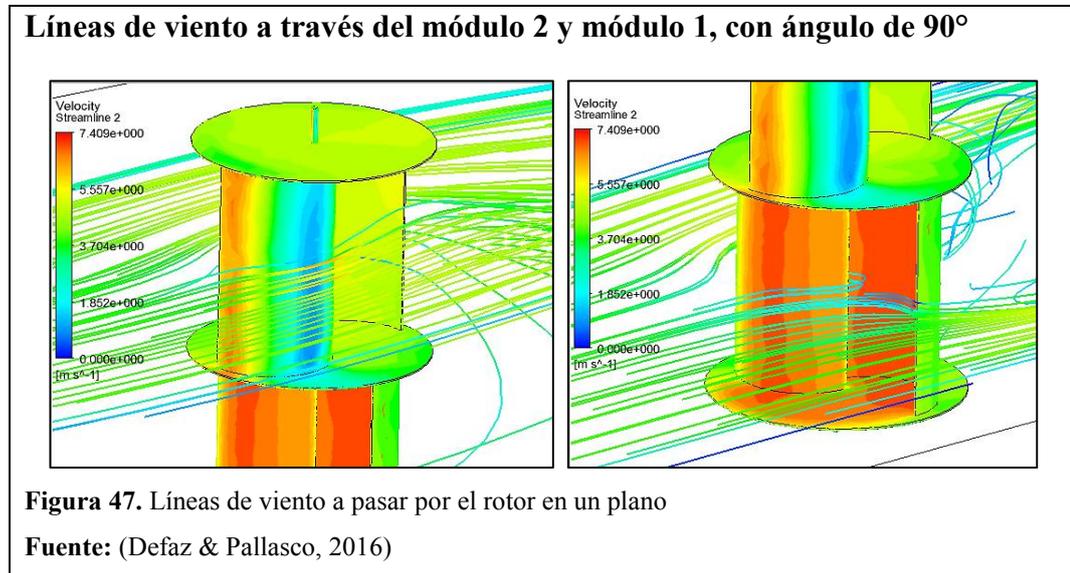
- Líneas de flujo en los módulos 1 y 2 con un ángulo de 0°

En la figura 46, se observa el recorrido que realiza el viento en un plano a través del rotor, en el módulo 2 se crea la estela de turbulencia a la salida de los álabes, mientras que en el módulo 1 el viento cruza por el lado convexo con un flujo más estable, como se describe en el capítulo 1, alcanzando la velocidad máxima en el perfil del álabes y una velocidad de 0 m/s en el punto de estancamiento. “frente del módulo 1”.



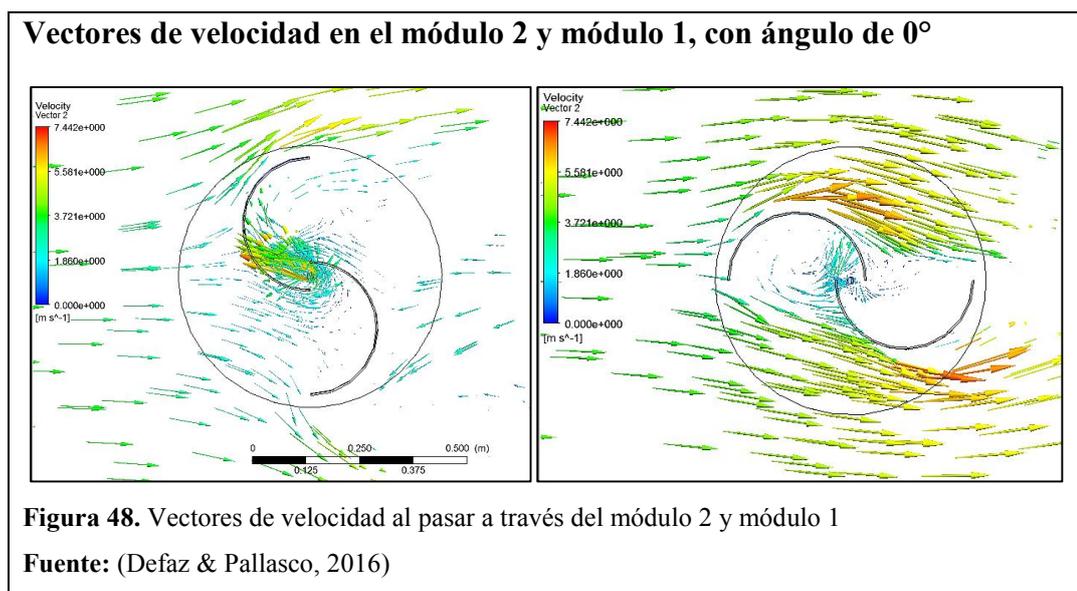
- **Líneas de flujo en los módulos 1 y 2 con un ángulo de 90°**

Al girar el rotor 90° por acción del viento, en la figura 47, se observa que en el módulo 1 se produce la estela de turbulencia, mientras que el módulo 2 tendrá un flujo de viento más estable alcanzando su velocidad máxima.



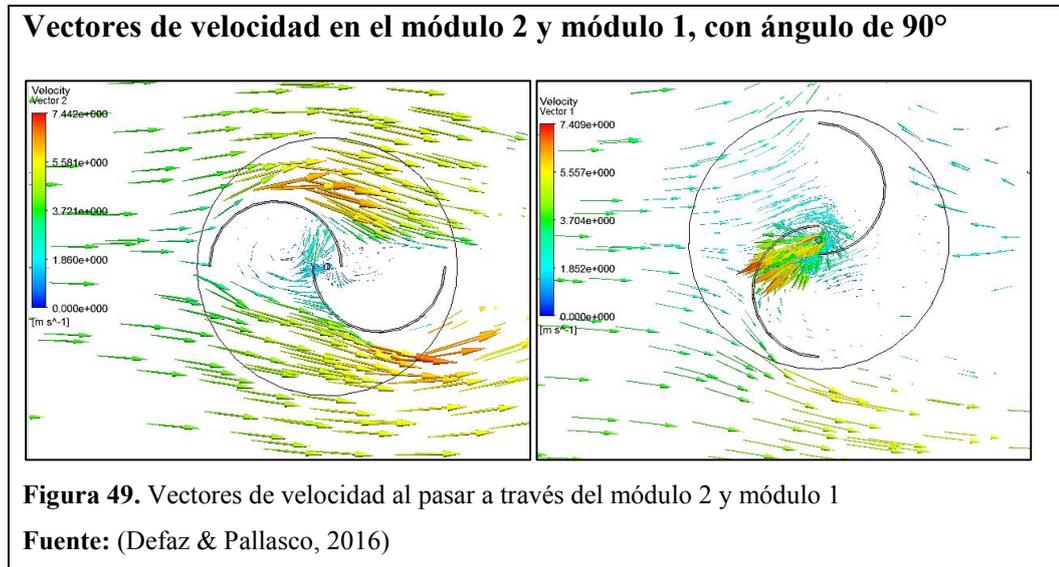
- **Vectores de velocidad en los módulos 1 y 2 con un ángulo de 0°**

En la figura 48, se observa el recorrido que realizan los vectores de velocidad a través del rotor tipo Savonius, en el módulo 2 se presenta el tipo de flujo circular o rotativo “vórtice”, mientras que en el módulo 1 los vectores de velocidad alcanzan su velocidad máxima al cruzar por el lado convexo del rotor.



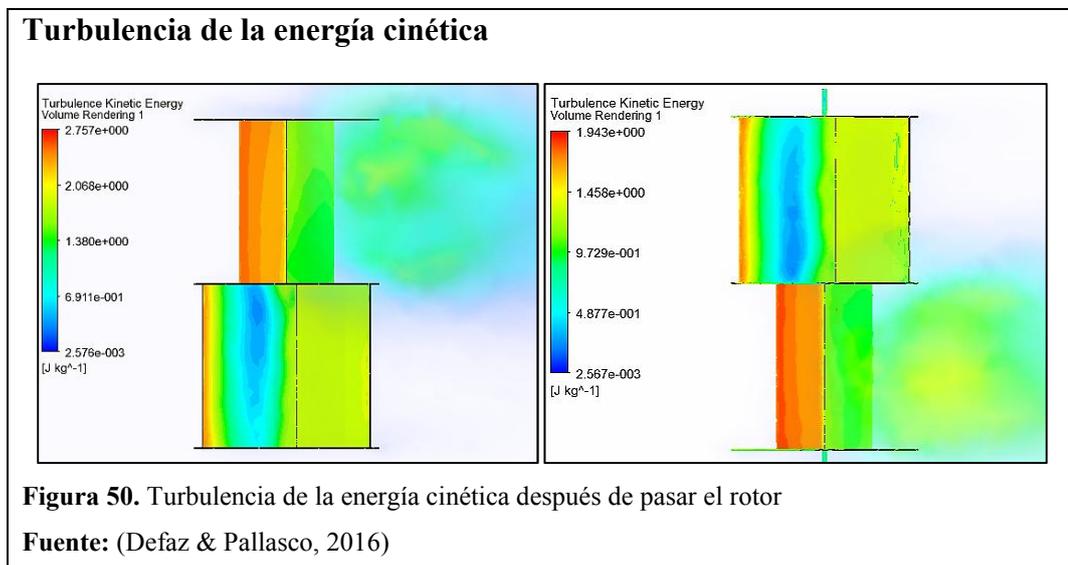
- **Vectores de velocidad en los módulos 1 y 2 con un ángulo de 90°**

Al girar el rotor 90° por acción del viento, en la figura 49, se observa que en el módulo 2 los vectores de velocidad que alcanzan su velocidad máxima, mientras que en el módulo 1 se presenta el tipo de flujo circular o rotativo “vórtice”, cumpliendo la teoría descrita en el capítulo 2.



- **Energía cinética turbulenta**

En la figura 50, se observa la Turbulence kinetic energy “TKE”, esta es la energía cinética media por unidad de masa que se asocia con la turbulencia producida por el viento después de cruzar el rotor, al estar desfasados los módulos 1 y 2, 90° entre sí, la turbulencia se presenta en el módulo 2, mientras que al girar el rotor 90° por acción del viento la turbulencia se presenta en el módulo 1.



3.1.5 Conclusiones del capítulo

- Mediante la simulación de esfuerzos en Inventor 2014 permite conocer los esfuerzos máximos y mínimos, desplazamientos y factor de seguridad a los elementos que forman parte del prototipo de aerogenerador, como son rotor, estructura de soporte y eje del rotor.
- Al considerarse de un elemento importante en el análisis de esfuerzos, para el rotor se tiene como máximo 5,144 MPa, presente en los apoyos de las tapas, mientras que el esfuerzo mínimo se observa en los bordes de las tapas.
- El desplazamiento máximo es de 1,275 mm presente en los bordes de las tapas, esto se debe a la flexión que se presenta en los álabes, mientras que el desplazamiento mínimo se encuentra en los apoyos del rotor.
- El análisis realizado en ANSYS Fluent permite conocer las zonas críticas que estarán sometidas a presión, en este caso se tiene una presión máxima de 72,96 KPa este valor cambia del módulo 1 al módulo 2 según gira el rotor.
- Finalmente, la velocidad máxima de 7.442 m/s se tiene en el lado convexo del rotor, este valor cambia según gira el rotor presentando en el módulo 1, mientras que en el módulo 2 se observa el flujo de aire circular o rotativo o llamado vórtice.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo, se analiza los valores obtenidos de la simulación computacional y pruebas del prototipo a diferentes velocidades de viento.

El objetivo principal es realizar la comparación de los resultados finales de las pruebas realizadas al prototipo al someter a diferentes velocidades de viento, frente a los valores obtenidos en los cálculos realizados en el capítulo 2 y los valores obtenidos en la simulación en el capítulo 3, así como analizar los costos para la construcción y pruebas del prototipo de aerogenerador eólico tipo Savonius.

4.1 Análisis de resultados teóricos

4.1.1 Potencia nominal del viento vs potencia del aerogenerador

Para el análisis de los resultados teóricos se observa la tabla 14, esta se realiza con las ecuaciones 4 y 12, las mismas que, muestran la potencia teórica del aerogenerador eólico a diferentes velocidades de viento, así como la potencia nominal del viento sin considerar pérdidas.

Tabla 14.

Potencia nominal de viento y potencia del aerogenerador

Velocidad de viento		Potencia teórica del aerogenerador (W)	Potencia nominal de viento (W)
(km/h)	(m/s)		
5	1.39	0.10	0.74
7	1.94	0.28	2.03
9	2.50	0.59	4.31
11	3.06	1.07	7.86
13	3.61	1.77	12.98
14.4	4.00	2.40	17.64
16	4.44	3.29	24.20
18	5.00	4.69	34.45
20	5.56	6.43	47.26

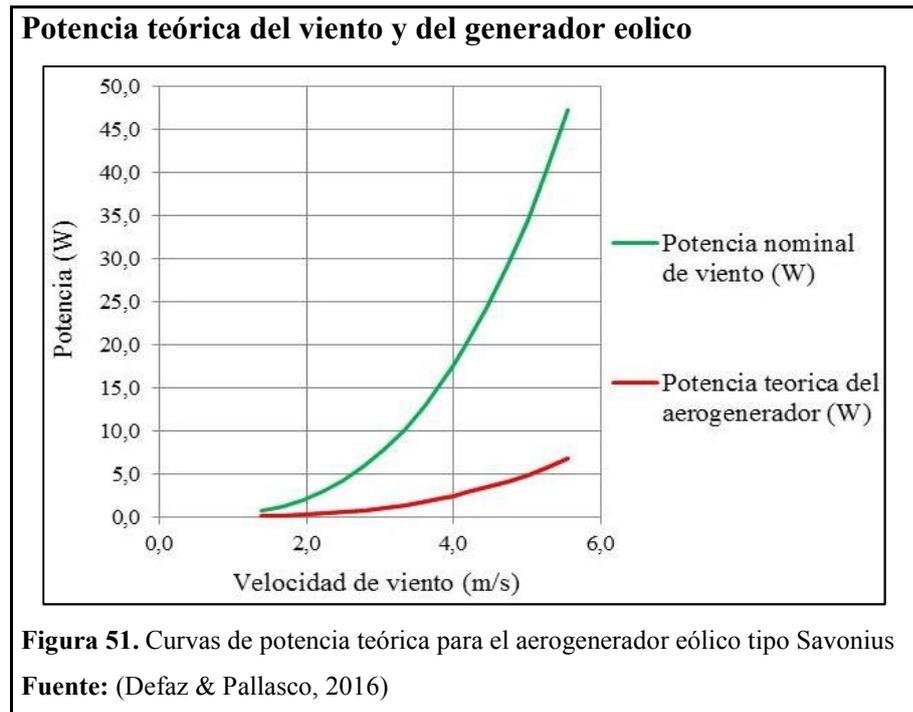
Nota: Potencia del aerogenerador a diferentes velocidades de viento

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

En la tabla 14, se observa la fila marcada de color amarillo, donde se muestra la velocidad de viento considerada para el dimensionamiento del prototipo, para este caso como se menciona en el capítulo 2, la velocidad promedio para la Ciudad de

Quito es de 4 m/s, valor con la cual se espera comprobar la potencia que genere el prototipo.

En la figura 51, se observa la curva de potencia nominal de viento “color verde” y la potencia del aerogenerador “color rojo”, en esta se muestra un aumento de potencia según aumenta la velocidad de viento llegando a una potencia de 47.26 W y 6.67 W respectivamente, a una velocidad máxima de prueba de 5.56 m/s.



La diferencia de potencia se debe al coeficiente de Betz, que dice que solo se puede aprovechar el 59 % de su energía cinética, según la figura 13 mostrada en el capítulo 2, se considera una eficiencia del 20 % para el aerogenerador eólico tipo Savonius, significa que se puede aprovechar el 20 % de la potencia nominal de viento.

4.1.2 Área de barrido vs potencia del aerogenerador

En la tabla 15, se observa los resultados del cálculo del área de barrido, realizado mediante la ecuación 13, la cual se realiza a diferentes velocidades de viento. En esta se observa, que a medida que aumenta la velocidad de viento el área de barrido disminuye y la potencia que genera aumenta, obteniendo una área de 0.23 m^2 y una potencia de 6.76 W a una velocidad máxima de 5.56 m/s.

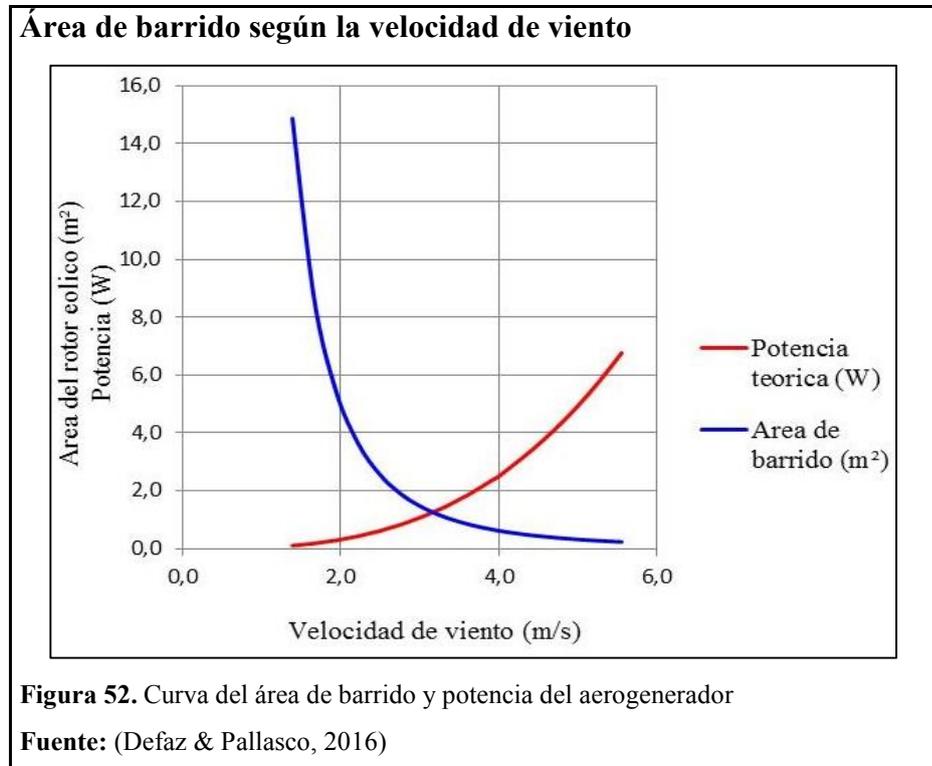
Tabla 15.
Cálculo del área de barrido

Velocidad de viento (m/s)	Potencia teórica del aerogenerador (W)	Área de barrido (m ²)
1.39	0.10	14.87
1.94	0.28	5.42
2.50	0.59	2.55
3.06	1.07	1.40
3.61	1.77	0.85
4.00	2.40	0.62
4.44	3.29	0.45
5.00	4.69	0.32
5.56	6.43	0.23

Nota: Cálculo del área de barrido a diferentes velocidades de viento

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

En la figura 52, se observa la curva del área de barrido y la potencia que genera, en la cual se muestra que a menor velocidad de viento, mayor es el área de barrido por lo tanto menor la potencia que genera el prototipo, mientras que al aumentar la velocidad disminuye el área y aumenta la potencia.



4.2 Análisis de resultados de la simulación computacional

Mediante la simulación de flujo de aire a través de los álabes, se obtiene la velocidad tangencial y el torque, para el análisis de los resultados obtenidos se realiza los siguientes cálculos.

- Calcular la velocidad angular mediante la ecuación 53.

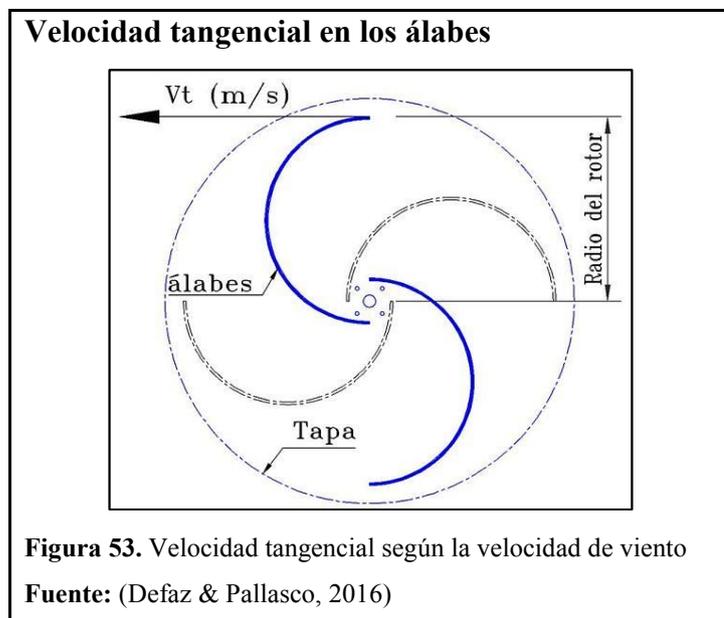
$$\omega = \frac{V_t}{r} \quad [\text{Ec. 53}]$$

Donde:

V_t = Velocidad tangencial, [m/s]

- Calcular la velocidad específica “TSR” mediante la ecuación 18.
- Mediante la velocidad específica calculada y la figura 49, se obtiene el coeficiente de potencia para el rotor eólico tipo Savonius.
- Calcular la potencia simulada del rotor, mediante el torque, velocidad angular y la ecuación 20.

En la figura 53, se observa la dirección de la velocidad tangencial de la simulación, esta velocidad se puede observar en la figura 48, donde se muestra los vectores de velocidad sobre los álabes.



En la tabla 16, se observa los resultados obtenidos al simular el rotor a diferentes velocidades de viento y los valores calculados mediante las ecuaciones mencionadas anteriormente.

Tabla 16.

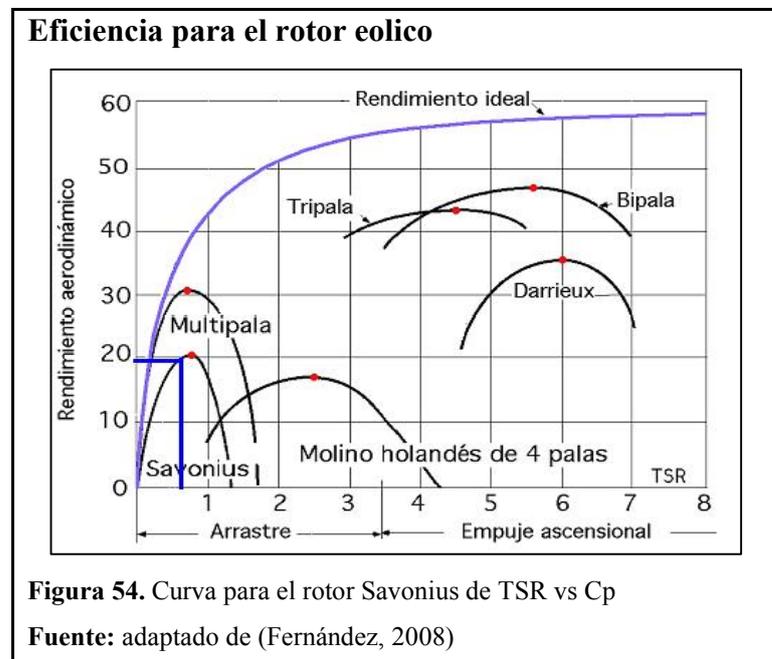
Resultado obtenidos de la simulación

Velocidad de viento (m/s)	Velocidad tangencial (m/s)	Velocidad angular (rad/s)	TSR	Torque Simulado (N·m)	Potencia simulada (W)
1.39	0.95	3.41	0.68	0.05	0.17
1.94	1.32	4.73	0.68	0.08	0.38
2.50	1.69	6.06	0.68	0.11	0.67
3.06	2.07	7.42	0.68	0.15	1.11
3.61	2.44	8.75	0.68	0.20	1.75
4.00	2.73	9.79	0.68	0.24	2.35
4.44	3.00	10.76	0.68	0.29	3.12
5.00	3.38	12.12	0.68	0.37	4.49
5.56	3.76	13.48	0.68	0.45	6.07

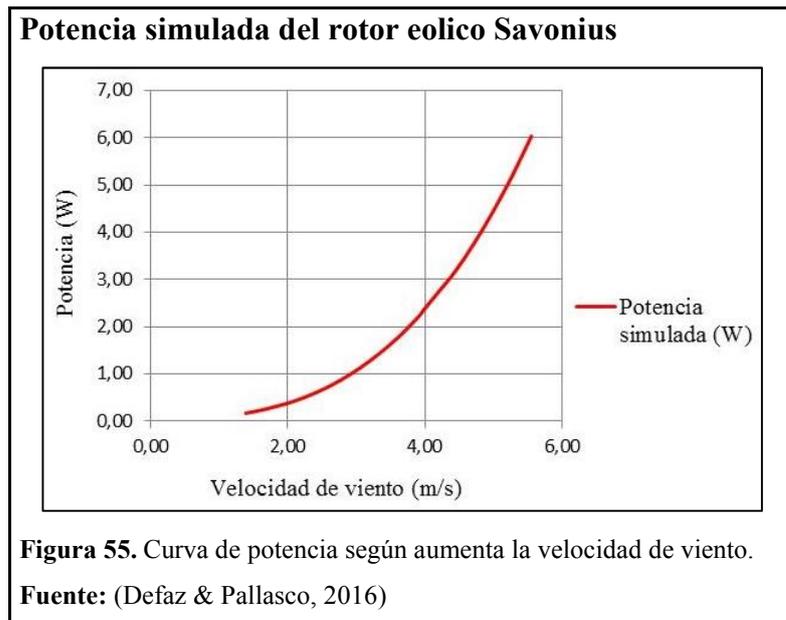
Nota: Velocidad tangencial y torque obtenido de la simulación

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

Con el valor de la velocidad específica “TSR = 0.68” y la figura 54 se obtiene el coeficiente de potencia, en este caso un $C_p = 0.19$, mediante estos resultados se comprueba los valores de TSR y C_p que fueron considerados en el capítulo 2 para el dimensionamiento del rotor eólico tipo Savonius.



En la figura 55, se observa la curva de la potencia simulada en función del aumento de la velocidad de viento, y se obtiene una potencia máxima de 6.07 W a una velocidad de viento 5.56 m/s.



4.3 Análisis de resultados del prototipo

Con el propósito de obtener el voltaje que genera el prototipo a diferentes velocidades de viento, se realizan las pruebas de campo, como se observa en el anexo 18.

A partir de los datos recolectados durante las pruebas de campo se obtiene la curva de voltaje, indicada en la figura 56, que cumple con la ecuación 54 de tipo exponencial.

$$y = 4,4693e^{0.1769x} \quad [\text{Ec. 54}]$$

Donde:

y = Voltaje generado del prototipo, [W]

x = Velocidad de viento, [m/s]

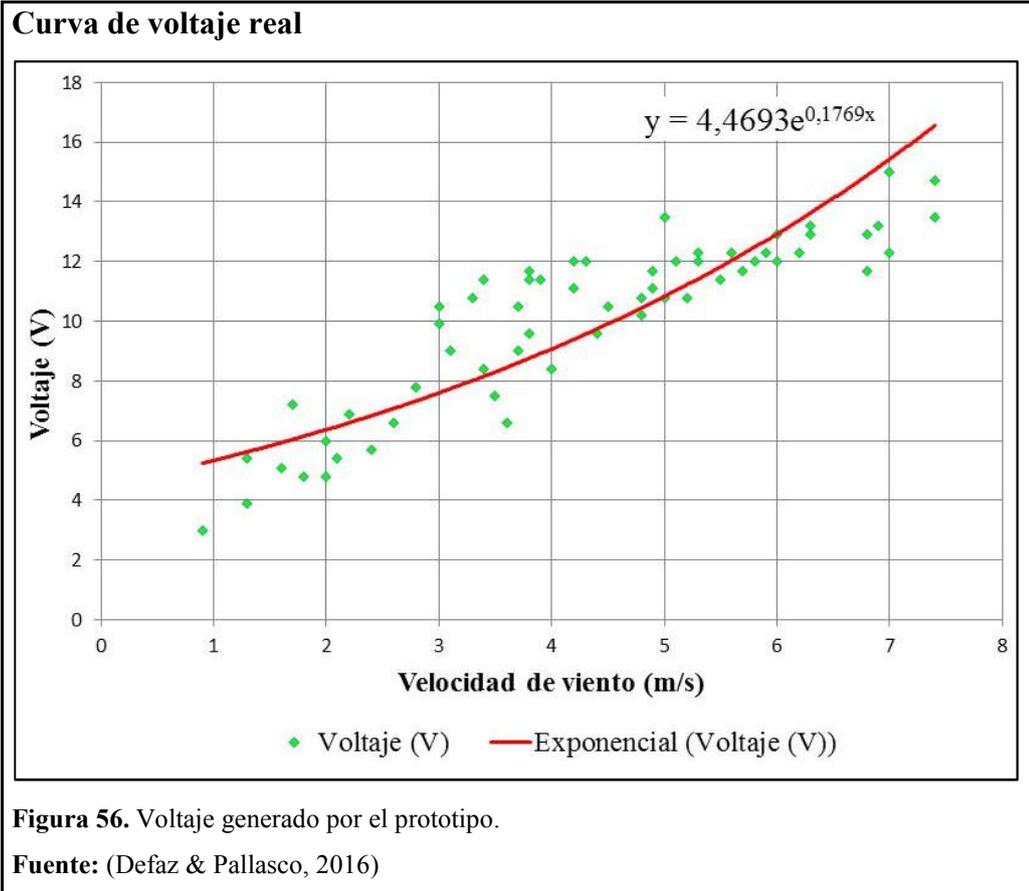
Tabla 17.

Intensidad y voltaje necesaria para la batería

Voltaje (V)	12
Capacidad (Ah)	5
Tiempo (h)	20
Amperaje (A)	0,25

Nota: Datos de intensidad y voltaje de la batería

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)



Por medio de la ecuación 54, y la tabla 17, se obtiene la tabla 18, donde mediante el voltaje y la intensidad que consume la batería se obtiene la potencia generada por el prototipo, para el rango de velocidad de viento planteado en el proyecto.

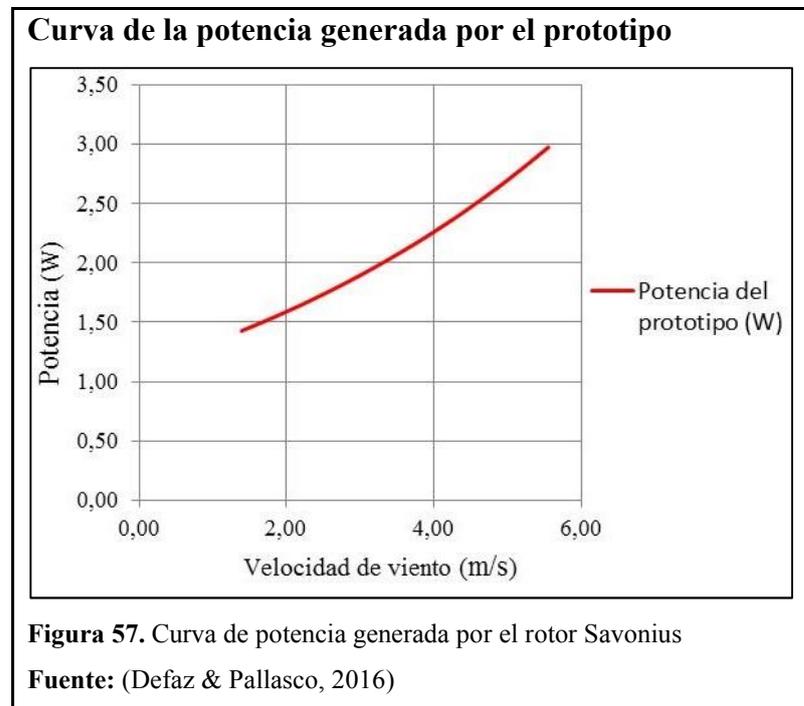
Tabla 18.
Potencia generada por el prototipo

Velocidad de viento (m/s)	Voltaje real (V)	Potencia real del generador (W)
1,39	5,71	1,43
1,94	6,30	1,57
2,50	6,95	1,74
3,06	7,66	1,92
3,61	8,45	2,11
4,00	9,05	2,26
4,44	9,79	2,45
5,00	10,79	2,70
5,56	11,91	2,98

Nota: Potencia generado por el rotor Savonius

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

En la figura 57, se observa la curva de la potencia que genera el prototipo en función del aumento de la velocidad de viento, obteniendo 2.98 W a una velocidad máxima de 5.56 m/s.



4.4 Comparación de resultados

Para la comparación de los resultados se genera la tabla 19, misma que contiene los resultados obtenidos en los cálculos teóricos, simulados y pruebas del prototipo.

Tabla 19.

Comparación de potencias teórica, simulada y real

Velocidad de viento (m/s)	Potencia teórica (W)	Potencia simulada (W)	Potencia del prototipo (W)
1,39	0,10	0,17	1,43
1,94	0,28	0,38	1,57
2,50	0,59	0,67	1,74
3,06	1,07	1,11	1,92
3,61	1,76	1,75	2,11
4,00	2,40	2,35	2,26
4,44	3,29	3,12	2,45
5,00	4,68	4,49	2,70
5,56	6,43	6,07	2,98

Nota: Potencia teoría, simulada y real del prototipo de rotor Savonius

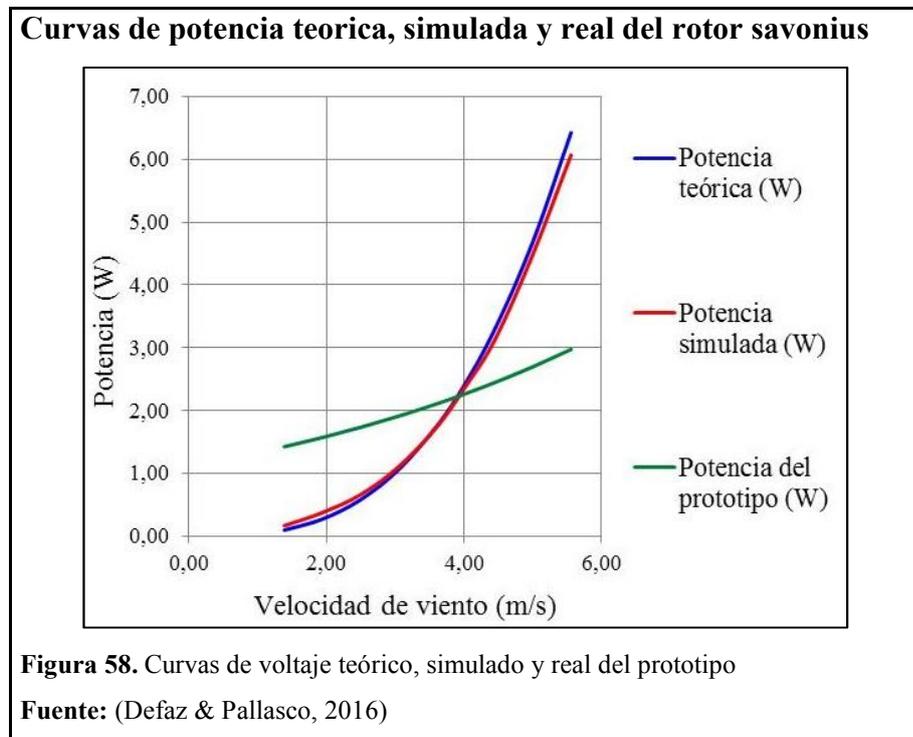
Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

Según los valores se observa que a una velocidad de viento mínima de 1.39 m/s, el prototipo genera mayor potencia a comparación con la teórica y simulada, esto se da debido a las bajas rpm que trabaja el generador seleccionado.

La potencia que genera el prototipo va aumentando hasta una velocidad de 5.56 m/s, donde la potencia teórica es superior a la potencia simulada y generada en las pruebas.

En la figura 58 se observa las curvas generadas según la velocidad de viento vs. La potencia generada, mismas que se describen a continuación:

- La curva de color azul presenta la potencia teórica.
- La curva de color rojo presenta la potencia simulada
- La curva de color verde presenta la potencia real del prototipo



En la figura se observa que a una velocidad de viento aproximada de 3.80 m/s, la potencia teórica, simulada y real se intersecan obteniendo una potencia aproximada de 2.20 W.

La potencia generada por el prototipo depende netamente de la velocidad e intensidad de viento que exista en ese momento de realizar las pruebas, es así, que la potencia puede variar de manera repentinas cuando existen grandes ráfagas a brisas de viento.

4.5 Análisis de costos

En este numeral se realiza el análisis total de los costos generados en la ejecución de este proyecto, en la tabla 20, se observa los diferentes costos necesarios para la construcción y las pruebas del prototipo.

Tabla 20.

Costos generados para la construcción

Costo total					
Descripción de costos	Descripción de materiales	QTY	Prec. Unit.	Prec. Total	
Elementos Normalizados	Chumaceras de piso	2	8.75	17.50	
	Perno hexagonal M10x1.5x 55	8	0.45	3.60	
	Arandela planas M10	8	0.10	0.80	
	Tuerca hexagonal M10	8	0.10	0.80	
	Perno hexagonal M6x1x50	15	0.30	4.50	
	Arandela plana M6	15	0.10	1.50	
	Tuercas M6	15	0.15	2.25	
	Prisionero M8x1.25	3	0.30	0.90	
	Prisionero para 1/4 NC	1	0.20	0.20	
	Prisionero para 3/8 NC	1	0.10	0.10	
	Abrazaderas de aluminio	3	5.00	15.00	
	Anemómetro	1	40.00	40.00	
	Elementos eléctricos	Generador eléctrico AC	1	150.00	150.00
		Cable concéntrico 2x16 / 3 metros	1	10.00	10.00
Visor digital de voltaje		1	25.00	25.00	
Batería 12V-4A@20h		1	20.00	20.00	
Controlador de carga		1	30.00	30.00	
Materiales de construcción	Eje principal Ø 16 mm	1	25.00	25.00	
	Acrílico 2400x1200x4mm	1	164.5	164.50	
Mano de obra	Corte y ensamblado de estructura incluye material tubo cuadrado 30x30x2mm y plancha corrugada	1	217.5	217.50	
	Corte formado y ensamblaje del rotor eólico	1	74.00	74.00	
	Rectificado de abrazaderas de aluminio	1	24.00	24.00	
	Conexión sistema eléctrico	1	50.00	50.00	
Materiales indirectos	Papel bond, impresiones.	1	150	150.00	
Sub. total			1007.15		
Imprevistos (7%)			70.50		
Total			\$ 1077.65		

Nota: Detalle de los costos generados para la construcción del prototipo

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

Para obtener el costo total de la construcción del prototipo se suman los costos de los elementos normalizados, elementos eléctricos, materiales de construcción, mano de obra y materiales indirectos, adicional se considera un 7 % del total para imprevistos, en caso de ser necesarios.

Como resultado se obtiene un valor decreciente de acuerdo al valor presupuestado, esto se debe a que todos los elementos para la construcción se tomaron precios referenciales.

4.6 Análisis de factibilidad

A la hora de desarrollar un proyecto de investigación es muy importante tener presente los siguientes aspectos: ambientales, económicos, técnicos, entre otros, con el fin de evaluar la viabilidad del proyecto. En este caso se tratarán principalmente la factibilidad técnica y la factibilidad económica de la construcción de un prototipo de aerogenerador eólico tipo Savonius.

4.6.1 Análisis económico

El costo de la construcción del proyecto de investigación no se puede emplear en un análisis de factibilidad económica pues al tratarse un prototipo no se pueden establecer comparaciones entre el costo y el beneficio. Sin embargo, el presupuesto presentado en este documento sirve como base para futuros estudios de implementación a gran escala, de este tipo de aerogeneradores.

4.6.2 Análisis técnico

La viabilidad de la construcción del prototipo antes mencionado depende principalmente de las velocidades de viento en lugar de instalación.

El viento en la ciudad de Quito es inestable y variable en todo el año, existiendo velocidades inferiores a 1 m/s que no pueden ser aprovechadas, lo cual afecta directamente al generador debido a que depende del flujo de viento y velocidad, dicho factor hace que la producción de energía no sea constante.

En el atlas eólico presentado por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable “MEER”, se pueden observar velocidades de viento superiores a los 7 m/s para la provincia de Pichincha, sin embargo esta se presenta en la zona montañosa.

Conociendo las irregularidades en las velocidades de viento previamente citadas, hace que la producción de energía no sea constante, por lo tanto el generador eólico

tipo Savonius no se pueda conectar directamente a la red, siendo factible la implementación del prototipo para rangos de velocidades superiores a los 4 m/s.

Al ser un aerogenerador de eje vertical este aprovecha las corrientes de viento en diferentes direcciones, sin necesidad de usar un orientador, facilitando su ubicación para la instalación.

Sabiendo que la velocidad media en la ciudad de Quito es de 4 m/s se fundamenta la decisión de diseñar y construir un prototipo aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, con el propósito de fomentar la investigación dentro del campo de las energías limpias.

4.7 Conclusiones del capítulo

- Mediante los resultados generados en la simulación se obtiene la velocidad específica “ $TSR = 0.68$ ” y según la curva del límite de Betz para el rotor Savonius se tiene el coeficiente de potencia “ $C_p=0.19$ ”, coeficiente y velocidad específica que se considera como valores de entrada para el diseño del prototipo, comprobando lo teórico con lo simulado.
- Para el diseño del prototipo se considera una velocidad promedio de 4 m/s en la Ciudad de Quito, mediante el análisis real se obtiene 2.26 W, necesaria para cargar la batería seleccionada anteriormente.

Conclusiones generales

- Este análisis se realiza con la necesidad de conocer el comportamiento del aerogenerador de eje vertical tipo Savonius, frente a diferentes velocidad de viento, en el cual, se puede conocer su eficiencia, potencia que genera y su factibilidad para la construcción, aportando soluciones en el ámbito de los recursos energéticos renovables.
- La configuración de las aspas seleccionadas para el rotor del prototipo han permitido mejorar el rendimiento, al ser de pasaje abierto se puede tener control de la velocidad de rotación al igual que del torque producido en el eje, aprovechando el viento sin importar la dirección que este lleve, lo cual hace ideal para vientos de baja velocidad, debido a que no requerirá sistemas de orientación que consumen energía o requieren mayor cantidad de viento para alinearse.
- Para la generación de energía eléctrica mediante generadores eólicos requieren de velocidades promedio durante el año de 4 m/s, con el cual se garantiza la estabilidad de producción de energía.
- Mediante la simulación de esfuerzos, permitió conocer las zonas críticas del prototipo que estarán sometidas a altos valores de presión, con el propósito de obtener resultados precisos es fundamental tener una malla bien construida, evitando situaciones de inestabilidad o falta de convergencia.
- La potencia teórica se validó al realizar la simulación mediante el método de volúmenes finitos en ANSYS Fluent, exponiendo el prototipo a velocidades de viento comprendidos entre 5 a 20 km/h, lo que permitió verificar el diseño propuesto es adecuado, asegurando la resistencia del mismo bajo las condiciones ingresadas en el software.
- El prototipo fue diseñado para una velocidad de viento máxima de 5.56 m/s, sin embargo en las pruebas realizadas se obtiene una velocidad de 7.4 m/s superior al rango planteado con presencia de ráfagas fuertes de viento, el cual permite que el rotor eólico genere un potencia máxima de 3.67 W.

Recomendaciones generales

- Complementar el presente proyecto investigativo efectuando pruebas del prototipo con diversos materiales de manera que puedan seleccionar los más idóneos para mayores rangos de velocidad de viento.
- Una vez que ha sido posible determinar el comportamiento del flujo de viento a través de la simulación, se considera necesario estudiar a profundidad el impacto que podría tener en otros lugares del país, las velocidades y turbulencias que se den en emplazamientos donde se quiera implementar los proyectos eólicos.
- El viento es un elemento variable y que no se puede controlar a voluntad, se debe agregar un banco de baterías el cual ira almacenando la energía para ser utilizada posteriormente, de tal manera que se pueda tener un flujo de energía constante por un periodo según sea la autonomía de las mismas.
- Se recomienda buscar un generador eléctrico más grande y con mayor capacidad de generación, y que su giro sea suave evitando usar transmisiones por poleas o cajas reductoras, reduciendo las pérdidas mecánicas.
- Para que el prototipo sea aprovechado es necesario instalar en un lugar con flujo abundante de viento y constante durante todo el año, donde el rango de velocidad de viento sea mayor, reduciendo el área de barrido con el propósito de obtener un generador de mayor potencia, menor dimensiones y costo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y NETGRÁFICAS

- 3D CAD PORTAL . (2016). *ANSYS*. Retrieved from <http://www.3dcadportal.com/ansys.html>
- Acciona . (2015, 09). *Acciona*. Retrieved 04 07, 2016, from Energía Eólica: <http://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/>
- Akwa, J. V., Vielmo, H. A., & Petry, A. P. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and sustainable Energy Reviews*, 3054-3064.
- Albornoz, E. (s.f.). *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*. Retrieved 04 02, 2016, from Atlas Eólico del Ecuador: <http://www.energia.gob.ec/ministerio-de-electricidad-y-energia-renovable-presento-el-primer-atlas-eolico-del-ecuador/>
- Andreas Fitzner, A. P. (2011). *ball-bearings*. Retrieved from <http://www.krw.de>
- Arrega, J. (2014, 05). *Fuentes de energía en el Ecuador*. Retrieved 03 20, 2016, from Energía eólica en el Ecuador: <http://blog.espol.edu.ec/jhohearr/energia-eolica-en-el-ecuador/>
- ASME.106.1M. (1985). *Design of transmission shafting*. United States: ASME International.
- Autodesk Inc. (2016). *Inventor*. Retrieved from <http://latinoamerica.autodesk.com/products/inventor/features/all>
- Barreira Pazos, C. (2009, 12 16). Eficiencia energética en motores eléctricos. *Energylab*, 16.
- Bavaresco, G. (s.f.). *GABP Ingeniería*. Retrieved 07 28, 2016, from Procedimiento para el diseño de ejes: http://gabpingenieria.weebly.com/uploads/2/0/1/6/20162823/diseo_de_ejes.pdf
- Bohler, A. (2015, 04 03). *Aceros Bohler - trabajo en frio*. Retrieved 11 18, 2016, from Catalogos:

<http://www.acerosbohler.com/spanish/files/downloads/37572%20aceros%20bohler.pdf>

- Budynas, R., & Nisbett, J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Octava edición ed.). México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
- Carta, J., Calero, R., Colmenar, A., & Castro, M. (2009). *Centrales de energías renovables generación eléctrica con energías renovables*. Madrid: Pearson Educación SA.
- Coast, P. (s.f.). *Energía Eólica*. Retrieved 03 16, 2016, from Cómo se produce y se obtiene: http://coast.pink/energia-eolica_4817944.html
- Cuesta, M., Martínez, M., & Cabrera, J. (2008). *Aerogeneradores de potencia inferior a 100 kW*. Centro de Investigaciones energeticos medio ambientales y tecnologicos.
- Desing, A. E. (2015). *calculators Equivalent bearing load*. Retrieved from <http://www.tribology-abc.com>
- di Prátula, H. (2009). *Cein*. Retrieved 02 20, 2016, from Características de las turbinas eólicas: <http://www.ceia.uns.edu.ar/cursos/Eolica09/4atecnologia%20aerog%20primer%20parte.pdf>
- Dipac. (s.f). *Dipac - Productos de acero*. Retrieved 07 22, 2016, from Tubo estructural cuadrado: http://www.dipacmanta.com/index.php?route=product/product&path=61_93&product_id=30
- Ecuador, B. (2016, 06 01). *baterias ecuador*. Retrieved 16 10, 2016, from baterias ecuador: <http://www.bateriasecuador.com/productos.html>
- ELECROW. (s.f.). *power-supply*. (G. d. Eólica, Producer) Retrieved 08 11, 2016, from green-energy: <http://www.elecrow.com/>
- Enríquez, G. (2004). *El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos*. México D.F.: Limusa.

- Espinoza, P. (2015, 02 4). *INER*. Retrieved 07 29, 2016, from INER desarrolla un software para estudios de energía eólica: <http://www.iner.gob.ec/iner-desarrolla-un-software-para-estudios-de-energia-eolica/>
- Fernández, P. (2008). *Energía Eólica* (4 ed.). España: Libros Redsauce.
- Focer. (2002, 09). *Secretaria Nacional de Energía*. Retrieved 03 25, 2016, from Manual sobre Energía Renovable Eólica: <http://www.energia.gob.pa/tmp/file/302/manual-eolica.pdf>
- idePlas. (2015). *idePlas "Láminas, Inyección y Termoformado"*. Retrieved 08 15, 2016, from Ficha técnica lamina PMMA (acrilico): <http://www.ideplas.com/fichas-tecnicas.html>
- INAMHI. (2015). *Anual Metereológico*. Quito: Gestion de la información Hidrometeorológica.
- Inaquito, P. E. (2016, 06 28). *Worldmeteo*. Retrieved 06 28, 2016, from El tiempo en quito, Ecuador: <http://www.worldmeteo.info/es/america-del-sur/ecuador/quito/tiempo-101692/>
- INEN. (2001). *Código Ecuatoriano de la construcción*. Quito.
- Ingemecanica. (2016, 06 04). *ingemecanica*. Retrieved 07 11, 2016, from Correas de transmisión cálculo y diseño: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn121.html#anexos1>
- Institute-Bangalore, C. M. (1982). *Machine tool desing handbook*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- KMABRASIL. (s.f.). *KMA Automação e proteção*. Retrieved 07 20, 2016, from Bateria selada 12V-5Ah first power: <http://www.kmabrasil.com.br/produto/baterias-seladas/baterias-12v-agm/284-bateria-selada-12v-5ah-first-power>
- Lara, M., & Hernández, M. (2013, 01 03). Prototipo de aspa para un Aerogenerador tipo Vertical. *Universita Ciencia*, 112.
- López, L. A. (2016, 04 26). *Factoria de ingenieros*. Retrieved 05 01, 2016, from Efecto Magus: cambiando las trayectorias: <http://www.factoriadeingenieros.com/efecto-magnus/>

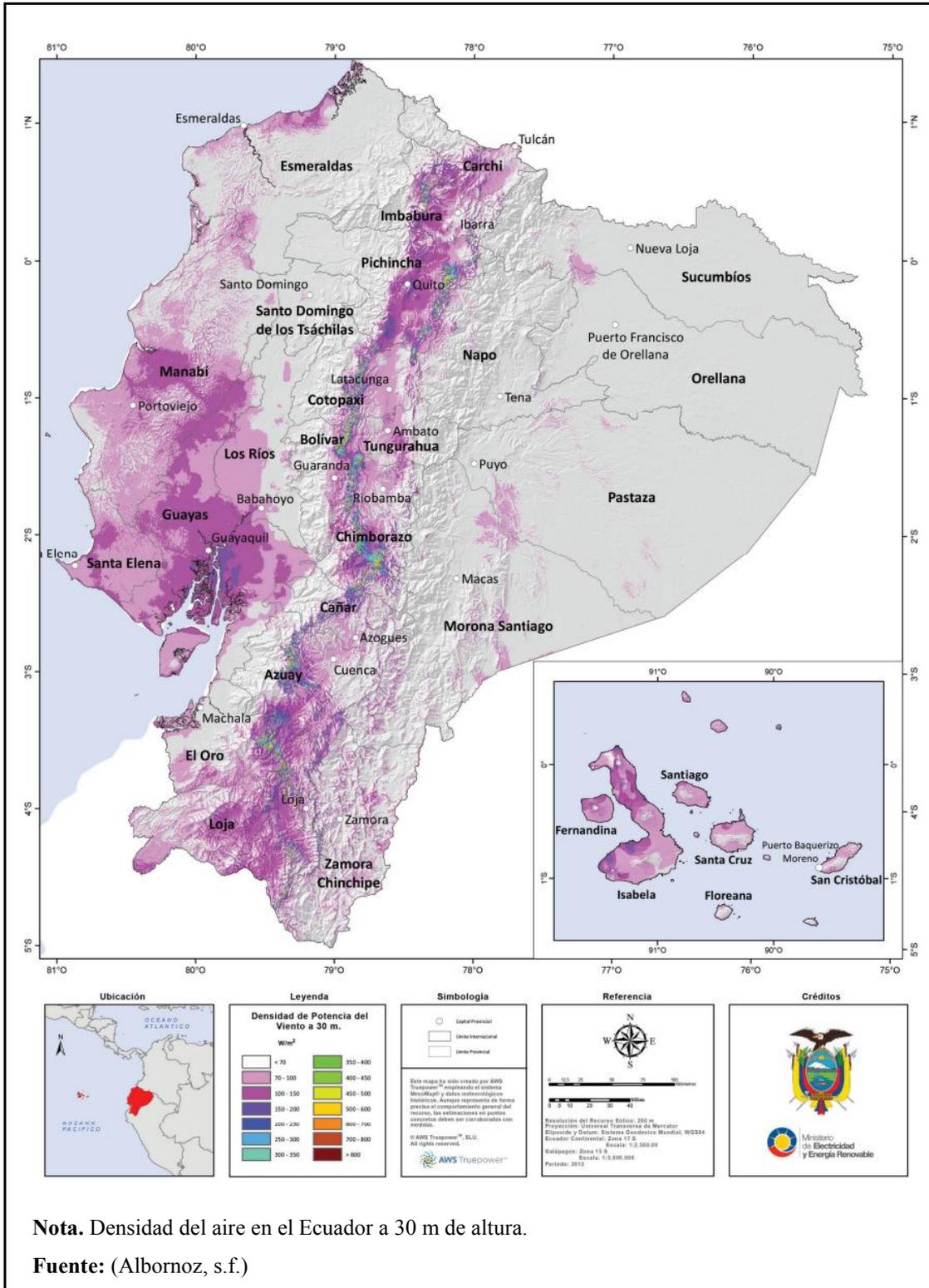
- Lysen, E., Bos, H., & Cordes, E. (1978). *Savonius rotor for water pumping*. Amersfoort: SWD Publication.
- Mauro, C. (2011, Julio 19). *Dinamica y Elementos de Máquinas*. Retrieved from http://mauro-calvo.blogspot.com/2011_07_01_archive.html
- Mauro, C. (2011, Julio 19). *Dinamica y Elementos de Máquinas*. Retrieved from http://mauro-calvo.blogspot.com/2011_07_01_archive.html
- MEER. (2013). *Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*. Retrieved 03 15, 2016, from Atlas Eólico del Ecuador: <http://www.energia.gob.ec/biblioteca/>
- Méndez, J., & Rodríguez, L. (2012). *Energía Eólica*. Madrid: Fundación Confemetal.
- Menet, J. (2004). A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study. *Renewable Energy*, 1843–1862.
- Milla Lostaunau, L., & Sotelo López, C. (2008). *Generador de Electricidad Savonius*. Lima: Electrónica-UNMSM.
- Mírez, J. (2011, 07 15). *Matlab / Simulink in Renewable Energy*. Retrieved 04 01, 2016, from La Rosa de los Vientos: <https://jmirez.wordpress.com/2011/07/15/j281-la-rosa-de-vientos-frecuencia-velocidad-y-energia/>
- Moreno, C., & Herrera, O. (2008). *Cubasolar*. Retrieved 04 20, 2016, from Método simplificado para la determinación del potencial eólico cuando se desean instalar pequeñas máquinas eólicas: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar24/HTML/articulo01.htm>
- Mott, R. (2009). *Resistencia de Materiales* (Quinta edición ed.). México: Pearson Educación.
- NEC. (2014). *Cargas no sísmicas*. Quito, Pichincha, Ecuador: Dirección de Comunicación Social, MIDUVI.
- Nor Afzanizam, S. (2013, 03). *NOR_AFZANIZAM_SAMIRAN*. Retrieved from Universiti Tun Hussein Onn Malaysia: http://eprints.uthm.edu.my/3726/1/NOR_AFZANIZAM_SAMIRAN_1.pdf

- Ocampo Gil, L. H. (1993). *Diseño de Accionamientos y Transmisiones de Máquinas*. Pereira: UTP.
- Paraschivoiu, I. (2002). *Wind turbine design with emphasis on Darrieus concept*. Montreal: Presses Internationales Polytechnique.
- Rabbat, B., ASCE, M., & Russell, H. (2008, 05). *ASCE - TECHNICAL PAPERS*. Retrieved 01 06, 2017, from Friction coefficient of steel on concrete or grout: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111%3A3\(505\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111%3A3(505))
- Ramírez, M. (2015, 11 21). *Renovablesverdes*. Retrieved 02 05, 2016, from Aerogeneradores verticales y de eje horizontal: como funcionan y tipos: <http://www.renovablesverdes.com/aerogeneradores-verticales/>
- Ren21. (2015). *Reporte de la situación mundial de las energías renovables*. Retrieved 03 16, 2016, from Hallazgos clave 2015: <http://www.ren21.net>
- Rodríguez, J. (1985). *Coeficientes de potencia en molinos Savonius*. Bogotá: Ingeniería e investigación.
- Sanguinés Lezama, F. A. (2011, 01). *Diseño de un aerogenerador de eje vertical de baja potencia*. Retrieved 08 17, 2016, from Tesis de nivel posgrado: <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/10070/32.pdf?sequence=1>
- Sheldahi, R., & Klimas, P. (1981). *Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*. Albuquerque: Sandia National Laboratories.
- Sitiosolar. (s.f.). *Sitiosolar.com*. Retrieved 07 29, 2016, from Los simuladores eólicos: <http://www.sitiosolar.com/los-simuladores-eolicos/>
- SKF, C. (2006, Mayo). *index Catálogos de rodamientos*. Retrieved from <https://app.box.com/s/e741ee52a755d5f37fad/1/255644030/2114832189/1>
- Svetlana, M. (2016, 05). *materiaali Performance of a Savonius wind turbine in urban sites using CDF analysis*. Retrieved from University of Vaasa: http://www.uva.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-675-3.pdf

- System, A. F. (s.f.). *Atmospheric Fan System*. Retrieved 03 02, 2016, from Energía Atmosférica: <http://www.extractores.com.mx/energia%20atmosferica.htm>
- Team, E. (2012, 03 21). *Energy Hunters*. Retrieved 02 25, 2016, from Turbine eoliche ad asse orizzontale o verticale un confronto: <http://www.energyhunters.it/content/turbine-eoliche-ad-asse-orizzontale-o-verticale-un-confronto>
- Tecnología. (s.f.). *487 - Tecnología 1*. Retrieved 07 06, 2016, from Tecnología y Mecanismos: <https://sites.google.com/site/487tecnologia1/tecnologia-y-mecanismos>
- Tolosa, J. R. (1983). *Aerogeneración de energía*. Ecuador: Olade.
- Ujjwal, S., Damodar, M., & S, T. (2008). Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *96*, 1359-1375.
- Ultracell. (s.f.). *Ultracel UL series: General series -12 Volts*. Retrieved 07 22, 2016, from Ultracell UL4-12: <http://ultracell.net/datasheets/UL4-12.pdf>
- Ushiyama, I., Nagal, H., & Shinoda, J. (1986). Optimum design configuration and performance of Savonius rotors. *Bulletin of JSME*, *29*, 4130-4138.
- Vanegas, L. (2016, 05 17). *Diseño I*. Retrieved 07 28, 2017, from Diseño de árboles: <http://blog.utp.edu.co/lvanegas/dis1/>
- Villarrubia, M. (2013). *Ingeniería de Energía Eólica* (1 ed.). México, D.F.: Alfaomega.
- Xamán Villaseñor, J. P., & Gijón Rivera, M. Á. (2015). *Dinámica de fluidos computacionales para Ingenieros*. United States: Palibrio.
- Yunus, C., & John, C. (2012). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. México: MCGRAW-HILL.

ANEXOS

Anexo 1. Densidad a 30 m en el Ecuador



Nota. Densidad del aire en el Ecuador a 30 m de altura.

Fuente: (Albornoz, s.f.)

Anexo 2. Clasificación de los generadores eólicos

Potencia nominal	Orientación de rotor	Mecanismo de regulación de potencia	Tipo de generador eléctrico	Número de palas
Baja < 3 kW	Eje vertical	Paso variable	Generador de corriente continua	Bipalas
Media < 30 Kw	Eje horizontal	Basculación de rotor	Generador de corriente alterna	Tripalas
Alta > 100 kW		Pérdida aerodinámica de la pala		Multipalas

Nota: Clasificación de los aerogeneradores considerando la potencia nominal

Fuente: (Ramírez, 2015)

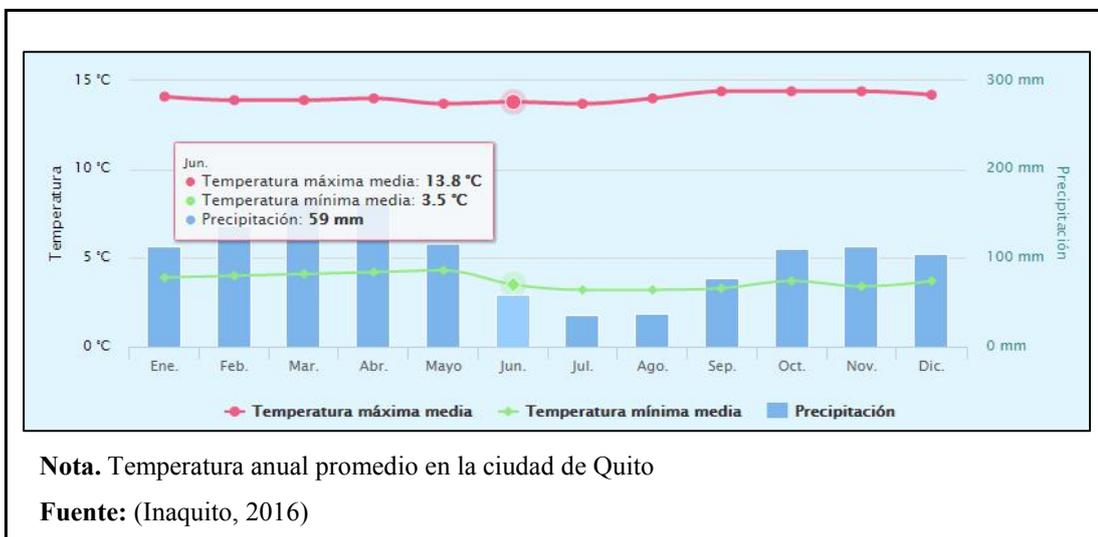
Anexo 3. Velocidad nominal de viento

MES	EVAPORACION (mm)			NUBOSIDAD MEDIA (Octas)	VELOCIDAD MEDIA Y FRECUENCIAS DE VIENTO																Vel. Mayor Observada			
	Suma Mensual	Máxima en 24hrs	en dia		N	NE		E		SE		S		SW		W		NW		CALMA	Nro OBS	(m/s)	DIR	
				(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	(m/s)	%	%				
ENERO	92.5	5.3	24	7	2.0	1	2.5	36	1.9	13	1.1	8	1.0	9	0.0	0	0.0	0	0.0	0	34	93	7.0	NE
FEBRERO	71.5	4.1	14	7	0.0	0	2.4	40	1.8	7	1.3	5	1.5	7	1.0	1	0.0	0	1.0	1	39	87	4.0	NE
MARZO	98.6			6	5.0	2	2.6	29	2.1	8	1.6	9	1.7	13	2.3	4	0.0	0	1.6	5	30	93	6.0	NE
ABRIL	75.0			7	2.5	2	2.4	26	3.0	7	1.2	10	2.6	9	1.0	2	0.0	0	1.0	2	42	90	7.0	NE
MAYO	100.2			6	1.5	2	3.1	38	2.6	8	2.7	3	2.6	12	3.2	7	0.0	0	0.0	0	31	93	8.0	NE
JUNIO	118.4	6.9	13	5	1.5	2	2.9	24	2.6	23	2.0	1	2.5	14	4.2	11	2.0	1	0.0	0	22	90	7.0	SW
JULIO	145.7	6.9	25	5																				
AGOSTO	143.9			5																				
SEPTIEMBRE	152.2	7.9	6	4	2.3	3	3.9	28	3.6	8	3.0	12	3.5	19	4.0	13	3.0	1	1.0	1	14	90	14.0	NE
OCTUBRE	107.3	6.2	11	6	2.0	2	2.5	22	2.0	15	1.7	3	2.1	13	3.8	5	0.0	0	0.0	0	40	93	7.0	SW
NOVIEMBRE	98.3	4.7	10	6	2.3	3	2.0	24	2.2	13	1.6	6	1.4	9	1.5	2	1.0	1	1.7	3	38	90	5.0	NE
DICIEMBRE	101.6			6	2.0	2	2.4	34	1.9	14	1.7	3	1.3	3	1.0	2	0.0	0	1.3	8	33	93	6.0	NE
VALOR ANUAL	1305.2			6																				

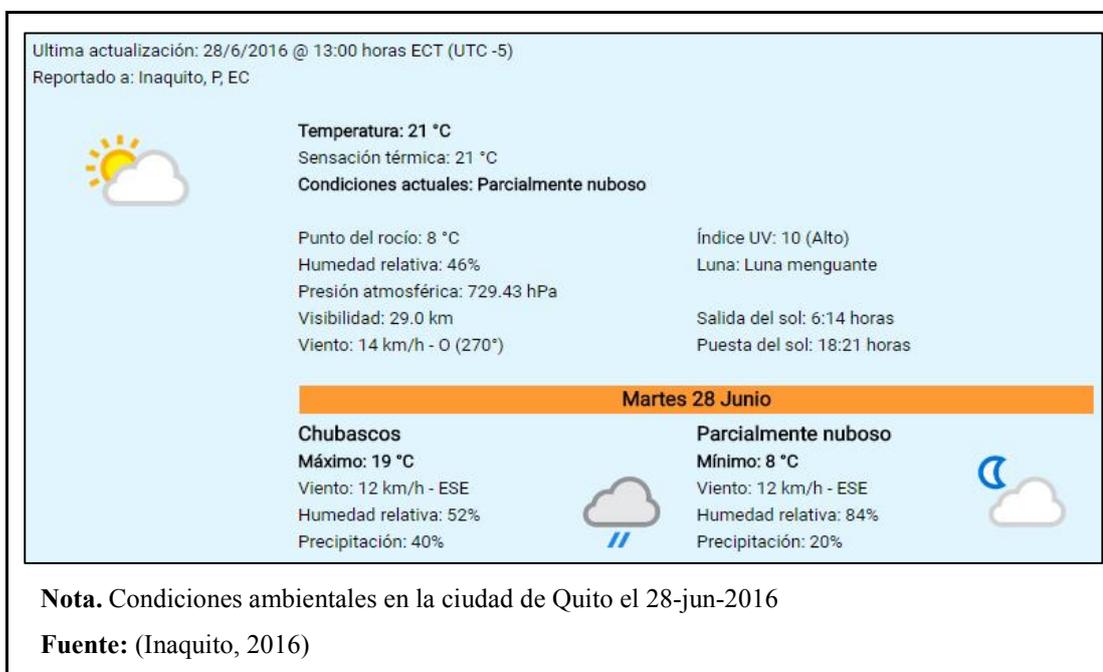
Nota: Velocidades medias y frecuencias de viento para cada mes

Fuente: (INAMHI, 2015)

Anexo 4. Temperatura en la ciudad de Quito



Anexo 5. Condiciones ambientales en la Ciudad de Quito



Anexo 6. Parámetros de selección de batería

	Normal Voltage	12V
	Normal Capacity (20HR)	4AH
Terminal Type	Standard Terminal	F1
	Optional Terminal	-
Container Material	Standard Option	ABS
	Flame Retardant Option (FR)	UL94:VO
Rated Capacity	4.00 AH/0.20A	(20hr, 1.80V/cell, 25°C / 77°F)
	3.72 AH/0.372A	(10hr, 1.80V/cell, 25°C / 77°F)
	3.40 AH/0.68A	(5hr, 1.75V/cell, 25°C / 77°F)
	3.06 AH/1.02A	(3hr, 1.75V/cell, 25°C / 77°F)
	2.51 AH/2.51A	(1hr, 1.60V/cell, 25°C / 77°F)
Max Discharge Current	60A (5s)	
Internal Resistance	Approx 45mΩ	
Discharge Characteristics	Operating Temp. Range	Discharge: -15 ~ 50°C (5 ~ 122°F)
		Charge: 0 ~ 40°C (5 ~ 104°F)
		Storage: -15 ~ 40°C (5 ~ 104°F)
	Nominal Operating Temp. Range	25 ± 3°C (77 ± 5°F)
	Cycle Use	Initial Charging Current less than 1.2A. Voltage 14.4V ~ 15.0V at 25°C (77°F) Temp. Coefficient -30mV/°C
	Standby Use	No limit on Initial Charging Current Voltage 13.5V ~ 13.8V at 25°C (77°F) Temp. Coefficient -20mV/°C
	Capacity affected by Temperature	40°C (104°F) 103%
25°C (77°F) 100%		
0°C (32°F) 86%		
Design Floating Life at 20°C	5 Years	
Self Discharge	Ultracell batteries may be stored for up to 6 months at 25°C(77°F) and then a refresh charge is required. For higher temperatures the time interval will be shorter.	

Nota: Especificaciones principales de la batería de 12 V

Fuente: (Ultracell, s.f.)

Anexo 7. Características de diferentes materiales

Material	Propiedades mecánicas	Densidad	Masa del rotor
Acero inoxidable 304 (e=1.5mm)	Sy = 310 MPA Elongación 30 % en 50mm E = 200 GPA	7850 kg/m ³	36,95 kg
Acero inoxidable 430 (e=1.5mm)	Sy = 270 MPA Elongación 20 % en 50mm E = 200 GPA	7850 kg/m ³	36,95 kg
Lámina galvanizada A653 calibre 14 (e=1.9mm)	$\sigma = 38 \text{ N/mm}^2$ Sy= 230 MPa Elongación 20%	7850 kg/m ³	46,58 kg
Lámina galvanizada A653 calibre 16 (e=1.5mm)	Sy= 230 MPa Elongación 20%	7850 kg/m ³	36,95 kg
Acrílico (PMMA) Álabes (e=4 mm) Tapas (e=4 mm)	Sy = 48 MPa Elongación 5 % E = 2336-3167 MPa	1190 kg/m ³	13,53 kg

Nota: Características de diferentes materiales para el rotor

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

Anexo 8. Propiedades del acrílico PMMA

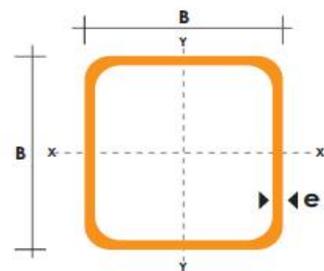
Producto	LÁMINA DE PMMA POLIMETILMETACRILATO				
Aplicaciones	Señalización, cubiertas, domos, protecciones en maquinaria, lámparas separadoras decorativas y de protección, acuarios y piscinas, obras de arte entre otros, exhibidores en punto de venta P.O.P.				
Características	Se destaca frente a otros 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/cm2	D-638			
Resistencia a la rotura	kg/cm2	D-638	562-773	492-773	386
Elongación a la rotura	%	D-638	4,5	5,0	
Módulo de elasticidad	kg/cm2	D-638	24.600-31.000	23000-31.000	
Flexión					
Resistencia en el límite elástico o rotura	kg/cm2	D-790	840-1.300	740-1.300	562
Módulo de elasticidad	kg/cm2	D-790	27.500-33.400	22.800-32.300	17.500
Compresión					
Resistencia a la compresión(ruptura)	kg/cm2	D-695	773-1.330	740-1.260	
Módulo de compresión	kg/cm2	D-695	27.500-33.300	26.000-32.300	

Nota: Plancha de acrílico PMMA para el rotor

Fuente: (idePlas, 2015)

Anexo 9. Tubo estructural cuadrado

DIMENSIONES			AREA	EJES X-Xe Y-Y		
A mm	ESPESOR mm	PESO Kg/m	AREA cm ²	I cm ⁴	W cm ³	i cm
20	1,2	0,72	0,90	0,53	0,53	0,77
20	1,5	0,88	1,05	0,58	0,58	0,74
20	2,0	1,15	1,34	0,69	0,69	0,72
25	1,2	0,90	1,14	1,08	0,87	0,97
25	1,5	1,12	1,35	1,21	0,97	0,95
25	2,0	1,47	1,74	1,48	1,18	0,92
30	1,2	1,09	1,38	1,91	1,28	1,18
30	1,5	1,35	1,65	2,19	1,46	1,15
30	2,0	1,78	2,14	2,71	1,81	1,13
40	1,2	1,47	1,80	4,38	2,19	1,25
40	1,5	1,82	2,25	5,48	2,74	1,56
40	2,0	2,41	2,94	6,93	3,46	1,54
40	3,0	3,54	4,44	10,20	5,10	1,52
50	1,5	2,29	2,85	11,06	4,42	1,97
50	2,0	3,03	3,74	14,13	5,65	1,94
50	3,0	4,48	5,61	21,20	8,48	1,91
60	2,0	3,66	3,74	21,26	7,09	2,39
60	3,0	5,42	6,61	35,06	11,69	2,34
75	2,0	4,52	5,74	50,47	13,46	2,97
75	3,0	6,71	8,41	71,54	19,08	2,92
75	4,0	8,59	10,95	89,98	24,00	2,87
100	2,0	6,17	7,74	122,99	24,60	3,99
100	3,0	9,17	11,41	176,95	35,39	3,94
100	4,0	12,13	14,95	226,09	45,22	3,89
100	5,0	14,40	18,36	270,57	54,11	3,84



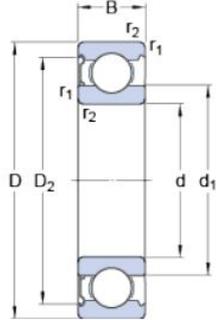
Nota: Dimensiones de tubos cuadrados

Fuente: (Dipac, s.f)

Anexo 10. Selección de rodamientos

Rodamiento de bola de hilera única para el soporte A

Dimensiones 6302-Z



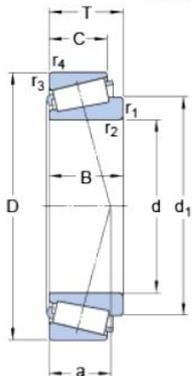
d	15	mm
D	42	mm
B	13	mm
d_1	≈ 23.7	mm
D_2	≈ 36.23	mm
$r_{1,2}$	min. 1	mm

Datos del cálculo

Capacidad de carga dinámica básica	C	11.9	kN
Capacidad de carga estática básica	C_0	5.4	kN
Carga límite de fatiga	P_u	0.228	kN
Velocidad de referencia		38000	r/min
Velocidad límite		24000	r/min

Rodamiento de rodillos cónicos para el soporte B

Dimensiones 03062/03162/Q



d	15.875	mm
D	41.275	mm
T	14.288	mm
d_1	≈ 28.1	mm
B	14.681	mm
C	11.112	mm
$r_{1,2}$	min. 1.3	mm
$r_{3,4}$	min. 2	mm

Calculation data

Basic dynamic load rating	C	22	kN
Basic static load rating	C_0	21.2	kN
Fatigue load limit	P_u	2.1	kN
Reference speed		20000	r/min
Limiting speed		20000	r/min

Nota: Selección de rodamiento.

Fuente: (SKF, 2006)

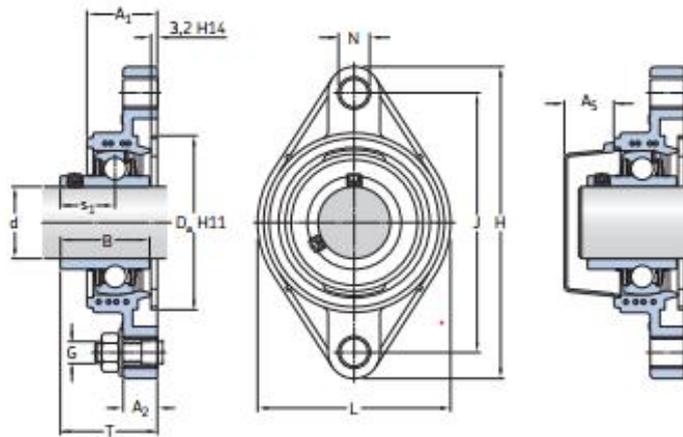
Anexo 11. Selección de rodamientos

Rodamiento	Tipo	Diámetro nominal [mm]	Diámetro Exterior [mm]	Altura [mm]	Referencia
A	De bolas de ranura, una sola hilera	15	42	13	Serie 6302-Z
B	De rodillos cónicos			14.288	Serie 03062/03162/Q

Nota: Selección de rodamientos

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

Anexo 12. Selección de chumacera



Dimensions													Basic load ratings		Fatigue load limit	Limiting speed with shaft tolerance h6	Designation
d	A ₁	A ₂	B	D ₂	H	J	L	N	G	s ₁	T	C	C ₀	P _e	r/min	Bearing unit	
mm													kN	kN	kN	r/min	-
12	26	11	27,4	50,8	98,5	76,5	57	11,5	10	15,9	32,9	9,56	4,75	0,2	9 500	FYTB 12 TF	
15	26	11	27,4	50,8	98,5	76,5	57	11,5	10	15,9	32,9	9,56	4,75	0,2	9 500	FYTB 15 TF	

Nota: Selección de rodamiento en función del eje.

Fuente: (SKF, 2006)

Anexo 13. Análisis de esfuerzos del rotor eólico

Stress Analysis Report



Analyzed File:	simulación rotor.iam
Autodesk Inventor Version:	2014 SP2 (Build 180246200, 246)
Creation Date:	22/01/2017, 19:58
Simulation Author:	MARCO
Summary:	

Project Info (iProperties)

Summary

Author	MARCO
--------	-------

Project

Part Number	simulación rotor
Designer	MARCO
Cost	0,00 €
Date Created	17/09/2016

Physical

Mass	11,3405 kg
Area	3998480 mm ²
Volume	8075710 mm ³
Center of Gravity	x=-131,761 mm y=42,5667 mm z=-47,8221 mm

Simulación de espesor de alabes

General objective and settings:

Design Objective	Single Point
Simulation Type	Static Analysis
Last Modification Date	22/01/2017, 22:03
Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No
Separate Stresses Across Contact Surfaces	No
Motion Loads Analysis	No

Mesh settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	0,2
Min. Element Size (fraction of avg. size)	0,2
Grading Factor	1,5
Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	No

Material(s)

Name	PMMA Plastic	
General	Mass Density	1,188 g/cm ³
	Yield Strength	48,9 MPa
	Últimate Tensile Strength	79,8 MPa
Stress	Young's Modulus	2,74 GPa
	Poisson's Ratio	0,355 ul
	Shear Modulus	1,01107 GPa
Part Name(s)	rotor simulacion.ipt	

Name	Steel, Carbon 4340	
General	Mass Density	7,87 g/cm ³
	Yield Strength	350 MPa
	Ultimate Tensile Strength	420 MPa
Stress	Young's Modulus	200 GPa
	Poisson's Ratio	0,29 ul
	Shear Modulus	77,5194 GPa
Part Name(s)	eje.ipt	

Results

Reaction Force and Moment on Constraints

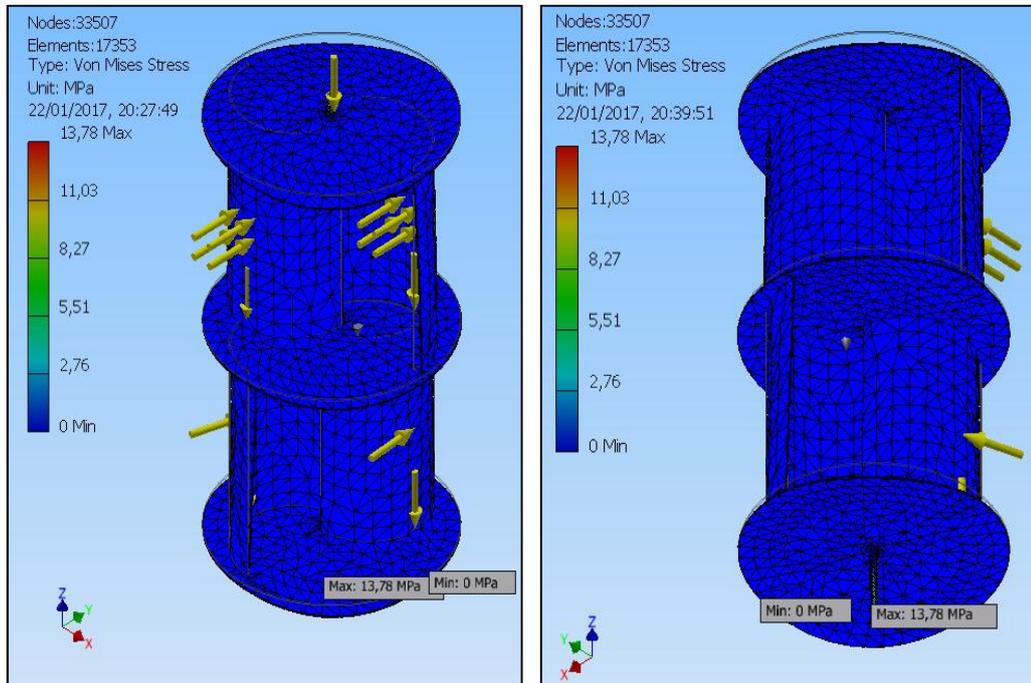
Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	265,782 N	-2,41049 N	4,79014 N m	4,74169 N m
		-50,591 N		0,580158 N m
		260,927 N		-0,353877 N m

Result Summary

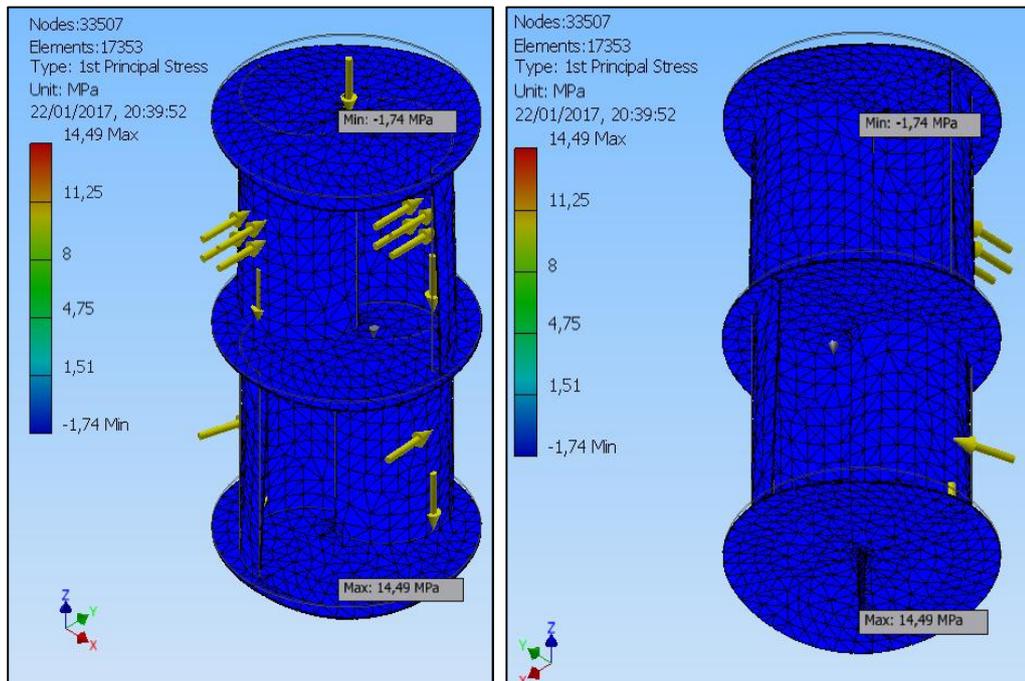
Name	Minimum	Maximum
Volume	8075710 mm ³	
Mass	11,3405 kg	
Von Mises Stress	0,0033946 MPa	13,7813 MPa
1st Principal Stress	-1,74146 MPa	14,4929 MPa
3rd Principal Stress	-14,9146 MPa	1,99676 MPa
Displacement	0 mm	1,4157 mm
Safety Factor	12,8419 ul	15 ul

Figures

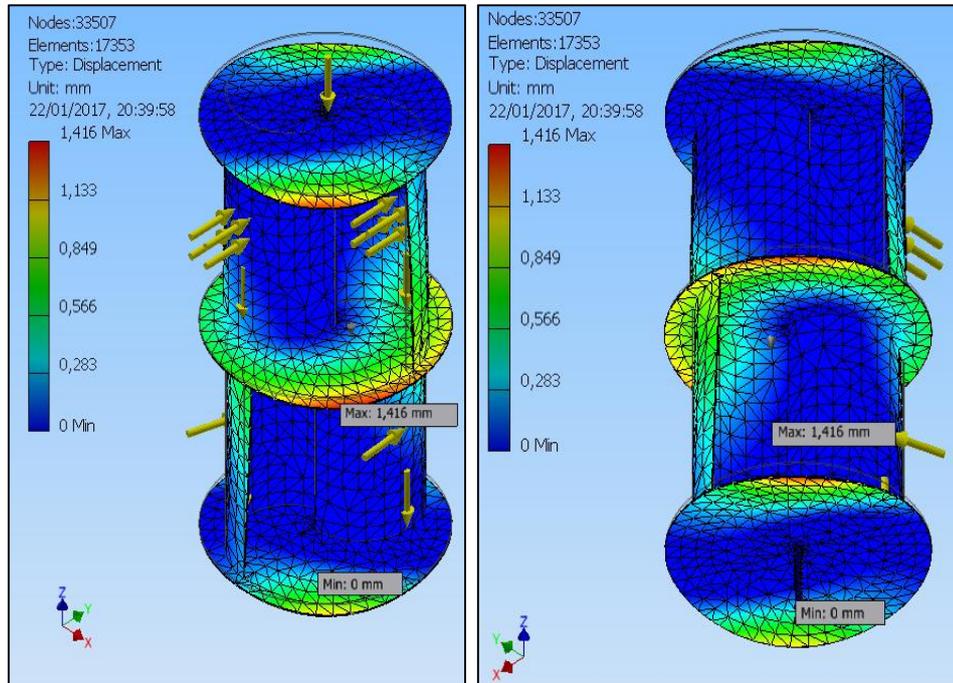
Von Mises Stress



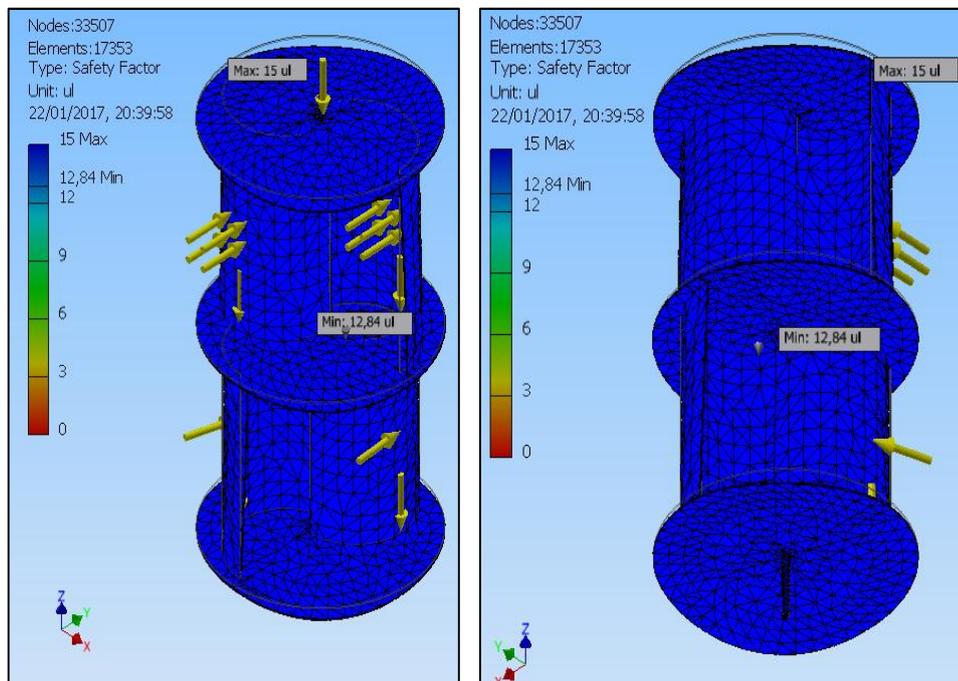
1st Principal Stress



Displacement



Safety Factor



Nota: Simulación de esfuerzos al rotor Savonius

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

Anexo 14. Análisis de esfuerzos del eje del rotor

Stress Analysis Report



Analyzed File:	Simulación eje.iam
Autodesk Inventor Version:	2014 SP2 (Build 180246200, 246)
Creation Date:	20/01/2017, 22:11
Simulation Author:	MARCO
Summary:	

Project Info (iProperties)

Summary

Author	MARCO
--------	-------

Project

Part Number	Simulación eje
Designer	MARCO
Cost	0,00 €
Date Created	17/09/2016

Physical

Mass	2,05706 kg
Area	65747,3 mm ²
Volume	261381 mm ³
Center of Gravity	x=-2,86738 mm y=4,21147 mm z=0 mm

Simulation eje

General objective and settings:

Design Objective	Single Point
Simulation Type	Static Analysis
Last Modification Date	20/01/2017, 22:06
Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No
Separate Stresses Across Contact Surfaces	No
Motion Loads Analysis	No

Mesh settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	0,2
Min. Element Size (fraction of avg. size)	0,2
Grading Factor	1,5

Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	No
Use part based measure for Assembly mesh	Yes

Material(s)

Name	Steel, Alloy 4340	
General	Mass Density	7,85 g/cm ³
	Yield Strength	470 MPa
	Últimate Tensile Strength	745 MPa
Stress	Young's Modulus	205 GPa
	Poisson's Ratio	0,3 ul
	Shear Modulus	78,8462 GPa
Part Name(s)	eje.ipt	

Results

Reaction Force and Moment on Constraints

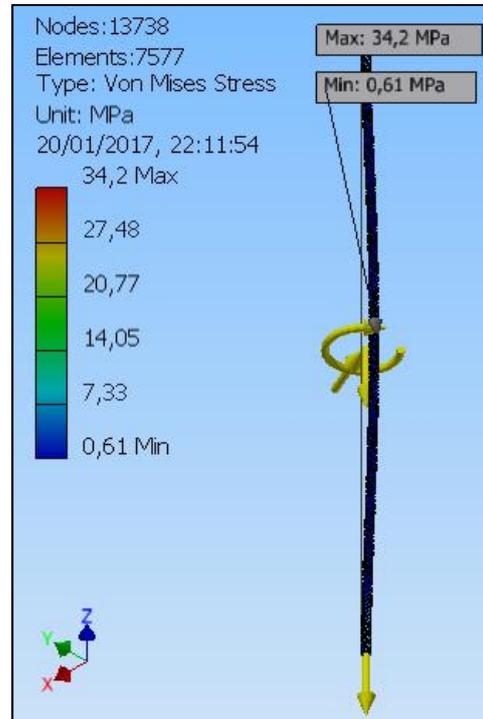
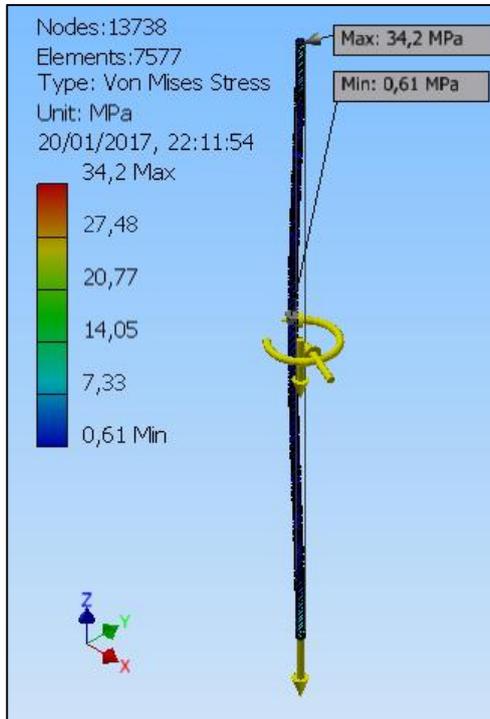
Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	170,118 N	49,7343 N	2,19406 N m	0 N m
		-21,0357 N		0 N m
		169,905 N		-2,19406 N m

Result Summary

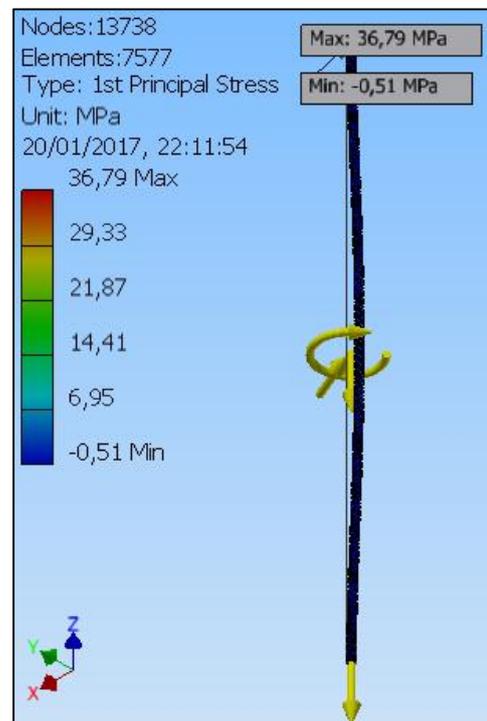
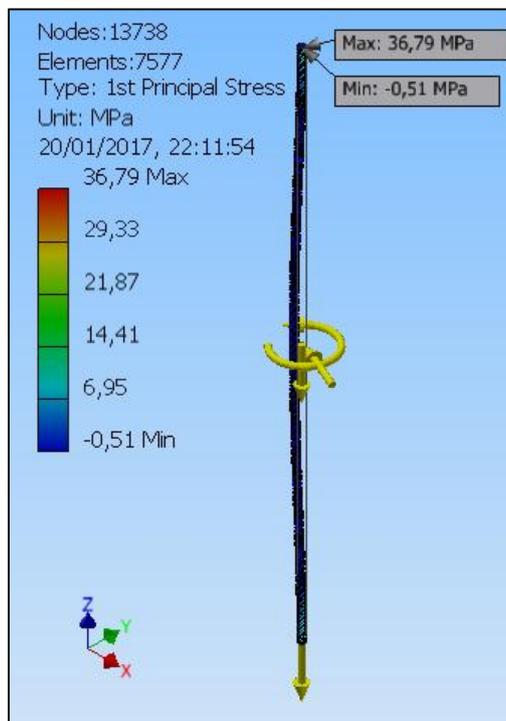
Name	Minimum	Maximum
Volume	261381 mm ³	
Mass	2,05184 kg	
Von Mises Stress	0,610012 MPa	34,2036 MPa
1st Principal Stress	-0,511324 MPa	36,7931 MPa
3rd Principal Stress	-24,8041 MPa	2,33642 MPa
Displacement	0 mm	0,645314 mm
Safety Factor	7,30917 ul	15 ul

Figures

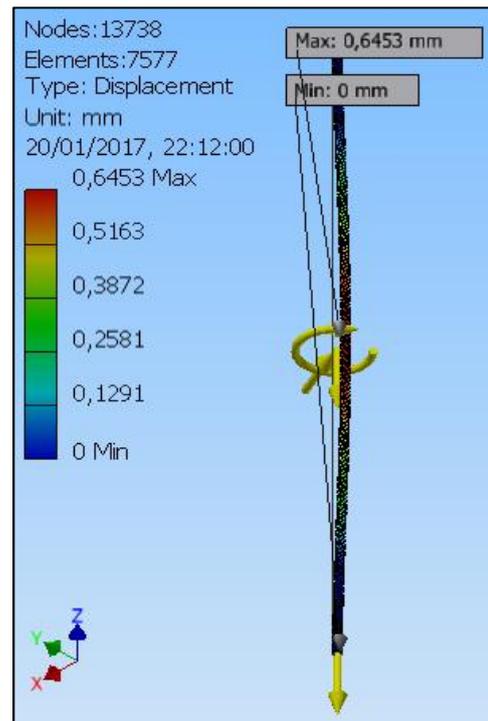
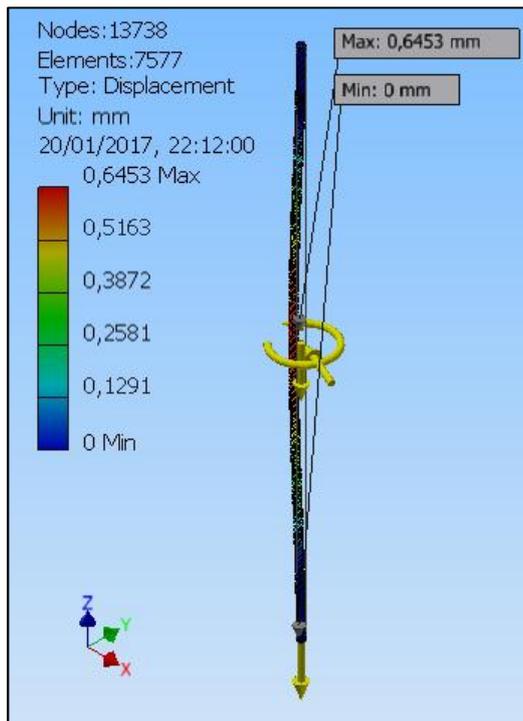
Von Mises Stress



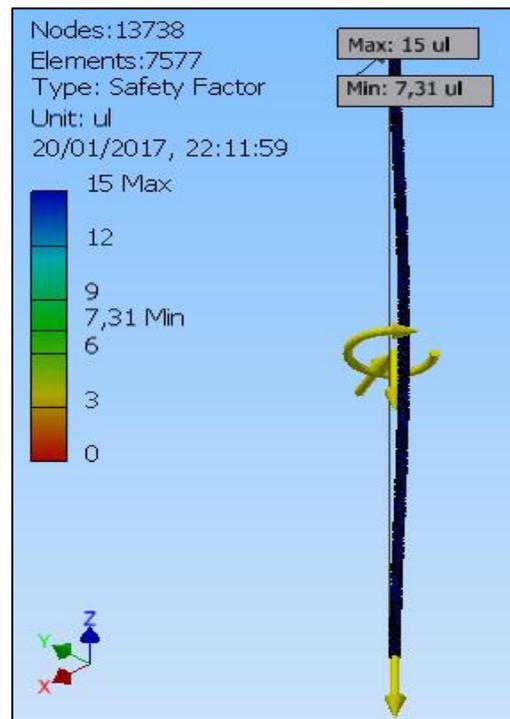
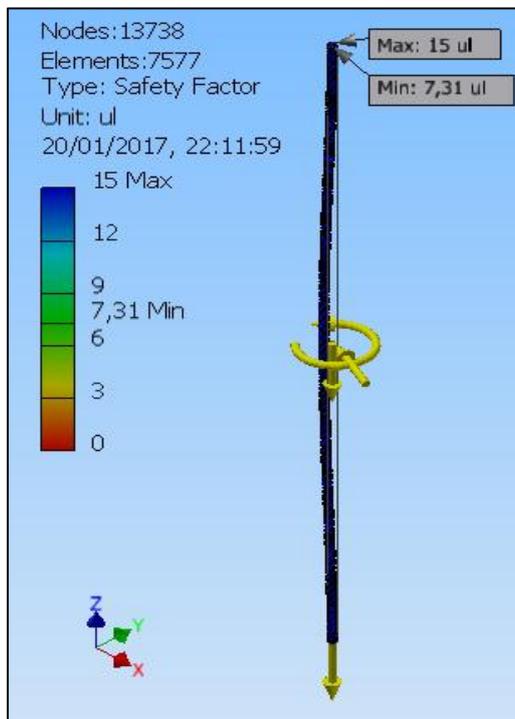
1st Principal Stress



Displacement



Safety Factor



Nota: Simulación de esfuerzos al eje del rotor

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

Anexo 15. Análisis de esfuerzos de la estructura de soporte

Stress Analysis Report



Analyzed File:	soporte.iam
Autodesk Inventor Version:	2014 SP2 (Build 180246200, 246)
Creation Date:	20/01/2017, 21:58
Simulation Author:	MARCO
Summary:	

Project Info (iProperties)

Summary

Author	MARCO
--------	-------

Project

Part Number	soporte
Designer	MARCO
Cost	0,00 €
Date Created	16/09/2016

Physical

Mass	19,8084 kg
Area	2526750 mm ²
Volume	2516950 mm ³
Center of Gravity	x=166,294 mm y=-160,761 mm z=1,81163 mm

Simulation estructura

General objective and settings:

Design Objective	Single Point
Simulation Type	Static Analysis
Last Modification Date	20/01/2017, 21:47
Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No
Separate Stresses Across Contact Surfaces	No
Motion Loads Analysis	No

Mesh settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	1
Min. Element Size (fraction of avg. size)	1
Grading Factor	5
Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	Yes
Use part based measure for Assembly mesh	No

Material(s)

Name	Steel, Carbon	
General	Mass Density	7,87 g/cm ³
	Yield Strength	350 MPa
	Últimate Tensile Strength	420 MPa
Stress	Young's Modulus	200 GPa
	Poisson's Ratio	0,29 ul
	Shear Modulus	77,5194 GPa
Part Name(s)	estructura.ipt Skeleton0001.ipt DIN 30 x 30 x 2	

Results

Reaction Force and Moment on Constraints

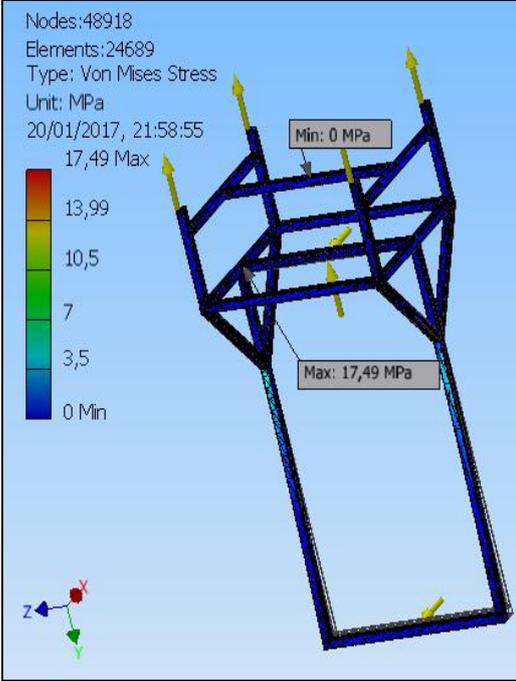
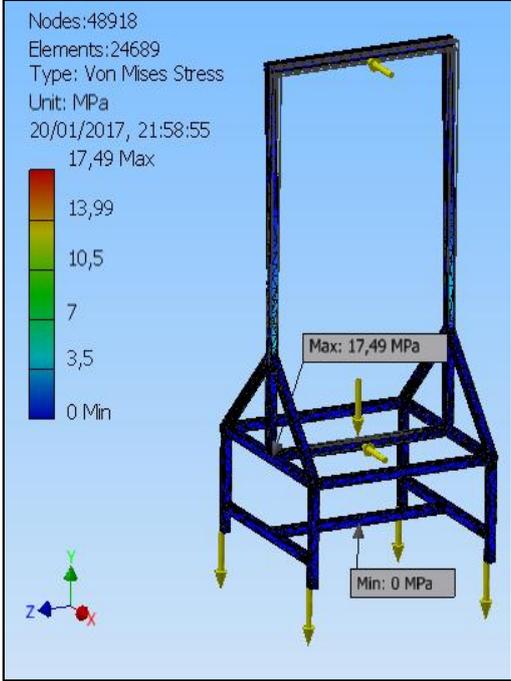
Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	541,563 N	54 N	53,2436 N m	-0,511099 N m
		538,864 N		-0,509628 N m
		0 N		-53,2387 N m

Result Summary

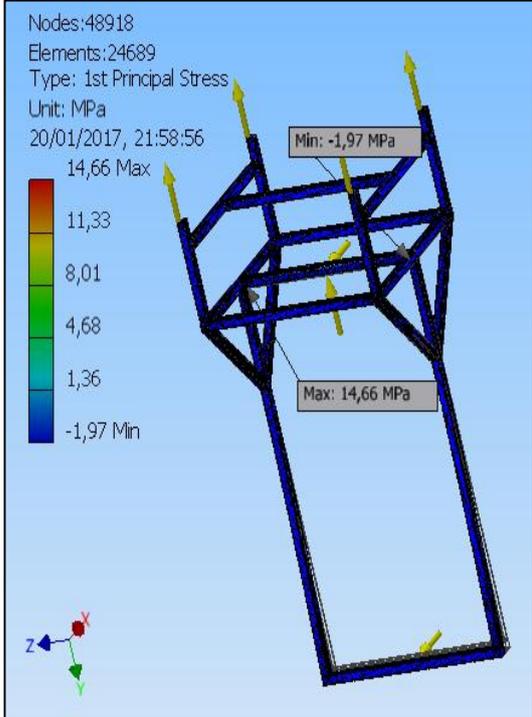
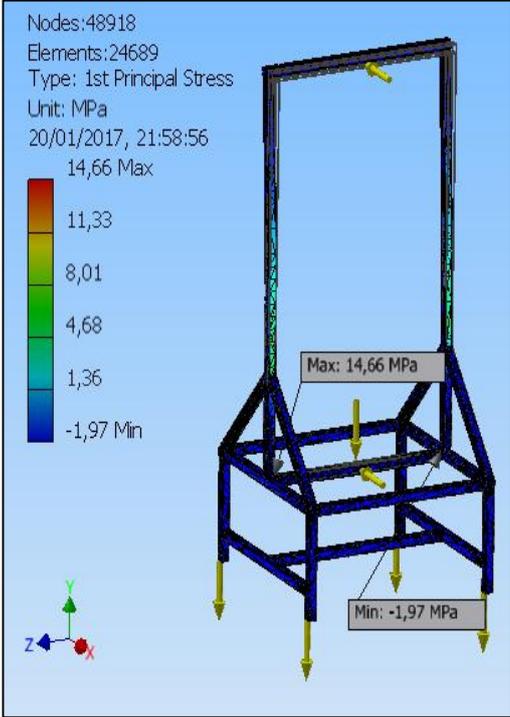
Name	Minimum	Maximum
Volume	2516950 mm ³	
Mass	19,8084 kg	
Von Mises Stress	0,00446753 MPa	17,4895 MPa
1st Principal Stress	-1,97019 MPa	14,66 MPa
3rd Principal Stress	-15,9925 MPa	5,1216 MPa
Displacement	0 mm	0,790877 mm
Safety Factor	15 ul	15 ul

Figures

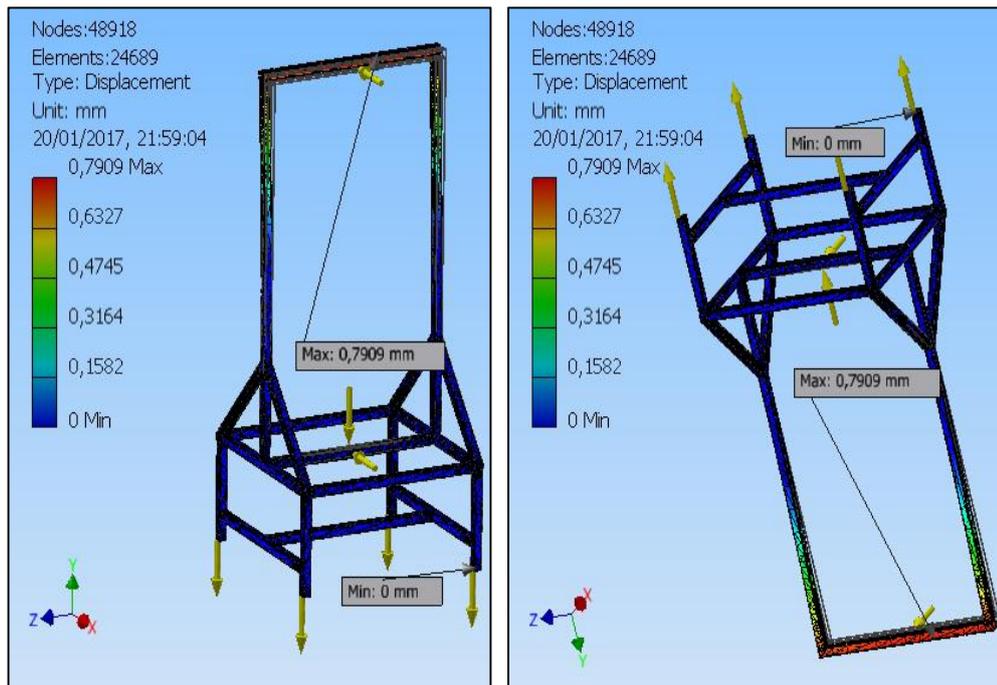
Von Mises Stress



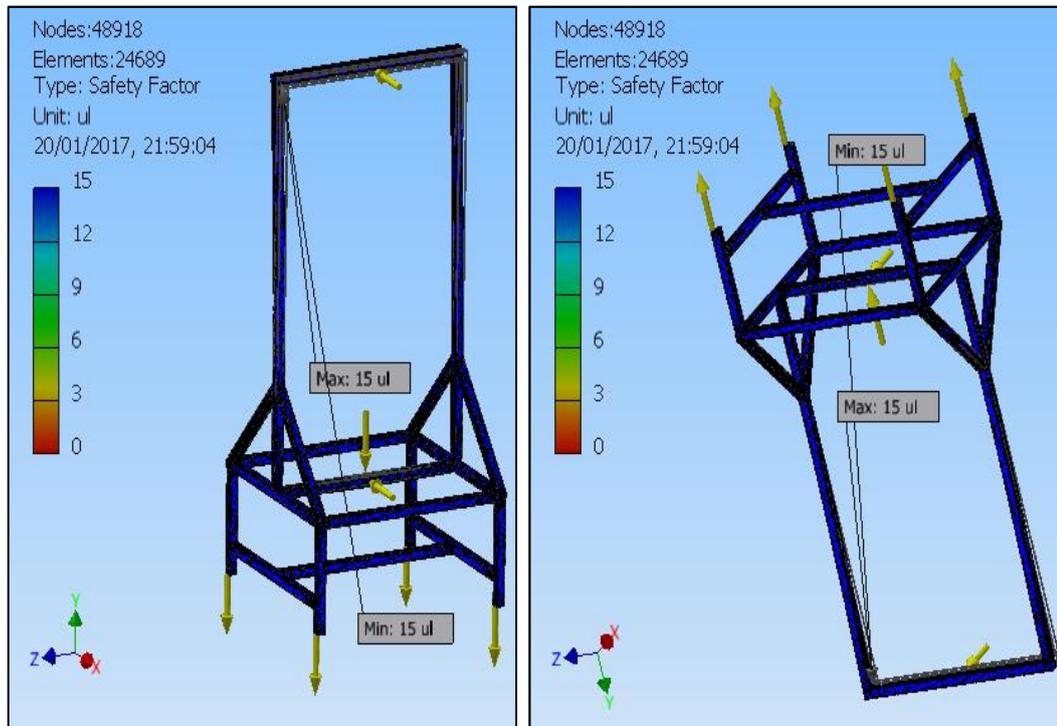
1st Principal Stress



Displacement



Safety Factor



Nota: Simulación de esfuerzos a la estructura de soporte

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

Anexo 16. Reporte de la construcción del aerogenerador eólico tipo Savonius

Rotor eólico tipo Savonius	
Descripción	Figura
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Los álabes y tapas del rotor se realiza mediante el corte láser en maquina CNC, el material es de acrílico según las dimensiones calculadas. El proceso de corte permite realizar un acabado de mejor calidad dejando un borde liso. ✓ La forma de los álabes se realiza calentando el acrílico en un horno a 45 °C para luego colocar en el molde con la forma semicircular. ✓ En las tapas se elabora cortes internos de forma semicircular para facilidad de montaje tapa - álabes. 	 
Estructura de soporte	
Descripción	Figura
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Para la unión de los soportes verticales y horizontales que constituyen la estructura se utiliza el proceso de soldadura por arco eléctrico. ✓ En la base se coloca una plancha corrugada para la instalación de los componentes eléctricos. ✓ Se empleó pintura para protección de la corrosión de la estructura. 	

Eje del rotor	
Descripción	Figura
<p>✓ El eje se adquiere del $\varnothing 16$ mm y se realiza el corte en frío de las dimensiones calculadas, adicional se realiza un pulido de la superficie con lija fina.</p>	
Abrazadera de sujeción / eje-rotor	
Descripción	Figura
<p>✓ Las tres abrazaderas se realizan en aluminio, tienen cuatro perforaciones roscadas M6x1, en la parte superior para ensamblaje con las tapas, y una perforación roscada M8x1.25 en la parte lateral para un prisionero.</p>	
Componentes normalizados	
Descripción	Figura
<p>✓ Para el ensamblaje del prototipo se emplean diferentes elementos normalizados, tales como: chumaceras, pernos de diferentes dimensiones, arandelas y tuercas, mismas que fueron adquiridas localmente.</p>	

Instrumentos de medición	
Descripción	Figura
<p>✓ El anemómetro portátil se adquiere para medir el viento en cualquier posición de entrada al rotor eólico Savonius y la temperatura. Marca BENETCH, código CR2032, rango de medición de 0 a 30 (m/s)</p>	
<p>✓ Tacómetro Digital, se utiliza para medir las revoluciones del rotor eólico, Código DT-2235A, de la Universidad Politécnica Salesiana, rango de medición 1 – 19.999 (rpm)</p>	
<p>✓ Medidor de Voltaje, se utiliza para medir el voltaje trifásico AC del generador eléctrico a diferentes velocidades de viento, rango de medición de 0- 20 (V)</p>	
<p>✓ El generador eléctrico genera un voltaje de 12 V-AC, depende de las revoluciones que tenga el rotor eólico, a diferentes velocidades de viento, Marca. ELECROW, rango de 0 – 15 (W)</p>	
<p>✓ La batería es necesaria para almacenar energía que genera el rotor, este se encuentra sobre la placa de la estructura, en este caso no se instala debido que para las pruebas del prototipo solo se necesita el voltaje generado, Marca TUREON, 4 Ah-12V</p>	

Ensamblaje del sistema eólico	
Descripción	Figura
<ul style="list-style-type: none"> ✓ En el rotor se colocan las tres abrazaderas, las cuales están ubicadas en la parte superior, intermedia y al final de rotor. ✓ Las abrazaderas están acopladas al rotor cada una con cuatro pernos. ✓ Se instala el eje en el rotor y se asegura mediante el prisionero. ✓ En la estructura se colocan las chumaceras en la parte superior e inferior de la estructura. ✓ Armado el conjunto rotor - eje se procede la instalación en la estructura. ✓ Se realiza la instalación del generador mediante un acople que se encuentra conectado al eje del rotor, y se acopla en la base de la estructura mediante 5 pernos. ✓ Como último paso se realiza la instalación eléctrica, en este paso se conecta un controlador de carga para evitar sobrecargas a la batería, se conecta el generador eléctrico a un visor de voltaje para medir el voltaje trifásico. 	   
<p>Observaciones: Durante la instalación se debe tener en cuenta la alineación y balaceo del rotor eólico con el generador eléctrico, para evitar problemas de vibración.</p>	

Nota: reporte de la construcción del prototipo

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

Anexo 17. Catalogo acero AISI SAE 4340

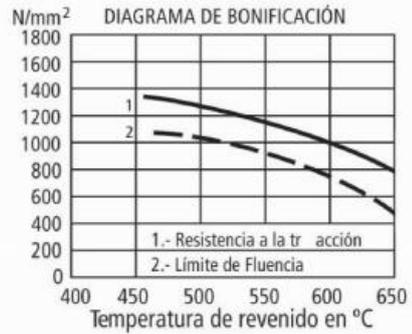
VCN	AISI : ~ 4340 H DIN : 34 Cr Ni Mo 6 WN°: 1.6582
-----	---

Tipo de aleación promedio : 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.

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.		Límite de fluencia N/mm²	Resistencia a la tracción N/mm²	Elongación (Lo = 5d) % mín.	Estricción % mín.	Resiliencia según DVM Joule
		desde	hasta					
800	248	16	16	980	1180 - 1380	9	40	41
		16	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

Nota: Catalogo de acero AISI SAE 4340 para el eje del rotor

Fuente: (Bohler, 2015)

Anexo 18. Pruebas de campo realizado al prototipo

PROTOTIPO DE AEROGENERADOR EOLICO TIPO SAVONIUS					
Fecha:		28 de Enero del 2016			
Hora inicio:		15H00	Hora final:		17H00
Lugar de pruebas:		Sector: La Gatazo, calle OE5U			
Condiciones climáticas					
Temperatura		Precipitación		Nubosidad	
17 (°C)		0 (mm)		Despejado	
PRUEBAS DE CAMPO					
No de medición	Velocidad de viento (m/s)	Voltaje (V)	No de medición	Velocidad de viento (m/s)	Voltaje (V)
1	0,9	3	31	4,3	12
2	1,3	5,4	32	4,4	9,6
3	1,3	3,9	33	4,5	10,5
4	1,6	5,1	34	4,8	10,8
5	1,7	7,2	35	4,8	10,2
6	1,8	4,8	36	4,9	11,7
7	2	4,8	37	4,9	11,1
8	2	6	38	5	13,5
9	2,1	5,4	39	5	10,8
10	2,2	6,9	40	5,1	12
11	2,4	5,7	41	5,2	10,8
12	2,6	6,6	42	5,3	12,3
13	2,8	7,8	43	5,3	12
14	3	9,9	44	5,5	11,4
15	3,1	9	45	5,6	12,3
16	3	10,5	46	5,7	11,7
17	3,3	10,8	47	5,8	12
18	3,4	8,4	48	5,9	12,3
19	3,4	11,4	49	6	12
20	3,5	7,5	50	6	12,9
21	3,6	6,6	51	6,2	12,3
22	3,7	10,5	52	6,3	12,9
23	3,7	9	53	6,3	13,2
24	3,8	9,6	54	6,8	11,7
25	3,8	11,4	55	6,8	12,9
26	3,8	11,7	56	6,9	13,2
27	3,9	11,4	57	7	15
28	4	8,4	58	7	12,3
29	4,2	11,1	59	7,4	13,5
30	4,2	12	60	7,4	14,7

Nota: Prototipo sometido a diferentes velocidades de viento

Fuente: (Defaz & Pallasco, 2016)

Anexo 19. Licencia Inventor Professional 2014



Autodesk Education Community

Dear Marco Pallasco,

Licensee's product license information:

Product:	Inventor Professional 2014
License Type:	Education Stand-alone
Access Type:	Single-user
Authorized Usage:	Install on up to 2 personal devices*
Product Key:	797F1
Serial Number:	900-40551803
Term:	3-year term
Licensee:	Marco Pallasco

* Your Autodesk Account may display this usage right as 1 seat.

During installation, enter this product key and serial number. The first time you start the product, you will be prompted to activate your license. This date marks the start of your three-year term.

Getting started:

[Education Resources for students & educators](#)
[Autodesk Design Academy](#)

Thank you,
Autodesk Education Team

AUTODESK LICENSE TERMS AND CONDITIONS

This Autodesk email is designed solely to confirm the number and type of license(s) of the specific Autodesk Software Product identified above ("Software") licensed by Customer. Receipt by Customer of this email does include the right to receive media containing Software object code or documentation. Customer must legally acquire the Software package which includes the media containing the Software object code. Customer's use of the Software is governed by the applicable Autodesk software license agreement included with, or incorporate in, the Software. The terms of such Autodesk software license agreement are incorporated herein by reference.

In the event that Customer changes the number of licenses of the Software under the Serial Number set forth above, this email shall automatically terminate. Customer may request a revised email reflecting such change.

Autodesk accepts no liability if this email incorrectly state Customer's maximum concurrent Authorized Users devices. If Customer's maximum concurrent Authorized Users or devices is incorrectly stated on this email, Customer shall inform Autodesk in writing, and subject to confirmation by Autodesk, as Autodesk may reasonably require, Autodesk shall issue an amended email to Customer stating the maximum concurrent Authorized Users or devices. This email shall automatically terminate in the event of termination of the software license agreement for any reason.

ANY TAMPERING WITH THIS AUTODESK EMAIL SHALL RENDER BOTH THIS EMAIL, AND SOFTWARE LICENSE(S) CONFIRMED BY THIS EMAIL, TERMINATED WITH IMMEDIATE EFFECT.

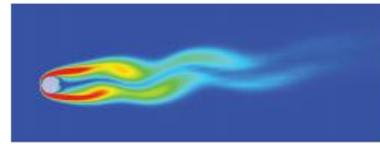
Anexo 20. Licencia ANSYS Fluent 16.2

ANSYS Student

License

The renewable six-month product license is free and can be downloaded and used by students anywhere in the world. It provides access to versions of ANSYS® Mechanical™, ANSYS® CFD™, ANSYS® Autodyn®, ANSYS® Workbench™, ANSYS® DesignModeler™ and ANSYS® DesignXplorer™ that are limited only in the size of the problems that can be solved. ANSYS® Student can be installed on any supported MS Windows 64-bit machine.

The ANSYS Student License is for personal educational purposes. The analysis work performed with ANSYS Student must be non-proprietary, and the product may not be used for competitive analysis (such as benchmarking) or for any commercial work.



Unsteady flow around a cylinder¹

Release Version 16.2

- Simulation Applications: Release 16.2
- ANSYS License Manager components: Release 16.2

License Type

- 6 month lease

Media

- Download only
- Download size: ~4 GBytes WinZip file

Supported Platforms and Operating Systems

- Microsoft Windows 7 64-bit
- Microsoft Windows 8 64-bit

Minimum Hardware Requirements

- Processor(s): Workstation Class
- 4 GByte RAM
- 25 GByte hard drive space
- Computer must have a physical C:/™ drive present
- Graphics card and driver: Professional workstation class 3D OpenGL-capable

Bundled Applications

- ANSYS® Workbench™
- ANSYS® Multiphysics™
- ANSYS® Mechanical™
- ANSYS® Autodyn®
- ANSYS® CFD™ (ANSYS® CFX™ and ANSYS® Fluent™)
- ANSYS® Meshing™ and Extended Meshing
- ANSYS® DesignModeler™
- ANSYS® DesignXplorer™

ANSYS® HPC (High Performance Computing)

- Support for up to 16 cores for HPC solutions

Geometry Import

- Neutral format import IGES, STEP
- Parasolid (Native within ANSYS® DesignModeler™)

Numerical Limits

- | | | |
|--------------|---------|----------------|
| • Structural | 32,000 | Nodes/Elements |
| • Fluids | 512,000 | Nodes/Cells |

Workbench Analysis Systems

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| • Design Assessment | • Random Vibration |
| • Electric | • Response Spectrum |
| • Explicit Dynamics | • Rigid Dynamics |
| • Fluid Flow (CFX) | • Shape Optimization |
| • Fluid Flow (Fluent) | • Static Structural |
| • Harmonic Response | • Steady-State Thermal |
| • Linear Buckling | • Thermal-Electric |
| • Magnetostatic | • Transient Structural |
| • Modal | |



ANSYS, Inc.
www.ansys.com
ansysinfo@ansys.com
866.267.9724

© 2015 ANSYS, Inc.
All Rights Reserved.

PLANOS