

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL CON GUÍA “PASO A PASO”, PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN UNA FINCA DE 2000 M².

MARIO FERNANDO ALMANZA VARGAS
NICOLAS RODRIGUEZ RIBERO

FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA INGENIERIA MECANICA
BOGOTA DC
2020

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL CON GUÍA “PASO A PASO”, PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN UNA FINCA DE 2000 M².

MARIO FERNANDO ALMANZA VARGAS
NICOLAS RODRIGUEZ RIBERO

Proyecto de trabajo de grado para optar el título de
INGENIERO MECÁNICO

FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA INGENIERIA MECANICA
BOGOTA DC
2020

Nota de aceptación:

Ing. Miguel Alfonso Morales Granados

Ing. Libardo Enrique Mendoza Geney

Bogotá D.C., Febrero de 2.020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

Dr. Mario Posada Garcia-Peña

Vicerrector de Desarrollo y Recursos humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrector Académico y de Posgrados (E)

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director del Departamento de Ingeniería Mecánica

Ing. Carlos Mauricio Veloza Villamil

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

DEDICATORIA

Este trabajo de grado lo dedico a Dios por guiarme en todo momento y darme la fortaleza de terminar mi carrera profesional. A mis padres, Luis Fernando Almanza Acosta y Audolina Vargas Alvarado, por brindarme su apoyo incondicional y gran esfuerzo; a mi hermana Lina María Almanza Vargas que a pesar de la distancia siempre tenía una voz de aliento para mí con valiosos consejos y por estar dispuesta a todo por ver en mí un gran hombre y profesional.

Mario Fernando Almanza Vargas

Dedico el presente proyecto de grado a Dios, a mis padres Hernán Javier Rodríguez Pérez y Elína Ribero Gualdrón, gracias por guiarme en cada paso de mi vida, que gracias a ellos he podido terminar esta etapa de mi vida, gracias por su apoyo condicional durante mi formación como Ingeniero Mecánico, gracias por la paciencia y comprensión que han tenido, por guiarme y acompañarme durante esta etapa de mi vida, a mis amigos que me apoyaron en cada instante y estuvieron presentes en esta etapa de vida.

Nicolás Rodríguez Ribero

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la dedicación y esmero de todos los profesores por compartir sus conocimientos, los cuales fueron indispensables en el proceso de aprendizaje. A nuestros padres por su apoyo incondicional, por los esfuerzos que hicieron para cumplirnos el sueño de ser profesionales. A nuestros amigos y compañeros por todos los buenos momentos que pasamos, por el apoyo que nos brindaron, gracias a todos.

CONTENIDO

	pàg.
RESUMEN	19
INTRODUCCION	20
OBJETIVOS	22
1. GENERALIDADES TEORICAS	23
1.1 ANTECEDENTES	23
1.2 LOS AEROGENERADORES	24
1.3 CLASIFICACION DE LOS AEROGENERADORES	24
1.3.1 Clasificación según su eje de rotación.	25
1.3.1.1 Aerogeneradores de eje vertical.	25
1.3.1.2 Aerogeneradores de eje horizontal.	28
1.3.1.3 Clasificación según el tamaño y la potencia	29
1.4 EVOLUCIÓN DE LOS AEROGENERADORES	30
1.5 SITUACIÓN ACTUAL	30
1.5.1 Potencia del viento	31
1.5.1.1 Potencia de la fórmula del viento	32
1.5.2 MEDICIÓN DEL VIENTO	32
1.5.2.1 ANEMÓMETRO	32
1.5.2.2 APLICACIONES	34
1.6 VIENTOS EN LAS REGIONES DE COLOMBIA	35
1.6.1 Clima de colombia	35
1.6.2 Catitud	36
1.6.3 Altitud	36
1.6.4 Temperatura en colombia	37
1.6.6 Vientos en colombia	38
1.6.7 Lluvias o precipitaciones en colombia	39
2. CONDICIONES CLIMATICAS.	41
2.1 RESULTADOS OBTENIDOS	41
2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS VIENTOS	43
2.2.1 Potencial eólico	49
2.3 ROSA DE LOS VIENTOS	52
3. CONCEPTUALIZACION Y PARAMETRIZACION	55
3.1 SISTEMAS Y COMPONENTES DEL AEROGENERADOR	55
3.1.1 Sistema de potencia	55
3.1.1.1 Rotor	55
3.1.1.2 Alabe	56
3.1.1.3 Brazo	56
3.1.1.4 Eje	57
3.1.1.5 Soportes del eje	57

3.1.1.6 Rodamientos	58
3.1.2 Sistema de generacion	58
3.1.2.1 Alternador	58
3.1.3 Sistema estructural	59
3.1.3.1 Torre	59
3.1.4 Sistema de control	60
3.1.4.1 Freno	60
3.2 DISEÑO CONCEPTUAL	61
4. SELECCIÓN PERFIL AERODINAMICO	62
4.1 ALTERNATIVAS DE SOLUCION	63
4.1.1 Naca 0024	64
4.1.2 Naca 0018	64
4.1.3 Naca 0012	65
4.2 SELECCIÓN ALTERNATIVA	66
5. CONSIDERACION AERODINÁMICAS	69
5.1 VELOCIDAD RELATIVA DEL VIENTO	69
5.2 FUNCIÓN PARA LA SECCIÓN AGUAS ARRIBA.	71
6. DISEÑO DETALLADO	75
6.1 PARAMETROS DE OPERACION	77
6.1.1 Cp	77
6.1.2 Tsr	78
6.1.3 Solidez del rotor	79
6.2 SISTEMA DE POTENCIA	80
6.2.1 DISEÑO DEL ROTOR	80
6.2.1.1 Área de barrido	83
6.2.1.2 Longitud de la cuerda	83
6.2.1.3 Diámetro rotor	84
6.2.1.4 Altura del rotor	84
6.2.2 Diseño del eje	85
6.2.3 Selección del rodamiento	95
6.3 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE FRENADO	96
6.4 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	99
6.4.1 Cimentación	100
6.4.1.1 Diseño de la torre	103
6.4.2 Estudio de cargas	103
6.4.2.1 Tensión máxima	109
6.4.3 Pandeo	113
6.4.5 Unión soldada	119
6.4.6 Unión pernada	121
6.5 SISTEMA GENERACIÓN	126
6.6 SISTEMA DE TRANSMISIÓN	130
6.6.1 Selección transmisión de potencia	130

6.6.1.1 Alternativa 1	131
6.6.1.2 Alternativa 2	131
6.6.1.3 Alternativa 3	132
6.6.2 Tren de engranajes	134
7. SIMULACIÓN ESTRUCTURA ELEMENTOS FINITOS SIMULACIÓN POR EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS	137
7.1 MODELAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	140
7.2 MALLA Y SIMULACIÓN	141
7.3 REFINAMIENTO DE MALLA	143
7.4 ANALISIS DE LOS RESULTADOS	146
8. MANUALES DE LA MAQUINA	149
8.1 MANUAL DE CONSTRUCCIÓN	149
8.2 MANUAL DE INSTALACIÓN	151
8.2.1 Requerimientos	152
8.2.2 Instalación de la estructura	154
8.2.3 Instalación del generador	159
8.2.4 Instalación del eje	160
8.2.5 Instalación del rotor	160
8.3 MANUAL DE OPERACIÓN DE LA MÁQUINA	164
8.4 MANUAL DE MANTENIMIENTO	165
8.5 MANUAL DE SEGURIDAD	169
9. ANÁLISIS DE IMPACTOS AMBIENTALES	173
10. ANÁLISIS FINANCIERO	178
10.1 COSTOS DE FABRICACIÓN	178
10.2 COSTOS DE INGENIERÍA	179
10.3 COSTO TOTAL DEL PROYECTO	180
11. CONCLUSIONES	181
12. RECOMENDACIONES	182
BIBLIOGRAFÍA	183
ANEXOS	185

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Escala de velocidades de viento	34
Cuadro 2. Tratamiento estadístico	44
Cuadro 3. Distribución de Weibull para factores k	46
Cuadro 4. Relación K , $V_{mp}/\langle v \rangle$, $[v^*]/\langle v \rangle$	50
Cuadro 5. Nivel de confianza criterios	67
Cuadro 6. Resultados método Scoring	68
Cuadro 7. Dimensiones de la estructura	103
Cuadro 8. Peso de los componentes del aerogenerador	104
Cuadro 9. Nivel de confianza	133
Cuadro 10. Ponderación alternativas	134
Cuadro 11. Características sobre el sistema de multiplicación	136
Cuadro 12. Herramientas	153
Cuadro 13. Seguridad industrial	154
Cuadro 14. Verificación sistema potencia	167
Cuadro 15. Verificación sistema generación	167
Cuadro 16. Verificación sistema potencia	167
Cuadro 17. Verificación sistema potencia	167
Cuadro 18. Listado de fallas en la máquina	168
Cuadro 19. Seguridad industrial	170
Cuadro 20. Riesgos estructura	171
Cuadro 21. Riesgos rotor	171
Cuadro 22. Riesgos generador	172

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Variables del viento	42
Tabla 2 Resultados mediciones Día 1	42
Tabla 3. Velocidad diseño a distintas alturas	48
Tabla 4. Consumo energético	52
Tabla 5 Clasificación datos obtenidos	53
Tabla 6.Ponderación	62
Tabla 7 Nivel de confianza	63
Tabla 8 Ponderación de los criterios	66
Tabla 9. Factores de confiabilidad	88
Tabla 10.Factor de tamaño	88
Tabla 11.Especificaciones del freno	99
Tabla 12. Fuerzas sobre la estructura	107
Tabla 13. Dimensiones de las secciones	119
Tabla 14. Criterios	133
Tabla 15. Relación piñón - engranaje	135
Tabla 16. Análisis métodos finitos	147
Tabla 17. Riesgos presentes	169

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Esquema aerogeneradores	24
Figura 2. Resistencia inducida	25
Figura 3. Modelo de los aerogeneradores	26
Figura 4. Esquema aerogenerador de eje vertical	27
Figura 5. Esquema aerogenerador tipo savonius	28
Figura 6. Turbina eólica de eje horizontal	29
Figura 7. Velocidad del viento a 8m/s	31
Figura 8. Anemómetro	33
Figura 9. Región andina de Colombia	35
Figura 10. Representación de la tierra.	36
Figura 11. Altura y altitud	37
Figura 12. Temperatura en Colombia.	38
Figura 13. Atlas de Colombia	39
Figura 14. Rosa de los vientos	53
Figura 15. Rosa de los vientos Quetame	54
Figura 16. Rotor	55
Figura 17. Alabe	56
Figura 18. Brazos aerogenerador eje vertical	56
Figura 19. Eje	57
Figura 20. Soporte del eje	57
Figura 21. Rodamiento rígido de bolas	58
Figura 22. Alternador síncrono de imanes permanentes	59
Figura 23. Estructura	60
Figura 24. Freno de disco	60
Figura 25. Transformación la energía eólica.	61
Figura 26. Principio de la energía eólica.	61
Figura 27. Perfil aerodinámico	62
Figura 28. Perfil NACA 0024	64
Figura 29. Perfil NACA 0018	65
Figura 30. Perfil NACA 0012	66
Figura 31. Especificaciones perfil NACA 0018	68
Figura 32. Sección aguas arriba-abajo	69
Figura 33. Representación teoría del doble disco actuador	72
Figura 34. Rango CP aerogeneradores	77
Figura 35. CP en función de TSR.	79
Figura 36. Relación coeficiente de solidez cp vs tsr	80
Figura 37. Factor corrección por densidad	81
Figura 38. Propiedades Mecánicas del Acero 1045	85
Figura 39. Resistencia a la tensión	87
Figura 40. Diagrama de cuerpo libre	92
Figura 41. Diagrama de fuerza puntual	92

Figura 42. Diagrama de cuerpo libre eje	94
Figura 43 Diagrama de esfuerzo cortante	94
Figura 44. Diagrama de momento flector	95
Figura 45. Rodamiento SKF Explorer	96
Figura 46. Material frenos	98
Figura 47.Mordaza	99
Figura 48. Fuerzas sobre el aerogenerador	101
Figura 49. Tipos de cimentación	101
Figura 50. Zapata cuadrada	102
Figura 51. Cimentación	102
Figura 52. Incidencia del viento en la torre	108
Figura 53. Valor teórico de las conexiones de las columnas	115
Figura 54. Brida se sujeción	118
Figura 55. Esquema brida	119
Figura 56. Tipos de electrodo	120
Figura 57. Tamaños de electrodo	120
Figura 58. Unión soldada	120
Figura 59. Propiedades mecánicas de pernos	121
Figura 60 Especificaciones ASTM para aceros al carbono	122
Figura 61. Montaje aerogenerador	125
Figura 62. Escaleras acceso	126
Figura 63.Alternador	129
Figura 64 Grado IP	130
Figura 65. Transmisión por bandas	131
Figura 66. Transmisión por cadenas	132
Figura 67. Transmisión por engranes	132
figura 68. Sistema de control	137
figura 69. Sistema electrico	138
figura 70. Sistema de control	139
Figura 71. . Modelamiento estructura	140
Figura 72. Deformación malla 12mm	141
Figura 73. Esfuerzo Von Mises malla 12 mm	142
Figura 74. Factor de seguridad malla 12 mm	142
Figura 75. Deformación malla 9mm	143
Figura 76. Esfuerzo Von Mises malla 9 mm	144
Figura 77. Factor de seguridad malla 9 mm	144
Figura 78. Deformación malla 4,5 mm	145
Figura 79. Esfuerzo Von Mises malla 4,5 mm	145
Figura 80. Factor de seguridad malla 4,5 mm	146
Figura 81. Costos computacionales	147
Figura 82. Convergencia de malla	148
Figura 83. Fabricación alabe	149
Figura 84. Zapata de la estructura	150
Figura 85. Fabricación torre metálica	150
Figura 86. Esquema aerogenerador	152

Figura 87. Zapata de hormigón armado	155
Figura 88. Ensamble pernos M12 cimentación	155
Figura 89. Fijación sección 1 metálica	156
Figura 90. Soldadura brida-sección metálica 1	156
Figura 91. Grúa celosía	157
Figura 92. Soldadura entre secciones metálicas	157
Figura 93. Ajuste brida superior-sección 3	158
Figura 94. Ensamble brida superior	158
Figura 95. Acople soporte eje	159
Figura 96. Instalación generador	159
Figura 97. Instalación del eje	160
Figura 98. Instalación rotor	161
Figura 99. Instalación soportes	161
Figura 100. Instalación brazos	162
Figura 101. Instalación bisagra	162
Figura 102. Rotor	163
Figura 103. Verificación instalación	164
Figura 104. Ficha técnica	168
Figura 105. Arnés de seguridad	170

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Potencia del viento	32
Ecuación 2. Factor de forma	45
Ecuación 3. Desviación típica	45
Ecuación 4. Variación velocidad con la altura	47
Ecuación 5. Coeficiente de rugosidad	47
Ecuación 6. Densidad del aire	48
Ecuación 7. Potencial eólico	49
Ecuación 8. Velocidad nominal	50
Ecuación 9. Scoring	67
Ecuación 10. Velocidad relativa del viento	69
Ecuación 11. Fuerza de arrastre	90
Ecuación 12. Fuerza de sustentación	91
Ecuación 13. Fuerza aerodinámica	91
Ecuación 14. Coeficiente de fuerza tangencial	70
Ecuación 15. Coeficiente de fuerza normal	70
Ecuación 16. Función para la sección aguas arriba	71
Ecuación 17. Factor de interferencia aguas arriba	71
Ecuación 18. Velocidad inducida aguas arriba	72
Ecuación 19. Fuerza tangencial	73
Ecuación 20. Torque	73
Ecuación 21. Reynolds	74
Ecuación 22. Coeficiente potencia del aerogenerador	77
Ecuación 23. Relación de velocidad tangencial	78
Ecuación 24. Solidez del rotor	79
Ecuación 25. Potencia mecánica	80
Ecuación 26. Presión	81
Ecuación 27. Densidad del aire	82
Ecuación 28. Área de barrido	82
Ecuación 29. Solidez del rotor	83
Ecuación 30. Longitud de cuerda	83
Ecuación 31. Diámetro del rotor	84
Ecuación 32. Altura del rotor	84
Ecuación 33. Diámetro eje	86
Ecuación 34. Momento torsor	89
Ecuación 35. Torque del freno	97
Ecuación 36. Torque por presión	97
Ecuación 37. Diámetro exterior del disco	97
Ecuación 38. Fuerza de frenado	98
Ecuación 39. Momento en el rotor	103
Ecuación 40. Fuerza radial	104
Ecuación 41. Fuerza ejercida por el viento	105
Ecuación 42. Área de ataque	105

Ecuación 43. Generatriz del tronco	106
Ecuación 44. Presión ejercida por el viento	106
Ecuación 45. Tensión máxima	109
Ecuación 46. Momento de inercia mínimo	110
Ecuación 47. Momento de inercia máximo	110
Ecuación 48. Desplazamiento horizontal del rotor	110
Ecuación 49. Desplazamiento horizontal de la estructura	111
Ecuación 50. Desplazamiento vertical	112
Ecuación 51. Radio de giro	113
Ecuación 52. Constante de columna	116
Ecuación 53. Resistencia máxima a fuerza cortante de los pernos	122
Ecuación 54. Fuerza generada en el perno	123
Ecuación 55. Esfuerzo permisible del perno	124
Ecuación 56. Velocidad específica	126
Ecuación 57. Momento en el eje	127
Ecuación 58. Velocidad específica	127
Ecuación 59. Scoring	133
Ecuación 60. Relación de transmisión	134
Ecuación 61. Diámetro primitivo	135

LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo A. Toma de mediciones	186
Anexo B. Selección del rodamiento	1891
Anexo C. Características del freno	1902
Anexo D. Especificaciones generador	1923
Anexo E. Especificaciones lamina torre	194

RESUMEN

Este proyecto está basado en el diseño de un aerogenerador de eje vertical para la zona rural de municipio de Quetame, Cundinamarca, en el cual se llevó a cabo una metodología con el fin de dar cumplimiento a una serie de objetivos, que inician con la recolección de información consultando diferentes fuentes bibliográficas sobre aerogeneradores, teniendo en cuenta los aspectos más importantes de los aerogeneradores de eje vertical; posteriormente se realizó el estudio de las condiciones climáticas de la zona, se continuo con el desarrollo del proyecto, evaluando las alternativas sobre el perfil de la paleta seleccionando la más adecuada para el diseño. A continuación, se realizó el diseño detallado de la turbina siguiendo el procedimiento “paso a paso”, en el cual se realizaron los correspondientes cálculos que requiere la máquina para un correcto funcionamiento, como lo es las dimensiones del aerogenerador, sistema de potencia, sistema de generación, sistema estructural y sistema de control.

Teniendo las características de cada uno de los componentes y del sistema en general, se realizó por medio de un software avanzado, un análisis por el método de los elementos finitos, con el fin de garantizar que los cálculos realizados sean confiables, posteriormente se realizaron los planos de ubicación, fabricación y ensamble.

Después se elaboraron los manuales de construcción, instalación, operación, mantenimiento y seguridad del aerogenerador de eje vertical, y finalizamos con un análisis de impacto ambiental y de costos de fabricación comparando con otros aerogeneradores que se encuentran en el mercado.

PALABRAS CLAVE: Diseño, aerogenerador, eje vertical, energía eólica,

INTRODUCCIÓN

La importancia de diseñar un aerogenerador de eje vertical para la producción de energía eléctrica para los habitantes de una finca en el municipio de Quetame, Cundinamarca es satisfacer la demanda eléctrica de la finca, brindando una innovación tecnológica en la zona.

El planteamiento del problema surge por varios aspectos, entre ellos que la finca se encuentra bastante retirada a la zona interconectada del municipio por lo cual la empresa no se compromete a proveer el servicio, de igual manera por la presencia de algunos grupos al margen de la ley hizo que se presentara atraso en aquella parte del municipio.

Para la solución del problema el proyecto plantea como objetivo general “Diseñar un aerogenerador de eje vertical con guía “paso a paso” para su implementación en una finca de 2,000 m²”, en donde lo primordial será suplir todas las necesidades energéticas que allí se presenten, mejorando así la calidad de vida de los habitantes de la finca y generando un bajo impacto ambiental. Para esto se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Conceptualizar el funcionamiento de un aerogenerador de eje vertical
- Evaluar condiciones climáticas
- Evaluar alternativas sobre el perfil de la paleta
- Realizar el diseño detallado usando el procedimiento paso a paso.
- Evaluar la estructura por el método de elementos finitos
- Realizar los planos de ubicación, fabricación y ensamble
- Elaborar manuales de construcción, instalación, operación, mantenimiento y seguridad del aerogenerador de eje vertical
- Realizar el análisis de impacto ambiental en la fabricación de aerogeneradores
- Elaborar una evaluación financiera

El alcance del proyecto llega únicamente hasta el diseño de un aerogenerador de eje vertical con guía “paso a paso”, en condiciones climáticas de Quetame, Cundinamarca, no incluye su construcción.

Las limitaciones de este proyecto son: Diseñar un aerogenerador de eje vertical tripala, donde los perfiles de las palas serán seleccionados de acuerdo a las condiciones climáticas de la zona. El sistema de freno es de selección igual que el generador.

El desarrollo de este proyecto aporta al avance de la energía eólica en el país, con el estudio de esta zona montañosa con condiciones tipo paramo donde las corrientes de aire son húmedas y el viento va a altas velocidades.

Este proyecto de diseño aplica para la obtención de energía eléctrica a partir de una fuente renovable.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un aerogenerador de eje vertical con guía "paso a paso", para su implementación en una finca de 2000 m².

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Conceptualizar el funcionamiento de un aerogenerador de eje vertical
2. Evaluar condiciones climáticas
3. Evaluar alternativas sobre el perfil de la paleta
4. Realizar el diseño detallado usando el procedimiento paso a paso.
5. Evaluar la estructura por el método de elementos finitos
6. Realizar los planos de ubicación, fabricación y ensamble
7. Elaborar manuales de construcción, instalación, operación, mantenimiento y seguridad del aerogenerador de eje vertical
8. Realizar el análisis de impacto ambiental en la fabricación de aerogeneradores
9. Elaborar una evaluación financiera

1. GENERALIDADES TEORICAS

1.1 ANTECEDENTES

“La necesidad de una fuente energética hace que nos remontemos a las antiguas civilizaciones, los romanos ensayaron los primeros métodos de electroterapia de la historia metiendo a paralíticos en aguas con peces eléctricos con el fin de que ellos recibieran descargas”¹. Pero en realidad ni los griegos ni los romanos pudieron resolver el problema de la generación de energía eléctrica. Fue hasta el siglo XVII donde los científicos y estudiosos dieron los primeros pasos hacia a el estudio de la electricidad.

“En Colombia la prestación del servicio de energía eléctrica se inició a finales del siglo XIX, se comenzó por el alumbrado público y del comercio de la capital, luego se pasó al uso residencial de los estratos más adinerados de la ciudad hasta que se llegó a industria, hacia los años 50 se empezó a estudiar el sistema de interconexión regional, pero fue a finales de los 60 que se materializo esa idea”², en el sector rural del país muchas familias no cuenta con una fuente de energía eléctrica que permita satisfacer todas las necesidades energéticas que allí se presenten, por tal motivo se realiza esta investigación en la cual se diseñara un aerogenerador de eje vertical con guía “paso a paso”, de tal manera que cualquier persona pueda implementar este aerogenerador.

En el trabajo de grado de la Universidad Industrial de Santander titulado “ DISEÑO Y CONTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE TURBINA EOLICA DE EJE VERTICAL PARA GENERACION A BAJA POTENCIA” presentada en el año 2011 por OSCAR IVAN ORDUZ BERDUGO y JULIAN EDGARDO SUAREZ PEREZ, llevan a cabo el desarrollo de un prototipo de un aerogenerador realizando un análisis de la velocidad del viento, consideraciones aerodinámicas, diseño del aerogenerador, además, desarrollan un diseño detallado del conjunto de rotor, estructura del soporte y del alternador del aerogenerador, el cual servirá de guía para entender y desarrollar nuestro proyecto.³

¹ La historia de la electricidad. [Consultado 10 de oct., 2018]. Disponible en: <https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/historia.pdf>

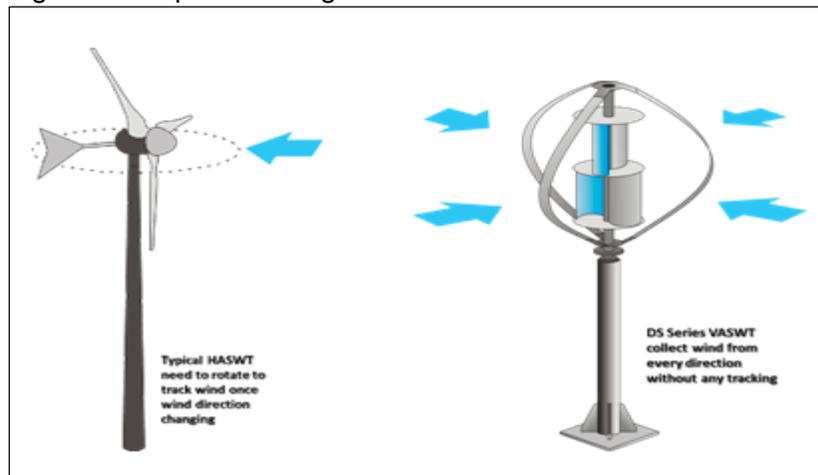
² Historia de la energía eléctrica en Colombia. [Consultado 10 de oct., 2018]. Disponible en: <http://www.creg.gov.co/index.php/es/sectores/energia/historia-energia>

³ ORDUZ BERDUGO, Oscar Iván Y SUAREZ PEREZ, Julián Edgardo. Diseño y Construcción de un Prototipo de turbina eólica de Eje Vertical para generación a baja potencia. [En línea]. Trabajo de grado de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga.: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, Facultad de ingenierías físico-mecánicas, 2011.

1.2 LOS AEROGENERADORES

Una turbina eólica o aerogenerador,⁴ es una máquina motora por la cual pasa un fluido en forma continua que intercambia una cantidad de movimiento con el viento, haciendo girar el componente principal para la generación de potencia “rotor”. El aerogenerador es usado para transformar la energía cinética del viento, en energía mecánica por medio de las paletas o alabes a un rotor, transformándola en energía eléctrica por medio de un generador de corriente alterna.

Figura 1. Esquema aerogeneradores



Fuente: Suministros y montajes eólicos S.L. Porque aerogeneradores de eje vertical? [Imagen]. Disponible en: <http://www.e-vawt.es/index.php?seccion=por-que-aerogeneradores>

1.3 CLASIFICACION DE LOS AEROGENERADORES

Constan de dos tipos de aerogenerador, los de eje vertical y eje horizontal; los de eje vertical se están implementando principalmente en zonas urbanas y en zonas donde no genere un impacto en la vida silvestre, se destacan por no necesitar el mecanismo de orientación, y lo que es el generador eléctrico puede ser instalado en el suelo. Por otro lado, los de eje horizontal, son los dispositivos mecánicos con mayor auge ya que generan una mayor capacidad de energía con un amplio campo de aplicaciones, se encuentran dispositivos de baja potencia hasta alta potencia, aunque a comparación de los de eje vertical necesitan un mecanismo de frenado, dispositivo de orientación, una torre, son más ruidosas y generan un impacto a los ecosistemas.

⁴ TALAYERO NAVARES, Ana Patricia y MARTINEZ TELMO, Enrique. Energías renovables: Energía Eólica [en línea]. ZARAGOSA: UNE, 2011. 16 p. [citado 17 Oct., 2018] Disponible en : <https://books.google.com.co/books?id=ML7uDAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

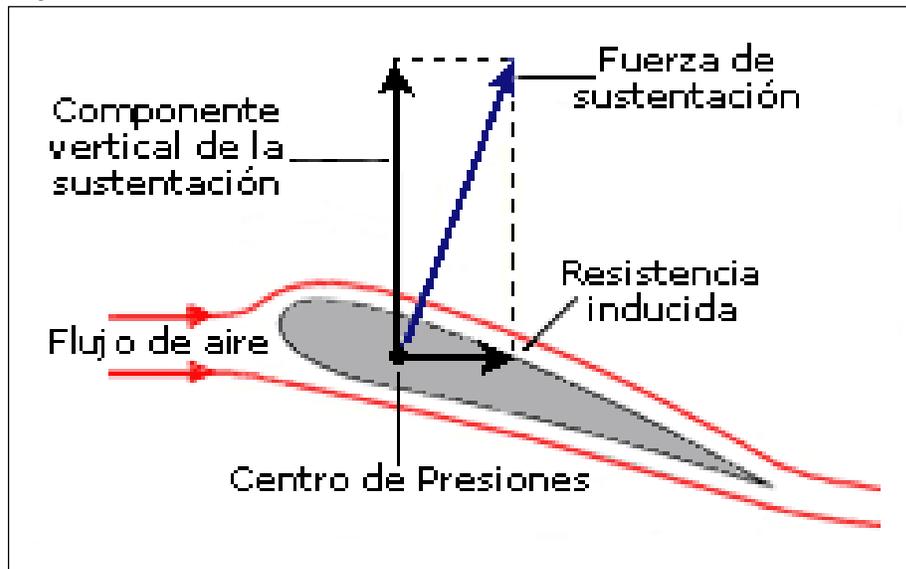
1.3.1 Clasificación según su eje de rotación.

1.3.1.1 Aerogeneradores de eje vertical. Los aerogeneradores de eje vertical, también conocidos como VAWT (Vertical Axis Wind Turbine). Son aquellos dispositivos mecánicos donde el eje de transmisión de la turbina se encuentra perpendicular a la tierra. “Tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección del viento sin necesitar mecanismo de orientación, y por ellos se les llama panemonos”⁵

A pesar de que se han construido gran cantidad de aerogeneradores de eje vertical, estos diseños no se encuentran en uso generalizado en parques eólicos, por tal motivo, lleva a que los ingenieros e investigadores trabajen en nuevos diseños de turbinas que puedan ampliar la utilidad de esta tecnología para ser aprovechada en grandes aplicaciones.

Las turbinas de eje vertical trabajan, ya sea por la diferencia de una fuerza de arrastre, esta diferencia hace que el rotor sea propenso a girar sobre su eje en una dirección específica o trabajan por la fuerza de sustentación, conocida como sustentación de dirección perpendicular al viento, que experimentan los alabes al interactuar con la corriente de viento; según como estén montadas las palas con respecto al viento y al eje de rotación, la fuerza que producirá el par motor será de arrastre o de sustentación.

Figura 2. Resistencia inducida

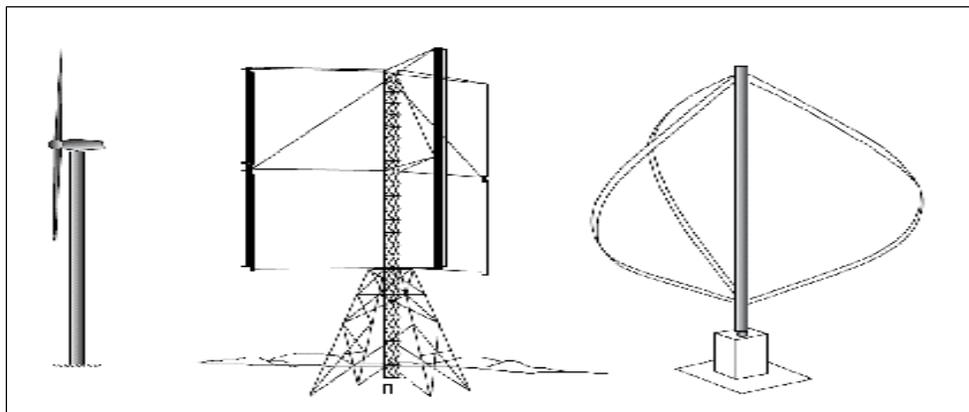


Fuente: Manuel vuelo. Fuerza inducida [imagen]. Disponible en: <http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV13.html>

⁵ TALAYERO NAVARES, Ana Patricia y MARTINEZ TELMO, Enrique. Energías renovables: Energía Eólica [en línea]. ZARAGOSA: UNE, 2011. 16 p. [citado 17 Oct., 2018] Disponible en : <https://books.google.com.co/books?id=ML7uDAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

“Los aerogeneradores de eje vertical se han venido implementando más seguido ya que se destacan por no necesitar el mecanismo de orientación y lo que es el generador eléctrico puede ir dispuesto en el suelo sin necesitar de una estructura para su operación”⁶, lo cual es un ahorro considerable para su implementación, por otro lado, las turbinas de eje vertical se han venido implementando principalmente en zonas urbanas y en zonas donde no afecte la vida silvestre como lo hacen las turbinas de eje horizontal, otras de sus principales ventajas con respecto a la de eje horizontal son: su baja contaminación auditiva, ya que las de eje vertical se destacan por ser muy silenciosas, por último, su tamaño no causa demasiado impacto visual.

Figura 3 Modelo de los aerogeneradores



Fuente: Composi.info. Modelos de aerogeneradores [imagen]. Fundamentos teóricos de los aerogeneradores. Disponible en: <http://composi.info/tesina-de-seminario-v3.html?page=6>

- **Tipo Darrieus.** El aerogenerador Darrieus. “fue patentado en 1927 por el ingeniero y académico francés Georges Darrieus”⁷, se basa en el principio de recurrir a la fuerza de sustentación, la cual consiste en ubicar unas palas con un diseño similar a la de los aviones alrededor del rotor agarrándolas al eje por sus dos extremos, obteniendo un menor peso y costo, en el diseño de las aspas se puede realizar una curva especial la cual nos brindara un mayor rendimiento entre los acoples del eje, además se generan mayores potencias por unidad de área de rotor, la fuerza ejercida sobre las palas se debe a la potencia del viento soportada, específicamente la suma “vectorial” del viento real, generándose una fuerza aerodinámica periódica, la cual se obtiene como la suma del rozamiento que se opone al movimiento.

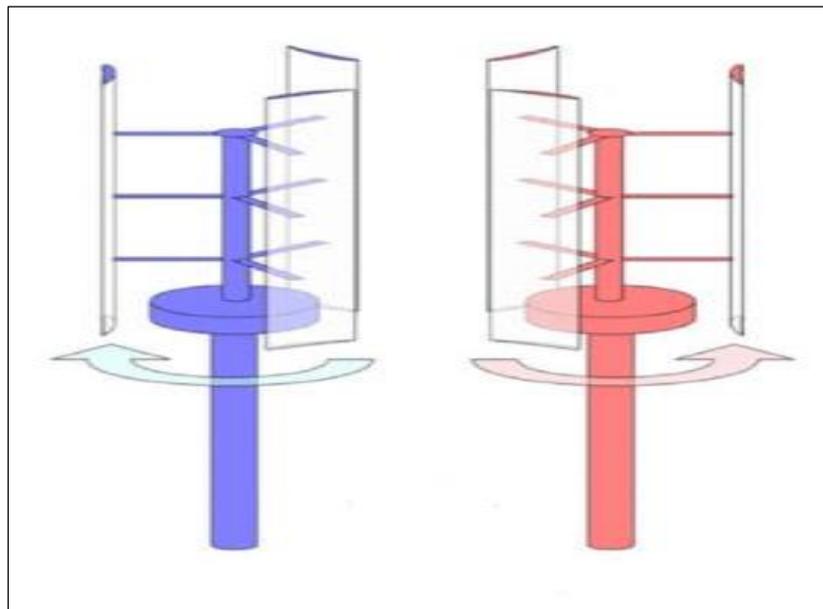
⁶ ORDUZ BERDUGO, Oscar Iván Y SUAREZ PEREZ, Julián Edgardo. Diseño y Construcción de un Prototipo de turbina eólica de Eje Vertical para generación a baja potencia. [En línea]. Trabajo de grado de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga.: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, Facultad de ingenierías físico-mecánicas, 2011.

⁷ Courty Jean-Michael y Kierlik Eduard. Aerogeneradores verticales. *Investigacion y ciencia*.2016. nro.475, pp. 88-89.

En los aerogeneradores de eje vertical tipo o Darrieus, se puede trabajar mayores velocidades que en las de rotor Savonius aunque no como en los aerogeneradores de eje horizontal, aunque uno de sus principales desventajas es que necesitan un dispositivo de arranque, ya que empiezan a trabajar con velocidad de mínimo 4 m/s, es por eso que en muchos casos combinan el diseño de un aerogenerador con rotor Savonius el cual trabaje en el arranque y un aerogenerador Darrieus el cual se encargue de generar la energía en la velocidades del viento mayores.

- **Rotor Darrieus tipo H o giromill.** Son aquellas turbomaquinas formadas normalmente por tres aspas, no necesitan de un mecanismo de orientación, aunque si de un dispositivo de arranque con el diseño de este aerogenerador se busca variar el ángulo de ataque por medio de la orientación a la que se dispondrá las aletas o aspas.

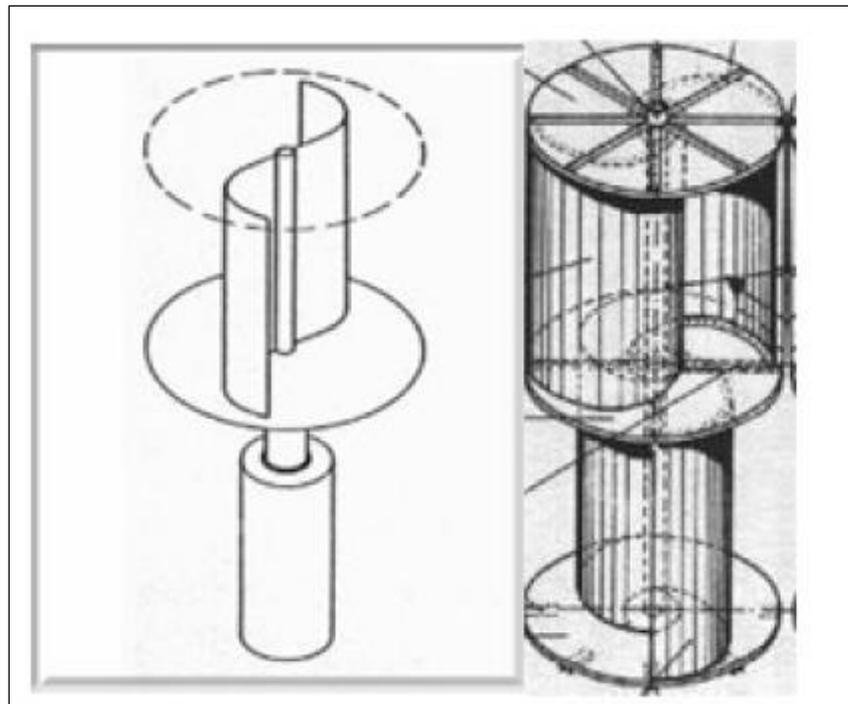
Figura 4. Esquema aerogenerador de eje vertical



Fuente: WHITTLESEY, Robert. Representación esquemática de dos turbinas eólicas de eje vertical [imagen]. Aerogeneradores de eje vertical: Diseño de granja y turbina Disponible en: https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpWEEAHOOJ/cid:kt011FU143/viewerType:khtml//root_slug:wind-energy-engineering/url_slug:vertical-a-axis-wind-turbines?b-q=vertical%20axis%20wind%20turbine&sort_on=default&b-group-by=true&page=1&b-sort-on=default&b-content-type=all_references&b-sort-on=default&b-content-type=all_references&view=collapsed&zoom=1&q=vertical%20axis%20wind%20turbine

- **Tipo savonius.** El aerogenerador Savonius fue patentado en 1929 por el ingeniero fines Sigurd Savonius, el aerogenerador tipo Savonius es uno de los modelos más simples de entender y fabricar, el cual consiste en tener unos cilindros huecos y desplazarlos con respecto al eje, en su parte convexa brinda una menor resistencia al giro, dado que las partes cilíndricas están desplazadas, el viento estará continuamente penetrando sobre ellos generando una rotación sin importar la orientación que tenga el aerogenerador, el Savonius tiene una velocidad de giro inferior a los otros y un bajo rendimiento.

Figura 5. Esquema aerogenerador tipo savonius



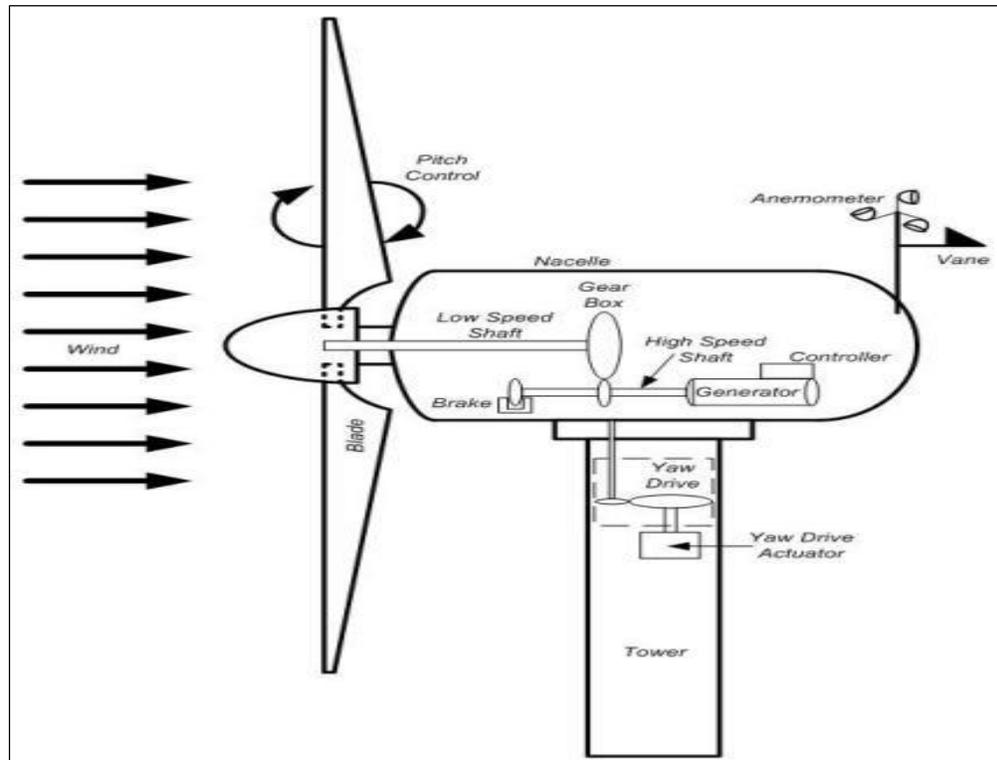
Fuente: Scielo. Aerogenerador Savonius [imagen]. Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador de eje vertical para oxigenar estanques de peces. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000900002

1.3.1.2 Aerogeneradores de eje horizontal. Los aerogeneradores de eje horizontal, también conocidos como HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine), son aquellos dispositivos mecánicos utilizados para la generación de energía eólica donde su principal característica es la ubicación del eje, el cual se encuentra en paralelo a la tierra, normalmente están formados por 3 palas que arrancan con velocidades de 3,5 m/s hasta 11 m/s, las palas se encargan de actuar sobre un rotor captando la energía cinética del viento, produciendo un movimiento rotacional transmitido hacia un multiplicador de velocidad, donde se transmite y se multiplica la velocidad hacia el generador donde se va a generar energía, y será conducida por

la parte interior de la torre hasta la base, seguidamente se conduce hasta una subestación para ser inyectada a la red eléctrica y ser distribuida para sus distintas aplicaciones.

Por otro lado, los de eje horizontal, son los aerogeneradores con mayor auge ya que generan una mayor cantidad de energía de aplicaciones, se encuentran dispositivos de baja potencia hasta alta potencia, aunque en comparación de los de eje vertical necesitan un mecanismo de frenado, dispositivo de orientación, una torre, son más ruidosas y generan un impacto a los ecosistemas.

Figura 6. Turbina eólica de eje horizontal



Fuente: Jmirez. Principales componentes de una turbina de viento imagen]. Disponible en: <https://jmirez.wordpress.com/2015/08/30/j849-principales-componentes-de-una-turbina-de-viento/>

1.3.1.3 Clasificación según el tamaño y la potencia. Aquellos equipos cuya potencia eléctrica nominal por unidad se encuentra entre 500kW y algunos megavatios. Se conocen como equipos medianos aquellos cuya potencia nominal se encuentran entre 100kW y 500kW. Las turbinas pequeñas son aquellas cuya potencia se halla entre las decenas de kilovatios y los 100kW y las turbinas eólicas micro o mini, aquellas con potencia nominal inferior a 10kW.

1.4 EVOLUCIÓN DE LOS AEROGENERADORES

En la actualidad está creciendo el interés por la implementación de equipos para la generación de energía eólica, por medio de la investigación, se ha llegado a fabricar nuevos prototipos, cada vez innovando la tecnología de las máquinas, para la construcción de aerogeneradores se deben tener en cuenta tres factores principales, los cuales son, materiales de fabricación, diseño de las palas y la transmisión de potencia. Lo que se busca en la parte de los materiales es reducir su peso y que sean más resistentes por un menor costo, en la parte de las palas lo que se busca es que el viento crea un par de fuerzas la cual hacen girar el mecanismo en torno a su eje

1.5 SITUACIÓN ACTUAL

La situación de las energías renovables a nivel mundial está en un gran crecimiento alentadora de cara al cambio climático, sin embargo, en Colombia la implementación de las energías renovables hasta ahora está dando sus primeros pasos.

“La necesidad de que Colombia adopte sistemas renovables para la generación de energía es inminente. En el país, la cogeneración solo aportó el 1% de la matriz energética el año pasado, cifra que evidencia que queda un largo camino por recorrer”⁸. Según se ha plantado para el año 2030 la implantación de energías renovables debe estar en un 30% y el 70% restante será de energías convencionales (hidroeléctricas, termoeléctricas).

La energía eólica está creciendo mundialmente, una tendencia alentadora de cara al acuerdo universal de Naciones Unidas sobre cambio climático previsto a finales de año en París. Este aumento es un resultado directo de las políticas en energía renovable implementadas por los ejecutivos. Tal acción política, discutida por los gobiernos reunidos bajo el auspicio de la CMNUCC este año, debe acelerarse para que la comunidad internacional pueda alcanzar su objetivo de limitar el aumento del calentamiento global a 2 grados centígrados y dichas políticas necesitan ser apoyadas con una financiación adecuada.

Un análisis reciente del Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC, por sus siglas en inglés) muestra que este año se añadirá una capacidad considerable de energía eólica en Brasil, Canadá, México y Estados Unidos, mayoritariamente. La industria offshore europea ya ha experimentado un fuerte crecimiento durante la primera

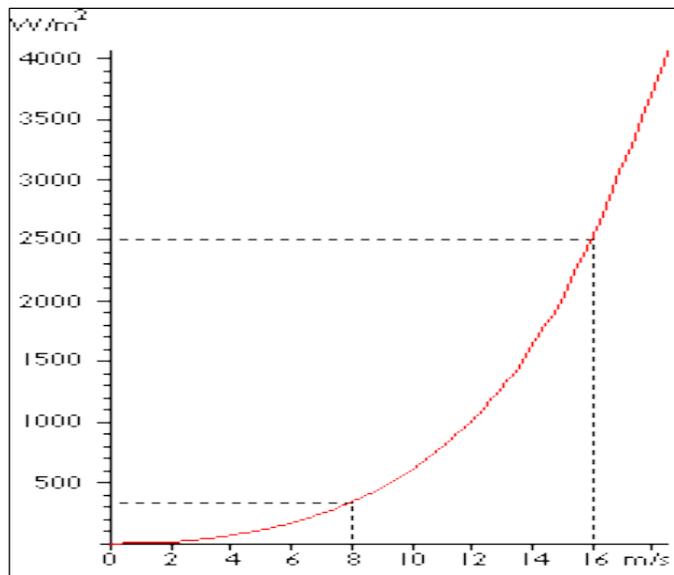
⁸ Colombia da sus primeros pasos para implementar energía renovable[en línea].Revista Dinero [citado 14 Dic., 2018] Disponible en : <https://www.dinero.com/pais/articulo/colombia-avanza-en-generacion-de-energias-renovables/257078>

mitad del 2015. Actualmente, los principales mercados mundiales son China, Estados Unidos y Alemania, tres de las principales economías mundiales que con sus políticas en energías limpias están logrando importantes resultados energéticos.

1.5.1 Potencia del viento. En el caso de turbinas eólicas usamos la energía de frenado del viento, por lo que si doblamos la velocidad del viento tendremos dos veces más porciones cilíndricas de viento moviéndose a través del rotor cada segundo, y cada una de esas porciones contiene cuatro veces más energía, como se ha visto en el ejemplo del frenado de un coche.

“El gráfico muestra que con una velocidad del viento de 8 metros por segundo obtenemos una potencia (cantidad de energía por segundo) de 314 W por cada metro cuadrado expuesto al viento (viento incidiendo perpendicularmente al área barrida por el rotor)”⁹.

Figura 7. Velocidad del viento a 8m/s



Fuente. InfoAgro [en línea], [Consultado 14, diciembre 2018].
Disponible en: http://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_anemometro_velocidad_viento.asp?k=80

⁹ DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION [en línea], [citado 14 diciembre, 2018]. Disponible en: http://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_anemometro_velocidad_viento.asp?k=80

1.5.1.1 Potencia de la fórmula del viento. La potencia del viento que pasa perpendicularmente a través de un área circular es:

Ecuación 1. Potencia del viento

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \pi r^2$$

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 94p. ISBN 978-958-778-232-5

Donde:

P = potencia del viento medida

ρ = densidad del aire

v = velocidad del viento medida en m/s

π = pi

r = radio del rotor

1.5.2 Medición del viento.

1.5.2.1 Anemómetro. Instrumento utilizado para medir la velocidad del viento. Los anemómetros miden la velocidad instantánea del viento, pero las ráfagas de viento desvirtúan la medida, de manera que la medida más acertada es el valor medio de medidas que se tomen a intervalos de 10 minutos. Por otro lado, el anemómetro nos permite medir inmediatamente la velocidad pico de una ráfaga de viento.

Existe gran diversidad de anemómetros:

Los de empuje están formados por una esfera hueca y ligera (Daloz) o una pala (Wild), cuya posición respecto a un punto de suspensión varía con la fuerza del viento, lo cual se mide en un cuadrante.

El anemómetro de rotación está dotado de cazoletas (Robinson) o hélices unidas a un eje central cuyo giro, proporcional a la velocidad del viento, es registrado convenientemente; en los anemómetros magnéticos, dicho giro activa un diminuto generador eléctrico que facilita una medida precisa.

El anemómetro de compresión se basa en el tubo de Pitot y está formado por dos pequeños tubos, uno de ellos con orificio frontal (que mide la presión dinámica

lateral (que mide la presión estática), y el otro sólo con un orificio lateral¹⁰. La diferencia entre las presiones medidas permite determinar la velocidad del viento. Se pueden comprar anemómetros sorprendentemente baratos de algunos de los principales vendedores del mercado que, cuando realmente no se necesita una gran precisión, pueden ser adecuados para aplicaciones meteorológicas, y lo son también para ser montados sobre aerogeneradores. (Normalmente solo utilizados para determinar si sopla viento suficiente como para ponerlo en marcha)

El anemómetro utilizado para realizar las distintas mediciones es el MODEL: AR85 de la empresa Smart sensor, a continuación se ilustra el dispositivo utilizado.

Figura 8. Anemómetro



Fuente: elaboración propia

Sin embargo, los anemómetros económicos no resultan de utilidad en las mediciones de la velocidad de viento que se llevan a cabo en la industria eólica, dado que pueden ser muy imprecisos y estar pobremente calibrados, con errores en la medición de quizás el 5 por ciento, e incluso del 10 por ciento.

Se puede comprar un anemómetro profesional y bien calibrado, con un error de medición alrededor del 1%.

¹⁰ InfoAgo [en línea] Que es un anemómetro [citado 14 diciembre, 2018] Disponible en : http://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_anemometro_velocidad_viento.asp?k=80

Cuadro 1. Escala de velocidades de viento

Escala de velocidades de viento		
Velocidades de viento a 10 m de altura		
m/s	Nudos	Clasificación del viento
0,0-0,4	0,0-0,9	Calma
0,4-1,8	0,9-3,5	Ligero
1,8-3,6	3,5-7,0	
3,6-5,8	7-11	
5,8-8,5	11-17	Moderado
8,5-11	17-22	Fresco
11-14	22-28	Fuerte
14-17	28-34	
17-21	34-41	Temporal
21-25	41-48	
25-29	48-56	Fuerte temporal
29-34	56-65	
>34	>65	Huracán

Fuente. DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION [en línea], [Consultado 14, diciembre, 2018]. Disponible en: http://www.infoagro.com/instrumentos_medida/doc_anemometro_velocidad_viento.asp?k=80

1.5.2.2 Aplicaciones. Entre las aplicaciones más comunes para los anemómetros tenemos:

Ingeniería civil: Operación de las grúas, seguridad en la obra y medición de esfuerzos del viento.

Aviación: Saltos en paracaídas y parapente, vuelo en globo o en planeador.

Incendios: Puede indicar hacia qué dirección se puede propagar el fuego.

Agricultura: Condiciones para riego o para quema de desechos.

Actividades al aire libre: Ciclismo, tiro con arco, golf, vela, atletismo, senderismo y montañismo.

Hobbies: Vuelo de cometas y modelismo de barcos.

Industria: Control de contaminación y mediciones de flujo de aire.

Ciencia: Meteorología y ciencia medio ambiental.

1.6 VIENTOS EN LAS REGIONES DE COLOMBIA

1.6.1 Clima De Colombia. En Colombia se presentan diversos climas, la posición geográfica del país hace que tengamos esta variedad climática, también al estar ubicado sobre una franja donde se van a encontrar aires cálidos y húmedos, provenientes del norte y el sur, estos son algunos de los hechos que pueden explicar la variación climática del país.

“En Colombia como en el resto del planeta, el clima está determinado por dos grandes componentes, los aspectos Geográficos y los aspectos Atmosféricos. De ellos se derivan una serie de factores tales como la intensidad radiación solar, la temperatura, los sistemas de vientos, la humedad atmosférica, los pisos térmicos y desde luego las lluvias o precipitaciones”¹¹. Esto le permite a Colombia contar con una gran variedad de climas, que van desde los 0 °C en los nevados, hasta los 35 °C en las costas.

Figura 9. Región andina de Colombia

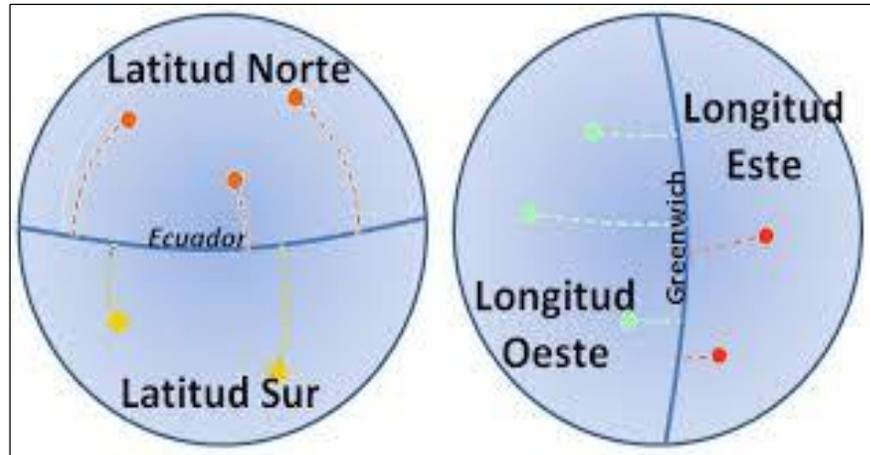


Fuente. Pérez Martín, lifeder [en línea], [Consultado 8, enero, 2019]. Disponible en: <https://www.lifeder.com/clima-region-andina-colombia/>

¹¹ GARCIA, Angélica - Colombia País Maravilloso [en línea]. Clima de Colombia [citado 17 Oct., 2018] Disponible en : <https://www.todacolombia.com/geografia-colombia/clima-colombia.html>

1.6.2 Latitud. “Colombia está ubicada directamente sobre la línea ecuatorial; su territorio se extiende hasta los 12°30’40” de latitud norte y los 4°13’30,5” de latitud sur respectivamente”¹². La posición de Colombia hace que los rayos del sol sobre ella caigan todo el año de forma vertical, por esto Colombia debería tener un clima caluroso pero debido a la humedad y otros factores predeterminados hacen que tenga una gran variedad de climas.

Figura 10. Representación de la tierra.



Fuente. Elkan Michael [en línea], [Consultado 8, enero, 2019]. Disponible en: <http://geografiaehistoriajmbm.blogspot.com/p/unidad-2-1-de-eso.html>

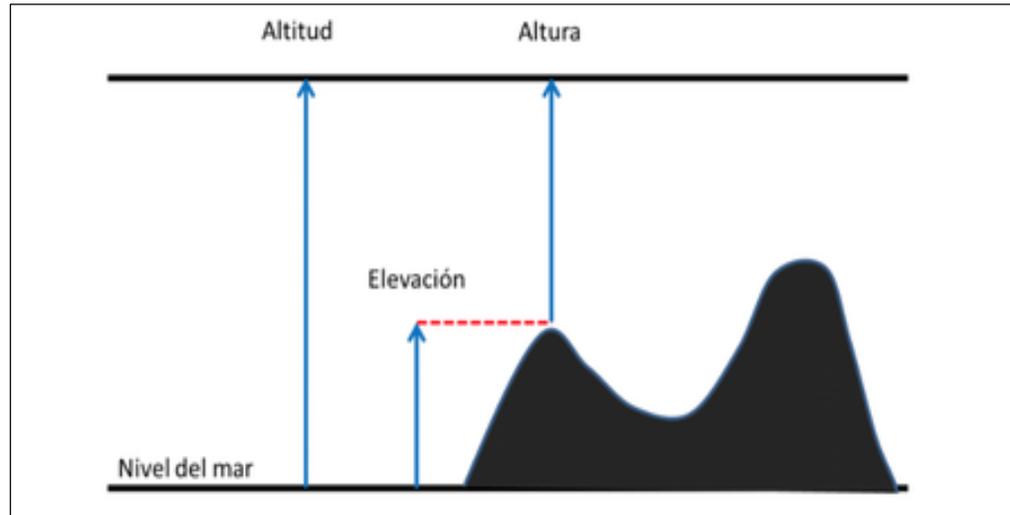
1.6.3 Altitud. “La altitud es el principal determinante del clima en las diferentes áreas del país, haciendo que la temperatura disminuya a medida que se asciende, a razón de un grado centígrado por cada 187 m”¹³, por otra parte el país cuenta con zonas climáticas que van desde calurosas hasta llegar a las zonas frías, la temperatura varía dependiendo la altitud sobre el nivel del mar.

Esto es relevante para la climatología del país, esto conlleva a la creación de un sistema de medición, el cual, tiene como prioridad la altitud y temperatura, denominado pisos térmicos.

¹² GARCIA, Angélica - Colombia País Maravilloso [en línea]. Clima de Colombia [citado 17 Oct., 2018] Disponible en : <https://www.todacolombia.com/geografia-colombia/clima-colombia.html>

¹³ GARCIA, Angélica - Colombia País Maravilloso [en línea]. Clima de Colombia [citado 17 Oct., 2018] Disponible en : <https://www.todacolombia.com/geografia-colombia/clima-colombia.html>

Figura 11. Altura y altitud



Fuente. Rodríguez María Victoria, El Diario del Viajero [en línea], [Consultado 8, enero, 2019]. Disponible en: <https://www.diariodelviajero.com/cajon-de-sastre/altitud-o-altura-que-diferencia-hay>

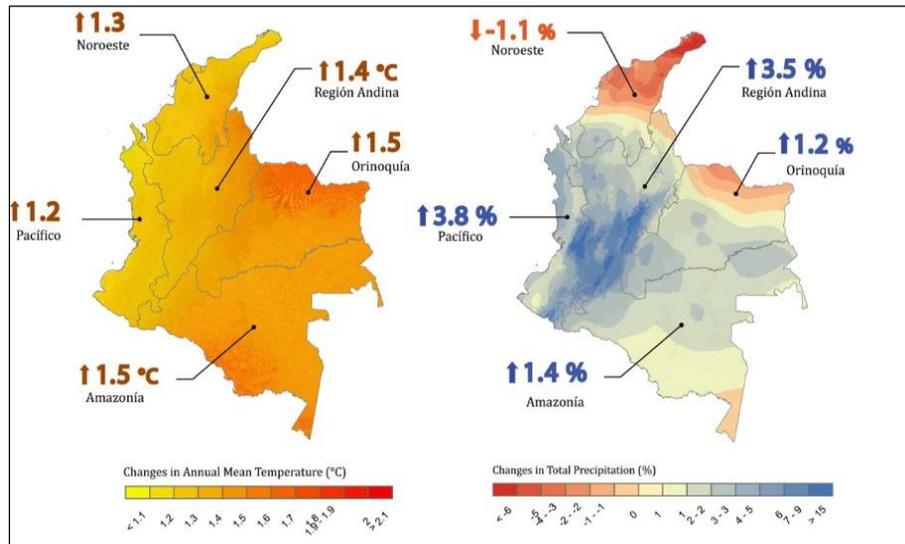
1.6.4 Temperatura En Colombia. “En Colombia la temperatura del aire está directamente influenciada por factores que modifican su comportamiento como la altitud, la ubicación geográfica y las continuas corrientes y masas de aire que penetran el territorio. La mayor parte del país presenta temperaturas que exceden los 24° C en especial en las regiones Caribe, Pacífica, Amazónica y la Orinoquía, que representan casi el 80% del territorio colombiano”¹⁴.

En cuanto a la costa atlántica, la temperatura esta entre un rango de 24° C y 28°, pero es importante tener claro que en las partes bajas y al sur del departamento encontraremos temperaturas hasta de 30° C.

Sin embargo, para la región andina se tendrán temperaturas bajas, por debajo de la media nacional, la razón de que la temperatura sea tan baja se debe a los pisos térmicos determinados por la altitud y la temperatura, las regiones donde más se presenta estas temperaturas bajas son la región Cundiboyacense, una referencia de las temperaturas bajas es el nevado del Cocuy o la cordillera central.

¹⁴ GARCIA, Angélica - Colombia País Maravilloso [en línea]. Clima de Colombia [citado 17 Oct., 2018] Disponible en : <https://www.todacolombia.com/geografia-colombia/clima-colombia.html>

Figura 12. Temperatura en Colombia.



Fuente. IDEAM [en línea], [Consultado 15, enero, 2019]. Disponible en: <https://www.tiempo.com/ram/343722/colombia-afectado-cambio-climatico/>

1.6.5 Humedad Atmosférica En Colombia. “En Colombia la humedad atmosférica está seriamente ligada con la temperatura del aire y la altitud. Debemos recordar que el aire al calentarse se dilata, sus moléculas se separan y pueden absorber un mayor volumen de vapor de agua; no ocurre lo mismo con el aire frío, quien por el contrario se contrae y admite una menor cantidad de humedad. Por lo tanto, a mayor temperatura, mayor humedad.”¹⁵

En el país donde se presenta mayor humedad es en la costa, el Amazonas, los llanos y el Orinoco.

1.6.6 vientos en Colombia. “Colombia, por encontrarse geográficamente ubicada en plena zona de convergencia intertropical, está sometida a los vientos alisios que soplan del noreste en el hemisferio Norte y del sureste en el hemisferio Sur, aunque hay que aclarar que los vientos no tienen siempre exactamente estas direcciones”¹⁶.

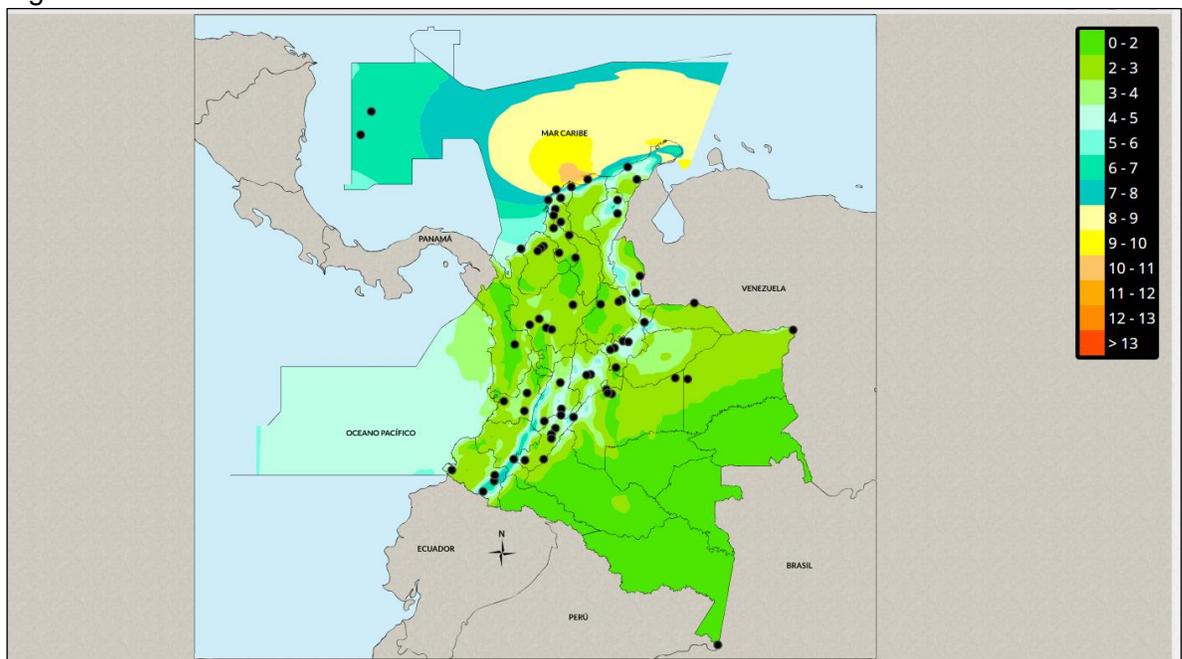
¹⁵ GARCIA, Angélica - Colombia País Maravilloso [en línea]. Clima Colombiano - Factores Atmosféricos del Clima [citado 17 Oct., 2018] Disponible en : <https://www.todacolombia.com/geografia-colombia/clima-colombia.html>

¹⁶ GARCIA, Angélica - Colombia País Maravilloso [en línea]. Clima Colombiano - Factores Atmosféricos del Clima [citado 17 Oct., 2018] Disponible en : <https://www.todacolombia.com/geografia-colombia/clima-colombia.html>

La brisa de mar-tierra se presenta en las proximidades de las costas. Frecuentemente al final de la mañana se establece un viento que sopla del mar hacia la tierra y al comienzo de la tarde alcanza su máxima intensidad; después disminuye progresivamente y en la noche puede cesar o invertirse en una corriente dirigida de la tierra al mar.

La brisa de valle-montaña se produce cuando las pendientes de las montañas se calientan por radiación solar y la temperatura del suelo se hace más alta que la del aire; así, se establece una corriente que sube por las montañas o colinas en días soleados. En la noche el suelo se enfría lo que ocasiona que el aire descienda de las montañas a los valles.

Figura 13. Atlas de Colombia



Fuente. IDEAM [en línea], [Consultado 15, enero, 2019]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

1.6.7 Lluvias o precipitaciones en Colombia. En el país se encuentra un gran volumen de lluvias, debido a las diferentes regiones y su ubicación geográfica, los océanos y la amazonia influyen de manera considerable en las lluvias debido al encuentro de las corrientes de aire húmedo.

“En nuestro país se presentan dos regímenes o patrones de lluvias, uno denominado monomodal, caracterizado por un largo periodo de lluvias que es seguido por un periodo seco; este régimen se presenta principalmente en las zonas Sur, Norte y Occidental del país. El segundo régimen se denomina bimodal, se

caracteriza por presentar dos periodos lluviosos intercalados por uno seco. Este régimen se manifiesta principalmente en la zona central”¹⁷.

¹⁷ GARCIA, Angelica - Colombia País Maravilloso [en línea]. Clima Colombiano - Factores Atmosféricos del Clima [citado 17 Oct., 2018] Disponible en : <https://www.todacolombia.com/geografia-colombia/clima-colombia.html>

2. CONDICIONES CLIMATICAS

Para evaluar las condiciones climáticas requeridas en el proyecto, se llevarán a cabo mediciones en dos puntos geográficamente distintos:

- Finca el Jordán en el municipio de Quetame, Cundinamarca.
- Cerro del Butulu ubicado en el municipio de La Vega, Cundinamarca.

Con el fin de identificar las variables más importantes del viento, el cual es toda masa de aire en movimiento generada por el desigual calentamiento que se presenta en la superficie terrestre, las variables a tener en cuenta son principalmente: la velocidad del viento, la dirección, la temperatura, altitud.

Comparando los resultados obtenidos en los dos sitios, el lugar con las mejores características de los vientos locales es en la Finca el Jordán ubicada en el municipio de Quetame, Cundinamarca., ya que por su geografía se obtienen datos considerablemente constantes durante el periodo de mediciones además datos con una determinación precisa.

2.1 RESULTADOS OBTENIDOS

Se realizará un estudio del viento teniendo en cuenta la rapidez con la cual la energía es empleada (Potencial Eólico), con estos valores ya establecidos obtendremos las velocidades de diseño, para cumplir con esta actividad se realizaron mediciones con un anemómetro digital llevando a cabo las correspondientes mediciones con un intervalo de tiempo de 20 minutos, desde las 8:00 am hasta las 5:00 pm, dicho dispositivo nos sirve para medir la velocidad del tiempo, temperatura, hallar máximos y mínimos de la velocidad del viento y a identificar la dirección del viento.

A continuación, se observan las variables del viento de la zona donde se desea implementar el aerogenerador.

Tabla 1. Variables del viento

VARIABLES DEL VIENTO	
DIRECCION DEL VIENTO	NORTE (22,61%)
HUMEDAD RELATIVA	80%
ALTITUD	2500 msnm
VELOCIDAD MEDIA	3,669 m/s
TEMPERATURA PROM	8 °C
PRESION	75,32 Kpa
DENSIDAD	0,9335 $\frac{kg}{m^3}$

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2, se muestran los datos obtenidos en las mediciones obtenidas en un día.

Tabla 2 Resultados mediciones Día 1

RESULTADOS OBTENIDOS DIA 1			
16/12/2019 "8:00-17:00"			
Hora	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Direccion
8:00	3,605	6	NW H
8:20	3	6,4	N A
8:40	2,905	6,8	E C
9:00	3,405	8	E C
9:20	3,505	8,2	N A
9:40	2,705	8,2	NE B
10:00	2,7	8,3	SE D
10:20	2,9	8,3	SW F
10:40	2,305	8	S E
11:00	2,103	8	S E
11:20	2,105	8	SW F

Tabla 2. (Continuación)

Hora	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)		Dirección
11:40	2,124	9	SW	F
12:00	2	9	SW	F
12:20	2,005	9	S	E
12:40	2,215	11	SE	D
13:00	2,365	11	E	C
13:20	3,405	11	E	C
13:40	3,505	10,8	NE	B
14:00	2,505	10,8	NE	B
14:20	2,6	10,6	N	A
14:40	2,805	10	NE	B
15:00	2,85	10	NW	H
15:20	3,015	8	N	A
15:40	3,405	8	N	A
16:00	3,805	8	NW	H
16:20	3,034	6	NW	H
16:40	3	6	N	A
17:00	4,3	6	N	A

Fuente: elaboración propia

Los datos obtenidos en las mediciones se ilustran en el Anexo A.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS VIENTOS

Para determinar el potencial eólico de la zona es importante tener en cuenta la dirección del viento y todas las variables topográficas del lugar, que puedan alterar las características de nuestro diseño, “usando herramientas meteorológica”¹⁸, los datos meteorológicos tomados por los autores en el lugar, se podrá obtener la velocidad media, la cual será la base para el desarrollo de nuestro diseño, la temperatura promedio se obtuvo por estudios realizados por el departamento de planeación de Quetame, Cundinamarca.

¹⁸ VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 63p. ISBN 978-958-778-232-5

Cuadro 2. Tratamiento estadístico

Datos			Cálculos			
Intervalo de la clase (m/s)	Centro de la clase	Frecuencia de la clase	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada	Productos	
	v (m/s)	n_i (datos)	$f_i=n_i/N$	F_i	$f_i v$	$f_i v^2$
$1 \leq v \leq 2$	1,5	20	0,238	0,238	0,357	0,187
$2 < v \leq 3$	2,5	25	0,298	0,536	0,75	1,044
$3 < v \leq 4$	3,5	18	0,214	0,75	0,749	2,193
$4 < v \leq 5$	4,5	10	0,119	0,869	0,536	3,139
$5 < v \leq 6$	5,5	3	0,036	0,905	0,198	2,874
$6 < v \leq 7$	6,5	2	0,024	0,929	0,156	5,028
$7 < v \leq 8$	7,5	2	0,024	0,953	0,18	6,019
$8 < v \leq 9$	8,5	2	0,024	0,977	0,204	4,263
$9 < v \leq 10$	9,5	1	0,012	0,989	0,114	1,083
$10 < v \leq 11$	10,5	1	0,012	1	0,16	2,646
Total		N=84	1		3,669	28,476

Fuente: elaboración propia con base en VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 63p. ISBN 978-958-778-232-5

A partir de los datos tomados y luego del tratamiento estadístico se determina que la velocidad media es de 3,669 m/s.

Para el cálculo del potencial eólico es importante determinar el factor de energía F_e , este será obtenido por medio de la interpolación de una tabla de distribuciones de Weibull para distintos parámetros de k (Factor de forma) que es calculado a partir de la siguiente ecuación.

Ecuación 2. Factor de forma

$$k = 0,9791 \left(\frac{\langle v \rangle}{\sigma} \right)^{1,1058}$$

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 78p. ISBN 978-958-778-232-5

Donde:

k = Factor de forma.
 $\langle v \rangle$ = Velocidad media (m/s).
 σ = desviación típica.

Para hallar la desviación típica lo hacemos con la siguiente ecuación;

Ecuación 3. Desviación típica

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n f_i * (v_i - \langle v \rangle)^2}$$

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 78p. ISBN 978-958-778-232-5

Donde:

σ = Desviación típica.
 f_i = Frecuencia relativa.
 v_i = Centro de clase.
 $\langle v \rangle$ = Velocidad media (m/s).

Luego de realizar todos los cálculos y reemplaza los valores que los encontramos en la tabla 3, en la ecuación queda;

$$\sigma = \sqrt{5,577}$$

Resolviendo la ecuación;

$$\sigma = 2,362$$

Teniendo la desviación típica ya podemos hallar el parámetro k (Factor de forma), reemplazamos en la ecuación;

$$k = 0,9791 \left(\frac{\langle 3,669 \frac{m}{s} \rangle}{2,362} \right)^{1,1058} = 1,593$$

Luego de hallar los valores de k y $\frac{\sigma}{\langle v \rangle}$ se interpolan los valores que se encuentran en el cuadro 3, para obtener el factor de energía F_e el cual será utilizado más adelante para hallar el potencial eólico en el lugar.

Cuadro 3. Distribución de Weibull para factores k

k	$\langle v \rangle / c$	$\sigma / \langle v \rangle$	$\tilde{v} / \langle v \rangle$	$v_m / \langle v \rangle$	$F_e = \langle v^3 \rangle / \langle v \rangle^3$	$F_e^{1/3} = v^* / \langle v \rangle$
1,2	0,941	0,837	0,783	0,239	3,99	1,59
1,4	0,911	0,724	0,844	0,448	3,03	1,45
1,6	0,897	0,640	0,887	0,604	2,48	1,35
1,8	0,889	0,575	0,917	0,717	2,14	1,29
2.0	0,886	0,523	0,939	0,798	1,91	1,24
2.2	0,886	0,480	0,956	0,857	1,75	1,21
2.4	0,886	0,444	0,968	0,901	1,63	1,18
2.6	0,888	0,413	0,978	0,934	1,53	1,15
2.8	0,890	0,387	0,985	0,959	1,46	1,13
3.0	0,893	0,363	0,991	0,978	1,40	1,12
3.2	0,896	0,343	0,996	0,993	1,36	1,11
3.5	0,900	0,316	1,001	1,010	1,30	1,09
4.0	0,906	0,281	1,007	1,027	1,23	1,07
5.0	0,918	0,229	1,012	1,042	1,15	1,05
6.0	0,928	0,194	1,014	1,046	1,11	1,04
7.0	0,935	0,168	1,014	1,046	1,08	1,03
8.0	0,942	0,148	1,014	1,044	1,06	1,02
9.0	0,947	0,133	1,014	1,042	1,05	1,02
10.0	0,951	0,120	1,013	1,040	1,04	1,01

Fuente: elaboración propia con base en VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 73p. ISBN 978-958-778-232-5

El factor F_e que obtenemos después de la interpolación es de 2,5. Este factor se usara más adelante para hallar el potencial eólico disponible en el lugar.

Para continuar con el análisis es necesario determinar las velocidades a diferentes alturas mediante la siguiente ecuación;

Ecuación 4. Variación velocidad con la altura

$$\frac{\langle v' \rangle}{\langle v \rangle} = \left(\frac{z'}{z} \right)^\alpha$$

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel.
Ingeniería de la Energía Eólica ,2013. 82p.
ISBN 978-958-778-232-5

Donde:

$\langle v' \rangle$ = Velocidad a la altura z' (m/s).

$\langle v \rangle$ = Velocidad media anual (m/s).

z = Altura de medición (m).

z' = Altura diferente a la altura de medición (m).

α = Coeficiente que depende de la longitud de rugosidad z_0 (m).

La rugosidad en sitio de medición se encuentra caracterizada por el parámetro z_0 , el cual se clasifica según su longitud (m) y su clase, como solo conocemos la velocidad media, medida de una altura y no se dispone de más información sobre la rugosidad del terreno, podemos obtener una primera estimación del coeficiente de rugosidad, partimos de la ecuación de Justus – Mikjail, dada por;

Ecuación 5. Coeficiente de rugosidad

$$\alpha = \frac{0.37 - 0,088 \ln \langle v_z \rangle}{1 - 0,088 \ln \left(\frac{z}{10} \right)}$$

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel.
Ingeniería de la Energía Eólica, 2013.
83p. ISBN 978-958-778-232-5

Donde:

v_z = Velocidad media anual (m/s).

z = Altura de medición (m).

Reemplazando en la ecuación se obtiene;

$$\alpha = \frac{0,37 - 0.088 \ln \left(3,669 \frac{m}{s} \right)}{1 - 0,088 \ln \left(\frac{1m}{10} \right)} = 0,21254$$

Con el valor de coeficiente respecto a la longitud de rugosidad del sitio, usamos la ecuación anterior para determinar las velocidades a diferentes alturas.

- Velocidad a 10 metros de altura;

$$\frac{\langle v' \rangle}{3,669 \frac{m}{s}} = \left(\frac{10m}{1m} \right)^{0,21254}$$

$$\langle v' \rangle = \left(\frac{10m}{1m} \right)^{0,21254} * 3,669 \frac{m}{s} = 5,9847 \frac{m}{s}$$

Seguendo el procedimiento que realizamos en la anterior ecuación determinamos la velocidad a 6, 10 y 12 metros de altura, como se muestra en el siguiente cuadro 1.

Tabla 3. Velocidad diseño a distintas alturas

Altura (m)	Velocidad (m/s)
1	3,669
3	4,633
6	5,369
10	5,9847
12	6,22

Fuente: elaboración propia

La densidad del aire en el sitio es importante para hallar el potencial eólico de la zona, la podemos hallar con la siguiente ecuación;

Ecuación 6. Densidad del aire

$$\rho = 1,225 \left(\frac{288}{^{\circ}\text{C} + 273} \right) * e^{-\left(\frac{h}{8,435} \right)}$$

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 92p. ISBN 978-958-778-232-5

Donde:

ρ = Densidad del aire (kg/m³).

$^{\circ}\text{C}$ = Temperatura.

h = Altura sobre el nivel del mar (msnm).

Reemplazando en la ecuación tenemos;

$$\rho = 1,225 \left(\frac{288}{8 + 273} \right) * e^{-\left(\frac{2,500\text{msnm}}{8,435} \right)} = 0,9335 \frac{kg}{m^3}$$

2.2.1 Potencial Eólico. Una vez definida la velocidad media y la altura de instalación, es necesario relacionar todos los parámetros del sitio para hallar el potencial eólico, el potencial eólico en la zona a una altura de 10m se puede hallar por medio de la siguiente ecuación:

Ecuación 7. Potencial eólico

$$P_{Sitio} = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * F_e$$

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 94p. ISBN 978-958-778-232-5

Donde:

P_{Sitio} = Potencia disponible (w).
 ρ = Densidad del aire (kg/m³).
 A = Área de barrido (m²).
 v = Velocidad del viento (m/s).
 Fe = Factor de energía

Reemplazando en la ecuación;

$$P_{sitio} = \frac{1}{2} * \left(0,9335 \frac{Kg}{m^3}\right) * (19,99m^2) * \left(5,98 \frac{m}{s}\right)^3 * (2,5)$$

$$\rho_{sitio} = 4,999.93 w$$

Utilizando la anterior ecuación, pero esta vez agregando el coeficiente de potencia (CP) se podrá obtener la potencia captada por el aerogenerador;

$$P_c = \frac{1}{2} * \rho * A * V^3 * C_p$$

El aerogenerador no podrá captar el 100% del potencial eólico disponible en la zona para convertirlo en energía mecánica, lo máximo que el aerogenerador captará será 59,26%, este valor se conoce como el límite de Betz, este es un valor teórico de esta manera el potencial ideal captado por el aerogenerador;

$$P_{Cideal} = \frac{1}{2} * \left(0,9335 \frac{Kg}{m^3}\right) * (19,99m^2) * \left(5,98 \frac{m}{s}\right)^3 * (0,5926)$$

$$P_{Cideal} = 1,185.184 w$$

Con este valor hallado se es necesario determinar el coeficiente de potencia para las condiciones dadas, el cual no podrá superar el límite de betz. Para el coeficiente de potencia real puede estar

“La velocidad nominal del aerogenerador es el 70% más la velocidad media de diseño”¹⁹, con la velocidad media hallada se puede hallar la velocidad nominal.

Ecuación 8. Velocidad nominal

$$v_{nominal} = (\langle v \rangle * 0,7 + \langle v \rangle)$$

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 94p. ISBN 978-958-778-232-5

Reemplazando;

$$v_{nominal} = \left(5,98 \frac{m}{s} * 0,7\right) + 5,98 \frac{m}{s}$$

$$v_{nominal} = 10,17 \frac{m}{s}$$

El valor de velocidad anteriormente hallado es el punto en donde el aerogenerador producirá la mayor cantidad de potencia. Con el parámetro k= 1,593 de la distribución de Weibull, con este valor y la siguiente tabla interpolamos para encontrar el valor de la relación $v_{mp}/\langle v \rangle$.

Cuadro 4. Relación K, $v_{mp}/\langle v \rangle$, $[v^*]/\langle v \rangle$

K	$v_{mp}/\langle v \rangle$	$[v^*]/\langle v \rangle$
1,2	2,41	1,59
1,4	2,07	1,45
1,6	1,85	1,35
1,8	1,70	1,29
2,0	1,60	1,24
2,2	1,51	1,21
2,4	1,45	1,18
2,6	1,40	1,15
2,8	1,36	1,13
3,0	1,33	1,12

¹⁹ VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 248p. ISBN 978-958-778-232-5

Cuadro 4. (continuación)

K	$v_{mp}/\langle v \rangle$	$[v^*]/\langle v \rangle$
3,5	1,26	1,09
4,0	1,22	1,07
5,0	1,17	1,05

Fuente: elaboración propia con base en VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 98p. ISBN 978-958-778-232-5

El valor de la relación $v_{mp}/\langle v \rangle$ será;

$$1,85 = v_{mp}/\langle v \rangle$$

Donde:

k = Parámetro de forma Weibull.

v_{mp} = Velocidad del viento para que la potencia sea la máxima.

$\langle v \rangle$ = Velocidad media (m/s).

El valor v_{mp} es aproximadamente igual a la velocidad nominal ($v_{mp} \approx v_{nominal}$), despejando;

$$v_{mp} = 1,85 * \langle v \rangle$$

Reemplazando;

$$v_{mp} = 1,85 * 5,98 \frac{m}{s}$$

$$v_{mp} = 11,06 \frac{m}{s}$$

Por lo tanto, se determina que la velocidad nominal del aerogenerador estará entre 10,17m/s y 11,06 m/s. por eso la velocidad nominal del sistema se definirá a los 10,62 m/s, la cual vamos utilizar más adelante para la selección del alternador.

2.3 CONSUMO ENERGÉTICO

La finca cuenta con una casa que tendrá los siguientes electrodomésticos e iluminación, como se muestra en la tabla 4;

Tabla 4. Consumo energético

Equipo	Cantidad	Potencia (Kw)	Horas al día	Horas al mes	Consumo Kwh
Nevera	1	0,18	24	720	12,96
Televisor	2	0,12	8	240	28.8
Plancha	1	1	1	4	4
Lavadora	1	0,75	2	40	30
Equipo de sonido	1	0,15	4	80	12
Bombillos	10	0,1	6	180	18
Licuada	1	0,4	0.5	15	6
Ducha Eléctrica	1	1,5	1	30	45
Bomba Eléctrica 2,5 hp	1	2	3	90	180
Cerca Eléctrica	1	0,035	24	720	25,2
					334.96

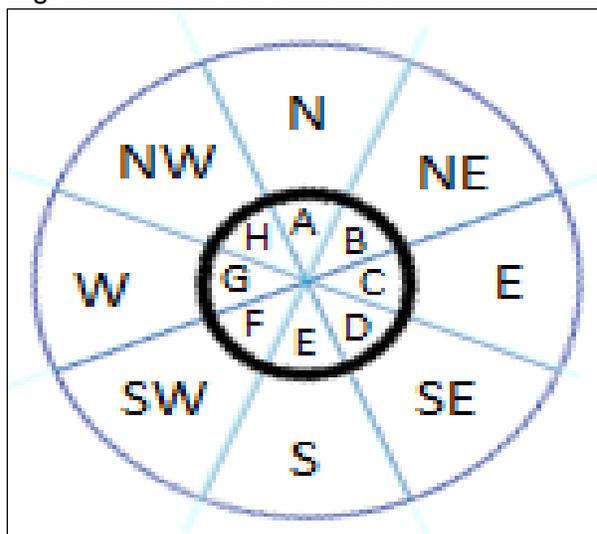
Fuente: Elaboración propia

De esta manera la energía producida por el aerogenerador será demandada en su totalidad por la casa.

2.3 ROSA DE LOS VIENTOS

Una de las ventajas de los aerogeneradores de eje vertical respecto a su diseño, se enfoca en no necesitar un mecanismo de orientación por lo tanto recibe vientos de cualquier dirección sin importar su magnitud y sentido.

Figura 14. Rosa de los vientos



Fuente: elaboración propia

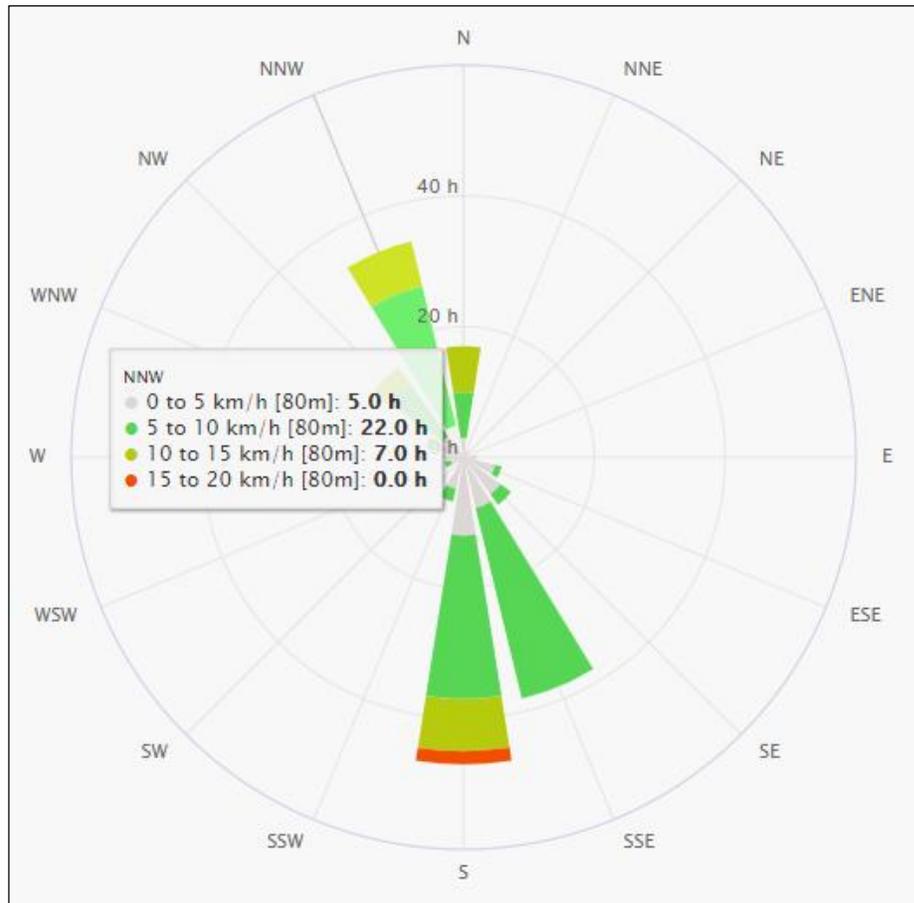
Por medio de la rosa de los vientos se marcan 8 direcciones cardinales como el Norte, Sur, Oeste, este y sus puntos intermedios, además en la gráfica de la rosa de los vientos identificamos cual es el punto con mayor frecuencia direccional durante las mediciones, cuál es la velocidad promedio de cada punto y la dirección dominante.

Tabla 5 Clasificación datos obtenidos

Clasificación	Dirección	Repetibilidad	Frecuencia %	Velocidad (m/s)
A	N	19	22,61904762	6,503
B	NE	18	21,42857143	6,577
C	E	10	11,9047619	5,163
D	SE	9	10,71428571	4,906
E	S	8	9,523809524	4,285
F	SW	9	10,71428571	4,908
G	W	5	5,952380952	5,1916
H	NW	6	7,142857143	3,26

Fuente: elaboración propia

Figura 15. Rosa de los vientos Quetame



Fuente: METEOBLUE. [sitio web]. Cundinamarca: Rosa de los vientos Quetame. [consulta: 15 febrero 2019]. Disponible en: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/archive/windrose/quetame_colombia_3671119?daterange=2019-05-17+to+2019-05-24¶ms=32%3B80+m+above+gnd%3B31%3B80+m+above+gnd&polarunit=hour°ree_resolution=22.5&value_resolution=5&windspeedunit=KILOMETER_PER_HOUR

No es posible graficar la rosa de los vientos del lugar donde se realizaron las mediciones, ya que no se cuenta con una licencia de un programa graficador de rosa de los vientos, en la página virtual meteoblue se encontró una rosa de los vientos del lugar, los datos ilustrados cambian considerablemente a los datos obtenidos de las mediciones por la diferencia de los tiempos.

3. CONCEPTUALIZACION Y PARAMETRIZACION

Para iniciar el diseño de aerogenerador, se requiere complementar el análisis realizado en el capítulo 2 acerca del estudio del viento, como complemento se identificarán las partes principales que componen el aerogenerador de eje vertical ilustrando cada elemento con el CAD que se obtuvo en el diseño detallado, destacando los materiales más relevantes de fabricación.

La turbina eólica, se encargará de convertir la energía cinética del viento disponible en la zona estudiada, a energía mecánica y posteriormente a energía eléctrica con el fin de satisfacer la demanda de una finca de 2000 m² garantizando un correcto funcionamiento.

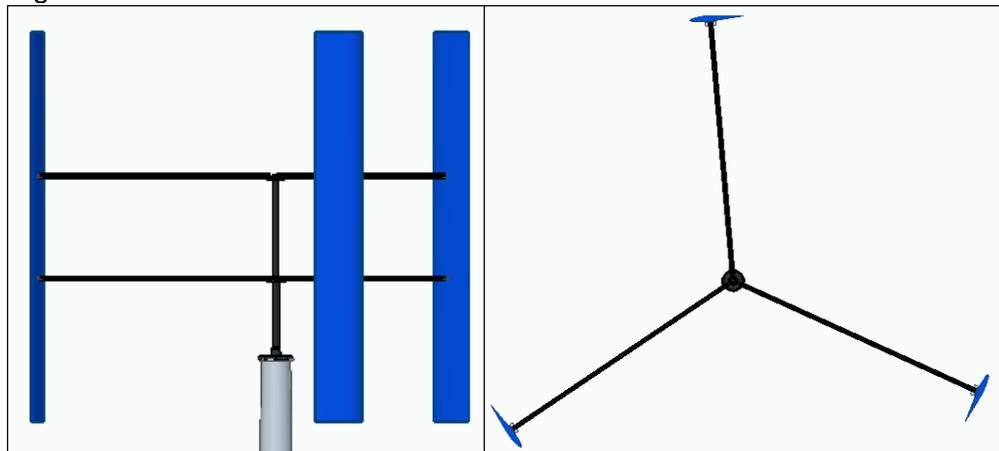
A continuación, se presentará el análisis realizado de los requerimientos mencionados anteriormente para desarrollar el diseño del aerogenerador.

3.1 SISTEMAS Y COMPONENTES DEL AEROGENERADOR

3.1.1 Sistema de potencia.

3.1.1.1 Rotor. “Es el elemento de la máquina que interactúa con el viento para lograr el proceso de conversión, transformando la energía cinética del viento en energía mecánica.”²⁰ El rotor está conformado por los alabes, los brazos de sujeción, el eje, los soportes y los rodamientos.

Figura 16. Rotor

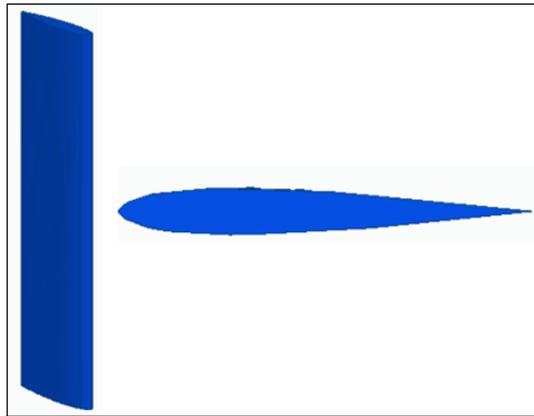


Fuente: elaboración propia

²⁰ ORDUZ BERDUGO, Oscar Iván y SUAREZ PEREZ, Julián Edgardo. Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas. Ingeniería Mecánica, 2011. 102 p.

3.1.1.2 Alabe. “Son unos de los elementos más importantes del sistema ya que están en contacto directo con el viento”²¹, debemos tener en cuenta que los alabes deben estar perfectamente alineados con los brazos, en el diseño de las palas debemos tener en cuenta tres características: “el peso, la resistencia y la fuerza ya que es el elemento que soporta la mayor cantidad de esfuerzos”²², en la fabricación de alabes se utilizan materiales dúctiles y resistentes, habitualmente son construidas con fibra de vidrio ya que el material proporciona resistencia y solidez

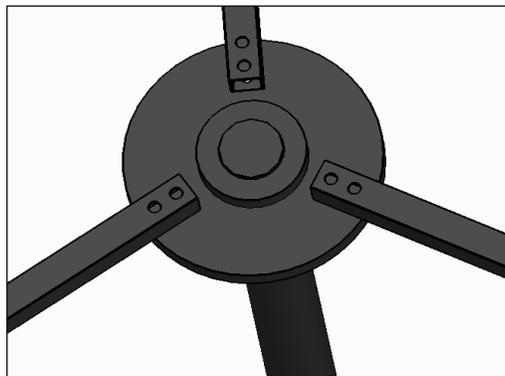
Figura 17. Alabe



Fuente: elaboración propia

3.1.1.3 Brazo. Los brazos estarán conectados por medio de un disco inferior y superior al eje, estos soportarán el peso de los alabes.

Figura 18. Brazos aerogenerador eje vertical



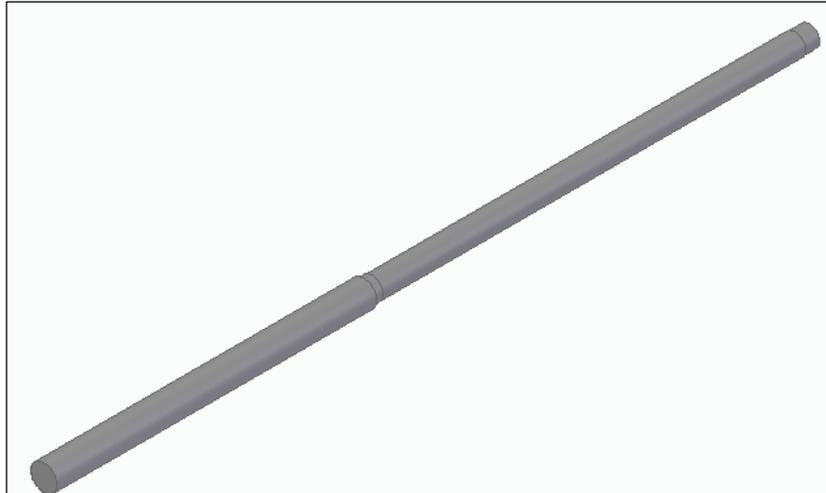
Fuente: elaboración propia

²¹ JARAUTA Rovira, Laura. Las Energías Renovables. Barcelona, ESPAÑA: Editorial UOC, 2015

²² LUNA GONZALEZ, Iván Felipe y RAMOS ROA, María Fernanda. Diseño de un aerogenerador para suministro de energía eléctrica para el alumbrado nocturno-externo de la planta vidrio Andino s.a. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Mecánica, 2017. 41 p

3.1.1.4 Eje. El eje es el elemento del rotor que soporta las cargas transmitidas por los alabes y brazos, se encarga de transmitir la potencia del rotor al eje del alternador.

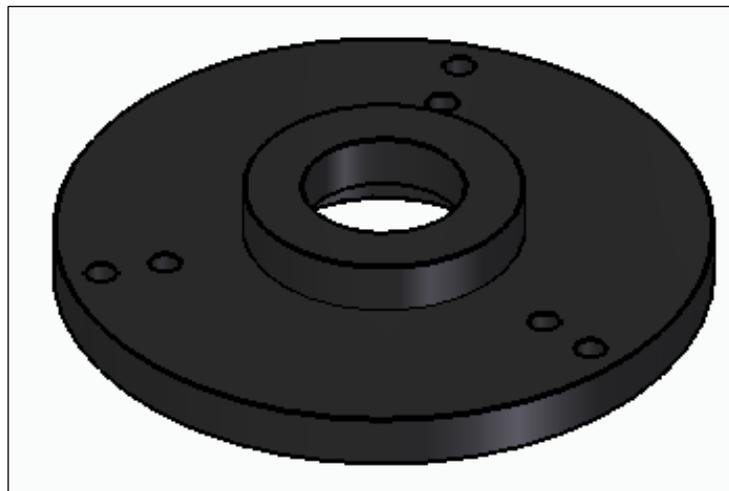
Figura 19. Eje



Fuente: elaboración propia

3.1.1.5 Soportes del eje. Los discos de soporte se encargaran de sujetar los brazos y los alabes al eje de trasmisión, en los soportes se alojan los rodamientos que irán sujetos al eje.

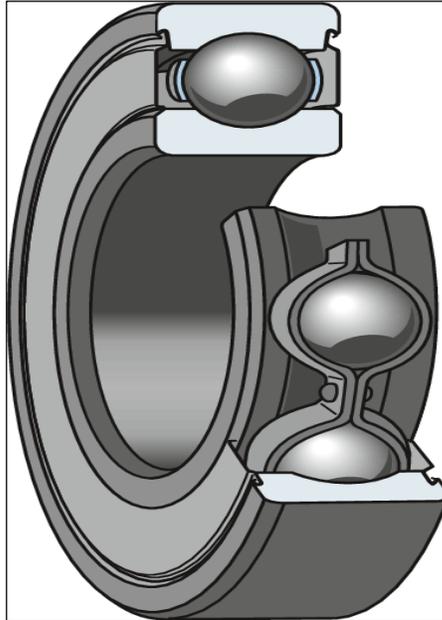
Figura 20. Soporte del eje



Fuente: elaboración propia

3.1.1.6 Rodamientos. Los rodamientos son elementos que permiten el movimiento relativo entre dos elementos mecánicos, son diseñados para soportar cargas axiales y radiales.

Figura 21. Rodamiento rígido de bolas



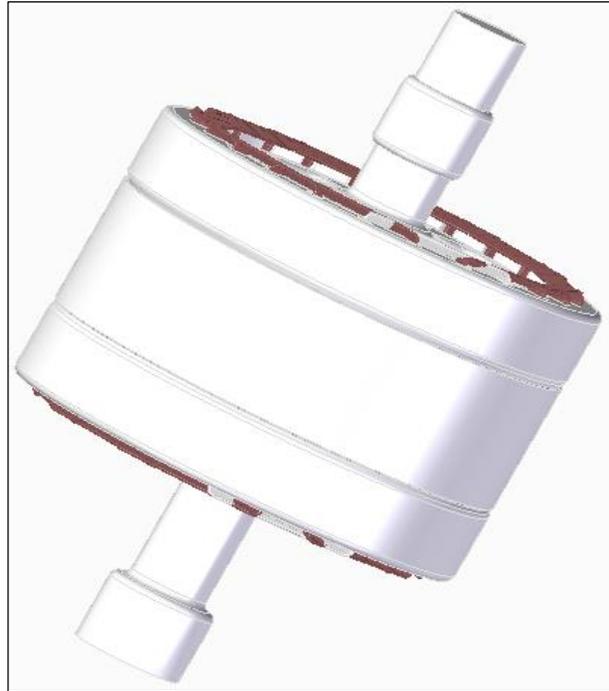
Fuente: SKF. Catálogo de rodamientos. [En línea]. [Consultado: 18 octubre 2019]. Disponible en: https://www.skf.com/binary/87-121486/0901d19680416953-10000_2-ES---Rolling-bearings.pdf

3.1.2 Sistema de generación

3.1.2.1 Alternador. Es quien transforma la energía mecánica en energía eléctrica y estará acoplado directamente al rotor para disminuir las pérdidas en el sistema. “Existen tres tipos de generadores: Asíncrono, Asíncrono con rotor bobinado y Síncrono.”²³

²³ LUNA GONZALEZ, Iván Felipe y RAMOS ROA, María Fernanda. Diseño de un aerogenerador para suministro de energía eléctrica para el alumbrado nocturno-externo de la planta vidrio Andino s.a. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Mecánica, 2017. 42 p

Figura 22. Alternador síncrono de imanes permanentes



Fuente: elaboración propia

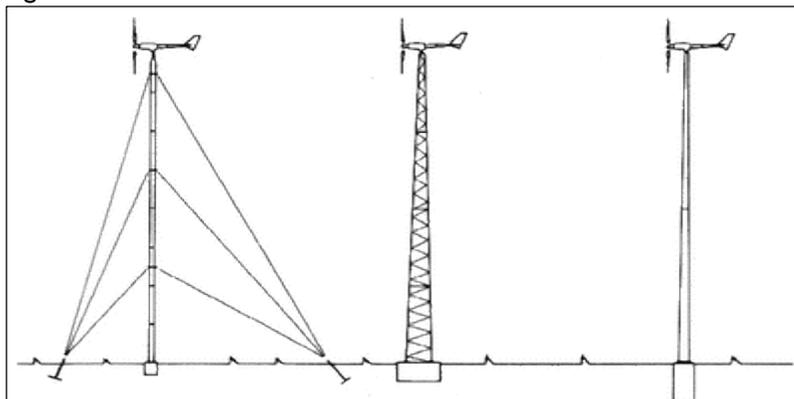
3.1.3 Sistema estructural

3.1.3.1 Torre. “La torre es el elemento estructural encargado de soportar las cargas y esfuerzos producidos por la turbina eólica y otros externos como las fuerzas del viento y diferentes condiciones climáticas”.²⁴ En la actualidad existen aproximadamente 5 tipos de estructura para aerogeneradores, los cuales son:

- Torres reticuladas
- Torres basculantes
- Torres de hormigón
- Torres metálicas
- Torres híbridas

²⁴ ROMERO SANABRIA, Jeison y SOTOMAYOR SANCHEZ, Nicolás. Diseño de un aerogenerador para la zona rural del Sumapaz, Cundinamarca. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Mecánica, 2016. 344 p

Figura 23. Estructura

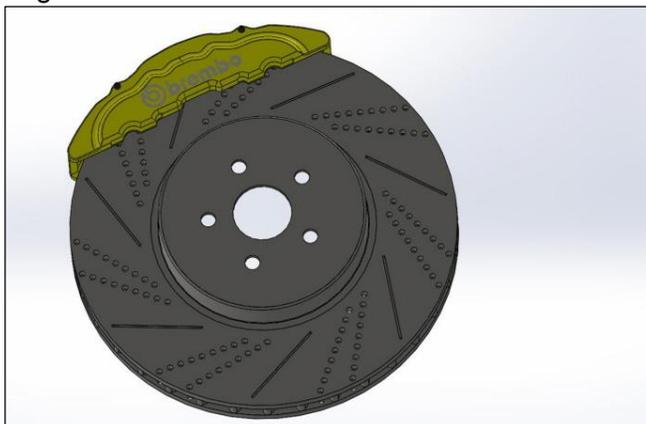


Fuente: Energía del viento conocimientos eólicos. [En línea].
[Consultado: 18 octubre 2019]. Disponible en:
https://inventhable.blogspot.com/2013_08_17_archive.html?view=sidebar

3.1.4 Sistema de control

3.1.4.1 Freno. En los aerogeneradores por lo general encontramos un freno, con “la función de disminuir las revoluciones por minuto que se presentan en el eje, de esta manera protegemos el sistema de generación y el de multiplicación. Se tienen frenos por accionamiento mecánico, hidráulico, neumático y eléctrico.”²⁵

Figura 24. Freno de disco



Fuente: COROFLOT. SOLIDWORKS. [En línea].
Colombia. [Consultado: 18 octubre 2019].
Disponible en:
<https://www.coroflot.com/stogniew/Solidworks>

²⁵ ROMERO SANABRIA, Jeison y SOTOMAYOR SANCHEZ, Nicolás. Diseño de un aerogenerador para la zona rural del Sumapaz, Cundinamarca. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Mecánica, 2016. 43 p

3.2 DISEÑO CONCEPTUAL

Va a ser un aerogenerador de eje vertical tripala, entregara energía eléctrica para una finca en el municipio de Quetame, Cundinamarca de 2.000m². Para este diseño la metodología estará sujeta a los objetivos establecidos, los cuales se quieren llevar a cabo. También se deben tener en cuenta las variables que afecten a la máquina como lo son: la zona, su ubicación, estudio de vientos, materiales para la fabricación, requerimientos, normas y leyes colombianas aplicadas a los aerogeneradores. Para que el proyecto sea desarrollado de una manera adecuada, el estudio de los factores nombrados es importante, ya que el funcionamiento del aerogenerador dependerá de las condiciones externas.

Figura 25. Transformación la energía eólica.



Fuente: elaboración propia

“Principio básico. La energía eólica se transforma en el aerogenerador mediante distintos principios físicos hasta llegar a la energía eléctrica, a continuación, se muestra el principio básico de transformación”²⁶:

Figura 26. Principio de la energía eólica.



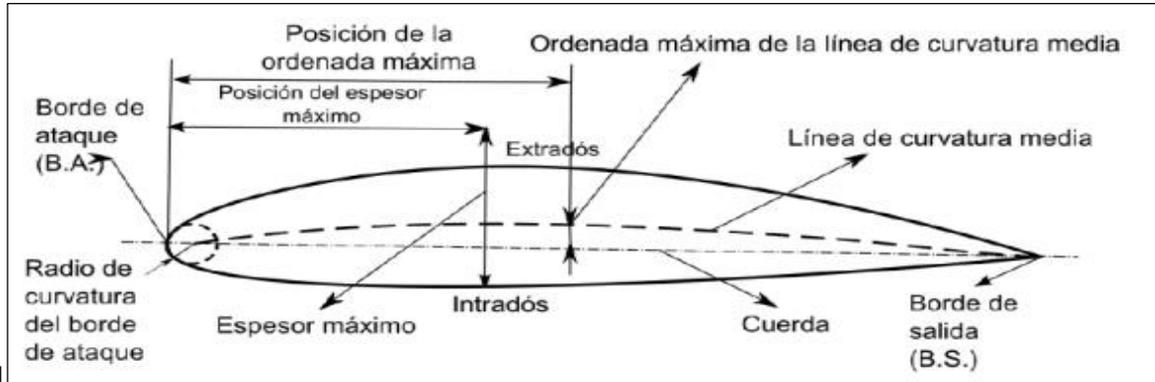
Fuente: ROMERO SANABRIA, Jeison y SOTOMAYOR SANCHEZ, Nicolás. Diseño de un aerogenerador para zona rural del Sumapaz, Cundinamarca

²⁶ ROMERO SANABRIA, Jeison y SOTOMAYOR SANCHEZ, Nicolás. Diseño de un aerogenerador para zona rural del Sumapaz, Cundinamarca. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Mecánica, 2016. 56 p.

4. SELECCIÓN PERFIL AERODINAMICO

Los perfiles aerodinámicos de los aerogeneradores se diseñan siguiendo perfiles aerodinámicos, de forma que las fuerzas de sustentación y arrastre sean las más eficientes por una parte para lograr extraer la mayor parte de la energía del viento y se facilite la regulación y control de la turbina.

Figura 27. Perfil aerodinámico



Fuente: sergio alfonso cáceres luque; estudio y modelamiento de una turbina eólica de eje vertical de pequeña escala [en línea]. Tesis de pregrado. Universidad de Chile, 2014. [Consultado 14 de marzo] Disponible en: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/116492/cf-caceres_sl.pdf?sequence=1

Para seleccionar el perfil aerodinámico adecuado para el diseño, se realizó una evaluación por el método Scoring evaluando 3 alternativas de diseño del perfil aerodinámico del aerogenerador de eje vertical basándonos en la serie NACA (National Advisory Committee of Aeronautics) 4 dígitos.

Para desarrollar la evaluación de Scoring debemos seleccionar los criterios de evaluación los cuales son: espesor máximo relativo, máxima curvatura de sustentación, ángulo relativo del viento o ángulo de ataque, relación coeficientes arrastre/elevación (C_l/C_d) y su desempeño. Seguidamente se realiza una ponderación según su interés.

Tabla 6. Ponderación

Nivel de importancia	Escala numérica
No importante	1
Poco importante	2
Importancia media	3
Importante	4
Muy importante	5

Fuente: elaboración propia

Teniendo la ponderación de cada uno de los criterios, se establece un nivel de seguridad y/o confianza con el fin de evaluar las alternativas planteadas y obtener la más adecuada.

Tabla 7 Nivel de confianza

Nivel de confianza	Escala Numérica
Extra bajo	1
Muy bajo	2
Bajo	3
Poco bajo	4
Medio	5
Poco alto	6
Alto	7
Muy alto	8
Extra alto	9

Fuente: elaboración propia

4.1 ALTERNATIVAS DE SOLUCION

A continuación, se describirán 3 alternativas de diseño, teniendo en cuenta los criterios de evaluación los cuales son: espesor máximo relativo, máxima curvatura de sustentación, ángulo relativo del viento o ángulo de ataque, relación coeficientes arrastre/elevación (Cl/Cd) y su desempeño para determinar y seleccionar la alternativa adecuada para el diseño del aerogenerador.

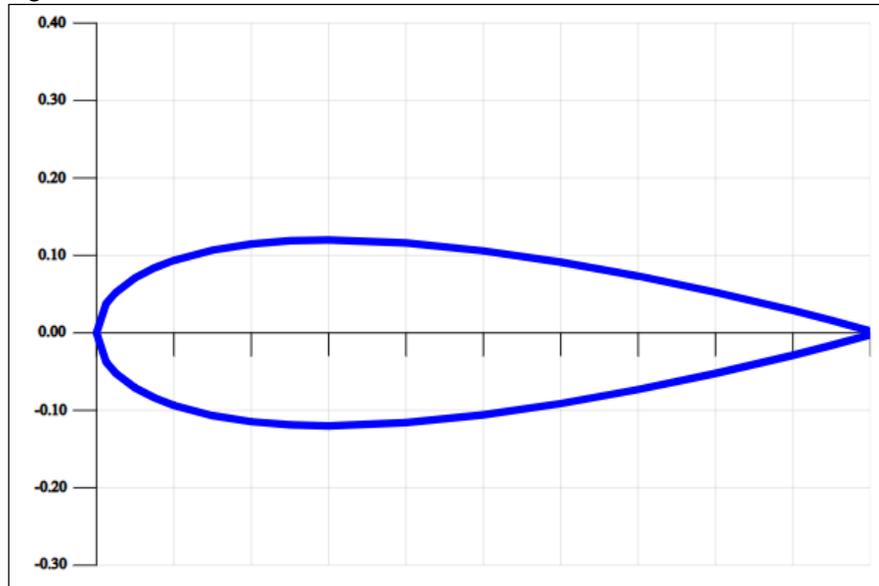
Aunque los perfiles que se usan para los aerogeneradores son similares a las alas de un avión, todos los perfiles tienen diferentes denominaciones, en muchos de los casos se especifican por la denominación NACA (National Advisory Committee of Aeronautics) junto a cuatro o cinco dígitos que definen su geometría.

En la serie NACA de cuatro dígitos que es la que vamos a usar se define de la siguiente manera:

- El primer dígito indica la máxima flecha de la línea media de la cuerda en porcentaje, proporcionando la curvatura máxima
- El segundo dígito indica la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de máxima flecha, en decimas de cuerda.
- Los dos últimos dígitos indican el máximo espesor en porcentaje de cuerda.

4.1.1 NACA 0024. Alternativa 1. NACA 0024. Es un perfil que a medida que cambia el ángulo de ataque los coeficientes de presión van a ser más bajos, además con el cambio de la velocidad del fluido, es decir, con el aumento de número de Reynolds ocurren variaciones significativas hacia el final del borde del perfil, este perfil tiene un espesor máximo de 24% respecto a la línea de cuerda y tiene una relación del coeficiente de arrastre/sustentación del 43%.

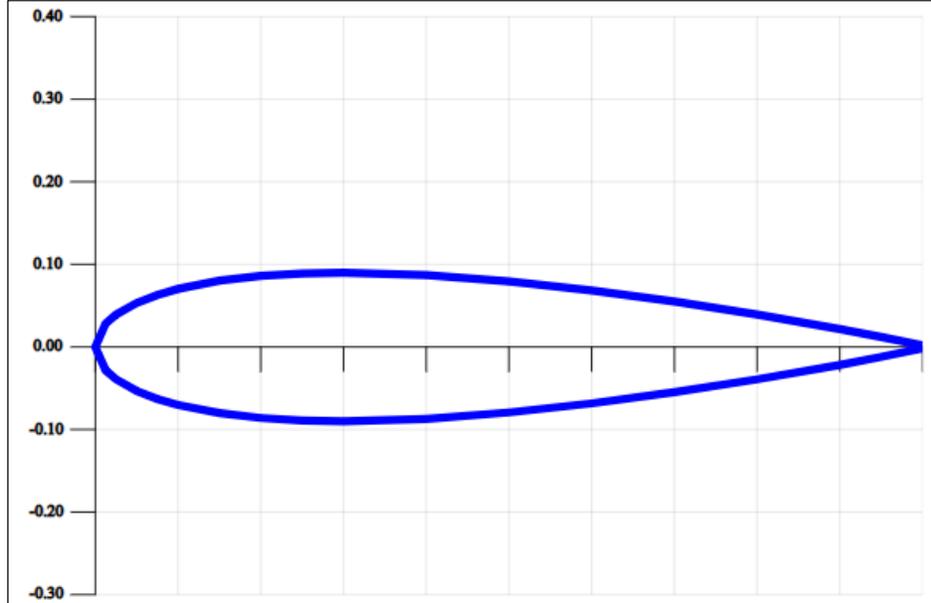
Figura 28. Perfil NACA 0024



Fuente: Airfoil investigation database, NACA 0024 [en línea]. [Citado 30 mar., 2019]. Disponible en: <http://www.airfoildb.com/airfoils/374>

4.1.2 NACA 0018. Alternativa 2. NACA 0018. Es un perfil simétrico con un espesor máximo relativo del 18% respecto al 30% de la cuerda, una ordenada máxima de la línea de la cuerda o camber del 0% la cual es la distancia máxima que existe desde la línea cuerda hasta la línea de curvatura media medida perpendicularmente desde la cuerda y por último una relación de coeficiente de arrastre/elevación de 51%. Datos tomados a un número de Reynolds de aproximadamente 200.000

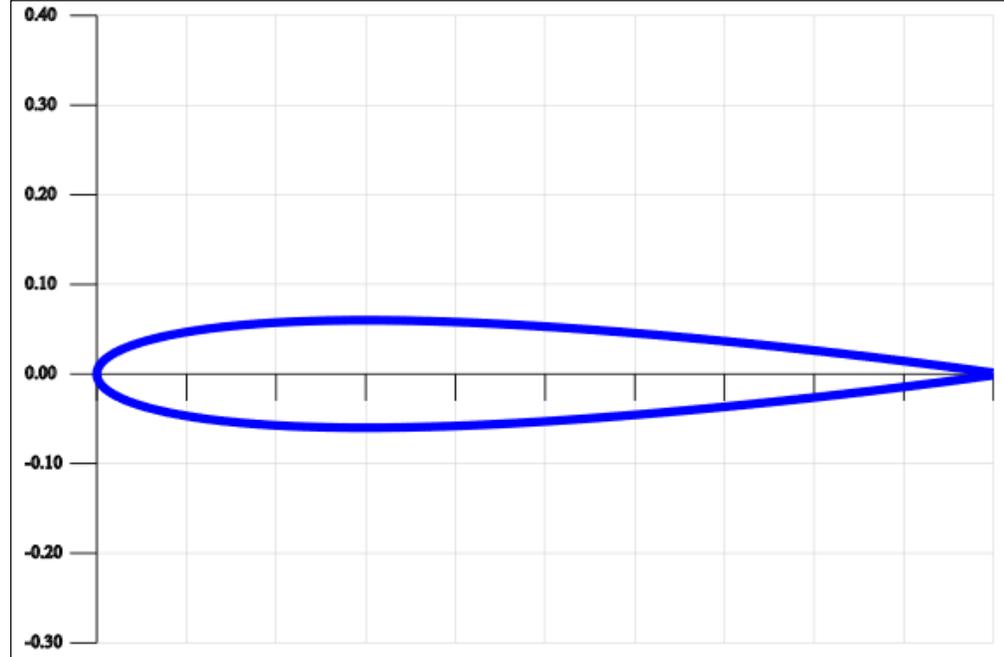
Figura 29. Perfil NACA 0018



Fuente: Airfoil investigation database, NACA 0018 [en línea]. [Citado 30 mar., 2019]. Disponible en: <http://www.airfoildb.com/airfoils/376>

4.1.3 NACA 0012. Alternativa 3. Es un perfil simétrico con un espesor máximo relativo del 12% respecto al 30% de la cuerda, una ordenada máxima de la línea de la cuerda del 0% la cual es la distancia máxima que existe desde la línea cuerda hasta la línea de curvatura media medida perpendicularmente desde la cuerda y por ultimo una relación de coeficiente de arrastre/elevación de 47,4%, datos tomados a un numero de Reynolds de aproximadamente 200.000.

Figura 30. Perfil NACA 0012



Fuente: Airfoil investigation database, NACA 0012 [en línea]. [Citado 30 mar., 2019]. Disponible en: <http://www.airfoildb.com/airfoils/435>

4.2 SELECCIÓN ALTERNATIVA

Como se resaltó al inicio del capítulo, para seleccionar la alternativa más adecuada al diseño, se evaluaron los criterios nombrados por medio del método de Scoring. Como primer paso, se realiza una ponderación según la importancia de cada criterio como se ilustra en la tabla 7.

Tabla 8 Ponderación de los criterios

Criterio	Ponderación W_i
Espesor	3
Curvatura	4
Angulo	5
CL/CD	5
Desempeño	5

Fuente: elaboración propia

Para continuar, se realiza una valoración de cada alternativa por medio de un cuadro comparativo como se ilustra en la tabla 7 teniendo en cuenta los valores que se mostraron en el planteamiento de las alternativas.

Cuadro 5. Nivel de confianza criterios

Criterio	Alternativa 1 r_{i1}	Alternativa 2 r_{i2}	Alternativa 3 r_{i3}
Espesor	5	6	7
Curvatura	3	3	3
Angulo	3	6	7
CL/CD	3	6	4
Desempeño	5	5	5

Fuente: elaboración propia

Para la selección de la alternativa más adecuada se implementa la siguiente ecuación:

Ecuación 9. Scoring

$$S_j = \sum (W_i * r_{ij})$$

Donde:

W_i = Ponderación por cada criterio

r_{ij} = Alternativa

Resolviendo:

$$S_j \text{ alternativa 1} = (3*5) + (4*3) + (5*3) + (5*3) + (5*5)$$

$$S_j \text{ alternativa 1} = 82$$

$$S_j \text{ alternativa 1} = (3*6) + (4*3) + (5*6) + (5*6) + (5*5)$$

$$S_j \text{ alternativa 1} = 115$$

$$S_j \text{ alternativa 1} = (3*7) + (4*3) + (5*7) + (5*4) + (5*5)$$

$$S_j \text{ alternativa 1} = 113$$

En la tabla 6 se ven ilustrados los resultados obtenidos en la selección de la alternativa por medio del método Scoring.

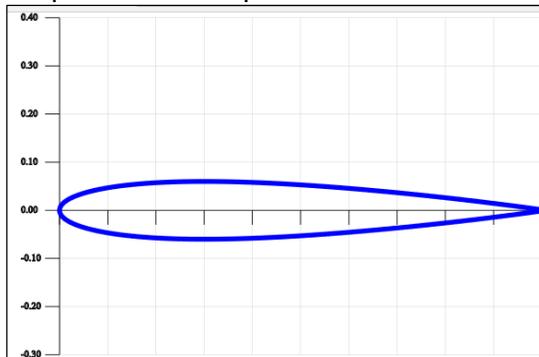
Cuadro 6. Resultados método Scoring

Criterio	Ponderación	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Espesor	3	5	6	7
Curvatura	4	3	3	3
Angulo	5	3	6	7
CL/CD	5	3	6	4
Desempeño	5	5	5	5
Puntaje	Σ	82	115	113

Fuente: elaboración propia

Según los datos mostrados en la tabla de resultados método scoring, la alternativa con mayor puntaje es la alternativa 2, se selecciona el perfil naca 0018 ya que evidencia propiedades deseables para el diseño del aerogenerador, una mayor relación de coeficientes de elevación arrastre a menores ángulo de ataque, además de presentar también simetría en el cambio continuo del ángulo de ataque que se evidencia durante la rotación, es decir que es la alternativa más adecuada según los criterios establecidos.

Figura 31. Especificaciones perfil NACA 0018



Thickness:	12.0%	Max C_L:	0.962
Camber:	0.0%	Max C_L angle:	15.0
Trailing edge angle:	21.3°	Max L/D:	36.958
Lower flatness:	5.4%	Max L/D angle:	7.5
Leading edge radius:	2.6%	Max L/D C_L:	0.842
Efficiency:	34.8	Stall angle:	7.5
		Zero-lift angle:	0.0

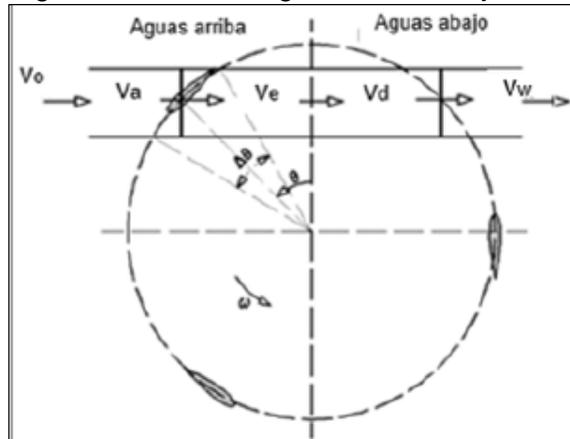
Fuente: Airfoil investigation database, NACA 0018 [en línea]. [Citado 30 mar., 2019]. Disponible en:
<http://www.airfoildb.com/airfoils/376>

5. CONSIDERACION AERODINÁMICAS

5.1 VELOCIDAD RELATIVA DEL VIENTO

Para el cálculo de la velocidad relativa vamos a tener en cuenta la sección de aguas arriba como se muestra en la figura 32.

Figura 32. Sección aguas arriba-abajo



Fuente: MOYANO CAMARGO, Danny Enrique y PINZON CASALLAS, Carlos Eduardo. Diseño de un prototipo de turbina de eje vertical para pruebas de laboratorio. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Mecánica, 2018. p 49

Ecuación 10. Velocidad relativa del viento

$$V_R = \sqrt{V_A^2 [(\lambda - \sin^2 \theta)^2 + (\cos^2 \theta)]}$$

Fuente: PARASCHIVOIU, Ion; Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept.

Donde:

V_R : Velocidad relativa del viento.

V_A : Velocidad inducida.

λ : Relación de velocidad tangencial.

θ : Azimuth.

Coeficiente de fuerza tangencial.

Ecuación 11. Coeficiente de fuerza tangencial

$$C_t = C_l \cos \alpha + C_d \sin \alpha$$

Fuente: PARASCHIVOIU, Ion; Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept.

Donde:

C_t : Coeficiente de fuerza tangencial.

C_l : Coeficiente de sustentación.

C_d : Coeficiente de arrastre.

α : Ángulo de ataque.

Reemplazando tenemos:

$$C_t = 0.8 \cos 0 + 0.018 \sin 0 = 0.8$$

Coeficiente de fuerza normal.

Ecuación 12. Coeficiente de fuerza normal

$$C_n = C_l \sin \alpha + C_d \cos \alpha$$

Fuente: PARASCHIVOIU, Ion; Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept.

Donde:

C_n : Coeficiente de fuerza normal.

C_l : Coeficiente de sustentación.

C_d : Coeficiente de arrastre.

α : Ángulo de ataque.

Reemplazando tenemos:

$$C_n = 0.8 \sin 0 + 0,018 \cos 0 = 0.018$$

Estos datos hallados de fuerza tangencial y fuerza normal, los usaremos más adelante para encontrar el valor en la sección de aguas arriba.

5.2 FUNCIÓN PARA LA SECCIÓN AGUAS ARRIBA

Ecuación 13. Función para la sección aguas arriba

$$f_{up} = \frac{N_c}{8\pi R} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |\sec\theta| (C_n \cos\theta - C_t \sin\theta) d\theta$$

Fuente: CASTILLO, Javier; Small Scale Vertical Axis Wind Turbine Design. p26. Tampere University of Applied Sciences. 2011.

Donde:

f_{up} : Función para la sección aguas arriba.

N : Número de palas.

c : Longitud de cuerda.

R : Radio del rotor.

C_n : Coeficiente de fuerza normal.

C_t : Coeficiente de fuerza tangencial.

Para encontrar el valor crítico de la sección de aguas arriba que es la que nos interesa tomamos valores de 90° hasta 180° , hasta encontrar dicho valor, para nuestro caso el valor crítico está en 91° con un resultado de $f_{up} = 3.4388$.

Factor de interferencia aguas arriba.

Ecuación 14. Factor de interferencia agua:

$$a_{up} = \frac{\pi}{f_{up} + \pi}$$

Fuente: CASTILLO, Javier; Small Scale Vertical Axis Wind Turbine Design. p26. Tampere University of Applied Sciences. 2011.

Donde:

a_{up} : Factor de interferencia aguas arriba.

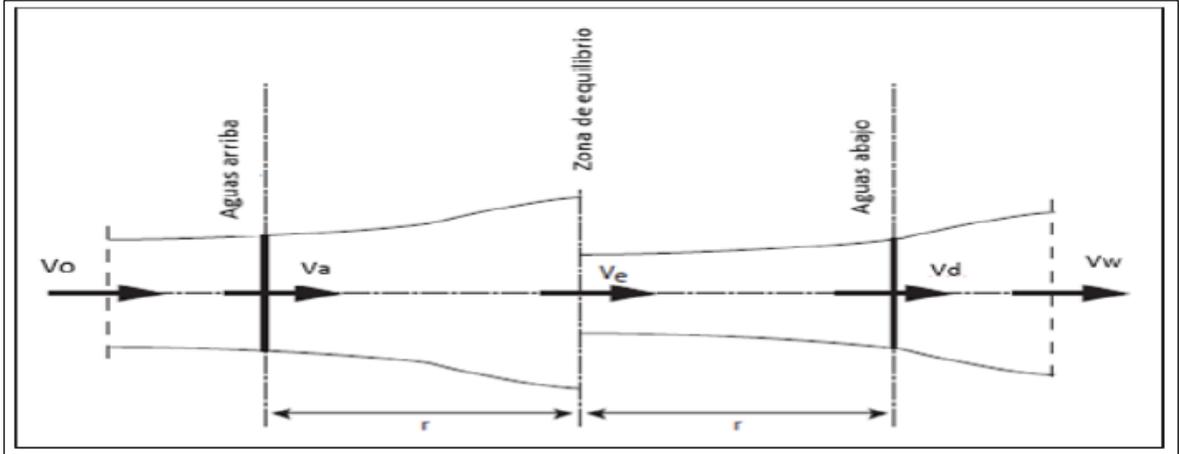
f_{up} : Función para la sección aguas arriba.

Reemplazando en la ecuación:

$$a_{up} = \frac{\pi}{3.4388 + \pi} = 0.4774$$

Este valor lo reemplazamos luego en la ecuación de velocidad inducida aguas arriba.

Figura 33. Representación teoría del doble disco actuador



Fuente. CLAESSENS, M. The design and testing of airfoils for application in small vertical axis wind turbines.

Velocidad inducida aguas arriba.

Ecuación 15. Velocidad inducida aguas arriba

$$V_a = V_0 a_{uv}$$

Fuente: CLAESSENS, M.C. The design and testing of airfoils for application in small vertical axis wind turbines. p26. Theses master of science. University of technology. 2006.

Donde:

V_a : Velocidad inducida aguas arriba.

a_{uv} : Factor de interferencia aguas arriba.

V_0 : Velocidad del viento.

Reemplazando en la ecuación:

$$V_a = \left(7,54 \frac{m}{s}\right) (0.4774) = 3,5996 \frac{m}{s}$$

Tomamos de nuevo la ecuación (17) de velocidad relativa y reemplazamos.

$$V_R = \sqrt{\left(3,5996 \frac{m}{s}\right)^2 [(3 - \sin^2 91) + (\cos^2 91)]}$$

$$V_R = 5.0914 \frac{m}{s}$$

Finalmente, para determinar el torque utilizamos las siguientes ecuaciones y el valor de la velocidad relativa hallado anteriormente.

Fuerza tangencial

Ecuación 16. Fuerza tangencial

$$F_t(\theta) = \frac{1}{2} \rho c L C_t V_R^2$$

Fuente: CASTILLO, Javier; Small Scale Vertical Axis Wind Turbine Design. p26. Tampere University of Applied Sciences. 2011.

Donde:

F_t : Fuerza tangencial.

ρ : Densidad.

c : Longitud de cuerda.

L : Fuerza de sustentación.

C_t : Coeficiente de fuerza tangencial.

V_R : Velocidad relativa.

Reemplazando tenemos:

$$F_t = \frac{1}{2} \left(0,9335 \frac{Kg}{m^3} \right) (0.499m) (24,5549N) (0.8) \left(5.0914 \frac{m}{s} \right)^2$$

$$F_t = 118,60N$$

Para el torque total, para el numero de palas se obtiene mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 17. Torque

$$T = N F_t R$$

Fuente: CASTILLO, Javier; Small Scale Vertical Axis Wind Turbine Design. p28. Tampere University of Applied Sciences. 2011.

Donde:

T : Torque.

N : Numero de palas.

F_t : Fuerza tangencial.

R : Radio del rotor.

Reemplazando en la ecuación:

$$T = (3)(118,60N)(2,5m)$$

$$T = 889,5Nm$$

Numero de Reynolds

Es el comportamiento de las palas es diferente para cada número de Reynolds del fluido. Para determinar esta condición se usa la siguiente ecuación;

Ecuación 18. Reynolds

$$R_e = \frac{\rho * c * V}{\mu}$$

Fuente: VILLARUBIA
LÓPEZ, Miguel.
Ingeniería de la Energía
Eólica, 2013. 113p. ISBN
978-958-778-232-5

Donde:

R_e = Número de Reynolds.

ρ = Densidad del aire.

V = Velocidad del viento.

μ = Viscosidad dinámica.

c = Longitud de cuerda.

El valor de viscosidad dinámica es $18,08 * 10^{-6}$ Pas.

Reemplazando los valores:

$$R_e = \frac{\left(0,9335 \frac{Kg}{m^3}\right) (0.4999m) \left(7,54 \frac{m}{s}\right)}{18,08 * 10^{-6} \text{ Pas.}}$$

$$R_e = 194,612.34$$

6. DISEÑO DETALLADO

Para el desarrollo del sistema detallado del aerogenerador se deben seguir una serie de pasos los cuales son:

Sistema de potencia:

Paso 1: identificar y hallar las principales variables climáticas de la zona donde se implementará el aerogenerador

Paso 2: Identificar parámetros de operación como CP (Coeficiente de potencia), Tsr (Tip Speed Ratio) y solidez del rotor del aerogenerador.

Paso 3: Diseñar sistema de rotor teniendo en cuentas las respectivas formulas, variables climáticas, parámetros de operación con el fin de hallar el área de barrido, longitud de la cuerda del alabe, diámetro del rotor y la altura del rotor.

Paso 4: seleccionar material del eje de transmisión teniendo en cuenta su aplicación.

Paso 5: calcular las dimensiones el eje de transmisión por medio de variables como; la altura del rotor, las cargas aerodinámicas, potencia mecánica, velocidad angular. Sistema de frenado

Paso 6: Para la selección del freno se debe tener en cuenta el torque sobre el eje y determinar un factor de seguridad,

Paso 7: Luego se halla el diámetro del disco exterior

Pasó 8: seleccionar el material del que estará fabricada la mordaza

Paso 9: hallar la fuerza de frenado

Paso 10: seleccionar el freno

Sistema estructural

Paso 11: identificar las cargas ejercidas sobre la estructura

Paso 12: seleccionar el tipo de cimentación

Paso 13: selección de la torre

Paso 14: identificar dimensiones de la torre

Paso 15: Realizar el estudio de cargas sobre la estructura

Paso 16: calcular los desplazamientos de la torre

Paso 17: realizar análisis por pandeo para mayor confiabilidad

Paso 18: seleccionar elementos de sujeción

Paso 19: realizar el montaje del diseño

Sistema de generación

Paso 20: Para la selección del generador se debe tener en cuenta la velocidad nominal del viento (10,62 m/s)

Paso 21: además se debe tener en cuenta el radio del rotor (2,5m²)

Paso 22: conociendo los datos de los pasos 20 y 21 se procede a hallar la velocidad de rotación (122 rpm)

Paso 23: calcular la velocidad angular

Paso 24: hallar el torque del sistema de generación (157 Nm)

6.1 PARAMETROS DE OPERACION

6.1.1 CP. El coeficiente de potencia es el componente que nos representa la eficiencia que tiene una turbina para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica.

“El coeficiente de potencia es un elemento muy importante dentro del modelo del aerogenerador, ya que es el factor que determina la cantidad de energía cinética que se puede extraer del viento”.²⁷ Se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 19. Coeficiente potencia del aerogenerador

$$C_p = \frac{P_m}{P_w}$$

Fuente: WOOD, David, Small Wind Turbines

Donde:

C_p=coeficiente potencia del aerogenerador

P_m= potencia mecánica aerogenerador

P_w= potencia del viento

En la siguiente tabla vemos un rango de coeficiente de potencia para distintos tipos de aerogeneradores:

Figura 34. Rango CP aerogeneradores

Tipo aerogenerador	Velocidad de operación	Torque	Complejidad constructiva	Rendimiento	Robustez (%)
Eje horizontal					
Moderadas RPM	Moderada	Bajo	Moderada	0.2-0.35	5-10
Altas RPM	Alta	Muy bajo	De precisión	0.3-0.45	<5
Eje vertical					
Panemono	Baja	Medio	En bruto	>0.1	50
Savonius	Moderada	Medio	Moderada	0.15	100
Darrieus	Moderada	Muy bajo	De precisión	0.25-0.35	10-20
Geometría variable	Moderada	Muy bajo	De precisión	0.2-0.35	15-40

Fuente: SAN ROMÁN, Álvaro Lucas. *Diseño de un aerogenerador para uso particular*. [En línea]. Trabajo de grado de Ingeniero Mecánico. Madrid.: Universidad Carlos III de Madrid, Facultad de ingenierías mecánica, 2012. 80p.

²⁷ VILLANUEVA, Juvenal y ALVAREZ, Luis. Modelado del coeficiente de potencia de un aerogenerador por efecto de fricción. [en línea]. [consultado el 11 jul. 2019]. Disponible en: http://amca.mx/memorias/amca2007/articulos/amca75.pdf?s_datos_Tema=12

6.1.2 TSR. El tsr (tip speed ratio) o también conocido como relación de velocidad en la punta del alabe es un valor con un rango de 0-10 por medio del cual se indica con que velocidad se mueve las aletas (velocidad tangencial del viento) respecto a la velocidad real del viento, para tener un mayor aprovechamiento de la velocidad del viento por medio de las aletas, se recomienda tener un TSR alto, es decir, que los aerogeneradores son más eficientes ya que se tiene un mejor aprovechamiento de la energía cinética del viento aunque se producirá un mayor nivel de ruido y se necesitaran materiales más resistentes para la construcción de las paletas.

Para los aerogeneradores de eje vertical se recomienda un tsr entre 3 -7 y así obtener un coeficiente de solidez dentro de un rango donde la turbina sea más eficiente, donde se genere un control óptimo y adecuado. Dicho control se obtiene entre mayor sea la relación de la velocidad de la punta del alabe.

Ecuación 20. Relación de velocidad tangencial

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_o}$$

Fuente: WOOD, David, Small Wind Turbines

Donde:

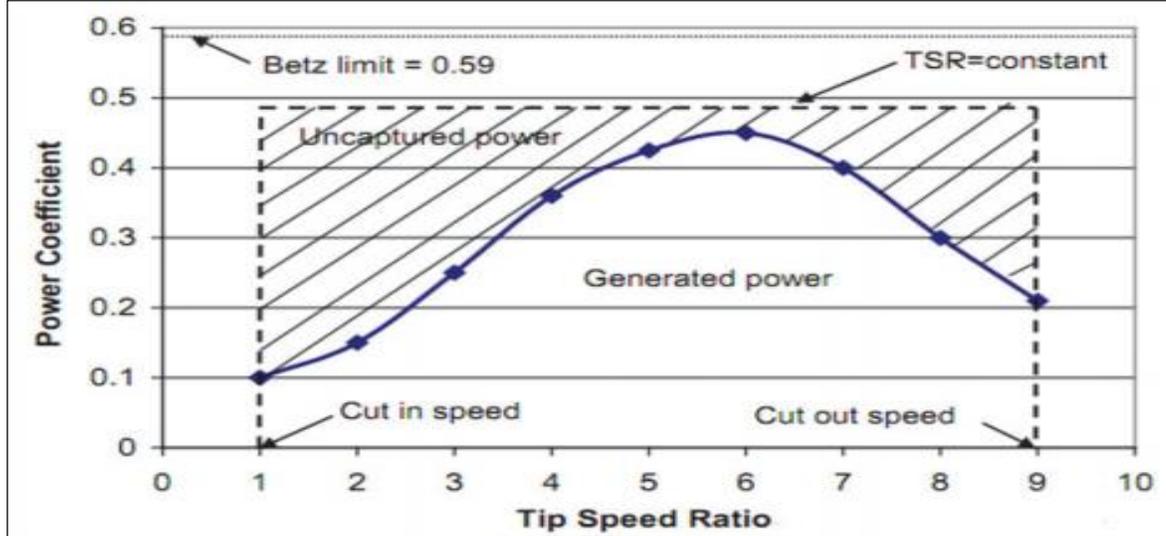
λ : Relación de velocidad tangencial.

ω : Velocidad angular.

R : Radio del rotor.

V_o : Velocidad del viento.

Figura 35. CP en función de TSR.



Fuente: SAN ROMÁN, Álvaro Lucas. Diseño de un aerogenerador para uso particular. [En línea]. Trabajo de grado de Ingeniero Mecánico. Madrid.: Universidad Carlos III de Madrid, Facultad de ingenierías mecánica, 2012. 80p.

Para el diseño del aerogenerador se tiene un coeficiente de potencia del aerogenerador de 0,25, por medio de la gráfica. Se interpreta un TSR=3 y un valor de relación de aspecto de la aleta de (BAR=8).

6.1.3 Solidez del rotor. La solidez del rotor es un parámetro el cual está relacionado con el TSR “relación de velocidad de la punta” y con el coeficiente de potencia del aerogenerador “cp”, el coeficiente de solidez nos indica la eficiencia de la turbina, una buena eficiencia resulta valores altos de solidez y a un bajo TSR.

Se puede apreciar que al aumentar la longitud de cuerda se mejora el rendimiento de la turbina eólica especialmente a bajas relaciones de velocidad, esto se debe a que existe una mayor área de contacto entre el fluido y los perfiles aerodinámicos.

Ecuación 21. Solidez del rotor

$$\sigma = Nc2R$$

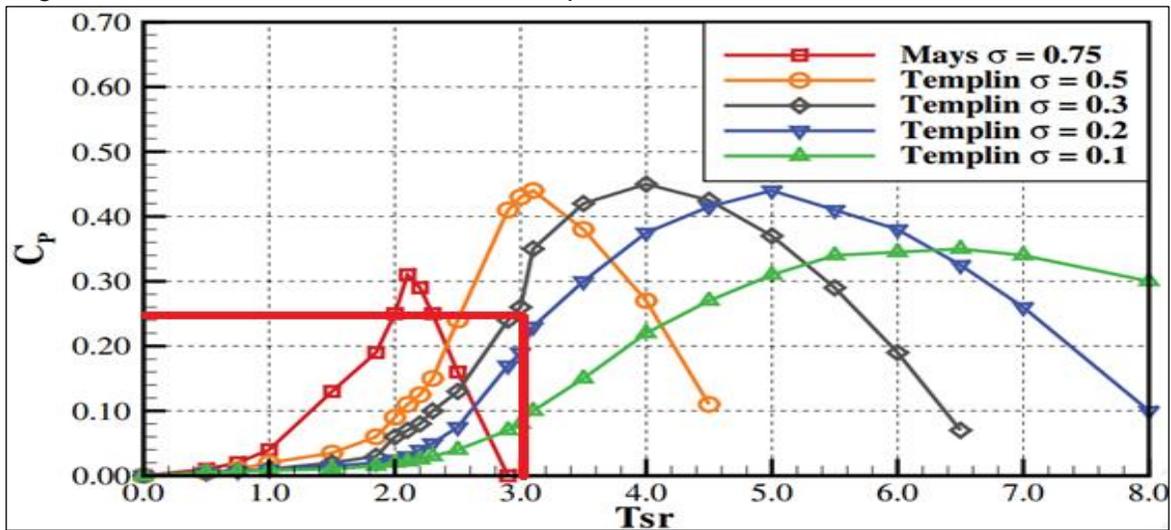
Fuente: PARASCHIVOIU, Ion; Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept

Donde:

- σ =solidez del rotor
- N =número de alabes
- c =longitud cuerda del perfil
- R =radio del rotor

Por medio de la grafica .. teniendo un $c_p=0,25$ y un $TSR=3$, se establecio un coeficiente de solidez $\sigma=0,3$ para el diseño del aerogenerador de eje vertical.

Figura 36. Relación coeficiente de solidez c_p vs tsr



Fuente: Relación coeficiente de solidez c_p vs tsr . [En línea]. [Citado 30 mar., 2019]. Disponible en: <https://vawt.ro/soliditate/>

6.2 SISTEMA DE POTENCIA

6.2.1 Diseño del rotor. Con base en el consumo energético realizado obtenemos una potencia de diseño del aerogenerador de 2 KW y una velocidad media del viento de 5,5 m/s, factores que son claves para determinar las dimensiones del rotor y los parámetros geométricos de la turbina eólica, la potencia que genera el aerogenerador está dada por la ecuación:

Ecuación 22. Potencia mecánica

$$P_m = \frac{1}{2} * \rho * A_b * v^3$$

Fuete: PINILLA S, Álvaro. Manual de aplicación de la energía eólica. Bogotá DC, Colombia. Ministerio de minas y energía. 1997. 84p. ISBN: 9589612156.

Donde:

P_m : Potencia mecánica producida por la turbina eólica

ρ : Densidad

A : Área de barrido turbina

V : velocidad del viento

Con una presión de 80,39 Kpa obtenida por medio de una interpolación basándonos de la tabla 9, una temperatura promedio de 8 °C respecto al promedio de las mediciones resultadas, y una constante universal de los gases de 8,31434 kpa m³/(kmol*k) .

Figura 37. Factor corrección por densidad

TABLA 5.7 Factor de corrección por densidad

Kg/m³ = Factor de densidad × 1,2
 Densidad del aire seco a 21 °C al nivel del mar = 1,2 Kg/m³
 Altitud sobre el nivel del mar en metros

	-250	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2500	3000
Temp. E Hg	782	760	738	717	697	677	657	639	620	603	569	536
C. E H ₂ O	10649	10345	10048	3761	3482	9211	8947	8691	8443	8201	7739	7303
0	1,11	1,08	1,05	1,02	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,86	0,81	0,76
21	1,03	1,00	0,97	0,95	0,92	0,89	0,87	0,84	0,82	0,79	0,75	0,71
50	0,94	0,91	0,89	0,86	0,84	0,81	0,79	0,77	0,75	0,72	0,68	0,64
75	0,87	0,85	0,82	0,80	0,78	0,75	0,73	0,71	0,69	0,67	0,63	0,60
100	0,81	0,79	0,77	0,75	0,72	0,70	0,68	0,66	0,65	0,63	0,59	0,56
125	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60	0,59	0,55	0,52
150	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60	0,59	0,57	0,55	0,52	0,49
175	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60	0,59	0,57	0,55	0,54	0,52	0,49	0,46
200	0,64	0,62	0,61	0,59	0,57	0,56	0,54	0,52	0,51	0,49	0,47	0,44
225	0,61	0,59	0,58	0,56	0,54	0,53	0,51	0,50	0,48	0,47	0,44	0,42
250	0,58	0,56	0,55	0,53	0,52	0,50	0,49	0,47	0,46	0,45	0,42	0,40
275	0,55	0,54	0,52	0,51	0,49	0,48	0,47	0,45	0,44	0,43	0,40	0,39
300	0,53	0,51	0,50	0,49	0,47	0,46	0,45	0,43	0,42	0,41	0,38	0,36
325	0,51	0,49	0,48	0,47	0,45	0,44	0,43	0,41	0,40	0,39	0,37	0,35
350	0,49	0,47	0,46	0,45	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,35	0,33
375	0,47	0,46	0,44	0,43	0,42	0,41	0,39	0,38	0,37	0,36	0,34	0,32
400	0,45	0,44	0,43	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,33	0,31
425	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,35	0,34	0,33	0,32	0,30
450	0,42	0,41	0,40	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,29
475	0,41	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,29	0,28
500	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,28	0,27
525	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,27	0,26

Las pérdidas de carga son proporcionales a la densidad (en primera aproximación)
 Consultar las leyes de los ventiladores, o las referencias, para más detalles

Fuete: GOBERNA, Ricardo. Industrial ventilation [Ventilación industrial]. Cincinnati, USA. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 1988. 416p. ISBN: 84-7890-818-8.

Calculamos la densidad del viento por medio del despeje de la siguiente ecuación

Ecuación 23. Presión

$$P = \rho * R * T$$

Fuente: CENGEL. Yunus. Transferencia de calor y masa un enfoque práctico. 3 ed. Mexico.: The McGraw-hill companies, 2007.

Donde:

P= Presión

ρ = Densidad

R= constante universal de los gases

Por lo tanto, se obtiene que la densidad es:

Ecuación 24. Densidad del aire

$$\rho = P / (R * T)$$

Fuete: PINILLA S, Álvaro. Manual de aplicación de la energía eólica. Bogotá DC, Colombia. Ministerio de minas y energía. 1997. 84p. ISBN: 9589612156.

Reemplazando en la ecuación se tiene:

$$\rho = \frac{75,32 \text{ Kpa}}{8,31434 \frac{\text{kpa}\cdot\text{m}^3}{(\text{kmol}\cdot\text{k})} * 281.15 \text{ K}} * \left(0,02897 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right) = 0.9335 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Despejando el área de barrido de la ecuación 25:

Ecuación 25. Área de barrido

$$Ab = \frac{Pm}{\frac{1}{2} * \rho * v^3}$$

Fuete: PINILLA S, Álvaro. Manual de aplicación de la energía eólica. Bogotá DC, Colombia. Ministerio de minas y energía. 1997. 84p. ISBN: 9589612156.

Donde:

Ab= área de barrido

Pm= potencia mecánica

ρ = Densidad

v = Velocidad de diseño

6.2.1.1 Área de barrido. Es el área específica en la cual el volumen de barrido generado por el funcionamiento de la turbina se intersecta con el eje del rotor en un plano determinado, para los aerogeneradores de eje vertical tipo H o alabe recto el área de barrido es igual al diámetro del rotor multiplicado por la altura del rotor de la turbina.

Reemplazando en la ecuación 28:

$$Ab = \frac{2000 \text{ w}}{\frac{1}{2} * 0,9335 \text{ kg/m}^3 * (5,9847 \text{ m/s})^3} = 19,99 \text{ m}^2$$

6.2.1.2 Longitud de la cuerda. La longitud de la cuerda es la distancia que hay entre el borde de ataque y el borde de salida del perfil del alabe.

Ecuación 26. Solidez del rotor

$$\sigma = \frac{N * c^2 * BAR}{A}$$

ORDUZ BERDUGO, Oscar Iván y SUAREZ PEREZ, Julián Edgardo. Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia

Donde;

σ = Solidez del rotor
 N= Número de alabes
 c= Longitud de la cuerda
 A= Área de barrido

Ecuación 27. Longitud de cuerda

$$c = \sqrt{\frac{A * \sigma}{N * BAR}}$$

ORDUZ BERDUGO, Oscar Iván y SUAREZ PEREZ, Julián Edgardo. Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia

Reemplazando los valores calculamos la longitud de la cuerda

$$C = \sqrt{\frac{19,99 * 0,3}{3 * 8}}$$

$$c=0,4999 \text{ m}$$

6.2.1.3 Diámetro rotor.

Ecuación 28. Diámetro del rotor

$$D = \frac{N * c}{\sigma}$$

ORDUZ BERDUGO, Oscar Iván y SUAREZ PEREZ, Julián Edgardo. Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia

Donde:

N= Numero de alabes

c= Longitud de la cuerda

σ = Solidez del rotor

Reemplazando valores se obtiene:

$$D = \frac{3 * 0,4999}{0,3}$$

$$D= 4,999 \text{ m}$$

6.2.1.4 Altura del rotor. La altura del rotor nos indica la distancia entre el límite inferior del alabe con el superior, se obtiene de la relación del área sobre el diámetro, como se muestra en la siguiente ecuación.

Ecuación 29. Altura del rotor

$$h = \frac{A}{D}$$

ORDUZ BERDUGO, Oscar Iván y SUAREZ PEREZ, Julián Edgardo. Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia

Donde:

h=Altura del rotor

A=Área de barrido

D=Diámetro del rotor

$$h = \frac{19,99 \text{ m}^2}{4,999 \text{ m}}$$

$$h = 3,999 \text{ m}$$

6.2.2 Diseño del eje. El eje transmite la potencia del rotor al eje del alternador. Para poder seleccionar ciertos componentes es necesario hallar el diámetro mínimo vamos a partir de la siguiente ecuación y las especificaciones del material.

Figura 38. Propiedades Mecánicas del Acero 1045

 Propiedades Mecánicas en condiciones de suministro	
ACERO AISI / SEA 1045	
Dureza	163 HBRINELL
Esfuerzo de Fluencia	310 Mpa
Esfuerzo Máximo	565 Mpa
Elongación	16% en 50 mm
Reducción de Área	40%
Densidad	7,85 g/ cm ³

Fuente: CIA. GENERAL DE ACEROS S.A. SAE 1045. [En línea]. [Consultado: 18 marzo 2019]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7826/VasquezTorresEdwinLibardo2013Anexos.pdf?sequence=2>

El material que se evalúa para el diseño del eje es Acero AISI 1045, éste tiene un esfuerzo máximo de 565 MPa, un límite de fluencia de 310 MPa, es dúctil y uniforme cumpliendo con los requerimientos para la fabricación de elementos de transmisión de potencia. Una vez seleccionado el material se define un factor de seguridad de 2 como lo sugieren varios autores en el diseño de ejes.

Ecuación 30. Diámetro eje

$$D = \left[\frac{32 * N}{\pi} * \sqrt{\left(kt * \frac{M}{s'n} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left[\frac{T}{Sy} \right]^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Fuente: MOTT, Robert. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México, 2006. [Consultado: 18 octubre 2019] p. 548.

Donde;

N = Factor de diseño.

kt = Concentración de esfuerzos que se producen por variaciones geométricas según Mott para un chaflán agudo kt: 2.5, para un redondeo kt: 1.5, para anillos de retención kt: 3, para cuñeros de trineo kt: 1.6, para cuñero de perfil kt: 2. 90

S'n = Resistencia de fatiga.

M = Momento flector.

T = Torque.

Sy = Esfuerzo de fluencia.

Para hallar el valor de la resistencia real a la fatiga se utiliza la siguiente ecuación;

$$S'n = sn(Cm)(Cst)(Cr)(Cs)$$

Fuente: MOTT, Robert. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México, 2006. [Consultado: 18 octubre 2019] p. 548.

Donde:

Cm = Factor de material.

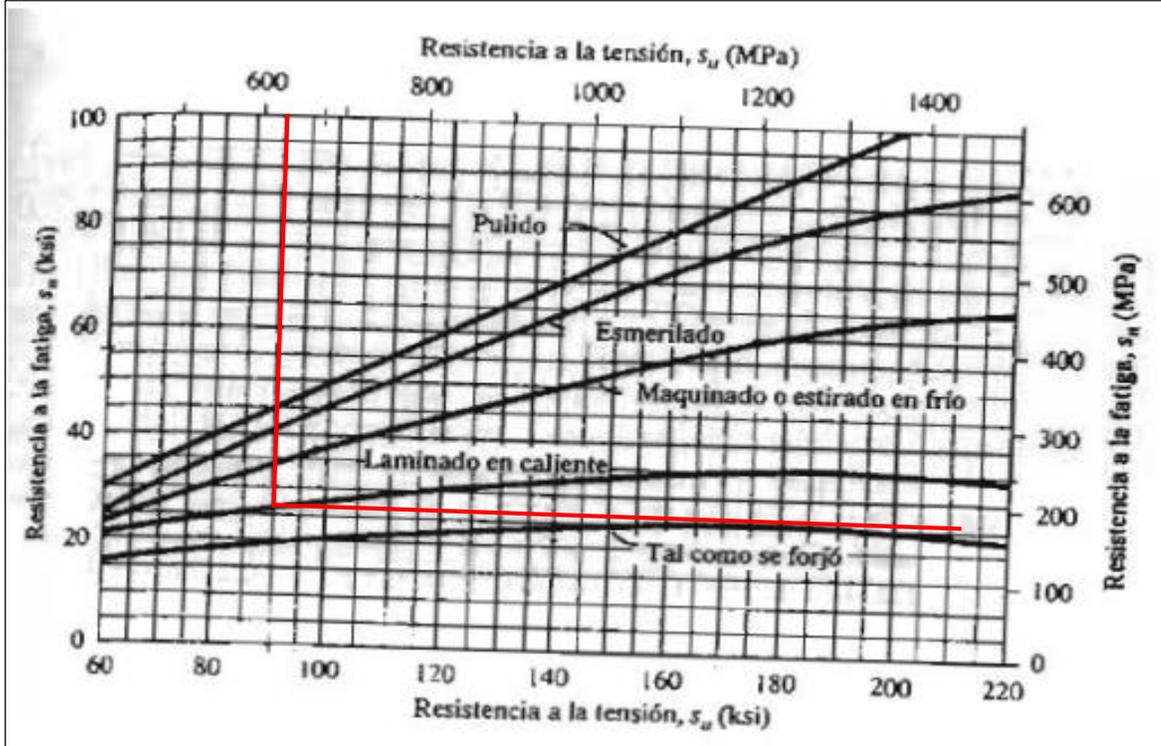
Cst = Factor de tipo de esfuerzo.

Cr = Factor de confiabilidad.

Cs = Factor de tamaño.

Para hallar sn debemos tener en cuenta el acabado superficial y el esfuerzo máximo, cruzando en la figura 39, se tiene una resistencia a la fatiga aproximadamente de 190 MPa.

Figura 39. Resistencia a la tensión



Fuente: MOTT, Robert. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México, 2006. [Consultado: 18 octubre 2019] p. 173.

Para determinar el factor de material se tiene en cuenta la siguiente consideración.

- Acero forjado $C_m = 1$
- Acero colado $C_m = 0.8$
- Acero pulverizado $C_m = 0.76$
- Hierro colado maleable $C_m = 0.8$
- Hierro colado gris $C_m = 0.7$
- Hierro colado dúctil $C_m = 0.66$

Se utilizará un acero forjado por lo tanto $C_m = 1$.

Se aplica un factor de tipo de esfuerzo $C_{st} = 1$ para el esfuerzo flexionante, $C_{st} = 0,8$ para la tensión axial.

Se aplica un factor de confiabilidad C_r según la figura 38 con una confiabilidad deseada de 0.99 el cual es $C_r = 0.81$.

Tabla 9. Factores de confiabilidad

Factores de confiabilidad aproximados C_R	
Confiabilidad deseada C_R	
0.50	1.0
0.90	0.90
0.99	0.81
0.999	0.75

Fuente: MOTT, Robert. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México, 2006. [Consultado: 18 octubre 2019] p. 173.

Se aplica un factor de tamaño C_S según la figura 41.

Tabla 10. Factor de tamaño

Unidades del Sistema Estadounidense Tradicional	
Rango de tamaño	Para D en pulgadas
$D \leq 0.30$	$C_S = 1.0$
$0.30 < D \leq 2.0$	$C_S = (D/0.3)^{-0.11}$
$2.0 < D < 10.0$	$C_S = 0.859 - 0.02125D$
Unidades SI	
Rango de tamaño	Para D en mm
$D \leq 7.62$	$C_S = 1.0$
$7.62 < D \leq 50$	$C_S = (D/7.62)^{-0.11}$
$50 < D < 250$	$C_S = 0.859 - 0.000837D$

Fuente: MOTT, Robert. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México, 2006. [Consultado: 18 octubre 2019] p. 173.

Tomamos un diámetro de eje aproximado de 100 mm y se utiliza en la ecuación tomada de la anterior tabla, con esto hallamos el factor de tamaño.

$$C_S = 0,859 - 0,000837 * D$$

Reemplazando tenemos;

$$C_S = 0,859 - 0,000837 * 100 = 0,7753$$

Con todos los datos hallados, reemplazamos en la ecuación de resistencia a la fatiga real.

$$S'n = 190 \text{ MPa}(1)(1)(0,81)(0,7753)$$

$$S'n = 119,3187 \text{ MPa}$$

Para obtener un diámetro de forma correcta se debe tener en cuenta el torque en el eje, con la siguiente ecuación, teniendo una potencia de 4 Kw que es equivalente a 5,364088 HP. De igual manera para el diseño del eje se requiere saber a qué velocidad angular trabajará, para ello se usará la siguiente ecuación:

Ecuación 31 Velocidad rotacional

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

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 121p. ISBN 978-958-778-232-5

Donde:

n = Velocidad de rotación del rotor (rpm)
 λ = Tip speed ratio o Velocidad específica (λ)
 v = Velocidad del viento nominal (m/s)
 R = Radio del rotor (m)

Reemplazando los valores en la ecuación tenemos;

$$n = \frac{3 * 60 * 10,62 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 * \pi * 2,5\text{m}} = 121,5099 \text{ rpm}$$

A continuación, se halla el paso torsor al que estará sometido el eje, usando la siguiente ecuación;

Ecuación 32. Momento torsor

$$T = \frac{63000 * P}{n}$$

Fuente: SHIGLEY, Joseph E. Diseño en ingeniería mecánica. 8 ed. México, 2008. p. 358. ISBN 978-0-07-312193-2

Donde;

n = Número de revoluciones por minutos (rpm).

P = Potencia (HP).
Reemplazando tenemos;

$$T = \frac{63000 * 2,682044HP}{122 rpm}$$

$$T = 1.384,989934 \text{ lbin}$$

Convirtiendo este valor en el sistema internacional se obtiene;

$$T = 1.384,989934 \text{ lbin} * \frac{0,0254 \text{ m}}{1 \text{ in}} * \frac{1 \text{ N}}{0,224 \text{ lb}} = 157 \text{ Nm}$$

Teniendo en cuenta la fuerza aerodinámica que actúan sobre los alabes, se hallan las reacciones sobre los brazos y luego estas se transfieren hacia el eje.

Fuerza de arrastre.

Ecuación 33. Fuerza de arrastre

$$F_D = C_D * \frac{\rho v^2}{2} * A$$

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 105p. ISBN 978-958-778-232-5

Donde;

F_D = Fuerza de arrastre

C_D = Coeficiente de arrastre (0,02 valor tomado del simulador en línea Airfoil Tools)

ρ = Densidad del aire

v = Velocidad nominal

A = Área del alabe

Reemplazando en la ecuación tenemos;

$$F_D = 0,02 \frac{0,9335 \frac{Kg}{m^3} * \left(12 \frac{m}{s}\right)^2}{2} * (1,999 \text{ m}^2)$$

$$F_D = 2,687 \text{ N}$$

Fuerza de sustentación.

Ecuación 34. Fuerza de sustentación

$$F_L = C_L * \frac{\rho v^2}{2} * A$$

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 105p. ISBN 978-958-778-232-5

Donde:

F_L = Fuerza de sustentación

C_L = Coeficiente de sustentación (0,8 valor tomado del simulador en línea Airfoil Tools)

ρ = Densidad del aire

v = Velocidad nominal

A = Área del alabe

$$F_L = 0,8 \frac{0,9335 \frac{Kg}{m^3} * \left(12 \frac{m}{s}\right)^2}{2} * (1,999 m^2)$$

$$F_L = 107,49 N$$

Vamos a tener que la fuerza aerodinámica está dada por la siguiente ecuación;

Ecuación 35. Fuerza aerodinámica

$$F_a = \sqrt{(F_D)^2 + (F_L)^2}$$

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 105p. ISBN 978-958-778-232-5

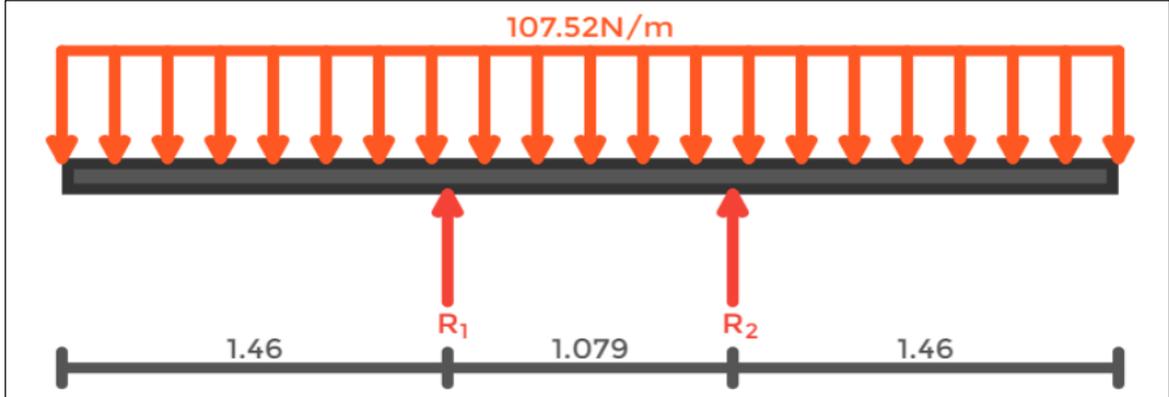
Reemplazando tenemos;

$$F_a = \sqrt{(2,69 N)^2 + (107,49 N)^2}$$

$$F_a = 107,52 N$$

Luego de determinar el valor de la fuerza aerodinámica se continua con las gráficas de esfuerzo cortante y momento flector, para esto vamos a realizar el diagrama de cuerpo libre sobre el alabe, se toma el alabe como una viga horizontal que va a estar apoyada en dos puntos que se van a asemejar a los brazos del aerogenerador.

Figura 40. Diagrama de cuerpo libre



Fuente: elaboración propia con base en SkyCiv

Teniendo el diagrama de cuerpo libre del alabe, se toma la carga distribuida y se convierte en carga puntual, de tal manera que se puedan encontrar las reacciones.

$$F_T = F_A h$$

Donde:

F_T = Carga puntual (Nm)

F_A = Carga aerodinámica (N)

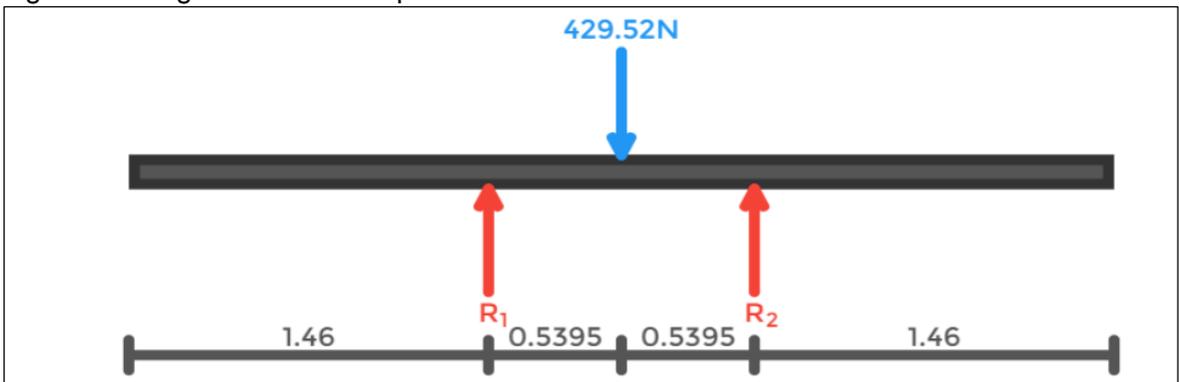
h = Altura dl alabe (m)

Reemplazando en la ecuación tenemos;

$$F_T = 107,52 \text{ N/m} * 3,999 \text{ m} = 429,9725 \text{ N}$$

Con la carga puntual sobre el alabe se realiza un nuevo diagrama de cuerpo libre.

Figura 41 Diagrama de fuerza puntual



Fuente: elaboración propia con base en SkyCiv

Partiendo de la sumatoria de fuerzas y momentos se encontrarán el valor de las reacciones. Al no existir cargas sobre el eje Y este se tomará como 0.

$$\sum F_y = 0$$

$$F_a - R_1 - R_2 = 0$$

Donde:

F_a = Fuerza aerodinámica

R_1 = Reacción número 1

R_2 = Reacción número 2

Para conocer los valores de las reacciones R1 y R2, realizamos sumatoria de momentos sobre la reacción número 1 (R1).

$$\sum M_{R_1} = 0$$

$$R_2(2,539m - 1,46m) - 429,9725N(1,9995m - 1,46m) = 0$$

$$1,079m R_2 = 231,9702 N$$

Por último, se tiene este sistema de ecuaciones;

$$R_1 + R_2 = 429,972 N$$

$$1,079m R_2 = 231,970N$$

Resolviendo el sistema queda;

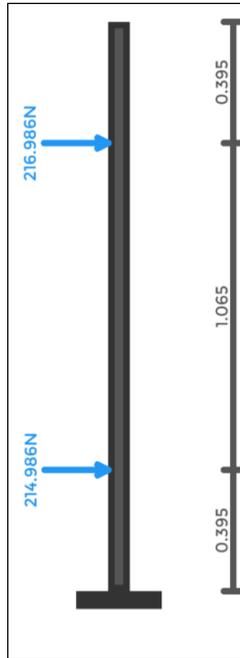
$$R_1 = 214,986 N$$

$$R_2 = 214,986 N$$

Finalmente se realizará el diagrama de cuerpo libre sobre el eje, se tendrán en cuantas las reacciones previamente halladas para el diagrama de cuerpo libre como fuerzas que actuarán sobre el mismo, “estas tendrán la misma magnitud de las reacciones, pero en este caso irán en el sentido contrario y en la base tendremos una restricción como lo indican los proyectos de diseño de aerogeneradores”²⁸

²⁸ ORDUZ BERDUGO, OSCA IVÁN. SÚAREZ PEREZ, JULIAN EDGARDO. Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia. 2011, P103. trabajo de grado (Ingeniero mecánico). Universidad industrial de Santander. Facultad de ingeniería.

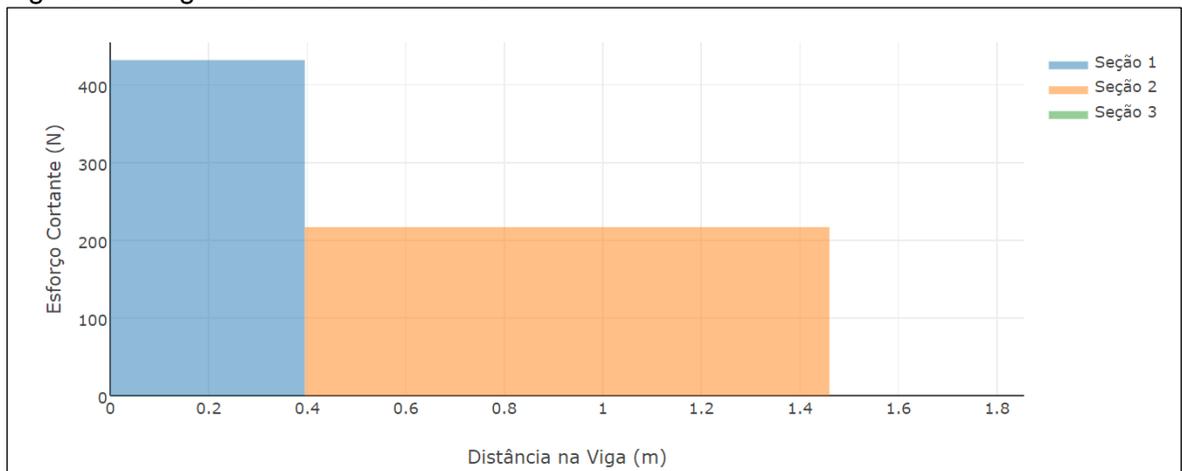
Figura 42.
Diagrama de
cuerpo libre eje



Fuente: elaboración propia con base en SkyCiv

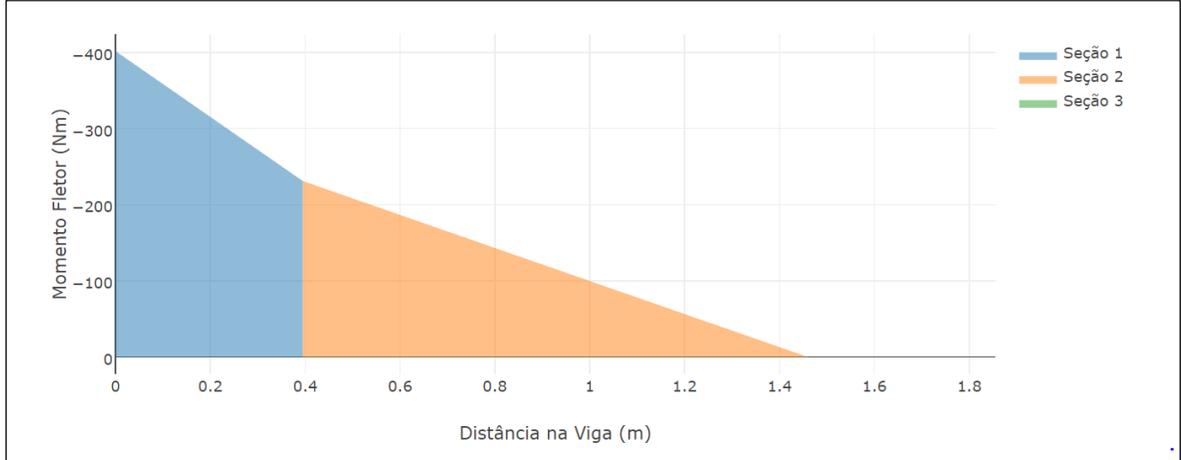
Por último, se realizarán los diagramas de esfuerzo cortante y momento flector del eje

Figura 43 Diagrama de esfuerzo cortante



Fuente: elaboración propia con base en SkyCiv

Figura 44. Diagrama de momento flector



Fuente: elaboración propia con base en SkyCiv

Reemplazando los valores obtenidos se halla el valor del diámetro mínimo de diseño.

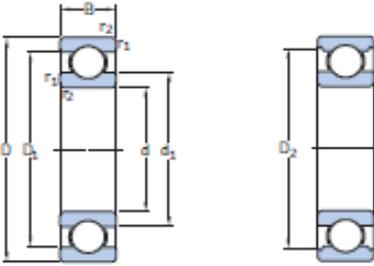
$$D = \left[\frac{32 * 2}{\pi} * \sqrt{\left(\frac{398,8 \text{ Nm}}{119,3187 * 10^6 \text{ Pa}} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left[\frac{157 \text{ Nm}}{310 * 10^6 \text{ Pa}} \right]^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D = 0.04095m = 40.95mm$$

6.2.3 Selección del rodamiento. La selección de los rodamientos es un aspecto importante en el ensamble del aerogenerador, los rodamientos son elementos el cual su principio de funcionamiento se basa en permitir el giro relativo entre dos piezas o elementos mecánicos, además soportan cargas tanto axiales como radiales.

El elemento giratorio que se seleccionó es rodamiento rígido de bolas, tipo explorer de la compañía SKF los cuales se caracterizan por brindar un rendimiento superior, menor mantenimiento, reducen el ruido y su vida útil es mayor.

Figura 45. Rodamiento SKF Explorer



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación	
d	D	B	C	C ₀	P _L	Velocidad de referencia	Velocidad límite	kg	-	
mm			kN		kN	r. p. m.				
40	52	7	4,49	3,75	0,35	26 000	35 000	0,032	61808	
	62	12	13,8	10	0,425	24 000	34 000	0,12	61908	
	68	9	13,8	10,2	0,44	22 000	34 000	0,13	66008	
	68	15	17,8	11	0,49	22 000	34 000	0,19	68008	
	80	18	32,5	19	0,8	18 000	11 000	0,37	6208	
	80	18	35,8	20,8	0,88	18 000	11 000	0,34	6208 ETN9	
	90	23	42,3	24	1,02	17 000	11 000	0,63	6308	
	110	27	63,7	36,5	1,53	14 000	9 000	1,25	6408	
	45	58	7	6,63	6,1	0,26	22 000	34 000	0,04	61809
		68	12	14	10,8	0,465	20 000	33 000	0,14	61909
75		10	16,5	10,8	0,52	20 000	32 000	0,17	66009	
75		16	22,1	14,6	0,64	20 000	32 000	0,24	68009	
85		19	35,1	21,6	0,915	17 000	11 000	0,42	6209	
100		25	55,3	31,5	1,34	15 000	9 500	0,84	6309	
120	29	76,1	45	1,9	13 000	8 500	1,55	6409		
50	65	7	6,76	6,8	0,285	20 000	33 000	0,052	61810	
	72	12	14,6	11,8	0,5	19 000	32 000	0,14	61910	
	80	10	16,8	11,4	0,56	18 000	31 000	0,18	66010	
	80	16	22,9	16	0,73	18 000	31 000	0,26	68010	
	90	20	37,1	23,2	0,98	15 000	30 000	0,45	6210	
	110	27	65	38	1,6	13 000	8 500	1,1	6310	
130	31	87,1	52	2,2	12 000	7 500	1,95	6410		
55	72	9	9,04	8,8	0,375	19 000	32 000	0,083	61811	
	80	13	16,5	14	0,6	17 000	31 000	0,19	61911	
	90	11	20,3	14	0,695	16 000	30 000	0,27	66011	
	90	18	29,6	21,2	0,9	16 000	30 000	0,39	68011	

Fuente: SKF. Catálogo de rodamientos. [En línea]. [Consultado: 18 octubre 2019]. Disponible en: https://www.skf.com/binary/87-121486/0901d19680416953-10000_2-ES---Rolling-bearings.pdf

Las características de los rodamientos se ilustran en el anexo B.

6.3 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE FRENADO

Para controlar el aerogenerador se debe contar con un sistema de frenado, este suele ser mecánico. En la industria eólica se usa el freno de disco, para este caso también se usará el freno de disco.

Para el cálculo del freno de disco, se inicia calculando el torque necesario para el sistema de la siguiente manera;

Ecuación 36. Torque del freno

$$T_{freno} = T_{eje} * \text{factor de seguridad}$$

Reemplazando en la ecuación;

$$T_{freno} = 157 \text{ Nm} * 2 = 314 \text{ Nm}$$

En el libro de Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley, encontramos el método de “presión uniforme” ya que en el sistema diseñado no se encuentra ningún tipo de desgaste previo. Teniendo el torque del freno, el diámetro interior del disco que será equivalente al diámetro del eje de transmisión, utilizando la figura 41 se puede determinar los demás datos relacionados con el diseño del freno que son: material del freno, presión y coeficiente de fricción datos que son importantes. Utilizando la siguiente ecuación de torque se puede determinar el diámetro exterior del disco.

Ecuación 37. Torque por presión

$$T = \frac{\pi * f * Pa}{12} (D^3 - d^3)$$

Fuente: SHIGLEY, Joseph E. Diseño en ingeniería mecánica. 8 ed. México, 2008. p. 828. ISBN 978-0-07-312193-2

Despejando el diámetro exterior:

Ecuación 38. Diámetro exterior del disco

$$D = \sqrt[3]{\left(\frac{12 * T}{\pi * f * Pa}\right) + d^3}$$

Fuente: SHIGLEY, Joseph E. Diseño en ingeniería mecánica. 8 ed. México, 2008. p. 828. ISBN 978-0-07-312193-2

Donde:

D = Diámetro exterior del disco (m)

T = Torque de frenado (Nm)

f = Coeficiente de fricción

d = Diámetro interior del disco (m)

Figura 46. Material frenos

Material	Coefficiente de fricción f	Presión máxima $P_{máx}$ psi	Temperatura máxima Instantánea, °F	Temperatura máxima Continua, °F	Velocidad máxima, $V_{máx}$ pie/min	Aplicaciones
Cermet	0.32	150	1500	750		Frenos y embragues
Metal sinterizado (seco)	0.29-0.33	300-400	930-1020	570-660	3600	Embragues y frenos de disco de yugo
Metal sinterizado (húmedo)	0.06-0.08	500	930	570	3600	Embragues
Asbesto moldeado rígido (seco)	0.35-0.41	100	660-750	350	3600	Frenos y embragues de tambor
Asbesto moldeado rígido (húmedo)	0.06	300	660	350	3600	Embragues industriales
Zapatillas de asbesto moldeado rígido	0.31-0.49	750	930-1380	440-660	4800	Frenos de disco
Que no sea asbesto moldeado rígido	0.33-0.63	100-150		500-750	4800-7500	Embragues y frenos
Asbesto moldeado semirrígido	0.37-0.41	100	660	300	3600	Embragues y frenos
Asbesto moldeado flexible	0.39-0.45	100	660-750	300-350	3600	Embragues y frenos
Hilo y alambre de asbesto arrollado	0.38	100	660	300	3600	Embragues de automóviles
Hilo y alambre de asbesto tejido	0.38	100	500	260	3600	Embragues y frenos industriales
Algodón tejido	0.47	100	230	170	3600	Embragues y frenos industriales
Papel resiliente (húmedo)	0.09-0.15	400	300		$PV < 500\,000$ psi · pie/min	Embragues y bandas de transmisión

Fuente: SHIGLEY, Joseph E. Diseño en ingeniería mecánica. 8 ed. México, 2008. p. 842.

Teniendo todos los valores necesarios para hallar el diámetro exterior, reemplazando en la ecuación tenemos;

$$D = \sqrt[3]{\left(\frac{12 \cdot 314 \text{ Nm}}{\pi \cdot 0.49 \cdot 5 \cdot 171,058.61 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}\right)} + (0.0508 \text{ m})^3 = 0,0781 \text{ m}$$

Con el diámetro exterior obtenido, se determina la fuerza de frenado con la siguiente ecuación;

Ecuación 39. Fuerza de frenado

$$F_{frenado} = \frac{\pi \cdot Pa}{4} \cdot (D^2 - d^2)$$

Fuente: *Ibíd.* p. 807.

Resolviendo la ecuación tenemos;

$$F_{frenado} = \frac{\pi \cdot 5 \cdot 171,058.61 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{4} \cdot ((0,0781 \text{ m})^2 - (0,0508 \text{ m})^2)$$

$$F_{frenado} = 14,291.73 \text{ N} = 3,212.91 \text{ lbf}$$

Tabla 11. Especificaciones del freno

Tipo de Freno	Freno de Disco
Torque	157 Nm
Fuerza de frenado	14,291.73 N
Presión Máxima	750 psi = 51,71 Bar

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos, se selecciona un freno HW 100 HFA de la compañía RINGSPANN que tiene una fuerza de frenado máxima de 70kN y una presión máxima de 90 Bar. Este sistema de frenado se acciona de manera hidráulica, el cual recibe una señal de salida del PLC que acciona el freno y de esta manera detiene el rotor cuando las velocidades del viento sean máximas, para ver más detalles ver Anexo C.

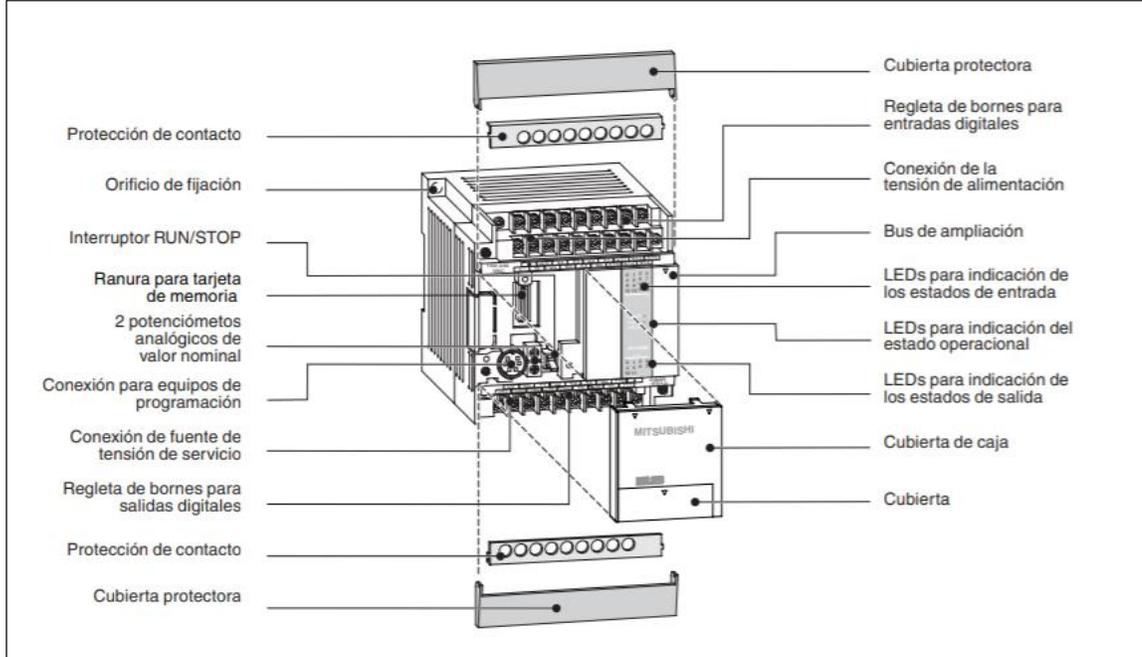
Figura 47. Mordaza



Fuente: RINGSPANN. Catálogo de mordazas. [En línea]. [Consultado: 18 octubre 2019].

Para controlar el sistema de frenado, se hará a través de un PLC, el cual, es de la marca Mitsubishi, el modelo FX1N, este modelo no necesita gran espacio y de esta forma los gastos también serían mínimos y tiempo debido a las potentes herramientas de posicionamiento. Cuenta con controladores de alta velocidad que puede procesar señales de hasta 60 kHz, se puede ver la descripción en la figura 48.

Figura 48. PLC Mitsubishi FX1N



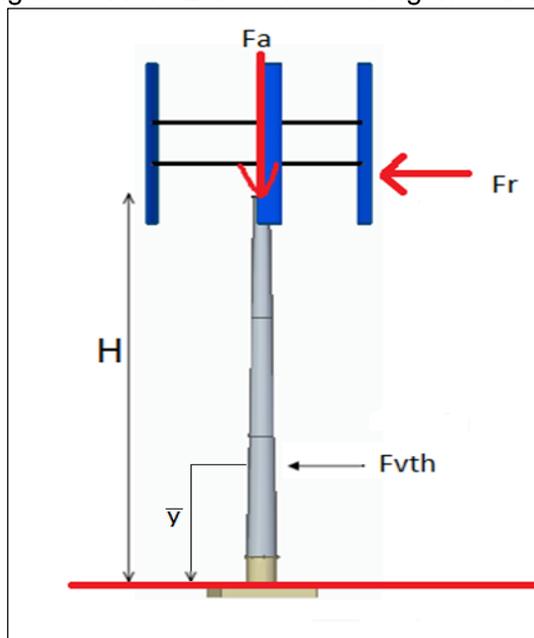
Fuente: Mitsubishi electric. Manual de instrucción Fx series. [en línea]. 2005. [Consultado 15 enero 2020]. 34 p. Disponible en: https://instrumentacionycontrol.net/wp-content/uploads/2017/11/lyCnet_Manual_Introduccion_fx-min.pdf

El freno estará después del generador, la mordaza estará apoyada a una placa que estará unida al eje del generador, para la unión de la mordaza utilizaremos pernos tipo hexagonal M11 de acero resistentes a la intemperie y para unir la mordaza con la placa se usarán pernos tipo hexagonal M24 de acero de igual manera resistentes a la intemperie.

6.4 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

6.4.1 Cimentación. La función principal de la cimentación es brindar estabilidad al aerogenerador, se encargará de soportar las cargas axiales producidas por el aerogenerador (torre, rotor, etc) y las cargas radiales generadas por la fuerza del viento, todas las cargas deben ser repartidas hacia la superficie terrestre, son construidas con materiales tradicionales usados en la construcción como el hierro, cemento, material de río y madera.

Figura 48. Fuerzas sobre el aerogenerador



Fuente: elaboración propia

Existe gran variedad de cimentaciones que varían dependiendo de la geología del terreno que se presente en la zona de instalación, la cimentación que se sugiere para el diseño de la torre es convencional de hormigón armado, para la construcción de la cimentación se deben fijar 8 pernos M12 en el hormigón, para posteriormente anclar la estructura metálica, sin embargo se recomienda hacer un estudio de suelos para garantizar que la cimentación a implementar se adapte al terreno,

Figura 49. Tipos de cimentación

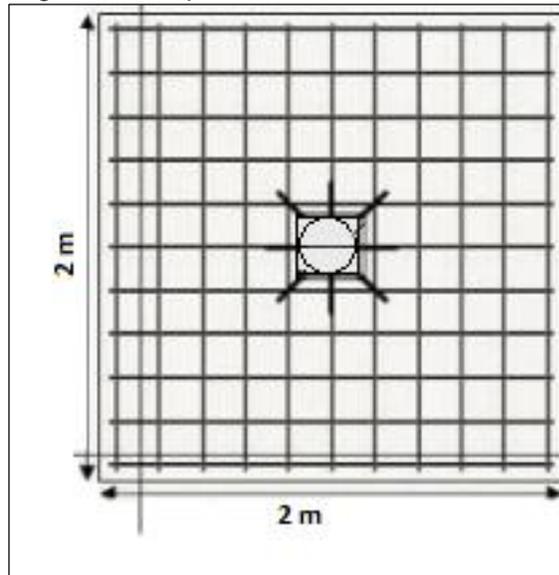
Tipo de terreno	Tipo de cimentación
Roca próxima a la superficie	Superficial de hormigón armado apoyado Anclado en la roca y anclado mediante pernos
Terreno firme	Superficial de hormigón armado (puede incorporar pilotes)
Terreno de baja capacidad portante	Superficial de hormigón armado con pilotes

Fuente: HERRANDO, Víctor. Optimización del diseño de la cimentación para un aerogenerador de gran altura. [en línea]. Trabajo de grado. Universitat Politècnica de Catalunya. 2012. [Consultado 12 octubre 2019]. p. 29. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/17202/OPTIMIZACI%C3%93N%20DEL%20DISE%C3%91O%20DE%20LA%20CIMENTACI%C3%93N%20PARA%20UN%20AEROGENERA.pdf>

“Este tipo de cimentación dispone de una zapata de hormigón pretensado sobre la que se monta una virola que se unirá posteriormente a la brida inferior de la torre.”²⁹

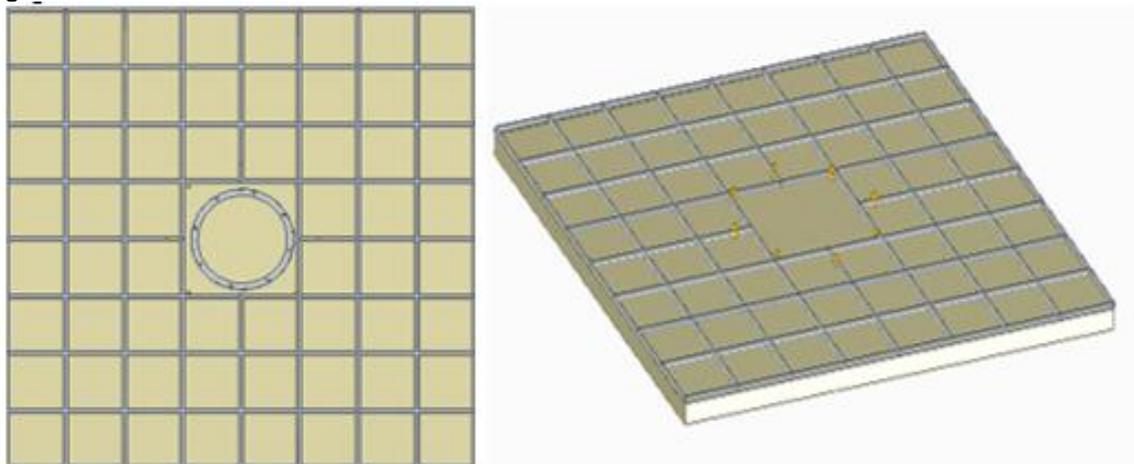
La siguiente figura ilustra una cimentación convencional con torre tubular de acero.

Figura 50. Zapata cuadrada



Fuente: elaboración propia

Figura 51. Cimentación



Fuente: elaboración propia

²⁹ LUNA GONZALEZ, Iván Felipe y RAMOS ROA, María Fernanda. Diseño de un aerogenerador para suministro de energía eléctrica para el alumbrado nocturno-externo de la planta vidrio Andino s.a. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Mecánica, 2017. 72 p

6.4.1.1 Diseño de la torre. Actualmente, debido a su gran resistencia, las torres híbridas son la principal opción a la hora de realizar estructuras para los aerogeneradores, cuentan con una sección de hormigón y posteriormente secciones metálicas, dichas secciones se encargarán de generar estabilidad y recibir las cargas dinámicas y estáticas producidas en el sistema, garantizando que la frecuencia natural de flexión sea inferior a la frecuencia producida por el giro de los alabes.

6.4.2 Estudio de cargas. Para la selección de las dimensiones de la torre diseñada, se tiene como referencia diseños de estructuras de aerogeneradores que ya han sido construidas, realizando una proporción entre las cargas recibidas y la altura, se seleccionaron a criterio de los autores las dimensiones de cada sección, siendo evaluada la estructura en el capítulo V por medio de los elementos finitos.

La torre metálica se acoplará a la torre de hormigón por medio de una brida metálica.

En el cuadro 7 Se pueden observar la cantidad de secciones, las dimensiones de cada una y el material de fabricación.

Cuadro 7. Dimensiones de la estructura

	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4
Diámetro inferior (m)	0,6	0,6	0,574	0,549
Diámetro superior (m)	0.6	0,549	0,549	0,498
Espesor (m)	Maciza	0,0254	0,0254	0,254
Altura a nivel del suelo (m)	1	4	7	10
Material	Hormigón	Acero	Acero	Acero

Fuente: elaboración propia

Momento flector. El momento flector de mayor magnitud del sistema se encuentra en el acoplamiento de la torre híbrida, debido a la fuerza radial producida por el viento distribuida en el rotor del aerogenerador y sobre la estructura (torre y cimentación). La sumatoria del momento producido en el rotor y en la estructura será el momento máximo.

Mediante la fuerza radial que genera el viento y la altura del rotor se halla el momento sobre el rotor como se muestra en la siguiente ecuación.

Ecuación 40. Momento en el rotor

$$M_{rotor} = Fr * H$$

ROMERO SANABRIA, Jeison y SOTOMAYOR SANCHEZ, Nicolás. Diseño de un aerogenerador para la zona rural del Sumapaz, Cundinamarca

La fuerza radial es producida por la velocidad del viento proyectada en el área del rotor por el coeficiente de potencia ya seleccionado en la sección 4.2.1. La fuerza radial está dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 41. Fuerza radial

$$Fr = cp * v^2 * A$$

Fuente: LIU, Wenyi. Design and kinetic analysis of wind turbine blade-hub-tower coupled system. En: Renewable Energy, 2016, vol. 94, p. 547-557.

Donde:

Fr= Fuerza radial (N)

Cp= coeficiente potencia

v= velocidad máxima del viento (m/s)

A= Área del rotor

$$Fr = 0,25 * (7,54 \frac{m}{s})^2 * 19,99 m^2$$

$$Fr = 284,11 N$$

Donde:

Fr= Fuerza radial (N)

H=Altura del rotor (m)

$$M_{rotor} = 284,11 N * 3,999 m$$

$$M_{rotor} = 1136,15 Nm$$

La fuerza axial es producida por el peso de los componentes del aerogenerador que estarán ajustados a la torre, en el siguiente cuadro se muestra la sumatoria de masa y peso de los componentes del aerogenerador, obteniendo la fuerza axial del sistema

Cuadro 8. Peso de los componentes del aerogenerador

Elemento	Cantidad	Masa (kg)	Masa total (kg)	Peso (N)
Eje	1	37,6	37,6	368,85
Generador	1	88	88	863,28
Brazos	6	2,7	16,2	158,92
Alabe	3	78,9	236,7	2322,02

Cuadro 8. (continuación)

Elemento	Cantidad	Masa (kg)	Masa total (kg)	Peso (N)
Freno	1	30	30	294,3
Rodamiento 6010	1	0,26	0,26	2,55
Rodamiento 6011	1	0,38	0,38	3,72
Bisagras	6	0,18	1,08	10,59
Soporte inferior	1	3,98	3,98	39,04
Soporte superior	1	3,7	3,7	36,29
Soporte base	1	13,13	13,13	128,8
TOTAL			431,03	4228,36

Fuente: elaboración propia

Para realizar el análisis de fuerzas que actúan sobre la torre del aerogenerador, se deben identificar las cargas a las que estará sometida la estructura troncocónica, el método usado es similar al diseño de columnas libres de un lado y fijo del otro lado.

La fuerza ejercida por el viento se calcula por medio de la siguiente ecuación:

Ecuación 42. Fuerza ejercida por el viento

$$F_{vth} = A_{at} * P_v$$

ROMERO SANABRIA, Jeison y SOTOMAYOR SANCHEZ, Nicolás. Diseño de un aerogenerador para la zona rural del Sumapaz, Cundinamarca

Donde:

F_{vth} = Fuerza ejercida por el viento en la sección de la columna

A_{at} = Proyección del área del frente de ataque

P_v = Presión ejercida del viento

La proyección del área del frente de ataque se calcula por medio del área lateral de una figura troncocónica

Ecuación 43. Área de ataque

$$A_{at} = \pi * (r + R) * g$$

ROMERO SANABRIA, Jeison y SOTOMAYOR SANCHEZ, Nicolás. Diseño de un aerogenerador para la zona rural del Sumapaz, Cundinamarca

Donde:

Aat: proyección del área del rente de ataque (m^2)

R= radio mayor (m)

r=radio menor (m)

g= generatriz del tronco de cono.

Ecuación 44. Generatriz del tronco

$$g = \sqrt{h^2 + (R - r)^2}$$

ROMERO SANABRIA, Jeison y
SOTOMAYOR SANCHEZ, Nicolás.
Diseño de un aerogenerador para la
zona rural del Sumapaz,
Cundinamarca

Donde:

h= altura de la torre (m)

R= radio mayor (m)

r= radio menor (m)

Reemplazando los valores en las formulas mencionadas anteriormente obtenemos:

$$g = \sqrt{10^2 m + (0,3 m - 0,1429 m)^2} = 10 m$$

$$Aat = \pi * (0,142 m + 0,3m) * 10m$$

$$Aat = 13,91 m^2$$

Se plantea dividir la torre en secciones de 3 metros cada una, con el fin de hallar la fuerza puntual que se está ejerciendo sobre cada una de estas. Se toma la velocidad de 7,94 m/s, siendo la más crítica del sistema. La presión ejercida por el viento está dada por la siguiente ecuación;

Ecuación 45. Presión ejercida por el viento

$$P_v = \frac{C_d * \rho * v^2}{2}$$

ROMERO SANABRIA, Jeison y
SOTOMAYOR SANCHEZ, Nicolás.
Diseño de un aerogenerador para la
zona rural del Sumapaz, Cundinamarca

Donde:

Pv= Presión del viento

ρ = Densidad del aire

v= velocidad del viento critica

Cd= Coeficiente aerodinámico de resistencia al avance³⁰: depende de la sección a la que se enfrenta el viento para este caso tenemos una sección troncocónica donde el Cd es de 0.42.

$$Pv = \frac{0,42 * 0,9335 \text{ kg/m}^3 * (7,54 \frac{\text{m}^2}{\text{s}})^2}{2}$$

$$Pv = 11,14 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$Fvth = 13,91 \text{ m}^2 * 11,14 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$Fvth = 154,95 \text{ N}$$

Tabla 12. Fuerzas sobre la estructura

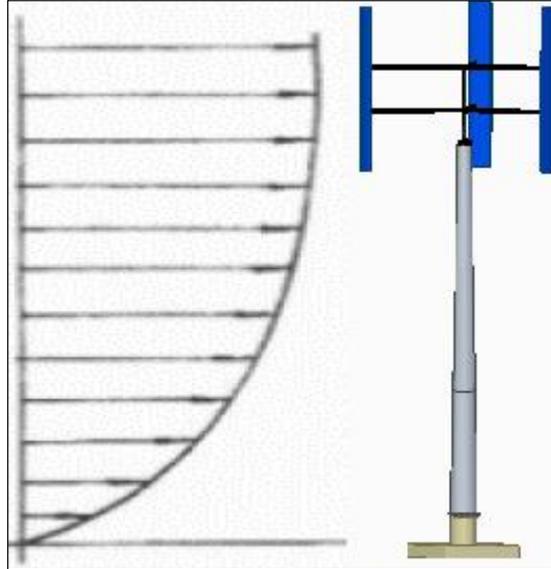
h (m)	v (m/s)	R (m)	r (m)	g (m)	A (m²)	P (N/m²)	Fvth (N)
0	0	0,3	0,2873	0,00	0,00	0,00	0,00
1	4,84	0,3	0,2873	1,00	1,85	4,59	8,47
4	6,32	0,2476	0,2349	4,00	6,06	7,83	47,48
7	7,04	0,1952	0,1825	7,00	8,31	9,72	80,70
10	7,54	0,1429	0,1302	10,00	8,58	11,14	95,62

Fuente: elaboración propia

Una vez obtenida la magnitud de la carga se debe obtener la ubicación de la carga, la función para determinar la fuerza que ejerce el viento sobre la estructura es parabólica, por tal motivo se debe hallar el centro de masa de una función parabólica, con el fin de obtener su respectiva ubicación.

³⁰ NASA, Shape effects on drag. Drag coefficient. USA: National Aeronautics and Space Administration.

Figura 52. Incidencia del viento en la torre



Fuente: elaboración propia

El centro de masa de una parábola se ubica en:

$$\bar{x} = \frac{3H}{5}$$

$$\bar{y} = \frac{3b}{8}$$

Donde:

B= distancia del suelo al rotor (m)

Para esta situación debemos hallar el valor de \bar{y} , ya que esta es la altura donde se situara la carga puntual producida por el viento.

$$\bar{y} = \frac{3(10\text{ m})}{8}$$

$$\bar{y} = 3,75\text{ m}$$

El momento flector en el acoplamiento de la torre ocasionado por el viento en la torre es:

$$M_{\text{torre}} = 154,95\text{ N} * 3,75\text{ m}$$

$$M_{\text{torre}} = 581,06\text{ Nm}$$

Como se mencionó anteriormente el momento máximo en el empotramiento se calcula mediante la sumatoria del momento en el rotor y el momento sobre la torre, el momento máximo es 1717,21 Nm.

6.4.2.1 Tensión máxima. Para determinar la tensión máxima en el sistema, se debe relacionar la carga de compresión máxima debida a la fuerza axial y el momento flector máximo producido por medio de la ecuación de Navier;

Ecuación 46. Tensión máxima

$$\sigma \text{ máx} = \frac{M \text{ máx} * Y \text{ máx}}{I} + \frac{N}{Ac}$$

Fuente: MOTT, Robert. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México, 2006.

Donde:

M máx= Momento máximo

Y máx= Radio inferior

I= Momento de inercia

N= Peso de todo el sistema o esfuerzo axial

Ac= Área cortante de la sección trasversal

$$\sigma \text{ máx} = \frac{1717,21 \text{ Nm} * 0,3 \text{ m}}{\frac{\pi}{64} ((0,2858 \text{ m})^4 - (0,2604 \text{ m})^4)} + \frac{4228,36 \text{ N}}{\frac{\pi}{4} ((0,2858 \text{ m})^2 - (0,2604 \text{ m})^2)}$$

$$\sigma \text{ máx} = 5060317,79 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} + 388058,01 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma \text{ máx} = 5,44 \text{ Mpa}$$

Para identificar si la estructura va a fallar por tensión se debe usar la siguiente condición.

$$\sigma \text{ máx} \leq \frac{\sigma_y}{F.S}$$

Donde:

σ_y = limite elastico del material (mpa)

$$5,44 \text{ Mpa} \leq \frac{250 \text{ Mpa}}{1,5}$$

F.S= Factor de seguridad 1.5

$$5,44 \text{ Mpa} \leq 166,66 \text{ Mpa}$$

Como se puede observar, la estructura no fallara por estar sometida a tensión.

Para el desplazamiento del rotor se usará el momento de inercia mínimo ya que el rotor se encuentra encima de la torre y para el desplazamiento de la torre se usara el momento de inercia máximo ya que se está estudiando la parte empotrada de la torre.

En la parte superior de la torre:

Ecuación 47. Momento de inercia mínimo

$$I_{min} = \frac{\pi}{64} (D_{ext}^4 - D_{int}^4) = \frac{\pi}{64} ((0,2858 \text{ m})^4 - (0,2604 \text{ m})^4) = 1,018 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

Fuente: MOTT, Robert. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México, 2006.

En la parte inferior de la torre:

Ecuación 48. Momento de inercia máximo

$$I_{max} = \frac{\pi}{64} (D_{ext}^4 - D_{int}^4) = \frac{\pi}{64} ((0,6 \text{ m})^4 - (0,5746 \text{ m})^4) = 1,010 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

Fuente: MOTT, Robert. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México, 2006.

Desplazamiento horizontal.

Se produce por las fuerzas horizontales ejercidas en la estructura y el rotor, el desplazamiento horizontal generado por la acción de viento se determina mediante la siguiente ecuación:

Desplazamiento horizontal del rotor;

Ecuación 49. Desplazamiento horizontal del rotor

$$\delta_{rotor} = \frac{Fr * H^3}{3 * E * I_{min}}$$

ROMERO SANABRIA, Jeison y SOTOMAYOR SANCHEZ, Nicolás. Diseño de un aerogenerador para la zona rural del Sumapaz, Cundinamarca

Donde:

δ_{rotor} = Desplazamiento horizontal del rotor
Fr=fuerza del viento sobre el rotor (N)

H=Altura de la torre (m)

E = Módulo elasticidad del material (Pa)

I_{min} = Momento de inercia mínimo de la torre (m⁴)

$$\delta_{\text{rotor}} = \frac{284,11 \text{ N} * (10 \text{ m})^3}{3 * 200 \times 10^9 \text{ Pa} * \frac{\pi}{64} ((0,2858 \text{ m})^4 - (0,2604 \text{ m})^4)}$$

$$\delta_{\text{rotor}} = 4,651 \times 10^{-3} \text{ m}$$

El Desplazamiento horizontal de la estructura se determina mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 50. Desplazamiento horizontal de la estructura

$$\delta_{\text{Torre}} = \frac{F_t * a^2}{6 * E * I_{\text{max}}} * (3 * L - a)$$

ROMERO SANABRIA, Jeison y SOTOMAYOR SANCHEZ, Nicolás. Diseño de un aerogenerador para la zona rural del Sumapaz, Cundinamarca

Donde:

Torre = Desplazamiento horizontal de la estructura

F_t = Fuerza del viento sobre la estructura (N).

a = Distancia de La base de la torre a la carga puntual del viento sobre la torre (m).

E = Módulo elasticidad del material (Pa)

I_{max} = Momento de inercia máximo de la torre (m⁴)

L= Longitud de la torre (m)

$$\delta_{\text{Torre}} = \frac{154,95 \text{ N} * 3,75 \text{ m}^2}{6 * 200 \times 10^9 \text{ Pa} * \frac{\pi}{64} ((0,6 \text{ m})^4 - (0,5746 \text{ m})^4)} * (3 * 10 - 3,75)$$

$$\delta_{\text{Torre}} = 4,72 \times 10^{-5} \text{ m}$$

El desplazamiento horizontal total producido por las fuerzas en la torre y el peso del rotor será la sumatoria de los dos desplazamientos calculados anteriormente, se obtiene un desplazamiento total de $4,69 \times 10^{-3} \text{ m}$, para tener un mayor grado de confiabilidad respecto a una presente falla en la estructura por el desplazamiento total se debe cumplir la siguiente condición:

$$\frac{L}{500 * \delta_{\text{tot}}} > 1$$

Donde:

δ_{tot} = Desplazamiento horizontal total (m)

L= Longitud de la torre (m)

$$\frac{10 \text{ m}}{500 * 4,69 \times 10^{-3} \text{ m}} > 1$$

$$4,26 \text{ m} > 1$$

Esta condición se cumple

Desplazamiento vertical.

Se produce por las fuerzas axiales ejercidas en la estructura por el peso del rotor, el desplazamiento se determina mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 51. Desplazamiento vertical

$$V_z = \frac{N}{E * A_c} * L$$

ROMERO SANABRIA, Jeison y
SOTOMAYOR SANCHEZ, Nicolás.
Diseño de un aerogenerador para la
zona rural del Sumapaz,
Cundinamarca

Donde:

V_z = desplazamiento vertical (m)

N= peso del rotor (N)

E = Módulo elasticidad del material (Pa)

A_c = Área sección transversal (m^2)

L= longitud de la torre

$$V_z = \frac{4228,36 \text{ N}}{200 \times 10^9 \text{ Pa} * \frac{\pi}{64} ((0,6 \text{ m})^2 - (0,5746 \text{ m})^2)} * 10 \text{ m}$$

Resolviendo la ecuación anterior tenemos:

$$V_z = 1,445 \times 10^{-4} \text{ m}$$

El desplazamiento vertical que se presenta en la estructura es producido a la carga que axial que es producida por el peso del rotor, mediante la siguiente condición se podrá verificar el valor del desplazamiento vertical de la torre.

$$\frac{L}{500 * V_z} > 1$$

Donde:

L= Longitud de la torre (m)

Vz= Desplazamiento vertical (m)

Reemplazando los valores en la ecuación de condición de desplazamiento se obtiene;

$$\frac{10}{500 * 1,445 \times 10^{-4}} > 1$$

$$138,4 > 1$$

La condición se cumple.

6.4.3 Pandeo. La torre del aerogenerador recibe cargas axiales de compresión como las columnas, por tal motivo se hará el respectivo análisis de columnas por pandeo del libro diseño de elementos de máquinas de Mott.

El pandeo de una columna se debe a la geometría, dimensiones de su sección transversal (diámetro, espesor), longitud y de las cargas a las que estará sometida, para iniciar el análisis por pandeo se debe identificar el radio de giro mínimo de la columna, tomando el momento de inercia mínimo y el área mínimo de la torre ya que es donde se presenta la carga crítica del sistema, el radio de giro se determina a través de la siguiente formula.

Ecuación 52. Radio de giro

$$r = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}}$$

ROMERO SANABRIA, Jeison y SOTOMAYOR SANCHEZ, Nicolás. Diseño de un aerogenerador para la zona rural del Sumapaz, Cundinamarca

Donde:

r= Radio de giro

I_{min}= momento de inercia mínimo

A= área de la sección trasversal

Reemplazando los valores se obtiene:

$$r = \sqrt{\frac{\frac{\pi}{64} ((0,2858 \text{ m})^4 - (0,2604 \text{ m})^4)}{\frac{\pi}{64} ((0,2858 \text{ m})^2 - (0,2604 \text{ m})^2)}} = 0,3866 \text{ m}$$

La relación de esbeltez es la comprensión entre la longitud de la torre con el radio de giro mínimo, esto es igual a

$$\text{Relacion de esbeltez} = \frac{KL}{r}$$

Donde:

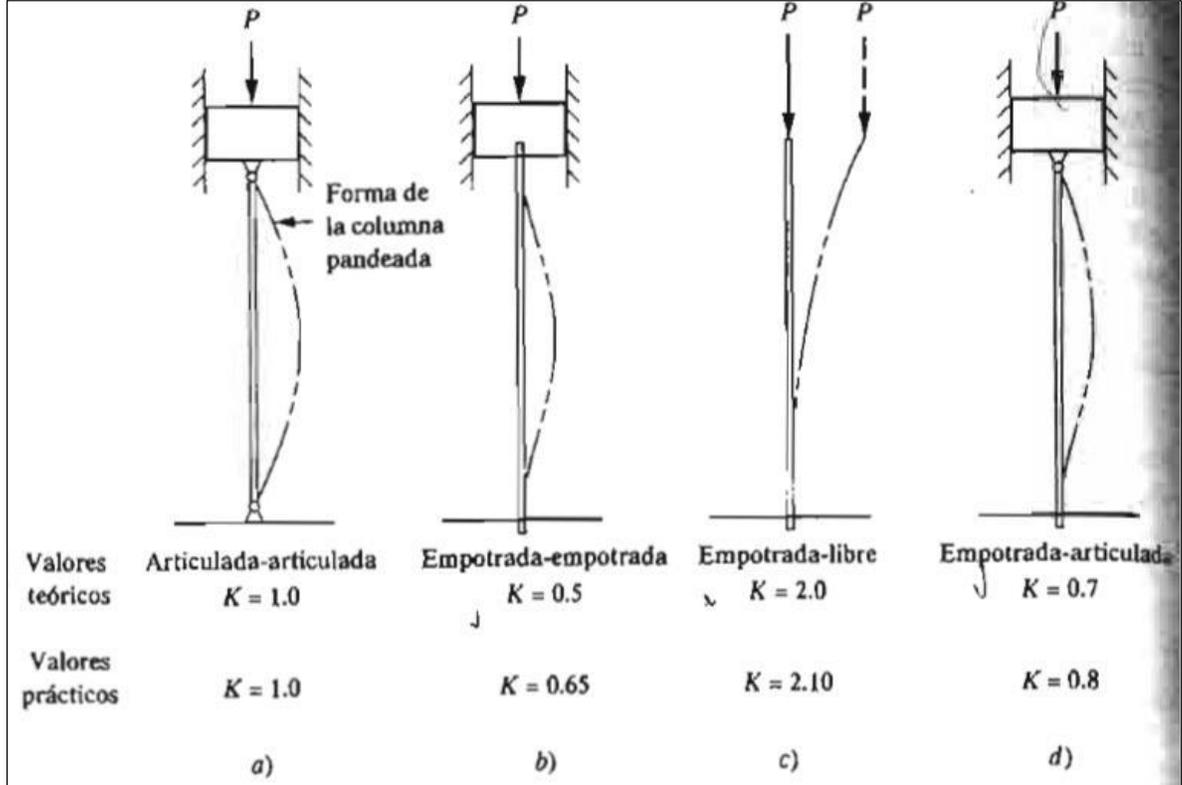
K= Valore teóricos de las conexiones en los extremos

L= longitud efectiva

r= radio de giro mínimo

Para determinar el valor de k nos basamos a partir de la siguiente imagen,

Figura 53. Valor teórico de las conexiones de las columnas



Fuente: MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas, Cuarta edición.

Para el diseño de nuestra torre tenemos la conexión de tipo columna empotrada a un extremo y libre al otro donde $K=2$

$$\text{Relacion de esbeltez} = \frac{2 * 10 \text{ m}}{0,3866 \text{ m}}$$

$$\text{Relacion de esbeltez} = 51,73$$

Para analizar las columnas se tienen dos métodos los cuales dependen del valor de la relación de esbeltez real de la columna analizada comparada con la constante de la columna analizada, dichos métodos son:

- Si la relación de esbeltez es mayor a C_e se usa la fórmula de Euler para columnas largas.
- Si la relación de esbeltez es menor a C_e se usa la fórmula de J.B Johnson para columnas cortas.

Ecuación 53. Constante de columna

$$C_e = \sqrt{\frac{2\pi^2 * E}{\sigma_y}}$$

ROMERO SANABRIA, Jeison y
SOTOMAYOR SANCHEZ, Nicolás.
Diseño de un aerogenerador para la
zona rural del Sumapaz,
Cundinamarca

Donde:

C_e= Constante de columna

E= Modulo de elasticidad del material de la columna

σ_y= Limite elástico del material (Mpa)

Reemplazando los valores obtenemos:

$$C_e = \sqrt{\frac{2\pi^2 * 200 \times 10^9 \text{ Pa}}{250 \times 10^6 \text{ Pa}}}$$

$$C_e = 125,66$$

Como la relación de esbeltez es menor a la constante de columna, se tiene una columna corta por tal motivo se debe implementar la siguiente fórmula de J.B Johnson para realizar el respectivo análisis de la columna e identificar la carga critica de pandeo.

Ecuación 54. Carga critica de pandeo

$$P_{cr} = A * \sigma_Y \left(1 - \frac{\sigma_Y \left(\frac{kl}{r} \right)^2}{4\pi * E} \right)$$

ROMERO SANABRIA, Jeison y
SOTOMAYOR SANCHEZ,
Nicolás. Diseño de un
aerogenerador para la zona rural
del Sumapaz, Cundinamarca

Donde:

A= área de la sección transversal

σ_y= Limite elástico del material (Mpa)

KL/r= Relación de esbeltez

E= Modulo de elasticidad del material de la columna

Reemplazando los valores obtenemos que la carga crítica de pandeo es igual a:

$$P_{cr} = 6,81 \times 10^{-4} m^2 * 250 \times 10^6 Pa \left(1 - \frac{250 \times 10^6 Pa * (51,73)^2}{4\pi^2 * 200 \times 10^9 Pa} \right)$$

$$P_{cr} = 155824,8 N = 15,82 KN$$

6.4.4 Factor de diseño y carga admisible. El factor de diseño se emplea de forma distinta que, en la mayor parte de las partes sometidas a cargas, en vez de ser aplicado el factor de diseño a la resistencia última del material, será aplicado a la carga crítica de pandeo.

El objetivo del análisis realizado al diseño estructura es garantizar que la carga que ha sido aplicada a la torre o columna sea segura, por tal motivo debe ser menor que la carga critica de pandeo.

Ecuación 55. Carga admisible

$$P_u = \frac{P_{cr}}{N}$$

Fuente: MOTT, Robert. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México, 2006.

Donde:

P_u =Carga admisible

N= Factor de diseño

El factor de diseño será de 3 ya que es el implementado para aplicaciones típicas de diseño de máquinas.

$$P_u = \frac{155,82 KN}{3} = 51,94 KN$$

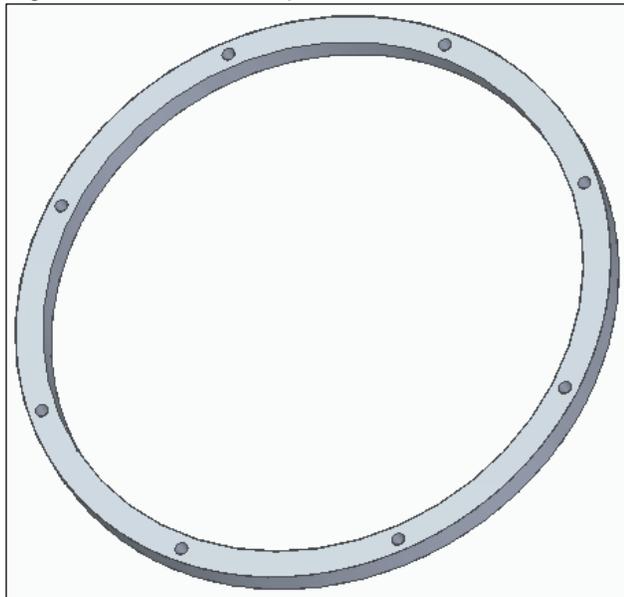
Como resultado obtenemos que la carga admisible es de 51,94 KN, por tal motivo la torre no fallara por pandeo si la carga axial o carga real aplicada generada por el peso del rotor no sobrepasa la carga admisible.

6.5 SUJECIÓN DE LA ESTRUCTURA

El acero que se va a implementar para la torre metálica es Acero A-36, para facilitar su construcción se utilizan láminas o planchas metálicas, el proveedor de dichas láminas es la campana servicios de acero S.A, siendo líderes en el mercado por la comercialización de acero en la ciudad de Bogotá, las planchas que se utilizarán en el proyecto para la construcción de la torre metálica son planchas en caliente o hot rolled 2,44 x 6,09 Mts y un espesor de 1/2 pulgada.

El diseño de la torre del aerogenerador se basa en tres secciones que la conforman, cada sección tubular tendrá diferentes diámetros, la unión de cada sección se llevará a cabo por medio de bridas en sus extremos, la sujeción de las bridas se lleva a cabo por medio de pernos de sujeción entre los extremos de cada elemento, las bridas serán unidas a las secciones por medio de soldadura de arco eléctrico, además la unión torre-rotor y torre-cimentación se hace por medio de bridas.

Figura 54. Brida se sujeción



Fuente: elaboración propia

Para el diseño de la torre se plantea diseñar 3 secciones metálica, en el siguiente cuadro se observan las dimensiones de cada una de las secciones metálicas de la torre:

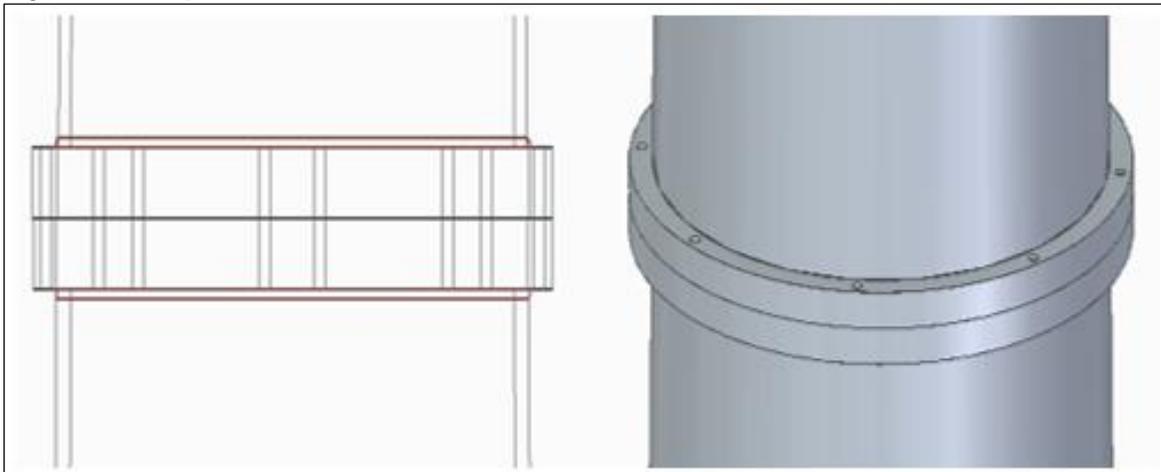
Tabla 13. Dimensiones de las secciones

	Sección 1	Sección 2	Sección 3
Diámetro inferior (m)	0,6	0,495	0,390
Diámetro superior (m)	0,495	0,390	0,2858
Espesor (m)	0,0254	0,0254	0,254
Altura a nivel del suelo (m)	4	7	10
Material	Acero	Acero	Acero

Fuente: elaboración propia

6.5.1 Sujeción por bridas. Para el diseño de la torre se tienen cuatro sujeciones por medio de bridas, donde la primera es utilizada para la unión de la cimentación con la torre, la segunda y la tercera son utilizadas para unir las secciones metálicas de la torre y la otra es utilizada para la unión entre la torre y el sistema del rotor.

Figura 55. Esquema brida



Fuente: elaboración propia

6.5.2 Unión soldada. La soldadura entre las secciones que conforman la torre se da por arco eléctrico, siguiendo el procedimiento del libro diseño de elementos de máquinas de Mott para diseñar uniones soldadas se debe tener en cuenta las fuerzas flexionantes y cortantes del sistema, con el fin de calcular el tamaño del cordón de soldadura.

Como se ilustra en la figura 63 el electrodo que se va a usar es el E-60 el cual se usa para unir materiales típicos como el A-36 y estructuras de edificios,

Figura 56. Tipos de electrodo

A. Acero		
Tipo de electrodo	Metales típicos que se unen (grado ASTM)	Esfuerzo cortante admisible
E60	A36, A500	18 ksi (124 MPa)
E70	A242, A441	21 ksi (145 MPa)
E80	A572, Grado 65	24 ksi (165 MPa)
E90		27 ksi (186 MPa)
E100		30 ksi (207 MPa)
E110		33 ksi (228 MPa)
B. Aluminio		

Fuente: MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas, Cuarta edición.

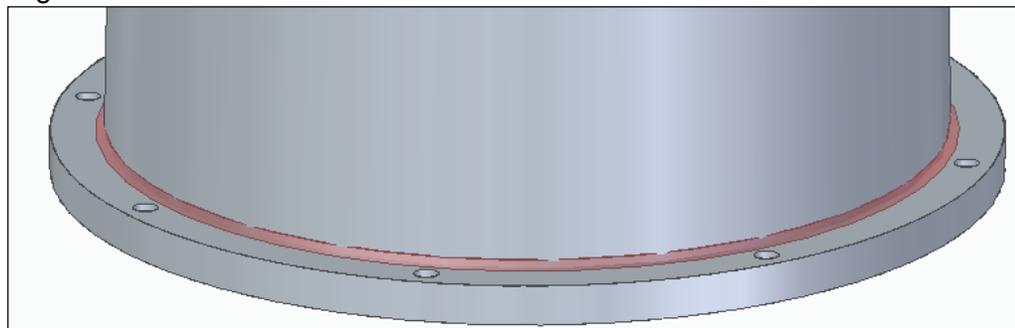
Para la selección del tamaño del cordón de soldadura nos basamos en la siguiente tabla, de donde tenemos que para un espesor de una pulgada el tamaño del chaflán la soldadura será de 5/16 in

Figura 57. Tamaños de electrodo

Espesor de la placa (pulg)	Tamaño máximo del lado, para soldaduras de chaflán (pulg)
$\leq 1/2$	3/16
$> 1/2 - 3/4$	1/4
$> 3/4 - 1\frac{1}{2}$	5/16
$> 1\frac{1}{2} - 2\frac{1}{2}$	3/8
$> 2\frac{1}{2} - 6$	1/2
> 6	5/8

Fuente: MOTT, Robert. Diseño de elementos de máquinas, Cuarta edición.

Figura 58. Unión soldada



Fuente: elaboración propia

6.5.3 Unión pernada. Cada uno de los componentes del aerogenerador estarán soportados por la estructura diseñada anteriormente, además cada uno de ellos estarán fijados mediante pernos de fijación. Para el cálculo de los pernos de fijación, primero debe seleccionarse la clase de propiedad, el tamaño de la rosca y el material de este. La figura 65 muestra la selección de los pernos de fijación.

Figura 59. Propiedades mecánicas de pernos

Clase de propiedad	Intervalo de tamaños, inclusive	Resistencia de prueba mínima,† MPa	Resistencia mínima a la tensión,† MPa	Resistencia mínima a la fluencia,† MPa	Material	Marca en la cabeza
4.6	M5-M36	225	400	240	Acero de bajo o medio carbono	
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Acero de bajo o medio carbono	
5.8	M5-M24	380	520	420	Acero de bajo o medio carbono	
8.8	M1.6-M36	600	830	660	Acero de medio carbono, T y R	
9.8	M1.6-M16	650	900	720	Acero de medio carbono, T y R	
10.9	M5-M36	830	1 040	940	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	
12.9	M1.6-M36	970	1 220	1 100	Acero aleado, T y R	

Fuente: BUDYNAS G., RICHARD. NISBETT, KEITH. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. 8 ed. México, McGrawHill, 2008. 419p. ISBN: 978-970-10-6404-7.

“Las roscas ASTM son más cortas porque por lo común la ASTM está relacionada con estructuras; por lo general las conexiones estructurales se someten a cortante”³¹

La clase de propiedad del perno que se seleccionó es 9.8, con un diámetro de rosca de 12 mm y un acero de medio carbono templado y revenido el cual tiene una resistencia mínima a la fluencia Sy_3 de 720 MPa. Con las características del perno seleccionado, se elige el material del mismo, siendo un acero ASTM 325 Tipo 1 de medio carbono templado y revenido. La figura xxx muestra la selección del material del perno.

³¹ BUDYNAS G., RICHARD. NISBETT, KEITH. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. 8 ed. México, McGrawHill, 2008. 418p. ISBN: 978-970-10-6404-7.

Figura 60 Especificaciones ASTM para aceros al carbono

Designación ASTM núm.	Intervalo de tamaños, inclusive, pulg	Resistencia de prueba mínima,* kpsi	Resistencia mínima a la tensión,* kpsi	Resistencia mínima a la fluencia,* kpsi	Material	Marca en la cabeza
A307	$\frac{1}{4}$ - $1\frac{1}{2}$	33	60	36	Acero de bajo carbono	
A325, tipo 1	$\frac{1}{2}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	85 74	120 105	92 81	Acero de medio carbono, T y R	
A325, tipo 2	$\frac{1}{2}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	85 74	120 105	92 81	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	
A325, tipo 3	$\frac{1}{2}$ -1 $1\frac{1}{8}$ - $1\frac{1}{2}$	85 74	120 105	92 81	Acero no temperizado, T y R	
A354, grado BC	$\frac{1}{4}$ - $2\frac{1}{2}$ $2\frac{3}{4}$ -4	105 95	125 115	109 99	Acero aleado, T y R	

Fuente: BUDYNAS G., RICHARD. NISBETT, KEITH. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. 8 ed. México, McGrawHill, 2008. 419p. ISBN: 978-970-10-6404-7.

A continuación se determina la resistencia máxima que pueden soportar los pernos mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 56. Resistencia máxima a fuerza

Cortante de los pernos

$$S_{sy} = 0.577 S_{y3}$$

Fuente: BUDYNAS G., RICHARD. NISBETT, KEITH. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. 8 ed. México, McGrawHill, 2008. 419p. ISBN: 978-970-10-6404-7.

Dónde:

S_{y3} = Resistencia mínima de fluencia de los pernos

Reemplazando los valores en la ecuación xxx se obtiene:

$$S_{sy} = 0.577(720 \text{ MPa})$$

$$S_{sy} = 415,44 \text{ MPa}$$

El área de la sección transversal de la rosca del perno está dada por la siguiente ecuación:

$$A_s = \#Elementos (Area . de la rosca)$$

Reemplazando los valores en la ecuación tenemos:

$$A_s = 8 * \left(\frac{\pi}{4} (12 \text{ mm})^2 \right)$$

$$A_s = 904,7786 \text{ mm}^2$$

La fuerza generada en el perno está determinada por la siguiente ecuación:

Ecuación 57. Fuerza generada en el perno

$$F_s = \frac{A_s * S_{sy}}{F.S}$$

Fuente: BUDYNAS G., RICHARD. NISBETT, KEITH. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. 8 ed. México, McGrawHill, 2008. 419p. ISBN: 978-970-10-6404-7

Dónde:

A_s = Área transversal de la rosca del perno

F_s = Fuerza cortante generada en el perno

$F.S$ = Factor de seguridad.

Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene:

$$F_s = \frac{904,7786 \text{ mm}^2 \times (415.44) \text{ MPa}}{3}$$

$$F_s = 125293,74 \text{ N}$$

Se asumió un valor de 3 para el factor de seguridad debido a que el esfuerzo al que puede estar sometido el material es de 240 Mpa. Por medio de la siguiente condición se podrá validar la información anterior.

Ecuación 58. Esfuerzo permisible del perno

$$\sigma_{permisible} = \frac{\sigma_{Fluencia}}{F.S}$$

Fuente: BUDYNAS G., RICHARD. NISBETT, KEITH. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. 8 ed. México, McGrawHill, 2008. 419p. ISBN: 978-970-10-6404-7.

Dónde:

$\sigma_{Fluencia}$ = Esfuerzo de fluencia del material

F.S = Factor de seguridad.

Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene:

$$\sigma_{permisible} = \frac{720 \text{ MPa}}{3}$$

$$\sigma_{permisible} = 240 \text{ MPa}$$

Para saber si el perno va a resistir el esfuerzo permitido por el material, se divide la fuerza cortante ejercida sobre él entre el área transversal del mismo y se obtiene lo siguiente:

$$\sigma_{permisible} > \frac{Fs}{As}$$

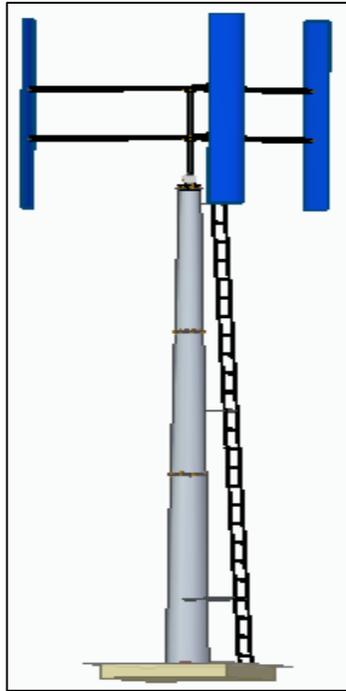
$$\sigma_{permisible} > \frac{125293,74 \text{ N}}{904,7786 \text{ mm}^2}$$

$$240 \text{ MPa} > 138.479 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante que se va a generar (138.479 Mpa) sobre el perno no supera el permitido (240 Mpa), lo que determina que no existirá ruptura del mismo.

6.5.4 Montaje aerogenerador. En la imagen 58 se puede observar como queda el montaje final del aerogenerador de eje vertical.

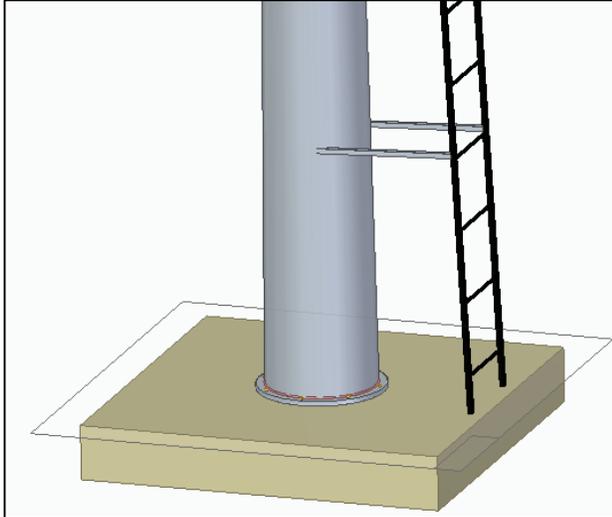
Figura 61. Montaje aerogenerador



Fuente: elaboracion propia

En la imagen 61 se puede observar el montaje del aerogenerador con las escaleras exteriores que permiten el acceso al mástil del aerogenerador. Este último componente se fabrica mediante perfiles tubulares, el diseño mostrado a continuación es realizado por los autores tomando como referencia escaleras diseñadas para tanques de gran magnitud;

Figura 62. Escaleras acceso



Fuente: elaboración propia.

6.5 SISTEMA GENERACIÓN

“Los alternadores apropiados para aerogeneradores de mediana potencia que giran a velocidad variable son los alternadores síncronos de imanes permanentes.”³²

Para la selección del alternador se tiene en cuenta la velocidad nominal que se halló en el capítulo 2 y el diámetro del rotor.

Utilizando la ecuación de la velocidad específica se determina la velocidad de rotación del rotor;

Ecuación 59. Velocidad específica

$$\lambda = \frac{u}{V} = \frac{\Omega * R}{V} = \frac{2 * \pi * n * R}{60 * V}$$

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 129p. ISBN 978-958-778-232-5

Donde:

λ = Tip speed ratio o Velocidad específica (6)

u = Velocidad lineal del extremo de la pala del rotor (m/s)

v = Velocidad del viento nominal (m/s)

³² Íbid. p. 4-7

Ω = Velocidad angular de rotación del rotor (rad/s)

R = Radio del rotor (m)

n = Velocidad de rotación del rotor (rpm)

Despejando la velocidad de rotación;

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

Reemplazando

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

$$n = \frac{3 * 60 * 10,62 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 * \pi * 2,5\text{m}} = 121,6962 \text{ rpm}$$

También se debe encontrar el par o momento en el eje del rotor por medio de la siguiente ecuación;

Ecuación 60. Momento en el eje

$$P = M * \Omega$$

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía Eólica, 2013. 121p. ISBN 978-958-778-232-5

Donde:

P = Potencia eólica del rotor (kW)

M = Momento en el eje del rotor (KN m)

Ω = Velocidad de rotación del rotor del generador (rad/s)

Utilizando la ecuación de velocidad específica λ , se puede determinar la velocidad angular de rotación del rotor del generador Ω ;

Ecuación 61. Velocidad específica

$$\lambda = \frac{\Omega * R}{V}$$

Fuente: VILLARUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería de la Energía

Despejando

$$\Omega = \frac{\lambda * V}{R}$$

Reemplazando

$$\Omega = \frac{3 * 10,62 \frac{m}{s}}{2,5m} = 12,74 \text{ rad/s}$$

Ahora despejando el momento de la ecuación que relaciona con la potencia eólica del rotor;

$$M = \frac{P}{\Omega}$$

La potencia eólica del rotor es la misma potencia eólica real captada, reemplazando los valores se encuentra que el Momento en el eje del rotor es;

$$M = \frac{2KW}{12,74\text{rad/s}} = 0.1570 \text{ KNm} = 157 \text{ Nm}$$

$$p = \frac{60 \text{ Hz} * 120}{2 * 122\text{rpm}} = 29,51\text{Kw}$$

Cuadro 9. Especificaciones alternador

Tipo de alternador	Potencia nominal (KW)	Revoluciones por minuto (rpm)	Frecuencia (Hz)	Momento (Nm)
Síncrono de imanes permanentes	2	122	60	157

Fuente: elaboración propia

Figura 63. Alternador



Fuente: elaboración propia.

El alternador seleccionado es fabricado por la empresa TGET modelo LS-4000P, comercialmente se encuentra disponible para velocidades de hasta 300 rpm y voltaje AC (Corriente Alterna), en contacto con la empresa el voltaje nominal se puede especificar que en este caso sería de 60Hz, las especificaciones del alternador se encuentran en el anexo D,

Los niveles de protección están dados por un código compuesto por dos letras constantes "IP" y dos números los cuales indican el grado de protección; para caso del alternado este tiene un tipo de protección IP54.

Figura 64 Grado IP

Grado de protección contra la introducción de cuerpos sólidos			Grado de protección al agua		
Primer Índice	Descripción	Alcance de la protección	Segundo Índice	Descripción	Alcance de la Protección
0	Sin protección	Sin especial protección para personas contra un contacto directo de piezas móviles internas y las externas con vida. Sin protección a los equipamientos contra el ingreso de objetos sólidos externos.	0	Sin protección	Sin ninguna protección especial
1	Protección contra los cuerpos sólidos grandes	Protección contra el contacto accidental de grandes áreas con vida y partes interiores con movimiento, por ejemplo: la parte posterior de la mano. Pero sin protección contra el acceso deliberado del mismo. Protección contra el ingreso de objetos sólidos con un diámetro mayor que 50 mm.	1	Protección contra el goteo de agua vertical (condensación)	La caída vertical de gotas de agua no debe causar daños
2	Protección contra los cuerpos sólidos medianos	Protección contra el contacto entre los dedos y las partes interiores móviles. Protección contra el ingreso de objetos sólidos con un diámetro mayor a 12,5mm.	2	Protección contra el goteo de agua inclinada verticalmente	La caída de gotas de agua con hasta un ángulo de 15° de la vertical desde cualquier dirección, no debe causar daño.
3	Protección contra los cuerpos sólidos pequeños	Protección contra el contacto entre las piezas móviles internas y herramientas, cables, hilos... con un espesor mayor a 2,5mm. Protección contra el ingreso de objetos sólidos con un diámetro mayor a 2,5mm.	3	Protección contra agua en spray	La caída de gotas de agua con hasta un ángulo de 60° de la vertical desde cualquier dirección, no debe causar daño. (lluvia)
4	Protección contra los cuerpos sólidos muy pequeños (granulados)	Protección contra el contacto entre las piezas móviles interiores y herramientas, cables, hilos... con un espesor mayor a 1mm. Protección contra el ingreso de objetos sólidos con un diámetro mayor a 1mm.	4	Protección contra las salpicaduras de agua	Las salpicaduras de agua desde cualquier dirección, no deben de causar daños al interior.
5	Protección contra los residuos de polvo	Protección contra el contacto entre las piezas móviles interiores y el ingreso de polvo. El ingreso no se previene completamente, pero el polvo no puede penetrar en tales cantidades que puedan afectar al funcionamiento correcto del mismo.	5	Protección contra chorros de agua de cualquier dirección con manguera	Los chorros de agua producidos con manguera y desde cualquier dirección, no deben de causar daño al interior.
6	Protección total contra la penetración de cualquier cuerpo sólido (estanqueidad)	Protección total contra el contacto de las piezas móviles interiores. Protección contra cualquier ingreso de polvo.	6	Protección contra inundaciones	La cantidad de agua que se introduzca, en casos de inundación esporádica o temporal, no debe dañar el interior, por ejemplo, los golpes de mar.
			7	Protección contra la inmersión temporal	La cantidad de agua que se introduzca, en caso de sumergir el equipamiento en específicas condiciones de presión entre 1 y 30 minutos, no debe dañar las piezas internas del mismo.
			8	Protección durante inmersión continua	El agua que se pueda introducir, si sumergimos el equipamiento al menos con 2 horas y con una presión de 2 bares (para los racores HelaGuard IP68 No Metálicos) y de 5 horas y con una presión de 5 bares (para los racores HelaGuard IP68 Metálicos), no deben producir daño en el interior.
			9k	Protección contra la introducción de agua usando pistolas de limpieza de alta presión	El agua que se introduzca en el interior, producida al utilizar pistolas de limpieza con agua de alta presión, no deben causar daño interior.

Fuente: Definición y tabla de grado de protección (IP) [En línea].
 [Consultado 1 febrero 2020 Disponible en:
 file:///C:/Users/User/Downloads/resumen%20IP%20.pdf

6.6 SISTEMA DE TRANSMISIÓN

6.6.1 Selección transmisión de potencia. Para la selección del tren de engranajes vamos a partir de tres alternativas que serán evaluadas por el método Scoring, la ponderación (Tabla 6) y el nivel de confianza (Tabla 7) serán los mismos que se usaron en la selección del perfil del alabe.

A continuación, se describirán las características de cada una de las alternativas teniendo en cuenta como criterios de evaluación velocidad, mantenimiento, costos, duración del sistema y alineación, de esta manera se seleccionará la mejor alternativa.

6.6.1.1 Alternativa 1. Transmisión por correas, “las correas ofrecen flexibilidad, absorción de vibraciones, transmisión de potencia a altas velocidades, resistencia a atmosferas abrasivas, costo relativamente bajos y poco mantenimiento”³³. Las correas pueden trabajar en poleas pequeñas, sin embargo, como requieren alta tensión a bajas velocidades son poco eficientes y su limpieza también es un poco compleja.

Figura 65. Transmisión por bandas



Fuente: CHIHUA`S EMEC.
Transmisión por banda [imagen].
Disponible en:
<https://zonaamechihuahua1.wordpress.com/2015/02/05/transmision-por-banda/>

6.6.1.2 Alternativa 2. Transmisión por cadenas, las cadenas de transmisión de potencia pueden trabajar en ambientes a altas temperaturas, no hay deslizamiento, transmite más potencia que las correas, no necesita ser tensionada, se puede adaptar a cualquier longitud, pero a bajas velocidades su trabajo es deficiente, transmite las vibraciones, requiere continua lubricación y generan bastante ruido.

³³ SHIGLEY, Joseph E. Diseño en ingeniería mecánica. Traducido por Jesús Elmer Murrieta, Efrén Alatorre Miguel. 8 ed. México D.C.: McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-970-10-6404-7

Figura 66. Transmisión por cadenas



Fuente: Mecanismos. Transmisión por cadenas [imagen]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/martaomecanis/mecanismos-de-transmision-circular/transmision-por-cadena>

6.6.1.3 Alternativa 3. Transmisión por engranajes, “la función de un engrane es transmitir movimiento, rotatorio o recíprocante, de una parte, de una máquina a otra y donde se requiere reducir o incrementar las revoluciones de un eje. Los engranes son los más resistentes y durables de todos los transmisores mecánicos. Por esta razón la mayoría de las veces se usan engranes en lugar de cadenas y correas en transmisiones automotrices y en la mayoría de transmisiones de máquinas para trabajos pesados”³⁴.

Figura 67. Transmisión por engranajes



Fuente: Mecanismos .Transmisión por engranajes [imagen]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/martaomecanis/mecanismos-de-transmision-circular/e>

³⁴ SHIGLEY, Joseph E. Diseño en ingeniería mecánica. Traducido por Jesús Elmer Murrieta, Efrén Alatorre Miguel. 8 ed. México D.C.: McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-970-10-6404-7

Para la selección de la mejor alternativa se usará el método scoring con los criterios ya mencionados anteriormente, a continuación, se dará una ponderación según la importancia de cada criterio teniendo en cuenta la tabla 6, obteniendo;

Tabla 14. Criterios

Criterios	Ponderación W_i
Mantenimiento	3
Velocidad	5
Costos	4
Alineación	4
Duración	5

Fuente: elaboración propia

Con la escala numérica de confianza tabla 7, se establece un rating para cada alternativa según cada criterio de la siguiente manera;

Cuadro 10. Nivel de confianza sobre los criterios

Criterio	Alternativa 1 r_{i1}	Alternativa 2 r_{i2}	Alternativa 3 r_{i3}
Mantenimiento	6	5	7
Velocidad	4	7	9
Costos	4	6	5
Alineación	5	4	6
Duración	3	7	8

Fuente: elaboración propia

Para la selección de la alternativa se usa la siguiente ecuación;

Ecuación 62. Scoring

$$S_j = \sum (W_i * r_{ij})$$

Donde:

W_i = Ponderación por cada criterio

R_{ij} = Alternativa

Resolviendo;

$$S_{j \text{ alternativa } 1} = (3 * 6) + (5 * 5) + (4 * 4) + (4 * 5) + (5 * 3)$$

$$S_{j \text{ alternativa } 1} = 94$$

Realizando el procedimiento anterior con las otras dos alternativas se obtiene;

Cuadro 11. Resultado de la ponderación

Criterio	Ponderación W_i	Alternativa 1 r_{i1}	Alternativa 2 r_{i2}	Alternativa 3 r_{i3}
Mantenimiento	3	6	5	7
Velocidad	5	5	7	9
Costos	4	4	6	5
Alineación	4	5	4	6
Duración	5	3	7	8
Score S_j		94	125	150

Fuente: elaboración propia

Con los resultados obtenidos en la tabla anterior, la alternativa con mayor puntaje es la alternativa 3, correspondiente a transmisión por engranajes, esto quiere decir que es la alternativa más adecuada según los criterios establecidos.

6.6.2 Tren de engranajes. Debido a que el sistema solo proporciona 122 rpm y el alternador encontrado trabaja a 300 rpm para generar 2Kw, se necesita un sistema que aumente la velocidad para ello se usara un sistema de multiplicación por medio de engranajes rectos.

Para esto determinamos la relación de transmisión de velocidad entre los engranajes, con la siguiente ecuación:

Ecuación 63. Relación de transmisión

$$i = \frac{n_2}{n_1}$$

Fuente: NORTON, Robert. Diseño de máquinas. 4 ed. México, 2006. [Consultado: 22 octubre 2019] p. 555.

Donde:

i = Relación de transmisión

n_1 = Velocidad de entrada

n_2 = Velocidad de salida

Reemplazando en la ecuación tenemos;

$$i = \frac{300 \text{ rpm}}{122 \text{ rpm}} = 2,45$$

Luego de tener la relación de transmisión de velocidad se calcula el número de dientes de los engranajes. Para esto tomaremos como guía la literatura de diseño de máquinas de Robert Norton³⁵. En este libro encontramos que para empezar con el cálculo es necesario determinar el número de dientes mínimo que debe tener el piñón. Para esto se debe determinar el ángulo de presión, para este trabajo de grado se tomará un ángulo de presión de 20°.

Con el ángulo de presión determinado Norton nos indica que el siguiente paso es determinar el número de dientes mínimo que debe tener el piñón y el máximo número de dientes que tendrá en engranaje, en la tabla 11 se encontrará la relación.

Tabla 15. Relación piñón - engranaje

Número de dientes del piñón	Número máximo de dientes en el engranaje
17	1309
16	101
15	45
14	26
13	16

Como ya se conoce la relación de transmisión de velocidad esta será la misma para el número de dientes (2,5). La opción a seleccionar será un piñón con 16 dientes y realizando el cálculo se tendrá un engranaje de 40 dientes.

Luego de determinar el número de dientes del piñón y el engranaje, se determina el modulo el cual gobernara el sistema, para cuestiones de diseño y no sobredimensionar el sistema se determinó un módulo estandarizado de 8.

Para determinar el diámetro primitivo del piñón y el engranaje se usará la siguiente ecuación;

Ecuación 64. Diámetro primitivo

$$dp = m * Z$$

Fuente: NORTON, Robert. Diseño de máquinas. 4 ed. México, 2006. [Consultado: 22 octubre 2019] p. 555.

Donde:

³⁵ NORTON, Robert. Engranajes rectos. Diseño de máquinas, 4ª, ed. México. ISBN 978-970-10-6884-7

d_p = Diámetro primitivo del engranaje (mm)

m = Módulo

Z = Número de dientes

Una vez reemplazado los valores en la ecuación obtenemos como resultados los siguientes diámetros primitivos;

Diámetro primitivo del piñón: 128mm

Diámetro primitivo del engrane: 320mm

En el siguiente cuadro 11 encontraremos la información resumida para el piñón y el engrane.

Cuadro 12. Características sobre el sistema de multiplicación

	Velocidad (rpm)	Relación de transmisión	Angulo de presión	Número de dientes	Módulo (mm)	Diámetro primitivo (mm)
Piñón	300	2,5	20	16	8	128
Engrane	122	2,5	20	40	8	320

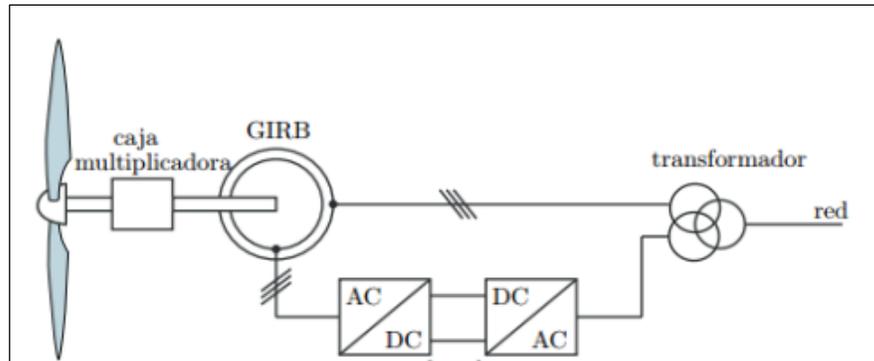
Fuente: elaboración propia.

6.7 SISTEMA DE CONTROL

6.7.1 Sistema eléctrico. El sistema de control está formado por el sistema eléctrico, el cual es el encargado de transportar la energía eléctrica producida por el generador hacia la red eléctrica en el hogar, la energía eléctrica pasa por una serie de elementos y/o componentes eléctricos, los cuales se encargan de transmitir la carga y la tensión del sistema para ser aprovechada en la red eléctrica.

En el caso de generadores sincrónicos y de imanes permanentes, es común que la conexión a la red de estos sistemas se realice a través de electrónica de potencia. El cual controla toda la potencia entregada por el sistema. Dicho esquema se puede observar en la parte inferior de la Figura 68.

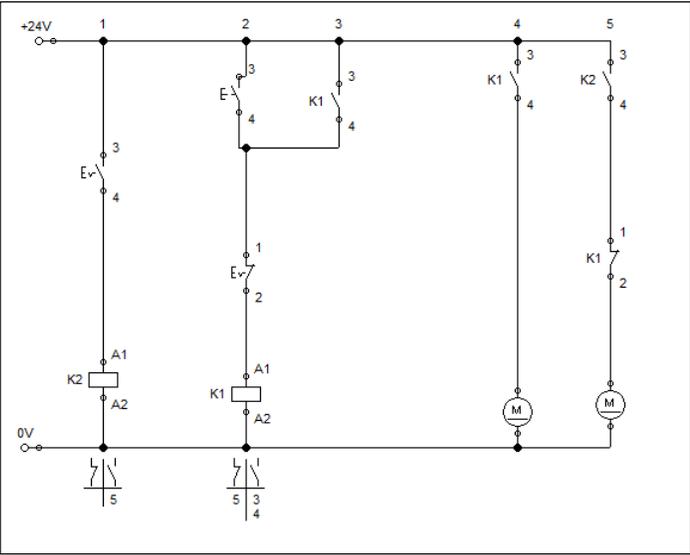
Figura 68. Sistema de control



Fuente: elaboración propia

6.7.2 Conexión eléctrica. El siguiente esquema representa el esquema eléctrico que representa las conexiones del aerogenerador, a través del esquema se representa el tipo de instrumentos que se requieren para las conexiones, el sistema cuenta con un interruptor el cual se encargara de permitir el funcionamiento del aerogenerador, además el sistema llevara un sensor por RPM el cual se encargara de activar el freno si se pasa de un límite de RPM y por ultimo cuenta con un freno de emergencia por si se bloquear el sistema, el cual deberá ser usado para brindarle una mayor seguridad al operario a la hora de realizar el mantenimiento al aerogenerador, para ello se utiliza un sensor detector de bloqueo que envía información al PLC que luego indica en el inferior de la torre mediante una luz verde que se puede ingresar a la máquina.

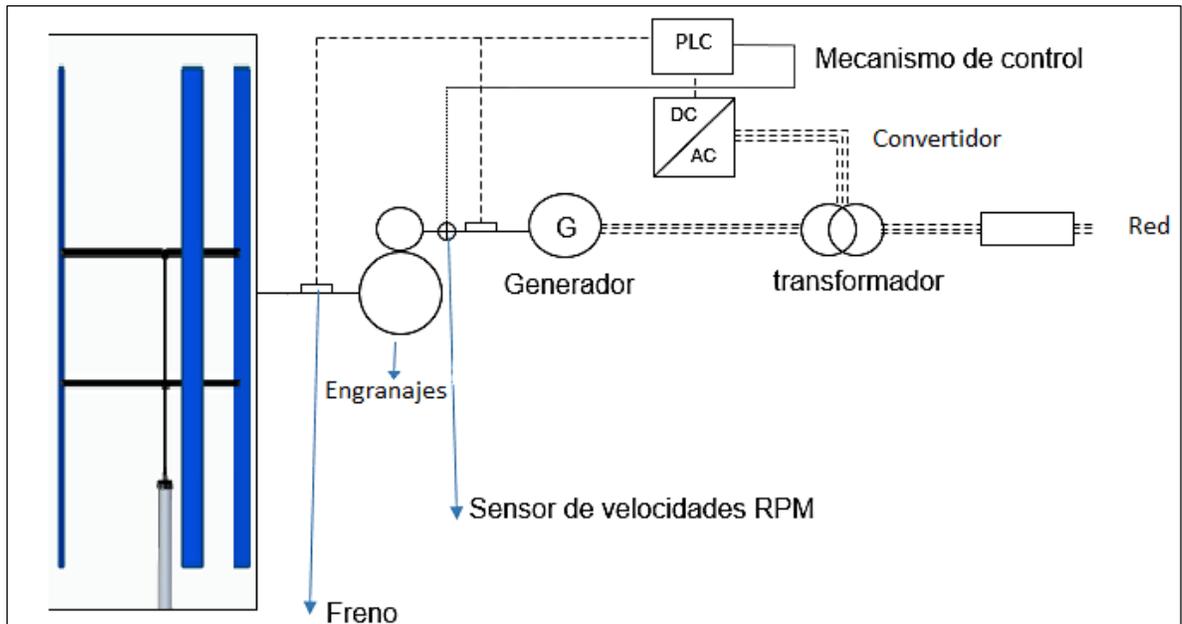
Figura 69. Sistema electrico



Fuente: elaboración propia

El siguiente esquema representa la conexión eléctrica y de control del sistema del aerogenerador, en donde tenemos que el movimiento producido por el rotor genera energía mecánica transmitida al generador, este entregara la energía al transformador el cual se encargara de bajar el voltaje, aquí se extrae una pequeña parte de energía para el sistema de control formado por diferentes sensores luego reaccionara de acuerdo con su necesidad, finalmente se transferirá al sistema interconectado nacional. Se aprecia la conexión en la siguiente imagen;

Figura 70. Sistema de control



Fuente: elaboración propia

6.7.2.1 Rectificador. Con el fin de llevar la potencia extraída desde el generador hacia las baterías, es necesario pasar de alterna a continua las ondas de voltaje y corriente. Para esto, se utilizará un sistema rectificador trifásico tipo puente de Graetz, que realiza una rectificación de onda completa. Para ello, las tres fases AC de la entrada pasan por 6 diodos SCR que generan a la salida del puente una señal rectificada, tal como en el caso monofásico.

6.7.2.2 Inversor. Es un dispositivo que se encarga de convertir la corriente continua que viene de las baterías en corriente alterna.³⁶

6.7.2.3 Transformador. La conexión del inversor a la red eléctrica se realiza a través de un transformador elevador de tensión. Es vital utilizar un transformador para la elevación de tensión a un valor razonable para el transporte de la energía, y a su vez, para que no produzca pérdidas o caídas de tensión en la línea.

6.7.2.4 El Generador. Para esta máquina se selecciona un generador de la casa TGET una fábrica de generadores chinos, el Generador modelo LS-2000P cuenta con una potencia nominal de 2KW, con un rango de 0-500 RPM, una frecuencia de 60Hz y un voltaje de 110V.

³⁶ FORGET, Astrid. Manual para ayudar la comprensión del diseño de microaerogeneradores. [En línea]. Lima, Peru. 2011. [Consultado: 14 julio 2019]. 29 – 34 p. Disponible en: <http://www.astridforget.com/wp-content/uploads/2014/09/Manual-t%C3%A9cnico-AF-eolico-VF-110617.pdf>

7. SIMULACIÓN ESTRUCTURA ELEMENTOS FINITOS SIMULACIÓN POR EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS

La simulación para este proyecto se realiza a la estructura del aerogenerador, teniendo como apoyo el software Siemens N.X. 12. Programa que permite realizar el análisis completo de las cargas ejercidas sobre la estructura, se calcula las cargas totales sobre el sistema, comprobando si existen esfuerzos que afecten gravemente la armadura diseñada.

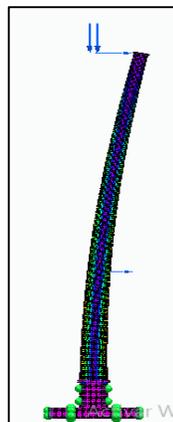
Para el análisis de elementos finitos se determina la deformación máxima y esfuerzos que se producen en la estructura para garantizar si es conveniente realizar este diseño, este análisis permite asegurar que la estructura resiste la fuerza ejercida sobre ella antes de una futura fabricación y así evitar gastos innecesarios o daños posibles durante la operación.

7.1 MODELAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

Para el modelamiento de la estructura se tiene en cuenta los cálculos realizados en el capítulo anterior en donde se escoge un acero A36 como el más apropiado para este tipo de diseño, este acero según cálculos previos son capaces de resistir la carga a la que esta sometidos, la simulación de este sistema se realizó dos veces ya que en la primera de ellas existían errores, según los diseñadores se debía a que la estructura no tenía un redondeo lo cual ocasionaba que los resultados no convergieran, es decir que los datos obtenidos no eran confiables, se hizo el debido ajuste mejorando la confiabilidad de los datos.

En la imagen se evidencia la estructura modelada con sus respectivas cargas, las cuales son; carga axial, carga radial, fuerza ejercida por el viento sobre la torre y sus restricciones en la parte inferior.

Figura 71. . Modelamiento estructura



Fuente: elaboración propia

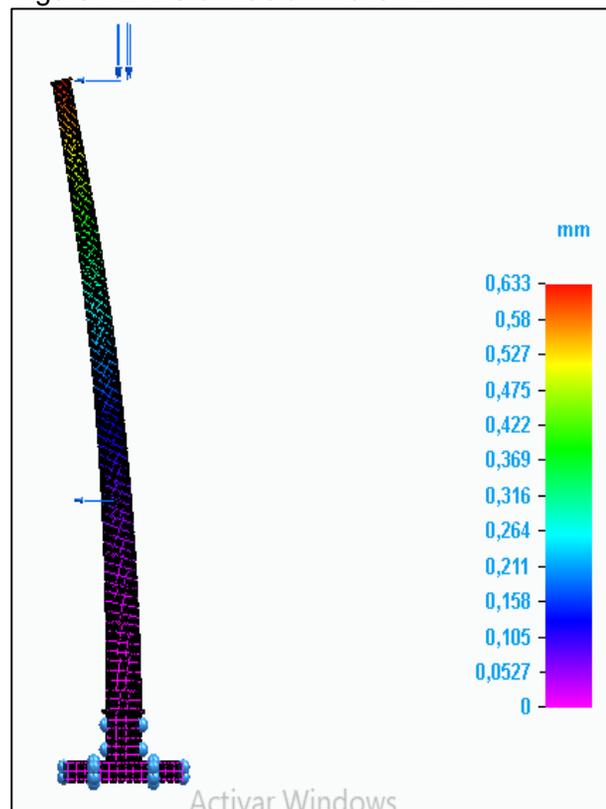
7.2 MALLA Y SIMULACIÓN

Para la simulación se establece una fuerza total de 4228,36 N y se realizan las restricciones en la parte inferior de la estructura, se crea una primera malla de 12 mm y se hace un énfasis en este elemento ya que de la refinación de esta dependen los resultados y la confiabilidad de la simulación.

Se utiliza una malla 3D tetraédrica y se establece un tamaño inicial alto, esto se hace para evitar que los gastos computacionales aumenten ya que cada vez que se reduce la malla aumentan los números de elementos y esto hace que la simulación tarde mucho más tiempo.

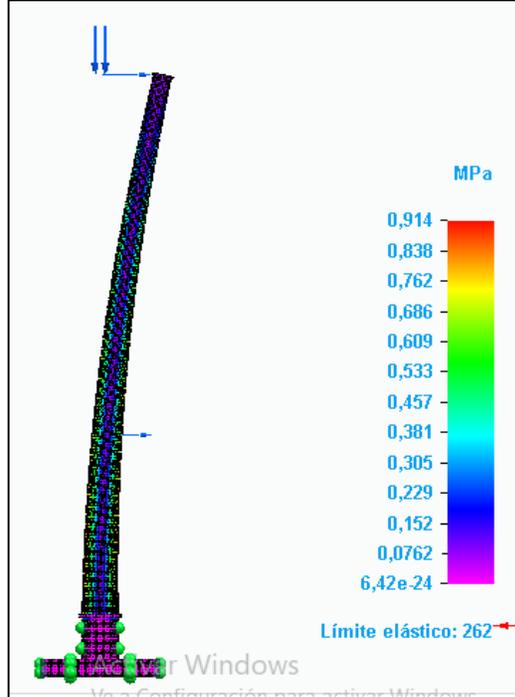
Después de realizar la primera simulación da como resultado una deformación de 0,633 mm presentando una mayor deformación sobre la parte superior que está soportando el rotor, los alabes, el eje, el freno, el generador y demás componentes de la máquina, sin embargo, esta deformación es mínima en el sistema ya que no sobrepasa el límite elástico del material y garantiza que va a resistir el peso proporcionado.

Figura 72. Deformación malla 12mm



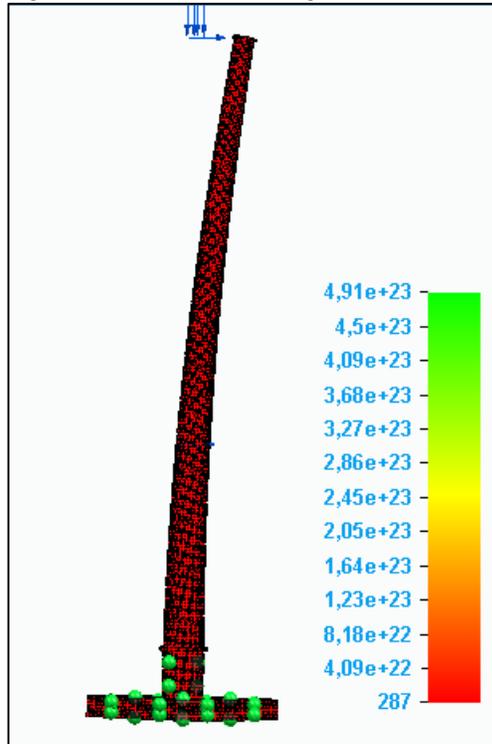
Fuente: elaboración propia

Figura 73. Esfuerzo Von Mises malla 12 mm



Fuente: elaboración propia

Figura 74. Factor de seguridad malla 12 mm



Fuente: elaboración propia

Como se estableció desde un principio estos datos deben ser corroborados realizando un refinamiento de malla y comprobando que los datos son confiables para la simulación de la estructura.

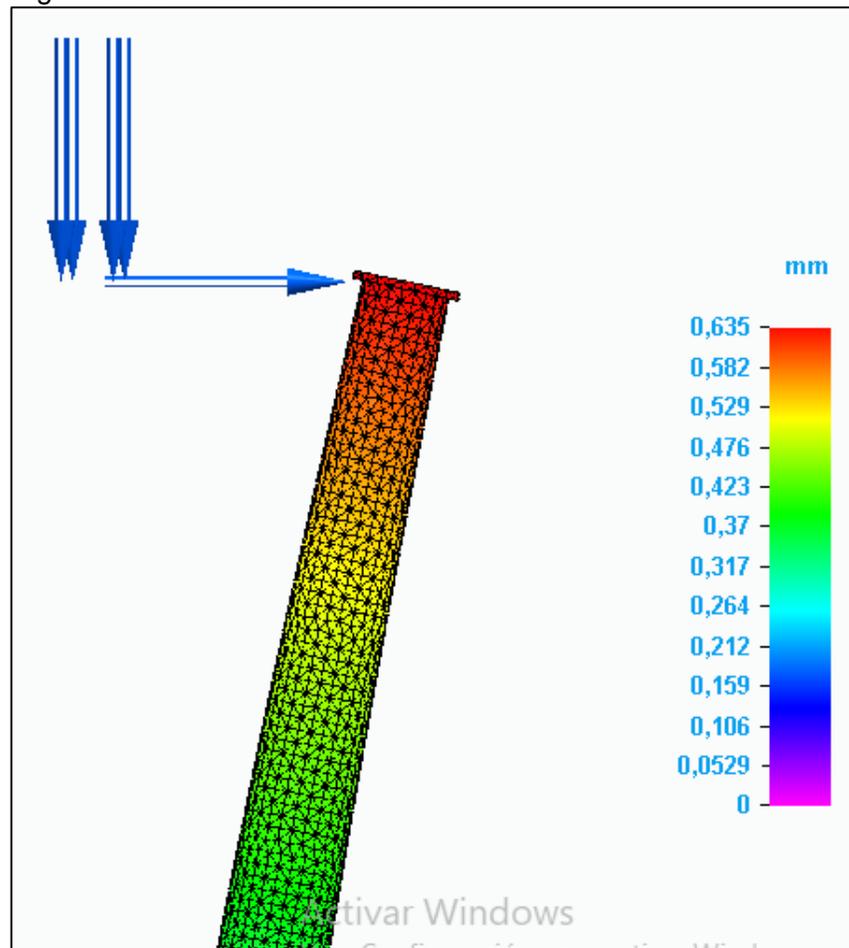
7.3 REFINAMIENTO DE MALLA

Para este capítulo se toma la medida inicial de tamaño de malla (12 mm) y se disminuye en un 25%, esto con el objetivo de ir realizando el refinamiento y obtener datos más precisos.

Para poder realizar un buen análisis se hicieron 2 refinamientos de la malla dando resultados de deformación y esfuerzos que son muy importantes a la hora de realizar la conclusión de esta simulación.

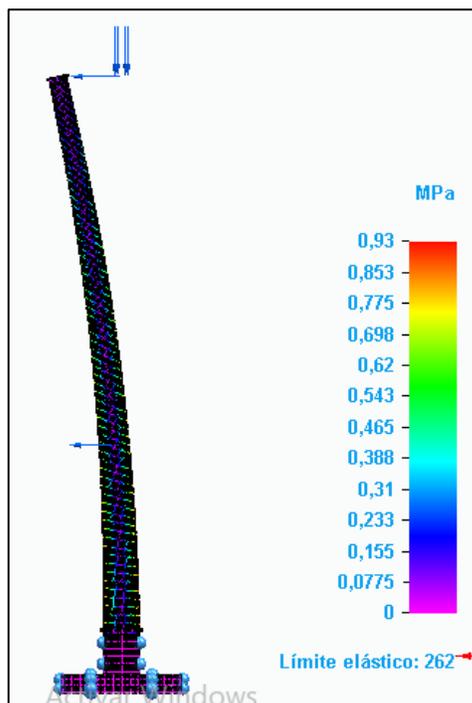
Refinamiento con malla de 9 mm

Figura 75. Deformación malla 9mm



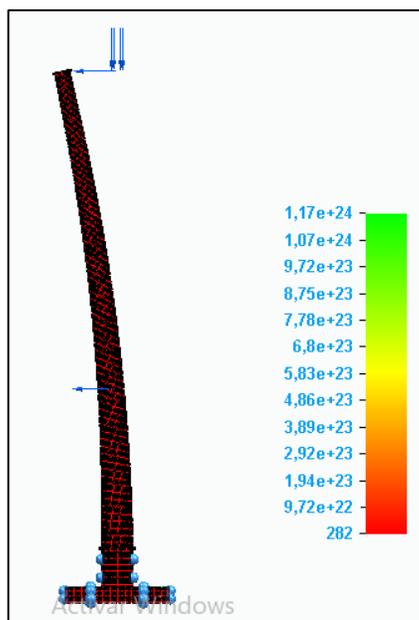
Fuente: elaboración propia

Figura 76. Esfuerzo Von Mises malla 9 mm



Fuente: elaboración propia

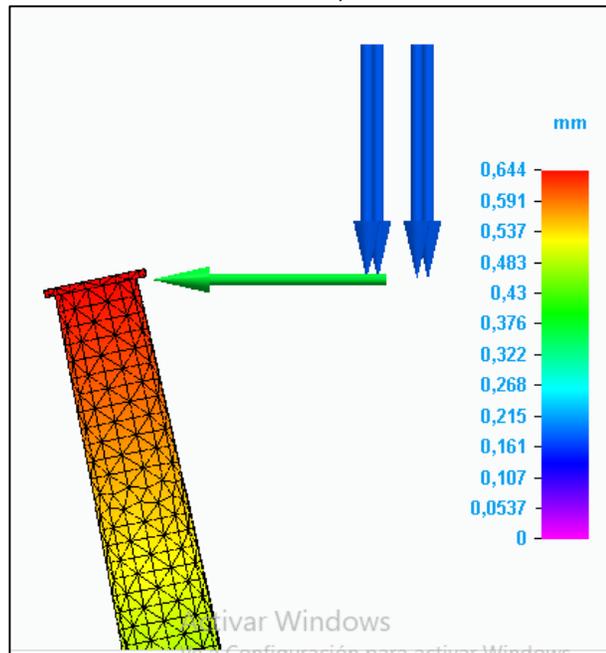
Figura 77. Factor de seguridad malla 9 mm



Fuente: elaboración propia

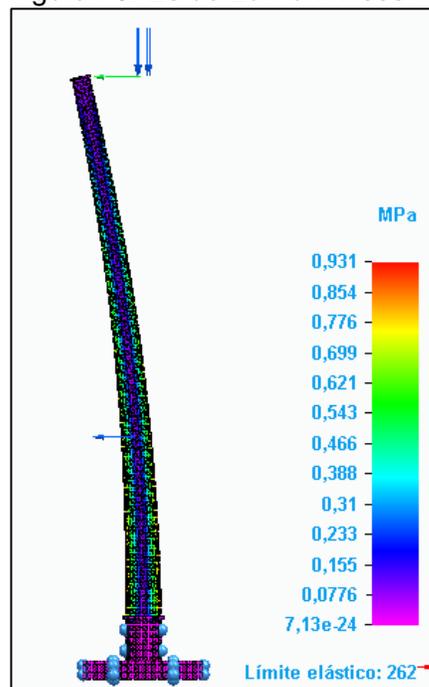
Refinamiento con malla de 4,5 mm

Figura 78. Deformación malla 4,5 mm



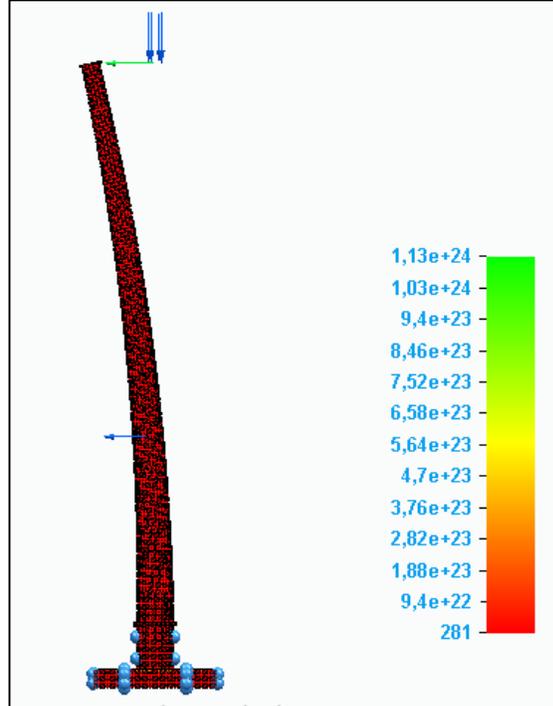
Fuente: elaboración propia

Figura 79. Esfuerzo Von Mises malla 4,5 mm



Fuente: elaboración propia

Figura 80. Factor de seguridad malla 4,5 mm



Fuente: elaboración propia

Después de realizar los debidos refinamientos se realiza el análisis de cada resultado para determinar si la simulación es confiable y arroja los resultados adecuados, en este sistema se realizaron simulaciones hasta un tamaño de malla de 4,5 mm ya que al momento de realizar un refinamiento más reducido se presentaban fallas en el programa y su tiempo de simulación era muy alto lo cual perjudicaba el costo computacional del trabajo.

7.4 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Teniendo los datos de cada una de las simulaciones se procede a realizar el análisis de los mismos teniendo como datos principales la cantidad de elementos, el tiempo en que tardo cada simulación, la deformación y los esfuerzos que se presentan sobre la estructura.

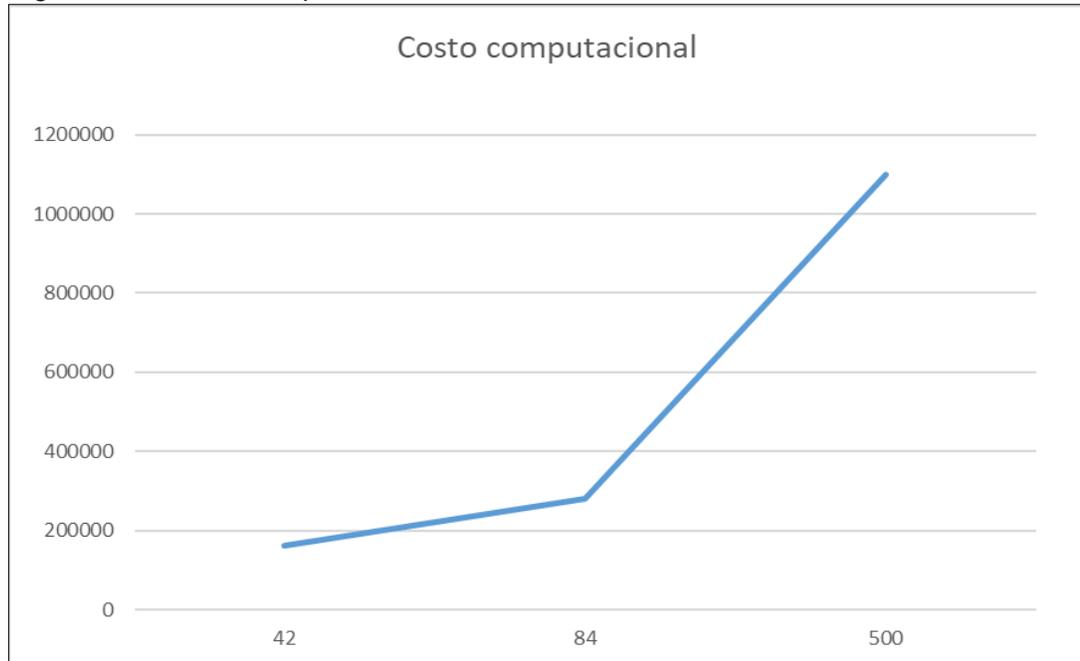
Tabla 16. Análisis métodos finitos

ANALISIS DE ELEMENTOS FINITOS					
TAMAÑO DE MALLA	# ELEMENTOS	TIEMPO (S)	DESPLAZAMIENTO MAX	ESFUERZO VM PROM	FACTOR DE SEGURIDAD
12	161117	42	0,633	0,914	287
9	279073	84	0,635	0,93	282
4,5	1098427	500	0,644	0,931	282

Fuente: elaboración propia

Conforme al resultado previsto en la tabla se grafican los datos de tiempo y número de elementos para lograr identificar los costos computacionales

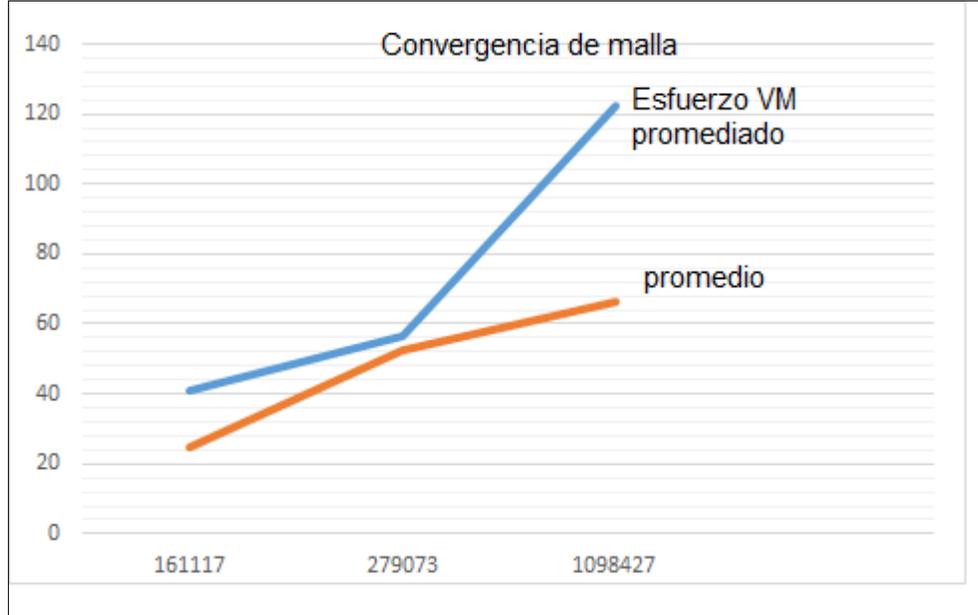
Figura 81. Costos computacionales



Fuente: elaboración propia

En la figura anterior se puede evidenciar que los costos computacionales aumentan en la última simulación ya que esta tiene muchos más elementos por simular, como conclusión estos gastos se ven afectados en el tiempo de la simulación ya que al demorarse el dinero de la licencia y el consumo de energía aumentan considerablemente.

Figura 82. Convergencia de malla



Fuente: elaboración propia

Según la Imagen se puede evidenciar la convergencia de malla en un punto lo cual hace que los resultados sean confiables para determinar los resultados de la simulación.

Teniendo en cuenta la simulación realizada y con los resultados del esfuerzo Von mises se evalúa el valor del factor de seguridad para demostrar que tan viable es utilizar este material y geometría.

$$F.S = \frac{\sigma_y}{\sigma_{vm}}$$

$$F.S = \frac{250 \text{ Mpa}}{0,931 \text{ Mpa}}$$

$$F.S = 268,53$$

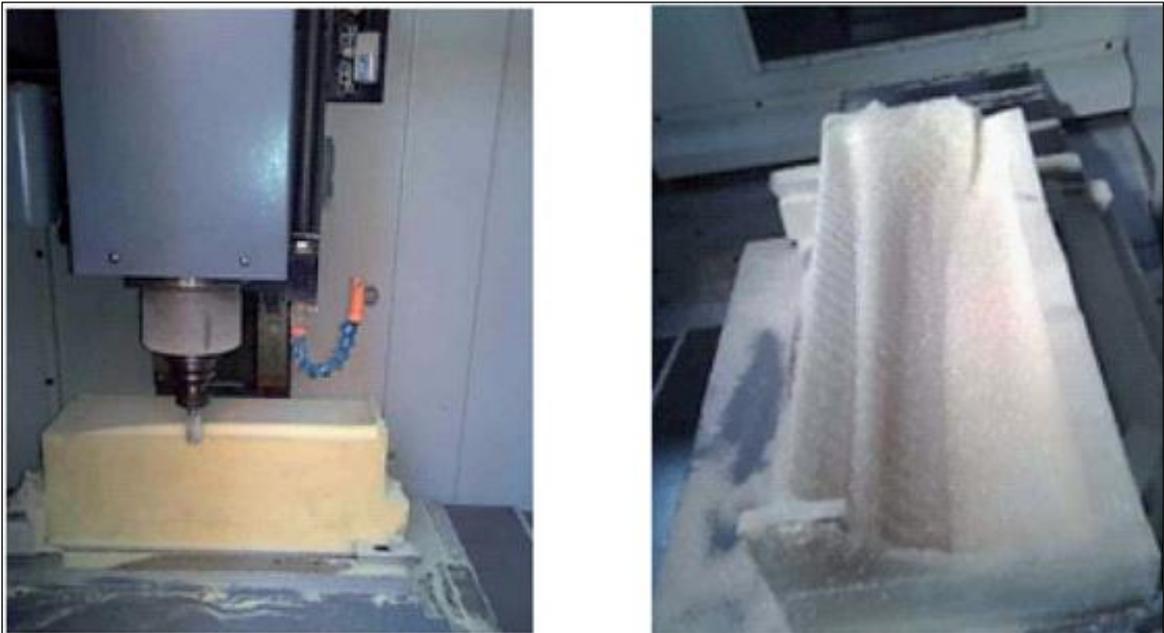
Luego de realizar las distintas simulaciones la torre no va sufrir ningún tipo de ruptura por la fuerza del viento, es posible reducir el espesor del material para de esta manera reducir costos y a su vez facilitar el doblar de la lamina, sin embargo es importante tener en cuenta que si se hacen estos cambios se recomienda realizar una nueva simulación para corroborar que no vaya a ocurrir ningún tipo de ruptura.

8. MANUALES DE LA MAQUINA

8.1 MANUAL DE CONSTRUCCIÓN

Para el proceso de fabricación de los álabes se utiliza material de poliuretano, siendo un material con una excelente resistencia a la tracción, abrasión, alta tenacidad, la resina de poliuretano es superior en operaciones secundarias tales como la perforación, mecanizado y montaje.

Figura 83. Fabricación alabe



Fuente: Desarrollo de rotores para turbina eólica de 200 vatios mediante la implementation de tecnología local. [En línea]. [Consultado 27 noviembre 2019]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-21262011000200001

Para la cimentación se procede hacer una excavación en el suelo de 2 m x 2 m con una profundidad de 0,3 m, el material de la cimentación será de hormigón armado con una resistencia de 4000 psi por las condiciones del terreno.

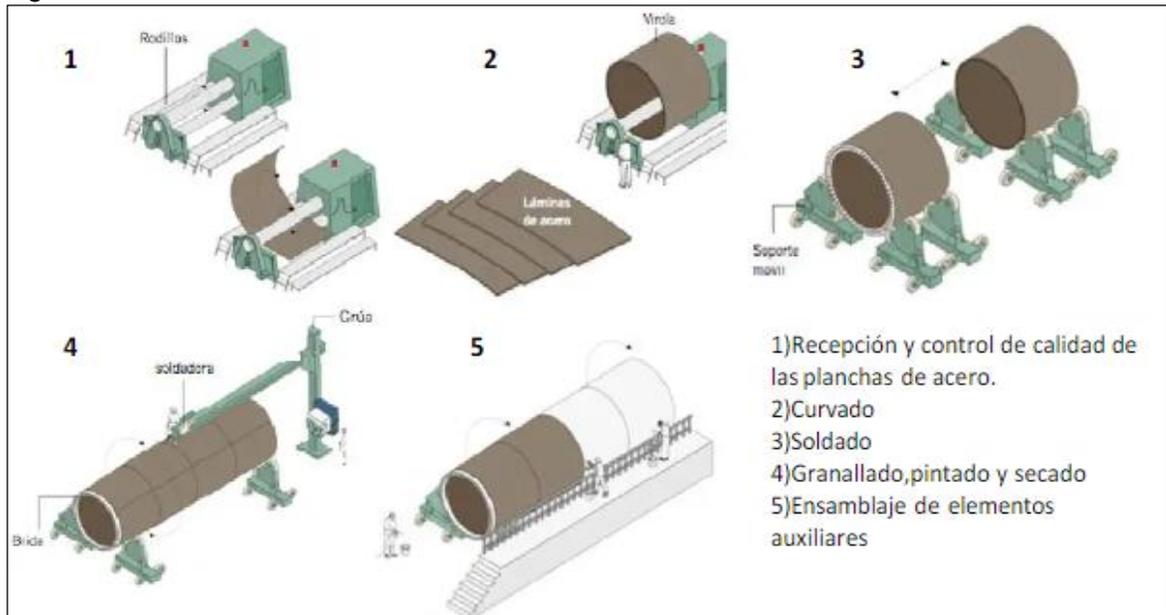
Figura 84. Zapata de la estructura



Fuente: elaboración propia

Para la torre cimentación se procede hacer curvado a la plancha de acero donde se tendrán que soldar para obtener la forma troncocónica, posteriormente se procede a ensamblar cada una las secciones metálicas, a continuación, se ilustra el proceso de obtención dela torre

Figura 85. Fabricación torre metálica



Fuente: Tendencias en el diseño de torres para aerogeneradores multi-MW. [en línea]. [Consultado 20 Octubre 2019]. Disponible en: https://www.academia.edu/6348540/Tendencias_en_el_dise%C3%B1o_de_torres_para_aerogeneradores_multi-MW

8.2 MANUAL DE INSTALACIÓN

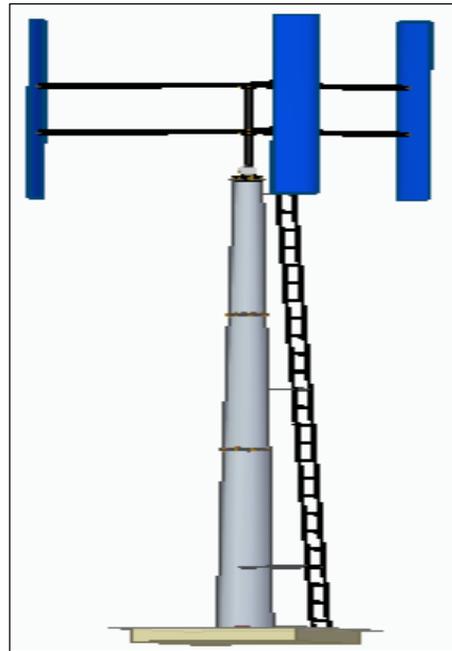
A continuación, encontrara manual con información para realizar la instalación del aerogenerador de eje vertical, se debe seguir una serie de pasos que se encontraran a continuación, con el fin de garantizar un buen funcionamiento y mantenimiento de la turbina. Por tal motivo a continuación se muestra un paso a paso para la instalación de cada componente del aerogenerador.

- a. Instalación de la cimentación y torre metálica.
- b. Instalación del generador.
- c. Instalación del eje.
- d. Instalación del rotor.
- e. Verificación conexiones
- f. Verificación
- g. Puesta en funcionamiento

IMPORTANTE: en cada paso se describirá que proceso se requiere para el correcto ensamble.

PRECAUCION: los pasos que requieran procesos de soldadura deberán ser realizados por personal capacitado y con los correspondientes elementos de seguridad.

Figura 86. Esquema aerogenerador



Fuente: elaboración propia

8.2.1 Requerimientos. para realizar una adecuada instalación de la turbina, se requiere cumplir con una serie de parámetros, como el tipo de herramientas que se va a usar, los correspondientes elementos de seguridad y el personal requerido para su instalación.

Cuadro 13. Herramientas

HERRAMIENTAS	
PULIDORA	JUEGO DE ALICATEZ
	
TALADRO CON KIT DE BROCAS	DESTORNILADORES
	
MARTILLOS	EQUIPO SOLDADURA
	
MULTIMETRO	JUEGO DE LLAVES
	

Fuente: elaboración propia

Cuadro 14. Seguridad industrial

SEGURIDAD INDUSTRIAL	
GUANTES PARA SOLDADURA	CARETA DE SOLDAR
	
CALZADO DE SEGURIDAD	ROPA DE TRABAJO
	
GAFAS	CASCO
	

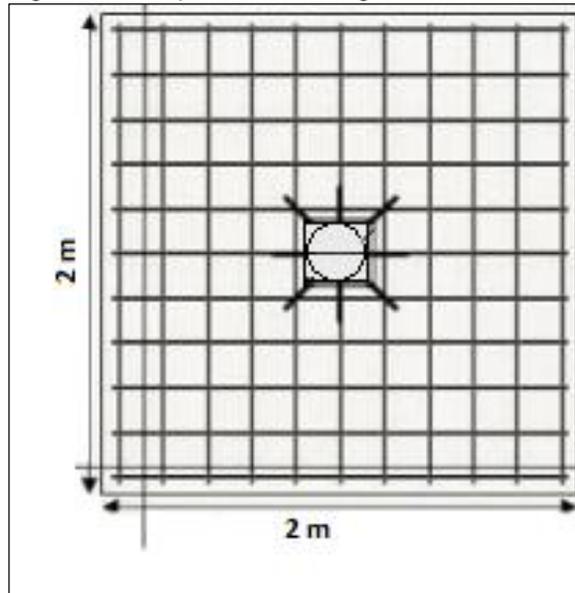
Fuente: elaboración propia

8.2.2 Instalación de la estructura. La instalación de la estructura es el primer paso, ya que esta pieza es la que va a recibir todo el peso del generador, como se mencionó anteriormente, se va a realizar una torre metálica con una zapata de hormigón armado y tres secciones metálicas, el terreno donde se hará la instalación debe ser compacto, para la instalación de la torre se requiere aplicar soldadura entre la unión de cada sección metálica, el personal encargado de la instalación del

aerogenerador se encargara de asegurar las secciones de la estructura por medio de una soldadura o utilización de pernos.

Paso 1: realizar la cimentación de la estructura del aerogenerador con medidas de 2000mm x 2000mm x 300 mm,

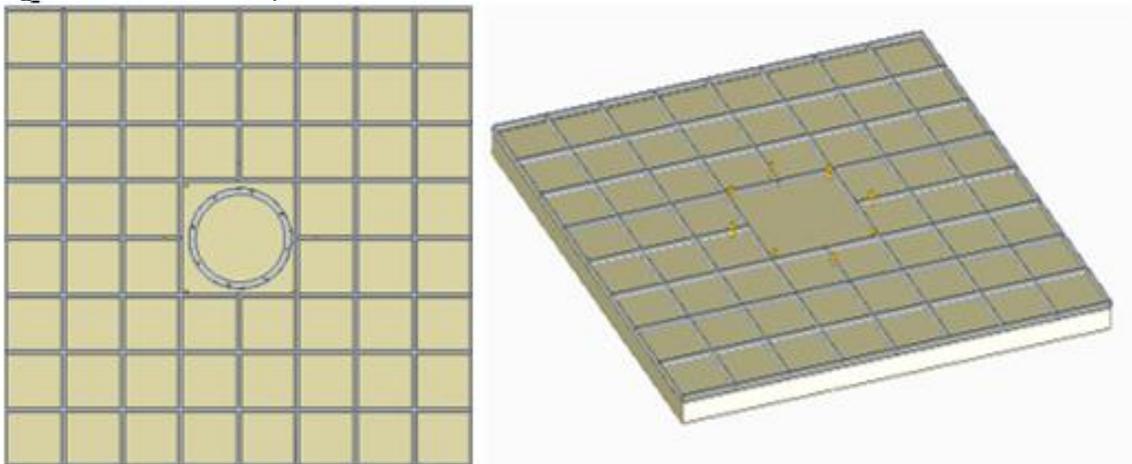
Figura 87. Zapata de hormigón armado



Fuente: elaboración propia

Pasó 2: se deben anclar 8 pernos M12 a la cimentación con el fin de fijar la "sección metálica 1"

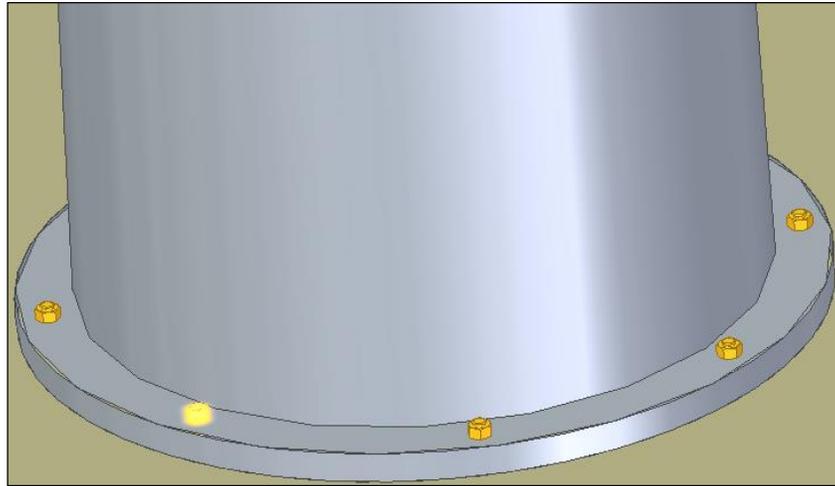
Figura 88. Ensamble pernos M12 cimentación



Fuente: elaboración propia

Pasó 3: por medio de una brida metálica se debe fijar la sección 1 metálica a los 8 pernos M12 anclados inicialmente en la zapata de hormigón,

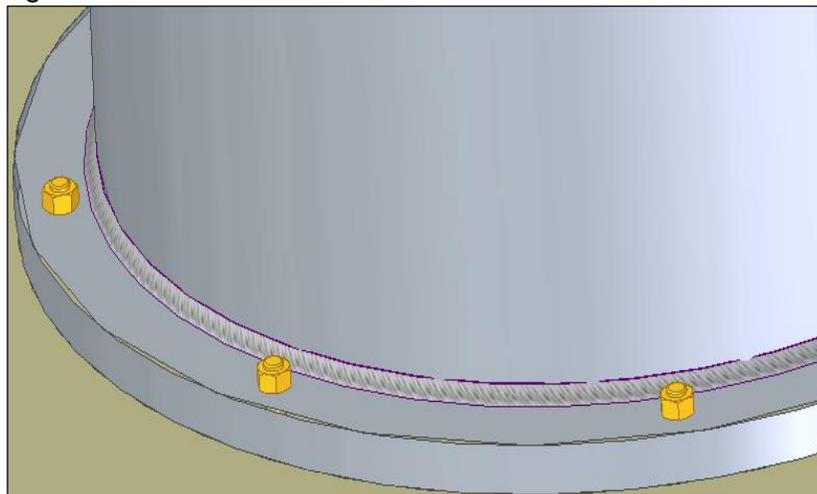
Figura 89. Fijación sección 1 metálica



Fuente: elaboración propia

Paso 4: por medio de un cordón de soldadura con electrodo E7013, se debe realizar una unión entre la brida y la sección metálica 1.

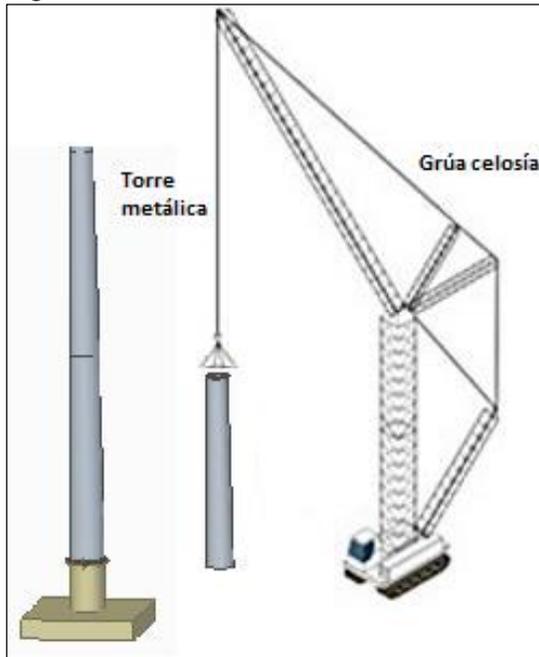
Figura 90. Soldadura brida-sección metálica 1



Fuente: elaboración propia

Pasó 5: se procede a instalar los dos tramos de la sección metálica pendientes, con el fin de facilitar su instalación se debe usar una grúa celosía levantando cada tramo para ensamblarlo con cada sección metálica.

Figura 91. Grúa celosía



Fuente: elaboración propia

Paso 6: usando soldadura de arco sumergido con un electrodo E70 y un tamaño de 5/16 el personal de instalación debe realizar el proceso de soldadura en las uniones de la sección 3 metálica.

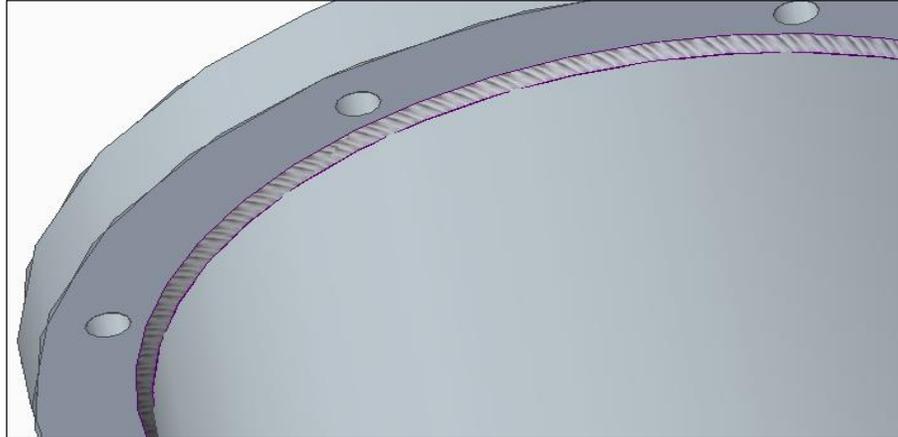
Figura 92. Soldadura entre secciones metálicas



Fuente: elaboración propia

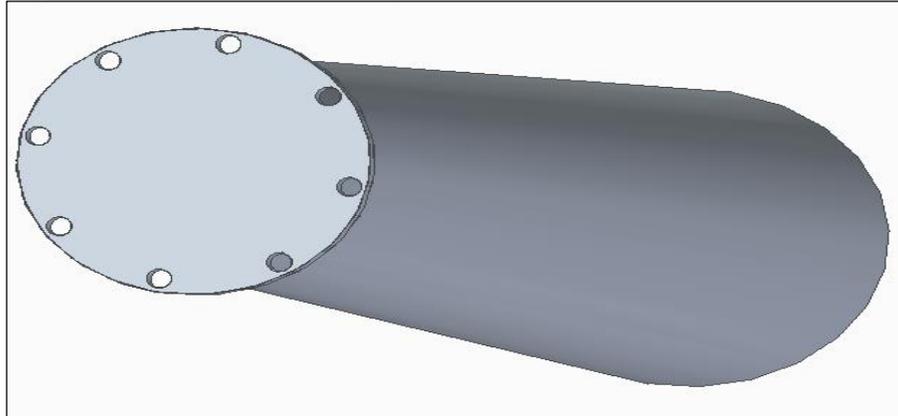
Paso 7: en las siguientes imágenes se ilustra cómo se deberá ajustar la brida superior a la sección 3 de la torre metálica donde ira el soporte del eje, se debe realizar una soldadura por la parte inferior de la brida redondeando toda la sección 4 metálica.

Figura 93. Ajuste brida superior-sección 3



Fuente: elaboración propia

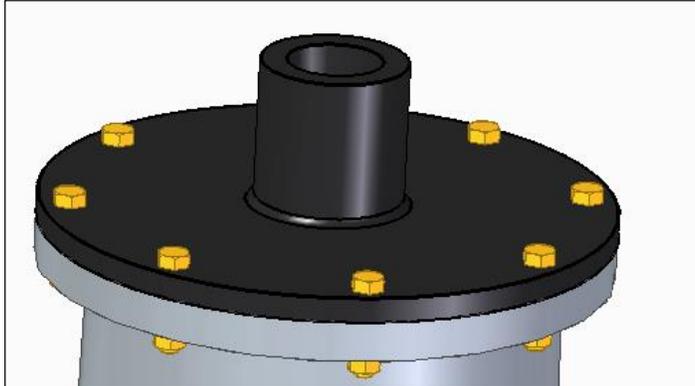
Figura 94. Ensamble brida superior



Fuente: elaboración propia

Paso 8: se deberá acoplar el soporte del eje a la brida que está en la torre metálica por medio de 8 pernos M12, el personal de instalación debe garantizar una correcta estabilidad del soporte para que el eje tenga equilibrio.

Figura 95. Acople soporte eje



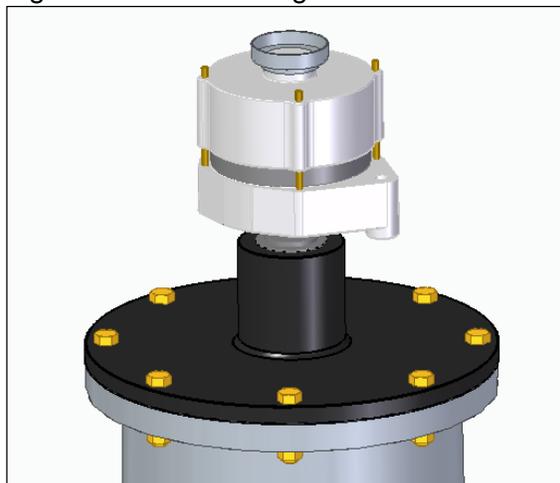
Fuente: elaboración propia

8.2.3 Instalación del generador. El generador es el dispositivo encargado de transformar la energía mecánica del rotor en energía eléctrica, el generador estará acoplado al eje de transmisión de potencia

Para facilitar su instalación el fabricante entrega totalmente ensamblado el generador listo para su operación.

Paso 9. Se debe ajustar el eje del generador al eje vertical del aerogenerador para llevar a cabo la conversión de la energía mecánica a energía eléctrica, se debe conectar los cables de los polos del generador a los polos del controlador para así evitar picos de corriente.

Figura 96. Instalación generador



Fuente: elaboración propia

Paso 10: El freno estará después del generador, la mordaza estará apoyada a una placa que estará unida al eje del eje del generador, para la unión de la mordaza utilizaremos pernos tipo hexagonal M11 de acero resistentes a la intemperie y para unir la mordaza con la placa se usaran pernos tipo hexagonal M24 de acero de igual manera resistentes a la intemperie.

8.2.4 Instalación del eje. El eje es el elemento que principalmente recibirá las cargas provenientes del viento, estas cargas se distribuyen sobre los alabes y los brazos, el eje estará apoyado en un soporte, el cual se situará en la parte superior de la estructura, en el siguiente paso se mostrara que componentes que estarán ajustados al eje.

Paso 11: se debe acoplar el eje del aerogenerador al eje del generador eléctrico por medio de un buje o acople.

Figura 97. Instalación del eje



Fuente: elaboración propia

8.2.5 Instalación del rotor. El rotor es uno de los componentes más importantes del aerogenerador, ya que será el que estará principalmente en contacto con el viento, convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica, al rotor lo componen los siguientes elementos: alabes, brazos, eje, discos de soporte y rodamientos, para su correcta instalación debemos seguir los siguientes pasos:

Paso 12: instalar los rodamientos que permitirán el movimiento en el eje de transmisión

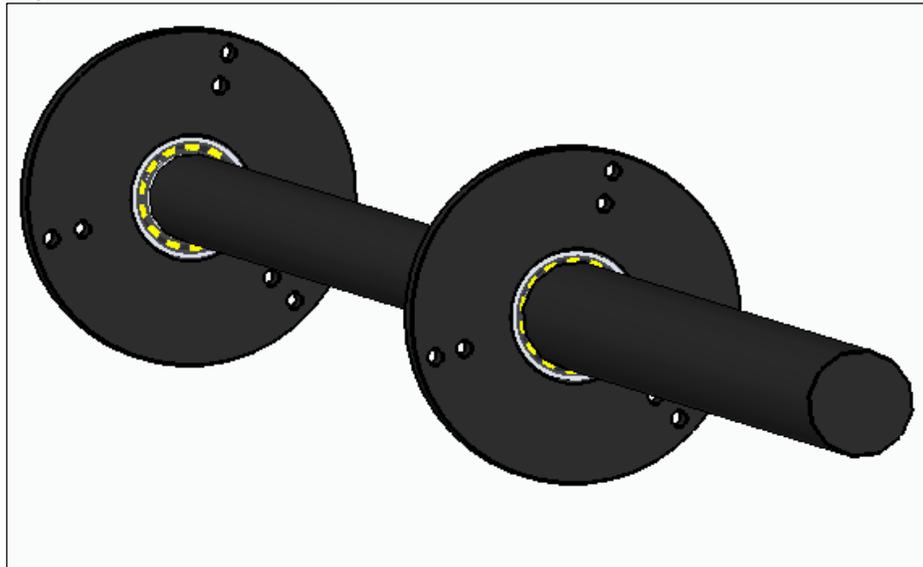
Figura 98. Instalación rotor



Fuente: elaboración propia

Paso 13: Los discos de soportes llevan incorporados los rodamientos, los cuales estarán acoplados al eje del aerogenerador asegurando una unión móvil entre los mecanismos mencionados del sistema.

Figura 99. Instalación soportes

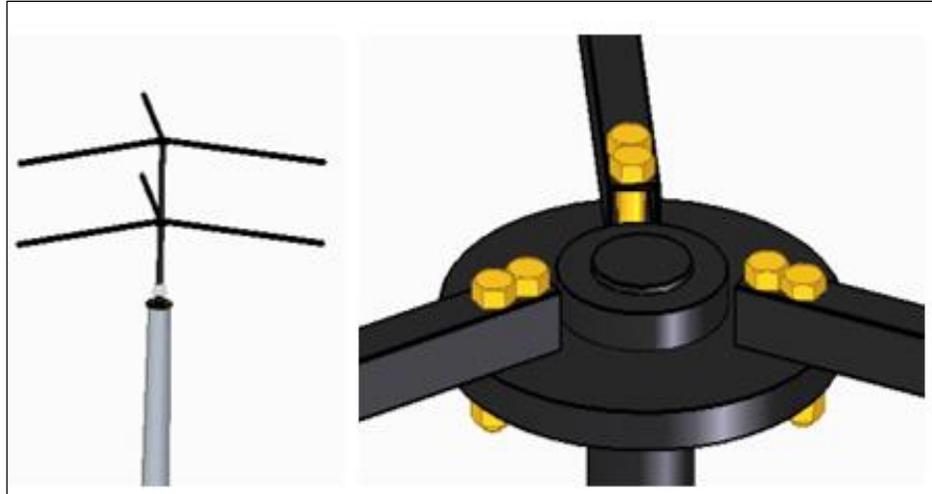


Fuente: elaboración propia

Paso 14: Los brazos del rotor deberán ir conectados al eje por medio de dos discos de soportes ubicados en la parte inferior y superior del eje, se deberá realizar las

correspondientes perforaciones y el anclaje de los brazos a los soportes por medio de pernos M12

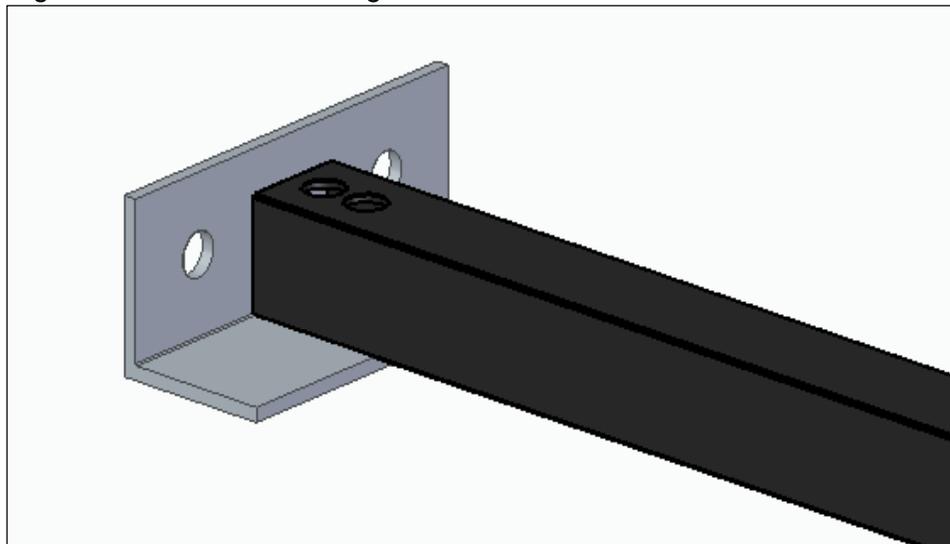
Figura 100. Instalación brazos



Fuente: elaboración propia

Paso 15: Por medio de un ángulo o una bisagra, se fija dicho elemento a los brazos del generador con los respectivos tornillos y perforaciones.

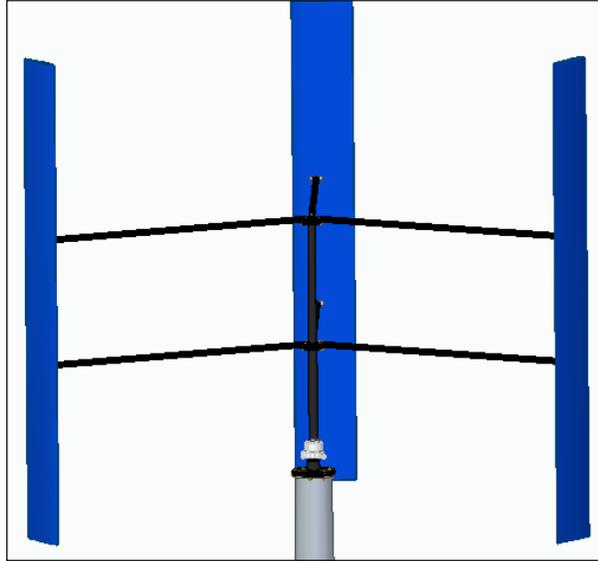
Figura 101. Instalación bisagra



Fuente: elaboración propia

Paso 16: Para culminar la instalación del rotor se debe ajustar y atornillar los alabes del aerogenerador a los brazos del rotor por medio de la bisagra mostrada en el paso anterior cada alabe llevara un total de 6 tornillos, 3 por brazo, se debe realizar dicho procedimiento con cada uno de los alabes como se ilustra a continuación.

Figura 102. Rotor



Fuente: elaboración propia

Paso 17. Verificación conexiones

Para tener una correcta conexión de electricidad del aerogenerador a la fuente se deberá seguir los siguientes pasos:

RECOMENDACIÓN: como se conectará una fuente de energía externa a la línea principal de la finca, se deberá contar con la presencia de personal calificado, el cual se encargará de manipular el cableado.

- Se recomienda conectar un controlador a las baterías antes de ser conectado el aerogenerador, con el fin de evitar daños en el equipo por picos de tensión.
- Se deberá conectar un cable desde el generador hasta el controlador de carga, el cable debe ir a través de la estructura hacia la turbina, la función del cable es transferir la electricidad generada a las baterías.
- Por último, se deberán conectar los cables de la batería a la línea de electricidad o circuito principal de la finca.

Paso 18: Verificar instalación del aerogenerador.

Por último, se debe verificar que no se presenta algún tipo de inconsistencia en la instalación del aerogenerador, con el fin de evitar fallas y prevenir posibles accidentes en el funcionamiento del dispositivo.

Figura 103. Verificación instalación



Fuente: anstockphoto. [En línea].
[Consultado: 27 noviembre 2019].
Disponible en:
<https://www.canstockphoto.es/correcto-13484481.html>

8.3 MANUAL DE OPERACIÓN DE LA MÁQUINA

En el siguiente manual se encontrará los aspectos que se deberán tener en cuenta para poner en funcionamiento el aerogenerador de eje vertical. A continuación, se describirá cada factor:

- Inicialmente se debe revisar detalladamente el manual de seguridad, antes de iniciar cualquier operación, con el fin de identificar los elementos de protección que se deben utilizar.
- Para que el aerogenerador entre en funcionamiento se deberán revisar los manuales diseñados por el fabricante, donde encontrara instrucciones que faciliten su operación.
- Se debe inspeccionar la cada componente de la turbina antes de ponerla en funcionamiento, para evitar accidentes y/o daños en la maquina
- Se deberán revisar las conexiones del aerogenerador antes de entrar en funcionamiento, además se debe llevar un control periódicamente

- Para detener el aerogenerador de eje vertical se utilizará el sistema de control implementado (freno)
- En caso de vibraciones irregulares en el rotor, se debe revisar que los alabes estén balanceado y ajustados de manera correcta

8.4 MANUAL DE MANTENIMIENTO

Los aerogeneradores son máquinas de gran resistencia, por ende, no es necesario un frecuente mantenimiento; sin embargo, las uniones pernaadas y las conexiones de cableado utilizadas en los componentes eléctricos deben tener una inspección por posibles desajustes. Cabe resaltar que la ventaja de usar un alternador de imanes permanentes es su menor mantenimiento.

Antes de mencionar las inspecciones y operaciones necesarias, se identificaron las fallas principales que se pueden presentar en los sistemas de la turbina.

Podemos encontrar las siguientes fallas:

1. SISTEMA DE POTENCIA.

- A-) Grietas en los alabes
- B-) freno del eje
- C-) Fisuras en el eje
- D-) Fallo rodamiento

2. SISTEMA DE GENERACIÓN.

- A-) Él generador no enciende
- B-) corto eléctrico

3. SISTEMA DE CONTROL.

- A-) Calentamiento freno

4. SISTEMA ESTRUCTURAL:

- A-) Presencia de Corrosión
- B-) Ruptura Pernos unión

Una vez obtenidos las principales fallas que se pueden presentar en el aerogenerador de eje vertical, se determinaron las posibles causas de estas fallas como se muestra a continuación:

1. SISTEMA DE POTENCIA

- A-1) impacto de rayos
- A-2) daños estructurales (defectos en la propia fabricación de las palas)
- A-3) Impacto con objetos o seres, especialmente con aves.
- B-) Desgaste asbesto
- C-) 1) sobrecarga
- C-2-) desalineación
- D-1) Lubricación inadecuada o contaminada
- D-2) Vibración
- D-3) Corrosión
- D-4) Desgaste

2. SISTEMA DE GENERACION

- A-1) Mala conexión
- A-2) sobrecalentamiento
- B-1) mal estado cables
- B-2) Fallos de aislamiento

3. SISTEMA DE CONTROL

- A-) Fricción excesiva

4. SISTEMA ESTRUCTURAL:

- A-1) condiciones climáticas (sol, lluvia, humedad)
- A-2) Mala aplicación agentes anticorrosivos
- B-) Vibración del sistema

A continuación, en el cuadro XX se presentan las actividades a tener en cuenta para realizar la verificación e inspección de los componentes del aerogenerador, en vista hacia un mantenimiento preventivo, con el fin de evitar averías, daños y fallas que interrumpan la generación de energía:

Cuadro 15. Verificación sistema potencia

SISTEMA	ELEMENTO	OPERACIÓN	PERIODICIDAD
SISTEMA POTENCIA	ALABES	Recubrimiento material	6 meses
		Pintar colores llamativos	6 meses
	RODAMIENTOS	Lubricación de los rodamientos	3 meses
		Alineación	3 meses

Fuente: elaboración propia

Cuadro 16. Verificación sistema generación

SISTEMA GENERACIÓN	GENERADOR	Revisar	Antes de usar
		Cambiar cales	12 mese
		Aislamientos	Antes de usar
		Inspección eléctrica	1 mes

Fuente: elaboración propia

Cuadro 17. Verificación sistema potencia

SISTEMA CONTROL	GENERADOR	Revisar	Antes de usar
		Medir temperatura	1 mes
		Cambiar asbesto	6 meses
		Graduar mordaza	1 mes

Fuente: elaboración propia

Cuadro 18. Verificación sistema potencia

SISTEMA ESTRUCTURAL	TORRE	Revisar	Antes de usar
		Aplicar anticorrosivo	6 mes
		Aplicar impermeabilizantes	6 meses
		Revisar uniones	¼ mes

Al realizar las actividades propuestas en el cuadro anterior se identifican las actividades para dar solución a las fallas que se pueden presentar en cada uno de los elementos que componen el aerogenerador.

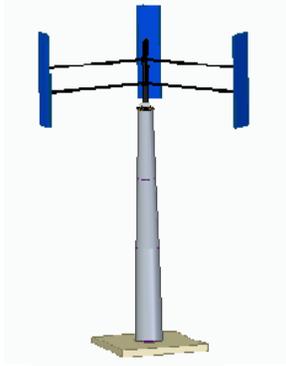
Cuadro 19. Listado de fallas en la máquina

Elemento	Falla	Actividad
Brazos	Ruptura	Cambio de piezas dañadas
	deflexión	Cambio
Ejes	Ruptura	Cambio
Pernos de sujeción	Fracturas súbitas o por fatiga	Reemplazar las piezas afectadas
	Deformación a tensión o flexión.	Sustituir las piezas dañadas
	Desgaste en vástago o rosca	Realizar el cambio de piezas dañadas

Fuente: elaboración propia

A continuación, tenemos la ficha técnica del aerogenerador;

Figura 104.Ficha técnica

AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL		DARRIEUS TIPO H	
		Datos técnicos	
		Potencia (kW)	4
		Velocidad de arranque(m/s)	4
		Peso (kg)	2200
		Altura (m)	12
		Diametro (m)	3,999
		AREA (m) ²	20
		NUMERO DE PALAS	3
		Marca del generador	
		Velocidad diseño (m/s)	
Descripción	La función principal del aerogenerador es captar la energía cinética del viento para convertirla en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica		
CARACTERÍSTICAS			
<ul style="list-style-type: none"> • la generación de energía es de 4 KW • Equipo silencioso • Torre troncoconica de 10 m de altura • el eje soporta las cargas producidas en los alabes 			

Fuente: elaboración propia

8.5 MANUAL DE SEGURIDAD

Para iniciar con el manual de seguridad, se deben identificar los principales riesgos o accidentes a los que el personal estará sometido al operar el aerogenerador.

Tabla 17. Riesgos presentes

Principales Riesgos	Factores de Riesgo
Caídas de altura	Secciones metálicas, rotor
Descarga eléctricos	Generador eléctrico
Cortes o pinchazos	Alabes, bisagras, pernos sujeción, torre
Golpes	Sistema general
Incendios	Generador eléctrico, aplicación soldadura
Atrapamiento	Eje, alabes, generador eléctrico, freno

Fuente: elaboración propia

Al momento de ingresar al aerogenerador se deben tener en cuentas los siguientes aspectos.

- El operario deberá haber leído los manuales de operación, instalación y mantenimiento para asociarse con el aerogenerador
- El personal que manipule el aerogenerador debe ser capacitado en trabajos de alturas mayores a 1,5 m
- En caso de presentarse alguna inconsistencia funcional se deberá avisar a los técnicos o personal capacitado.

Medidas de seguridad antes de ingresar al equipo. Para ingresar al dispositivo es necesario contar con los elementos de seguridad personal de nivel medio como lo son,

Cuadro 20. Seguridad industrial

SEGURIDAD INDUSTRIAL	
GUANTES PARA SOLDADURA	CARETA DE SOLDAR
	
CALZADO DE SEGURIDAD	ROPA DE TRABAJO
	
GAFAS	CASCO
	

Fuente: elaboración propia

Figura 105. Arnés de seguridad



Fuente: Construyored. [En línea]. [Consultado: 27 noviembre 2019]. Disponible en: <https://construyored.com/noticias/2165-conozca-el-equipo-de-seguridad-para-construir-en-las-alturas>

Cuadro 21. Riesgos estructura

SISTEMA	RIESGOS	MEDIDA PREVENTIVA
ESTRUCTURA	Caída de altura	Utilizar la dotación de seguridad industrial adecuado para alturas mayor a 1,5 m
		Revisar que los instrumentos de seguridad industrial estén en buenas condiciones
		No apoyarse contra la estructura
	Cortes o pinchazos	Uso de guantes de seguridad
		Evitar contacto con superficies corto punzantes
	Golpes	Uso de guantes de seguridad
		Uso de equipos con marcado de conformidad
	Exposición a sustancias químicas (pintura)	Los productos químicos deben disponer de la ficha de datos de seguridad actualizada así como estar etiquetados
		Usar gafas y tapabocas
	Atrapamiento	Procedimientos de trabajo para realizar de forma segura
	Caída de objetos	Uso obligatorio de casco de seguridad
		Orden y limpieza
Revisión de conexiones de los componentes		

Fuente: elaboración propia, con base en. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Aerogeneradores (III): Medidas de prevención y protección durante el mantenimiento. [En línea]. España, 2014. [Consultado 12 Noviembre 2019]. p. 7. Disponible en: <https://www.aeeolica.org/uploads/documents/10172- aerogeneradores-iii-medidas-de-prevencirn-y-proteccirn-durante-el-mantenimiento.pdf>

Cuadro 22. Riesgos rotor

SISTEMA	RIESGOS	MEDIDA PREVENTIVA
ROTOR	Radiación solar	Radiación solar Uso de gafas de protección solar.
	Cortes	Uso de guantes de seguridad
	Golpes	Uso de guantes de seguridad
		Uso de equipos con marcado de conformidad
	Caída de altura	Utilizar la dotación de seguridad industrial para alturas mayor a 1,5 m
		Revisar que los instrumentos de seguridad industrial estén en buenas condiciones
	Atrapamiento	Revisar calidad de la dotación de seguridad
		Instrucciones o procedimientos de trabajo para realizar de forma segura
	Caída de objetos	Uso obligatorio de casco de seguridad
		Orden y limpieza
Revisión de conexiones de los componentes		

Fuente: elaboración propia, con base en. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. [En línea]. [Consultado 12 noviembre 2019]. p. 7. Disponible en: <https://www.aeeolica.org/uploads/documents/10172- aerogeneradores-iii-medidas-de-prevencirn-y-proteccirn-durante-el-mantenimiento.pdf>

Cuadro 23. Riesgo generador

SISTEMA	RIESGOS	MEDIDA PREVENTIVA
GENERADOR	CONTACTOS ELECTRICOS	Revisión periódica de las conexiones
		No manipular conexiones sin previo conocimiento
	CONTACTO TERMICO	Dejar enfriar el generador para manipularlo
		Uso guantes de carnaza
	EXPLOSIÓN	Utilizar herramientas que no generen chispa
		No fumar
		Además, la instalación eléctrica deberá cumplir la normativa electrotécnica específica

Fuente: elaboración propia, con base en. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. [En línea]. [Consultado 12 noviembre 2019]. p. 7. Disponible en: <https://www.aeeolica.org/uploads/documents/10172- aerogeneradores-iii-medidas-de-prevencirn-y-proteccirn-durante-el-mantenimiento.pdf>

9. ANÁLISIS DE IMPACTOS AMBIENTALES

“La generación de energía eólica produce impactos ambientales que comienzan con la fabricación de la maquinaria, en este caso el aerogenerador. Luego se producen impactos durante la construcción de este y por último durante su funcionamiento. Los aerogeneradores convencionales requieren las mismas infraestructuras eléctricas para distribuir y transportar la energía generada por lo que los impactos derivados de las líneas eléctricas aéreas, soterradas y subestaciones de transformación no serán consideradas.”³⁷

Para la evaluación del impacto ambiental se utilizará el método CONESA, este método es de los más utilizados, tienen una parte cualitativa y cuantitativa.

Cuadro 24. Criterios de evaluación

NATURALEZA Impacto benéfico Impacto perjudicial	+ -	INTENSIDAD(IN) (Grado de destrucción) Baja Media Alta Muy alta Total	1 2 4 8 12
EXTENSIÓN(EX) (Área de influencia) Puntual Parcial Extensa Total Crítica	1 2 4 8 (+4)	MOMENTO(MO) (Plazo de manifestación) Largo plazo Mediano plazo Intermedio Crítico	1 2 4 (+4)
PRESISTENCIA(PE) (Permanencia del efecto) Fugaz Temporal Permanente	1 2 4	REVERSIBILIDAD(RV) Corto plazo Mediano plazo Irreversible	1 2 4
SINERGIA(SI) (Potencia de la manifestación) Sin sinergismo (simple) Sinérgico Muy sinérgico	1 2 4	ACUMULACIÓN(AC) (Incremento progresivo) Simple Acumulativo	1 4
EFECTO(EF) (Relación causa-efecto) Indirecto (secundario) Directo	1 4	PERIODICIDAD(PR) (Regularidad de la manifestación) Irregular o aperiódico o discontinuo Periódico Continuo	1 2 4

³⁷ GARCIA, Angélica. Estudio comparativo de los impactos ambientales producidos por los aerogeneradores [en línea]. Aerogeneradores de eje vertical [Consultado: 22 septiembre 2019] disponible en : <https://books.google.com.co/books?id=ml7udaaaqbaj&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Cuadro 24. (Continuación)

RECUPERABILIDAD(MC) (Reconstrucción por medios humanos)		IMPORTANCIA(I)	
Recuperable inmediato	1	I=	+/-
Recuperable a mediano plazo	2	(3IN+2EX+MO+PE+RV+SI+AC+EF+P+	
Mitigable o compensable	4	R+MC)	
Irrecuperable	8		

Fuente: elaboración propia con base en HIDROAR S.A. [en línea]. Metodología para el cálculo de las matrices ambientales. [Consultado: 22 septiembre 2019] disponible en PDF en: <http://www.chubut.gov.ar/portal/wp-organismos/ambiente/wp-content/uploads/sites/8/2015/01/Metodolog%C3%ADa-para-el-Calculo-de-las-Matrices-Ambientales.pdf>

Cuadro 25. Matriz cualitativa

MATRIZ CUALITATIVA												
Elemento	Agua		Suelo		Aire		Ecosistema Terrestre		Social		Económico	
Actividad	Calidad del Agua	Dinámica fluvial	Propiedades Físicas y Químicas	Paisaje	Materiales y Gases	Ruido	Biotopos	Biocenosis	Dinámica Poblacional	Servicios Públicos	Actividades Económicas	Empleo
Transporte de equipos			X	X	X		X	X	X		X	X
Remoción de la capa vegetal	X		X	X	X		X	X			X	X
Cimentación	X		X		X		X	X			X	X
Construcción	X		X	X		X	X	X			X	X
Funcionamiento			X	X			X	X			X	X
Desmantelamiento			X				X	X			X	X
Producción de energía				X		X	X	X		X	X	

Fuente: elaboración propia

Cuadro 26. Matriz cuantitativa

MATRIZ CUANTITATIVA													
Elemento	Impacto Ambiental	NATURALEZA	EXTENSION	INTENSIDAD	MOMENTO	DURACION	REVERSIBILIDAD	SINERGIA	ACUMULACION	EFFECTO	PERIODICIDAD	RECUPERABILIDAD	IMPORTANCIA AMBIENTAL
Agua	Modificación De la calidad del agua	-	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	-16
Suelo	Cambios de las propiedades físicas y químicas	-	1	4	4	4	4	4	1	4	1	4	-31
Aire	Material particulado, gases y olores	-	2	12	4	2	1	4	4	4	1	1	-51
Ecosistemas Terrestres	Afectación de biotopos	-	2	4	4	4	1	1	4	1	4	8	-33
Social	Implementación de un servicio público	+	1	4	2	4	4	1	4	1	4	1	32
Económico	Genera empleo	+	2	2	4	2	1	1	1	4	2	1	30

Fuente: elaboración propia

La matriz quedara conformada con las siguientes categorías:

Cuadro 27. Criterios de calificación

Valor Ponderado	Calificación	Categoría
< 25	Bajo	
25 < 50	Moderado	
50 < 75	Severo	
≥ 75	Critico	
Los valores con signo + se consideran de impacto nulo		

Fuente: elaboración propia con base en HIDROAR S.A. [en línea]. Metodología para el cálculo de las matrices ambientales. [Consultado: 22 septiembre 2019] disponible en PDF en: <http://www.chubut.gov.ar/portal/wp-organismos/ambiente/wp-content/uploads/sites/8/2015/01/Metodolog%C3%ADa-para-el-Calculo-de-las-Matrices-Ambientales.pdf>

La evaluación ambiental que realizamos para nuestro trabajo de grado nos da como resultado una actividad severa en la construcción de la máquina, para controlar este impacto, debemos evitar las compras excesivas de igual manera que los materiales no se conviertan en residuos por acopio o manipulación inadecuada es necesario y en lo posible reutilizar la mayoría de materiales que se pueda, por último es de suma importancia contar con una licencia ambiental y todos los documentos adicionales que se requieran, para las demás actividades se tiene un impacto moderado e irrelevante.

10. ANÁLISIS FINANCIERO

10.1 COSTOS DE FABRICACIÓN

A partir de las dimensiones de cada una de las partes del aerogenerador y los elementos seleccionados que hacen parte del sistema, se presentan los precios de cada uno de ellos, con el fin de conocer el costo total del proyecto.

Cuadro 28. Costos de fabricación

COSTOS DE FABRICACIÓN					
Componentes	Ítem	Unidad	Cantidad	Valor	Total
Cimentación	Cemento	Kg	200	\$500	\$ 100,000
	Arena	m ³	1	\$75,000	\$ 75,000
	Mortero	kg	2	\$10,000	\$ 20,000
	Varilla #3 x 6 mt	Unid	6	\$10,200	\$ 61,200
	Grava	m ³	1/2	\$45,000	\$ 22,500
Estructura	Lamina 1,22x2,44	Unid	3	\$620,000	\$ 1,860,000
Eje	Material en bruto	1	1	\$ 78,624	\$ 78,624
Generador		Unid	1	\$ 1,750,000	\$ 1,750,000
Freno	HW 100 HFA	Unid	1	\$ 825,000	\$ 825,000
Soportes	Soporte base	Kg	13,3	\$4,000	\$ 53,200
	Soporte inferior	Kg	3,98	\$4,000	\$ 15,920
	Soporte superior	Kg	3,7	\$4,000	\$ 14,800
Rodamientos	Rodamiento 6010	Unid	1	\$35,000	\$ 35,000
	Rodamiento 6011	Unid	1	\$32,000	\$ 32,000
Bisagras		Unid	6	\$5,000	\$ 30,000
Alabes	Mecanizado	HH	6	\$ 121,600	\$ 729,600
	Polipropileno	Kg	236,7	\$2,500	\$ 591,750
Brazos	Mecanizado	Unid	3	\$ 27,500	\$ 82,500
Pernos	M12	Unid	46	\$ 5,000	\$ 230,000
Soldadura	Servicio completo	HH	10	\$55,000	\$ 550,000
TOTAL					\$ 7,157,094

Fuente: elaboración propia.

10.2 COSTOS DE INGENIERÍA

Para el cálculo de los costos de ingeniería se tiene en cuenta el trabajo realizado por los proponentes, gastos de maquinaria, equipo, los fungibles y gastos adicionales que se necesitaron para el desarrollo del proyecto, estos valores se presentan en el siguiente cuadro 29.

Cuadro 29. Costos de ingeniería

Ítems	Unidad	Cantidad	V / Unidad (\$/hr)	Total (\$)	Fuente financiad.
Talento Humano					
Proponentes (2)	H-H	3072	7,500	23'040,000	Proponentes
Total Talento Humano	23'040,000				
Gastos maquinaria y equipo					
Computadora	Unidad	2	1'500,000	3'000,000	Proponentes
Software	Hora	70	15,000	1'050,000	Proponentes
Total Maquinaria y Equipo	4'050,000				
Fungibles					
Libros	Unidad	6	0	0	U. América
Papel	Resma	3	9,000	17,000	Proponentes
Tinta	Tóner	3	160,000	480,000	Proponentes
Total Fungibles	497,000				
Total					
Total antes de imprevistos	27'587,000				
Imprevistos 2-6%	5%				
Costo total del proyecto (σgastos)	28'966,350				

Fuente: Elaboración propia.

10.3 COSTO TOTAL DEL PROYECTO

El costo total del proyecto incluye la sumatoria del costo de fabricación y material para el aerogenerador, como se ve representado en el cuadro 30.

Cuadro 30. Costo total del proyecto

Ítem	Valor
Costo de fabricación y material	7'157.094
Costo de talento humano	28'966,350
Total costo del proyecto	36'123,444

Fuente: Elaboración propia.

En comparación a otros aerogeneradores de la misma capacidad el costo es menor, aerogenerador de eje vertical Darrieus modelo ARVCOF-4KW precio 12,000 dólares más envío (41,136,000 pesos colombianos); Aerogenerador tripala modelo FD5-5000 precio 11,500 dólares más envío (39,422,000 pesos colombianos).

11.CONCLUSIONES

- De este proyecto se concluye que los aerogeneradores tripala tienen una mayor eficiencia que los otros tipos de aerogeneradores, por eso se aconseja implementar para generación de energía eléctrica
- El aerogenerador produce 1,185.184 w con una velocidad de 5,98 m/s, cumpliendo a cabalidad con el requisito de 2,000 w que requiere la finca.
- Es claro que el diseño del aerogenerador de eje vertical (\$ 36´123,444) es mucho más económico respecto a los que encontramos en el mercado (\$ 41´136,000) y de la misma capacidad de generación.
- Los resultados encontrados en la simulación, se presenta un factor de seguridad alto (253.52), de tal manera que la estructura no va a sufrir ningún tipo de ruptura.
- Aunque el aerogenerador es una fuente de energía limpia, en la parte ambiental encontramos que en su construcción presenta un impacto severo.
- Se diseñó el sistema estructural del aerogenerador, analizando que bajo las cargas que estará sometida, no se presentara pandeo en la columna de la estructura, además que los pernos no fallaran

12. RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer un estudio de velocidad y dirección de viento por un periodo de tiempo mayor con ayuda de un anemómetro en la zona que se va a instalar el aerogenerador, para obtener una mayor precisión en los datos.
- Debido a que el material de la pastilla de la mordaza es en asbesto, se recomienda que esta pastilla sea diseñada en un material diferente.
- Con el fin de optimizar los costos del aerogenerador, se pueden reducir los diámetros de la torre, además se podrá disminuir el espesor de la lámina metálica.

BIBLIOGRAFÍA

ABARZUA, Alejandro. Aspectos de diseño de generadores sincrónicos de flujo axial para la aplicación en aerogeneradores. Memoria para optar por al título de ingeniero civil electricista. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Departamento de ingeniería eléctrica. 2012.

ALDERETE, Nicolás. CABRAL, Gregorio. Diseño estructural de aspás de un aerogenerador. [En línea]. Buenos Aires, Argentina. Proyecto final de ingeniería mecánica. Instituto tecnológico de Buenos Aires. [Consultado 4 febrero 2019]. p. 12 Disponible en:
https://ri.itba.edu.ar/bitstream/handle/123456789/252/500778_Alderete_Cabral.pdf?sequence=1&isAllowed=y

ANTEZANA NUÑEZ, Juan Cristóbal. Diseño y Construcción de un Prototipo de Generador Eólico de Eje Vertical. [En línea]. Trabajo de grado de ingeniero civil electricista. Santiago de Chile.: UNIVERSIDAD DE CHILE, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, 2004.

DUARTE, Carlos A. y GALINDO, Claudia V. Diseño mecánico de un aerogenerador de media potencia para la Isla de Providencia. Bogotá D.C., 2005, Trabajo de grado (Ingeniería Mecánica). Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería Mecánica. Disponible en el catálogo en línea de la Biblioteca de la Fundación Universidad de América: (<http://www.uamerica.edu.co/bibliotecas/>)

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018 ISBN 9789588585673.

NORTON, Robert L.; CAGIGAS CASTELLO-TÁRREGA, Carlota de, las Mercedes y SÁNCHEZ GARCÍA, Gabriel. Diseño De Máquinas. México: Prentice Hall, 1999. ISBN 9701702573

MOTT, Robert. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México, 2006.

SHIGLEY, Joseph E. Diseño en ingeniería mecánica. 8 ed. México, 2008

SLAMAKER, R. R. Diseño y Análisis De Elementos De Máquinas. México: Limusa, 1969.

VILLARRUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería De La Energía Eólica. México Barcelona: Alfaomega: Marcombo, México Barcelona: Alfaomega: Marcombo, 2013.

ORDUZ BERDUGO, Oscar Iván Y SUAREZ PEREZ, Julián Edgardo. Diseño y Construcción de un Prototipo de turbina eólica de Eje Vertical para generación a baja potencia. [En línea]. Trabajo de grado de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga.: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, Facultad de ingenierías físico-mecánicas, 2011.

TALAYERO NAVARES, Ana Patricia y MARTINEZ TELMO, Enrique. Energías renovables: Energía Eólica [en línea]. ZARAGOSA: UNE,2011. 16 p. [citado 17 Oct., 2018] Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=ML7uDAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

TONY BURTON, David Sharpe. Wind Energy Handbook. 1st ed. England: JOHN WILEY & SONS, LTD, 2001 by John Wiley & Sons, Lt.

ANEXOS

ANEXO A.
TOMA DE MEDICIONES
RESULTADOS OBTENIDOS DIA 1

15/02/2019 "8:00-17:00"				
Hora	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Direccion	
8:00	3,605	6	NW	H
8:20	3	6,4	N	A
8:40	2,905	6,8	E	C
9:00	3,405	8	E	C
9:20	3,505	8,2	N	A
9:40	2,705	8,2	NE	B
10:00	2,7	8,3	SE	D
10:20	2,9	8,3	SW	F
10:40	2,305	8	S	E
11:00	2,103	8	S	E
11:20	2,105	8	SW	F
11:40	2,124	9	SW	F
12:00	2	9	SW	F
12:20	2,005	9	S	E
12:40	2,215	11	SE	D
13:00	2,365	11	E	C
13:20	3,405	11	E	C
13:40	3,505	10,8	NE	B
14:00	2,505	10,8	NE	B
14:20	2,6	10,6	N	A
14:40	2,805	10	NE	B
15:00	2,85	10	NW	H
15:20	3,015	8	N	A
15:40	3,405	8	N	A
16:00	3,805	8	NW	H
16:20	3,034	6	NW	H
16:40	3	6	N	A
17:00	4,3	6	N	A

RESULTADOS OBTENIDOS DIA 2			
17/02/2019 "8:00-17:00"			
Hora	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Direccion
8:00	3,876	7	N
8:20	3,987	7	N
8:40	2,69	7	NE
9:00	3	8,2	NE
9:20	3,975	8,4	NW
9:40	4,105	8,4	NE
10:00	4,205	8,8	W
10:20	4,505	8,8	W
10:40	4,705	8,8	SE
11:00	4,505	9,2	SW
11:20	3,56	9,2	S
11:40	3,823	9,4	SE
12:00	4	10,2	S
12:20	4,005	10,2	S
12:40	4,215	10,2	SE
13:00	4,505	9,8	SE
13:20	4,7	9,8	E
13:40	4,805	9,8	E
14:00	4,995	9,4	NE
14:20	5	9,4	E
14:40	5,875	9	NE
15:00	5,325	9	N
15:20	5,3	9	NE
15:40	5,225	9	NE
16:00	5,3	7	N
16:20	5,504	7	N
16:40	6,65	7	NW
17:00	6	6,5	N

RESULTADOS OBTENIDOS DIA 3			
19/02/2019 "8:00-17:00"			
Hora	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Direccion
8:00	3,105	6	W
8:20	3,905	6	SW
8:40	3,345	6,5	SW
9:00	3,103	6,5	W
9:20	3,405	7,2	N
9:40	3,303	7,2	N
10:00	2,305	7	NE
10:20	3,491	7	W
10:40	3,605	7,4	SW
11:00	4	7,4	SW
11:20	4,875	7,6	SE
11:40	4,325	7,6	S
12:00	4,3	7,6	S
12:20	4,225	8	E
12:40	3,605	8	NE
13:00	3	8	SE
13:20	3,905	8	SE
13:40	3,405	7,6	NE
14:00	3,505	7,6	E
14:20	2,815	7,6	N
14:40	2,365	7	E
15:00	2,705	7	NE
15:20	2,808	7	N
15:40	3,9	6,4	NE
16:00	3,985	6,4	N
16:20	4	6	NE
16:40	4,05	6	NE
17:00	4,35	6	N

ANEXO B

SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Rodamiento soporte inferior

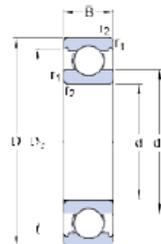
SKF



6010

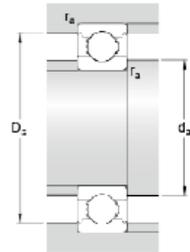
Producto popular
SKF Explorer

Dimensiones



d	50	mm
D	80	mm
B	16	mm
d ₁	≈ 59.75	mm
D ₂	≈ 72.8	mm
r _{1,2}	min. 1	mm

Dimensiones de los resaltes



d _a	min. 54.6	mm
D _a	max. 75.4	mm
r _a	max. 1	mm

Datos del cálculo

Capacidad de carga dinámica básica	C	22.9	kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	16	kN
Carga límite de fatiga	P _u	0.71	kN
Velocidad de referencia		18000	r/min
Velocidad límite		11000	r/min
Factor de cálculo	k _r	0.025	
Factor de cálculo	f ₀	14.7	

Masa

Rodamiento de masa		0.26	kg
--------------------	--	------	----

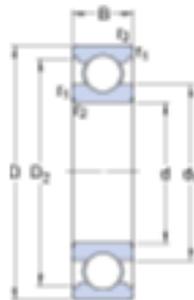
Fuente: SKF. Catálogo de rodamientos. [En línea]. [Consultado: 18 octubre 2019. Disponible en: https://www.skf.com/binary/87-121486/0901d19680416953-10000_2-ES---Rolling-bearings.pdf]



6011

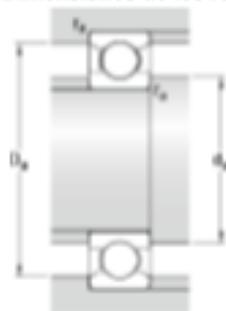
Producto popular
SKF Explorer

Dimensiones



d	66	mm
D	90	mm
B	18	mm
d_1	≈ 66.3	mm
D_2	≈ 81.6	mm
$r_{1,2}$	min. 1.1	mm

Dimensiones de los resaltes



d_a	min. 61	mm
D_a	max. 84	mm
r_a	max. 1	mm

Datos del cálculo

Capacidad de carga dinámica básica	C	29.6	kN
Capacidad de carga estática básica	C_0	21.2	kN
Carga límite de fatiga	P_u	0.9	kN
Velocidad de referencia		16000	r/min
Velocidad límite		10000	r/min
Factor de cálculo	k_r	0.026	
Factor de cálculo	f_0	16.4	

Masa

Rodamiento de masa		0.35	kg
--------------------	--	------	----

ANEXO C

CARACTERÍSTICAS DEL FRENO

Freno HW 100 HFA

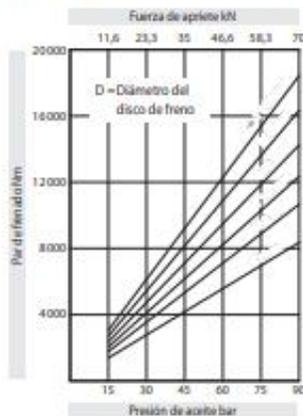
accionamiento hidráulico – liberación por muelle

RINGSPANN®



Características	Código
Freno	H
Estándar	W
Diámetro del pistón 100 mm	100
Accionamiento hidráulico	H
Liberación por muelle	F
Ajuste automático del desgaste de las zapatas	A
Máx. fuerza de apriete 70 kN	070
Ejemplo de pedido	
Freno HW 100 HFA, máx. fuerza de apriete 70 kN:	
	↓
	HW 100 HFA - 070

Datos técnicos



Otras características

- El espesor de la placa intermedia por parte del cliente, se obtiene de la suma del grosor W del disco de freno, más 3 mm.

Fuente: RINGSPANN. Catálogo de mordazas. [En línea]. [Consultado: 18 octubre 2019].

ANEXO D

ESPECIFICACIONES DEL ALTERNADOR

Artículo #	4kw GP
Potencia nominal (W):	4kw
Velocidad nominal (RPM):	300r/m
Voltaje nominal (V):	AC120v o según su petición
Aislamiento de clase:	F
La eficiencia (%)	93
Tipo de generador	3-Fase de imán permanente AC generador síncrono
La vida de servicio:	Más de 20 años
Ambiente de Trabajo	-35 ° C-60 ° C
Rango de velocidad	0-550 rpm
Mecánica de las especificaciones	
Montaje de significa	Horizontal/Vertical
Peso bruto (Kg)	88
Par de arranque (N * M)	2,3
Nominal Toque (N * M)	99,6
Los polacos	20
Las especificaciones de Material	
Material del eje	Hierro con tratamiento de enfriamiento y templado
Rodamiento	HRB o según su petición
Lubricación	Lubricación de grasa
Material de la carcasa	De acero al carbono
De la clase de temperatura	150 grados centígrados
Imán permanente Material	De la tierra rara NdFeB
Clase de temperatura del Material del imán permanente	150 grados centígrados
Core	Lámina de silicona laminada en frío de alta calidad 50WW470
Clase de protección	IP54

Fuente: Made in china. [Sitio web]. 4kw AC220V 300rpm bajas rpm generador de imanes permanentes. [Consulta: 17 octubre 2019]. Disponible en: https://es.made-in-china.com/co_cctvcamerachina/product_10kw-AC220V-200rpm-Low-Rpm-Rpm-Permanent-Magnet-Generator_eyhornerg.html

ANEXO E ESPECIFICACION LAMINA TORRE

espesor		planchas plates			pág 24
pulgadas	mm	peso (kg) 1219 x 2440mm	peso (kg) 1829 x 6096mm	peso (kg) 2483 x 6096mm	
3/16"	4.50	-	404.8	-	
3/16"	4.75	-	418.2	-	
1/4"	6.00	-	537.4	-	
1/4"	6.35	-	566.1	-	
5/16"	7.94	-	708.3	-	
5/16"	8.00	-	716.2	-	
3/8"	9.00	-	760.6	1050	
3/8"	9.50	-	827.2	-	
1/2"	12.00	286	1050	1400	
5/8"	15.00	350	1314	1750	
3/4"	19.00	443	1670	2217	
1"	25.00	584	2250	2917	
1.1/4"	32.00	723.4	2802	3617	
1.1/2"	38.00	887	3328	4433	
2"	50.00	1112	4382	5814	
2.1/2"	63.00	1470	5521	7419	
3"	75.00	1750	-	8750	
4"	100.00	2334	8757	11667	

Se entrega como plancha, placa o placa espesa productos laminados en caliente y cortado a medidas, con un mínimo de espesor de 4.50mm y ancho de 1219mm. Estas planchas son utilizadas para una gran variedad de productos laminados en los diferentes sectores económicos.

Aplicaciones: Carpinterías, autoportantes, estructuras metálicas, puentes, alas, buques, terminales de gases.

características técnicas
página 22

Referencia PUA



lámina hot rolled lámina en caliente



El proceso metalúrgico para lámina en caliente se usó principalmente para producir hojas a partir de planchones los cuales son deformados entre un set de rodillos y la temperatura del metal está por encima de su temperatura de recristalización.

Aplicaciones La lámina en caliente o hot rolled se usa en lugar de manipular su forma y geometría. Esto se logra calentando la lámina a su máximo nivel y aplicando una carga controlada para que el material tratado conserve la forma y medida deseada.

Referencia LAD - RAD

características técnicas
página 20

15

lámina hot rolled | lámina en caliente

pág 14

espesor	peso (kg)	peso (kg)	peso (kg)	peso (kg)
mm	1000 x 2000mm	1200 x 2400mm	1000 x 6000mm	1200 x 6000mm
1.55	n/a	85.04	n/a	87.60
1.80	28.26	40.69	84.78	101.73
2.00	31.50	47.62	94.20	113.04
2.50	39.78	57.20	117.75	141.80
3.00	47.67	68.43	141.59	171.43
4.00	63.00	90.54	195.57	226.00
4.50	71.88	103.43	215.47	255.05
6.00	95.47	136.88	289.55	345.29
8.00	n/a	182.40	n/a	454.30
9.00	n/a	204.28	n/a	508.68