

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA EN LA FINCA “EL ALTO DEL GAVILÁN”, BOYACÁ

NAOMI DAYANA GONZÁLEZ CONTRERAS  
JUAN DAVID SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.

2.019

DISEÑO DE UN AEROGENERADOR PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA EN LA FINCA “EL ALTO DEL GAVILÁN”, BOYACÁ

NAOMI DAYANA GONZÁLEZ CONTRERAS  
JUAN DAVID SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

Proyecto Integral de grado para optar el título de  
INGENIERO MECÁNICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.

2.019

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---



---

Ing. Rodrigo Sorzano Dueñas  
Jurado 1



---

Ing. Miguel Fdo. Jiménez Jiménez  
Jurado 2

Bogotá, agosto 2019

## DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente Institucional y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Jaime Posada García-Peña

Vicerrectoría Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director de Programa de Ingeniería Mecánica

Ing. Carlos Mauricio Veloza Villamil

La información presente en este documento es responsabilidad absoluta de los autores.

Dedico este trabajo primero a Dios por el hermoso regalo de la vida, por ser mi guía incansable y por la sabiduría que derrama en mí cada día; también dedico este trabajo a mis padres Mauricio Hernando González Velasco y Elizabeth Contreras Pachón, por el apoyo incondicional, por estar siempre presentes en cada momento de mi vida, por el cariño brindado y por las lecciones de vida que me dieron, las cuales me enseñaron a ser una persona con buenos valores, también a mis abuelos que me dieron un impulso agradable para culminar este proyecto, a mi hermano Juan González por su ayuda en los momentos de incertidumbre, a mi hermana Gabriela González que siempre me acompaña y hace que sea importante cada logro, para demostrarle que la vida con esfuerzo y dedicación se realizan las metas, y por ultimo a todas las personas importantes que han estado a lo largo de la vida.

Naomi Dayana González Contreras

Dedico este trabajo a mis padres Floraya Hernández Yepes y Juan Fernando Sánchez Casallas, por su apoyo, su paciencia, por permanecer en cada momento junto a mí, por brindarme la compañía y herramientas necesarias para llegar hasta aquí para obtener un logro más, muchas gracias por todo a ustedes. También se lo quiero dedicar a Dios por haberme escuchado en los peores momentos y las situaciones más difíciles, por darme la sabiduría correcta y haberme guiado en este camino para culminar con este trabajo.

Juan David Sánchez Hernández

Primero queremos agradecer a Dios por darnos la vida y guiarnos para culminar con éxito este proyecto.

En segunda instancia nuestro padre por brindarnos las herramientas y el apoyo necesario para salir a delante y cumplir con nuestros objetivos.

Por último, agradecemos a todos los docentes y compañeros que aportaron para la realización de este proyecto al igual que el comité de evaluación de proyectos de grado de Ingeniería Mecánica por su ayuda, asesoría y críticas constructivas.

## CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	20
INTRODUCCIÓN	21
1. ENERGÍA EÓLICA Y AEROGENERADOR	23
1.1 ENERGÍAS RENOVABLES	23
1.2 HISTORIA	23
1.3 ENERGÍA EÓLICA	26
1.3.1 Generalidades del Viento	26
1.4 AEROGENERADOR	27
1.4.1 Tipos de aerogeneradores	28
1.4.2 Partes de los aerogeneradores	34
1.5 MATERIAL ESTRUCTURAL	36
1.5.1 Acero	37
1.5.2 Materiales compuestos para los álabes	38
1.5.3 Material de refuerzo	39
1.6 GENERADORES	40
1.6.1 Generador asíncrono con jaula de ardilla	40
1.6.2 Generador síncrono	41
1.6.2.1 Electroimanes	41
1.6.2.2 Imanes permanentes	42
1.7 SISTEMA ELÉCTRICO DE UN AEROGENERADOR	42
1.7.1 Rectificador	43
1.7.2 Filtrado	43
1.7.3 Regulador	43
1.7.4 Bateria	44
1.7.5 Inversor	44
1.7.6 Transformador	44
1.8 APLICACIONES	44
1.8.1 Generación eléctrica a escala “mini”	44
1.8.2 Bombeo de agua	45
1.8.3 Hidrógeno “Verde”	45
1.8.4 Desalinización	45
1.9 PARQUE EÓLICO JEPÍRACHI	45
2. PARAMETROS Y REQUERIMIENTOS	47
2.1 MUNICIPIO DE SABOYÁ	47
2.1.1 Ubicación del aerogenerador	48
2.2 ENERGÍA ELÉCTRICA	48
2.2.1 Potencia requerida	49
2.3 VIENTO	50

2.3.1 Tipo de viento	50
2.3.2 Velocidad del viento	53
3. ALTERNATIVAS DE DISEÑO	59
3.1 PLANTEAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS	59
3.1.1 Alternativa N° 1	59
3.1.2 Alternativa N° 2	60
3.1.3 Alternativa N° 3	62
3.2 EVALUACION DE ALTERNATIVAS	63
4. DISEÑO DETALLADO	67
4.1 POTENCIAL EÓLICO	67
4.2 TOBERA	72
4.3 DISEÑO DE LOS ÁLABES	73
4.4 FUERZAS AERODINÁMICAS	83
4.5 DISEÑO DEL EJE	89
4.5.1 Unión roscada	106
4.6 SELECCIÓN DEL APOYO DE RODAMIENTO	111
4.7 SELECCIÓN DEL GENERADOR	111
4.8 SELECCIÓN DEL FRENO	116
4.9 DISEÑO DEL SOPORTE	121
4.9.1 Unión por soldadura	128
4.10 SISTEMA DE ORIENTACIÓN	131
4.11 DISEÑO DE LA GÓNDOLA	137
4.12 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	138
4.12.1 Material	138
4.12.2 Cimentación	138
4.12.3 Dimensiones de la estructura	140
4.12.4 Estudio de cargas	141
5. PLANOS CONSTRUCTIVOS	151
6. SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DE LA ESTRUCTURA	152
7. MANUALES	154
7.1 MANUAL DE CONSTRUCCIÓN	154
7.2 MANUAL DE INSTALACIÓN	157
7.3 MANUAL DE OPERACIÓN	162
7.4 MANUAL DE MANTENIMIENTO	163
7.5 MANUAL DE SEGURIDAD	167
8. EVALUACIÓN IMPACTO AMBIENTAL	170
9. ANÁLISIS DE COSTOS	173

10. CONCLUSIONES	175
11. RECOMENDACIONES	176
BIBLIOGRAFÍA	177
ANEXOS	180

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Velocidad del viento	57
Tabla 2. Punto seleccionado	58
Tabla 3. Criterios de selección	65
Tabla 4. Puntaje para cada alternativa	66
Tabla 5. Evaluación Scoring	66
Tabla 6. Periodo del viento anual	68
Tabla 7. Intervalos del viento	69
Tabla 8. Datos Airfoil Tools	78
Tabla 9. Sección Álabes	78
Tabla 10. Sección Álabe1	80
Tabla 11. Sección Álabe 2	81
Tabla 12. Sección Álabe 3	81
Tabla 13. Sección Álabe 4	81
Tabla 14. Sección Álabe 5	82
Tabla 15. Sección Álabe 6	82
Tabla 16. Factores de confiabilidad	92
Tabla 17. Factor de tamaño Cs	92
Tabla 18. Peso de los álabes	93
Tabla 19. Selección del aerogenerador	113
Tabla 20. Parámetros del generador seleccionado	114
Tabla 21. Características de materiales de fricción para frenos	117

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Resistencia a la fatiga	91
Gráfica 2. Momento flector y esfuerzo cortante plano X-Z	100
Gráfica 3. Momento flector y esfuerzo cortante plano Y-Z	105

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Propiedades de los aceros ASTM	38
Cuadro 2. Propiedades mecánicas de fibras	39
Cuadro 3. Equivalencias de velocidad del viento	55
Cuadro 4. Eje horizontal tripala	59
Cuadro 5. Aerogenerador Darrieus tipo H	61
Cuadro 6. Aerogenerador de eje horizontal tipo difusor	62
Cuadro 7. Propiedades de los álabes	85
Cuadro 8. Propiedades AISI SAE 1020	89
Cuadro 9. Especificaciones para freno de Disco	118
Cuadro 10. Datos iniciales soporte 1	122
Cuadro 11. Cargas aplicadas	126
Cuadro 12. Radio mínimo	126
Cuadro 13. Esfuerzo crítico	127
Cuadro 14. Comparación de la resistencia de diseño y carga mayoritaria	127
Cuadro 15. Esbeltez	127
Cuadro 16. Parámetros de soldadura	131
Cuadro 17. Fuerza total axial	134
Cuadro 18. Tipo de terreno	139
Cuadro 19. Condiciones iniciales estructura	149
Cuadro 20. Radio mínimo de giro	149
Cuadro 21. Esfuerzo crítico	149
Cuadro 22. Resistencia de diseño y carga mayorada	150
Cuadro 23. Esbeltez	150
Cuadro 24. Riesgos	167
Cuadro 25. Principales medidas de prevención en la estructura	169
Cuadro 26. Principales medidas de prevención en la góndola, álabes y eje	169
Cuadro 27. Costos de fabricación	173
Cuadro 28. Costos de ingeniería	174
Cuadro 29. Costo total de proyecto	174

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Clasificación de la energía renovable	23
Figura 2. Embarcación velera, antiguo Egipto	24
Figura 3. Primera turbina eólica	25
Figura 4. Esquema de conversión de energía eólica	27
Figura 5. Aerogenerador Savonius	28
Figura 6. Aerogenerador Darrieus	29
Figura 7. Aerogenerador Giromill	30
Figura 8. Aerogenerador Windside	31
Figura 9. Aerogenerador WM	32
Figura 10. Aerogenerador tripala	33
Figura 11. Aerogenerador difusor	34
Figura 12. Partes de un aerogenerador de eje vertical	35
Figura 13. Partes de un aerogenerador de eje horizontal	36
Figura 14. Generador asíncrono con jaula de ardilla	41
Figura 15. Generador sincrónico de electroimanes	41
Figura 16. Generador de imanes permanentes	42
Figura 17. Esquema sistema eléctrico.	43
Figura 18. Parque eólico Jepírachi	46
Figura 19. División política	47
Figura 20. Brisa en montañas y valles	51
Figura 21. Viento catabático y anabático	52
Figura 22. Föhn	53
Figura 23. Influencia de obstáculos	53
Figura 24. Rosa de los vientos en Tunja, Boyacá	56
Figura 25. Mapa velocidad del viento en Colombia	57
Figura 26. Aerogenerador tripala	60
Figura 27. Aerogenerador Darrieus tipo H	61
Figura 28. Aerogenerador tipo difusor	63
Figura 29. Tobera	72
Figura 30. Desarrollo tobera	73
Figura 31. Perfil BW-3	75
Figura 32. Perfil goe391	76
Figura 33. Perfil goe590	76
Figura 34. Perfil fg1	77
Figura 35. Perfil mh23	77
Figura 36. Diseño del álabe	82
Figura 37. Distribución de presiones sobre un álabe con perfil aerodinámico	84
Figura 38. Eje	94
Figura 39. Reacción en X - Z	94
Figura 40. Fuerzas en X - Z	95
Figura 41. Sección A-B	95

Figura 42. Sección A-C	96
Figura 43. Sección A-D	96
Figura 44. Sección A-E	97
Figura 45. Sección A-F	98
Figura 46. Sección G-I	98
Figura 47. Eje sección H-I	99
Figura 48. Reacción en Y-Z	100
Figura 49. Fuerzas en Y-Z	101
Figura 50. Sección A-B	101
Figura 51. Sección A-C	102
Figura 52. Sección A-D	102
Figura 53. Sección A-E	103
Figura 54. Sección A-F	104
Figura 55. Sección G-I	104
Figura 56. Apoyo de rodamiento	111
Figura 57. Velocidad específica del rotor	112
Figura 58. Dimensiones del generador	115
Figura 59. Mordaza	118
Figura 60. Disco de freno	120
Figura 61. Placa para la mordaza	120
Figura 62. Sistema de freno de disco	121
Figura 63. Soporte	121
Figura 64. Soporte 1	122
Figura 65. Sujeción de soldadura	128
Figura 66. Análisis de fuerzas	130
Figura 67. Junta de las placas	131
Figura 68. Anemómetro y veleta	132
Figura 69. PLC Mitsubishi FX1N	133
Figura 70. Motorreductor	135
Figura 71. Corona	136
Figura 72. Placa motorreductor	136
Figura 73. Parte inferior de la góndola	137
Figura 74. Parte superior de la góndola	137
Figura 75. Góndola	138
Figura 76. Fuerza sobre cimentación	139
Figura 77. Unión para la estructura con la cimentación	140
Figura 78. Dimensiones de la estructura	141
Figura 79. Cargas de la estructura	141
Figura 80. Condiciones de la estructura	152
Figura 81. Desplazamiento horizontal	153
Figura 82. Esfuerzo Von Mises	153
Figura 83. Construcción de la cimentación	154
Figura 84. Material de fabricación de los álabes	155
Figura 85. Carro grúa	155
Figura 86. Fabricación del disco de freno	156

Figura 87. Disco de freno	156
Figura 88. Estructura	157
Figura 89. Juego de boquillas hexagonales	158
Figura 90. Instrumentos de instalación	159
Figura 91. Unión de la estructura con la cimentación	160
Figura 92. Sistema de Orientación	160
Figura 93. Instalación del soporte	161
Figura 94. Instalación de los álabes al eje	161
Figura 95. Instalación del disco sistema de freno	162
Figura 96. Equipo con arnés	168
Figura 97. Criterios de evaluación	170

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Score para la alternativa	63
Ecuación 2. Potencial eólico	67
Ecuación 3. Densidad en el sitio	67
Ecuación 4. Factor de forma	69
Ecuación 5. Área de barrido	70
Ecuación 6. Energía eléctrica demandada anual	70
Ecuación 7. Velocidad efectiva	71
Ecuación 8. Coeficiente de corrección por densidad	71
Ecuación 9. Diámetro	72
Ecuación 10. Número de Reynolds	73
Ecuación 11. Longitud de la cuerda	74
Ecuación 12. Solidez	74
Ecuación 13. Longitud de cuerda óptima	79
Ecuación 14. Ángulo $\Theta$	79
Ecuación 15. Factor de forma de la pala	80
Ecuación 16. Ángulo de anclaje	80
Ecuación 17. Flujo másico	83
Ecuación 18. Fuerza de sustentación	85
Ecuación 19. Fuerza de arrastre	86
Ecuación 20. Fuerza aerodinámica	87
Ecuación 21. Torque ejercido sobre el eje	87
Ecuación 22. Velocidad angular	88
Ecuación 23. Potencia	88
Ecuación 24. Diámetro del eje	89
Ecuación 25. Resistencia a la fatiga	90
Ecuación 26. Rango de tamaño	92
Ecuación 27. Torque	93
Ecuación 28. Fuerza centrífuga	107
Ecuación 29. Distancia de giro	107
Ecuación 30. Relación del centro de gravedad de la pala	108
Ecuación 31. Esfuerzo cortante	109
Ecuación 32. Factor de seguridad	110
Ecuación 33. Velocidad específica	112
Ecuación 34. Torque freno	116
Ecuación 35. Diámetro externo del disco de freno	116
Ecuación 36. Fuerza de frenado	117
Ecuación 37. Momento de inercia en xi	122
Ecuación 38. Momento de inercia en yi	123
Ecuación 39. Teorema de ejes paralelos en xi	123
Ecuación 40. Teorema de ejes paralelos en yi	123
Ecuación 41. Radio de giro en xi	123

Ecuación 42. Radio de giro en $y_i$	123
Ecuación 43. Elemento sometido a compresión	124
Ecuación 44. Esfuerzo crítico	124
Ecuación 45. Resistencia de diseño	125
Ecuación 46. Carga	125
Ecuación 47. Relación de esbeltez	125
Ecuación 48. Área de la soldadura	128
Ecuación 49. Perímetro de la soldadura	128
Ecuación 50. Volumen de la soldadura	129
Ecuación 51. Fuerza por metro cortante	129
Ecuación 52. Fuerza debido a la torsión	129
Ecuación 53. Fuerza resultante	130
Ecuación 54. Fuerza radial	133
Ecuación 55. Potencia del motor	135
Ecuación 56. Momento lado derecho	142
Ecuación 57. Momento lado izquierdo	142
Ecuación 58. Momento en el rotor	142
Ecuación 59. Carga ejercida por el viento	143
Ecuación 60. Ubicación en Y	143
Ecuación 61. Magnitud de la fuerza	144
Ecuación 62. Variación de diámetro	144
Ecuación 63. Fuerza ejercida por el viento	144
Ecuación 64. Momento en la estructura	145
Ecuación 65. Tensión máxima	145
Ecuación 66. Momento de inercia	146
Ecuación 67. Condición	146
Ecuación 68. Desplazamiento horizontal del rotor	147
Ecuación 69. Desplazamiento horizontal de la estructura	147
Ecuación 70. Condición desplazamiento horizontal	148
Ecuación 71. Desplazamiento vertical	148
Ecuación 72. Condición de desplazamiento vertical	148

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Ubicación geografica de saboyá	181
Anexo B. Recibo de luz	182
Anexo C. Propiedades del aire	183
Anexo D. Coordenadas airfoil tools	184
Anexo E. Catalogo de apoyo de rodamiento	185
Anexo F. Catalogo de motorreductor	186
Anexo G. Catalogo de corona	188
Anexo H. Planos constructivos	189

## RESUMEN

El proyecto está enfocado en el diseño de un aerogenerador para la producción de energía eléctrica en una zona rural de Boyacá de 4 KWh, enfocándose en la vivienda y el cercado eléctrico, para lo cual, se tiene que analizar el lugar y la disposición que se tiene del viento como elemento primario para la generación de energía.

Teniendo en cuenta lo anterior, se establecen parámetros básicos y requerimientos fundamentales, estableciendo alternativas de diseño donde se seleccionará la mejor alternativa, posteriormente, se realizará un diseño del aerogenerador seleccionado anteriormente, donde se calcularán los elementos externos e internos; se hará la respectiva simulación de la zona más crítica del aerogenerador a través de elementos finitos, en este caso será de la estructura del aerogenerador, seguido de los planos constructivos y los manuales de construcción, instalación, operación, mantenimiento y seguridad. Por último, se desarrollará un análisis de impacto ambiental por medio de la matriz CONESA o también llamada cualitativa-cuantitativa y el análisis financiero de la fabricación comparado con los aerogeneradores que se encuentran en el mercado.

Palabras Claves: Generación; Energía eléctrica; Aerogenerador; Viento; Energía Eólica.

## INTRODUCCIÓN

En la zona rural de Boyacá se presenta la deficiente prestación en el servicio de energía local, debido al cableado y al mal mantenimiento de los transformadores que a su vez están cerca de las casas. El sector agropecuario se ve afectado en la producción de sus insumos al no tener una fuente sostenible de energía; otro de los grandes problemas es la variación del potencial eléctrico, pues algunas de las máquinas se ven afectadas generando pérdidas. En la finca “El alto del gavilán”, localizada en la vereda molinos de Saboya, Boyacá, se presenta inseguridad en sus ganados, porque no hay un cercado eléctrico.

El origen del problema es debido a la constante pérdida en el servicio de energía eléctrica, quedando expuestos los ganados a robos, pérdida o a lesiones por caídas en los barrancos; al igual que en la vivienda en el daño de los objetos y los alimentos que necesitan ser refrigerados.

Para suplir esta necesidad de energía en la zona rural el proyecto tiene como objetivo, “Diseñar un aerogenerador para la producción de la energía eléctrica en la finca “El alto del gavilán”, y como objetivos específicos;

- Diagnosticar la situación actual del proceso
- Establecer parámetros básicos y requerimientos funcionales
- Establecer alternativas de diseño
- Desarrollar el diseño detallado
- Simular la estructura por el método de elementos finitos
- Elaborar planos constructivos
- Elaborar manuales de construcción, instalación, operación, mantenimiento y seguridad
- Evaluar el impacto ambiental del proyecto
- Realizar un análisis de costos del proyecto

Para el alcance del proyecto solo se realizará el diseño del aerogenerador y no se realizarán prototipos, construcción, ni instalación y para la delimitación la capacidad eléctrica es de mínimo 4 KW para el hogar y las cercas de los corrales de una finca de 55 hectáreas.

Para la metodología del proyecto se consultarán libros, proyectos de grado, tesis, revistas científicas y páginas del IDEAM, la CAR y el Ministerio de Minas y Energía, para tener un diagnóstico de cómo es la situación en la región de Boyacá, la velocidad y dirección del viento se medirán con un anemómetro, la potencia que se debe generar para suministrar energía al hogar y al cercado eléctrico se determinará mediante un vatímetro, se analizarán tres alternativas de diseño basadas en el tipo de aerogeneradores, aplicando el método de selección ponderado para escoger la mejor alternativa, se realizarán todos los cálculos correspondientes para el diseño del aerogenerador incluyendo la estructura.

Por el método de elementos finitos se simulará la estructura, los planos se realizarán en un software CAD, se elaborarán manuales de construcción, instalación, operación, mantenimiento y seguridad, se evaluarán el impacto ambiental y se realizará un análisis de costos comparando con un modelo existente.

El desarrollo de este proyecto, aporta a las bases existentes de aerogeneradores incluyendo un difusor para aumentar la velocidad en cada sección que pasa el viento; y así poder superar la potencia que entrega el sector, para un sector montañoso donde las condiciones de viento son húmedas y las velocidades de viento son altas.

Este proyecto aplica al diseño de una máquina proveedora de energía eléctrica utilizando energía renovable.



Figura 2. Embarcación velera, antiguo Egipto



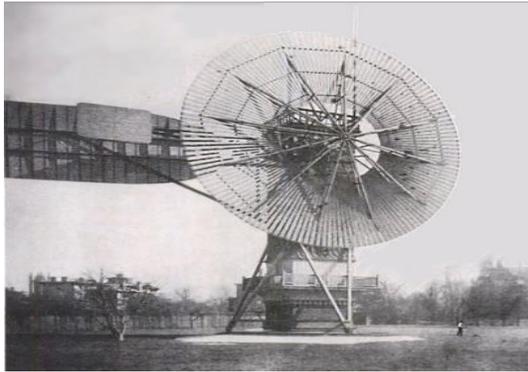
Fuente: PRIMIUM energía. [sitio web].  
[Consultado: 28 octubre 2018]. Disponible  
en: <http://premiumenergia.es/historia-de-la-energia-eolica/>.

Con la invención de la máquina de vapor en la Revolución Industrial, se dio paso a la energía eólica en los primeros años del siglo XIX. En 1802 Lord Kelvin tuvo la idea de acoplar un generador eléctrico a una máquina que usaba el viento. El inventor Charles F. Brush creó entre los años 1887 y 1888 la primera turbina eólica para generar electricidad diferente a las demás ya que tenía 144 palas de madera de cedro, a pesar del tamaño del rotor solo generaba 12 KW de potencia, debido a que la turbina giraba lento.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> LÓPEZ, Masao. La energía eólica: régimen jurídicoeconómico y régimen de autorización de sus instalaciones de producción. Tesis de doctoral Granada: Universidad de Granada. 2008. 45 p.

Figura 3. Primera turbina eólica



Fuente: ECOINVENTOS. [sitio web].  
[Consultado: 28 octubre 2018].  
Disponible en  
<https://ecoinventos.com/primera-turbina-eolica-de-la-historia/>

Poul La Cour diseñó el primer prototipo de un aerogenerador a finales del siglo XIX, este prototipo generaba entre 5 y 25 KW, con una altura de 24 m y un rotor de 4 palas, tenía un diámetro de 25 m y fue uno de los primeros pasos de la teoría de la aerodinámica.

La aerodinámica es el estudio del movimiento del aire y su incidencia sobre cuerpos que se mueven sobre él. En 1927 A. J. Dekker implemento el primer prototipo de turbina eólica con sección aerodinámica, consiguió velocidades de rotación cinco veces superior al viento, la clave era reducir el número de palas a dos o tres.<sup>3</sup>

Los aerogeneradores de eje vertical derivan todos del invento del Ingeniero Francés Darrieus en 1925, patentado en Estados Unidos. En los años 70, coincidiendo con la crisis petrolera, se inicia una nueva etapa de aprovechamiento de la energía del viento.

A partir de 1981 comenzó el verdadero auge de la generación eólica, en este año se aumentó la rentabilidad de la energía eólica gracias a la innovación en tecnología y el incremento en el rendimiento, algo muy importante a destacar es que el mantenimiento se acomodó a los periodos de escaso viento.

---

<sup>3</sup> GÓMEZ, Laura. Análisis de viabilidad técnica y financiera de la generación de energía eléctrica a partir del recurso eólico en el municipio de Pereira. Trabajo de grado Medellín: Universidad EAFIT. 2015. 21, 22 p.

En el 2001 se creó en Dinamarca la Asociación Mundial de Energía Eólica (World Wind Energy Association), con sede en Alemania, concebida como una organización internacional para la promoción mundial de esta fuente energética.<sup>4</sup>

### 1.3 ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica es aquella que proviene de movimientos de masas de aire, en otras palabras, del viento. La radiación solar calienta la atmosfera de maneras desiguales, por lo que no todas las masas de aire tienen la misma temperatura y presión. El viento se origina para igualar las presiones de las masas de aire que se encuentran a diferentes temperaturas, el 2% de la energía solar que recibe el planeta se transforma en viento. El viento, considerándolo como recurso energético y desde el punto de vista de su disponibilidad como suministro, tiene características específicas, el viento es una fuente con variaciones temporales, a grandes y pequeñas escalas de tiempo.<sup>5</sup>

1.3.1 Generalidades del Viento. El Sol calienta de forma desigual las diferentes zonas del planeta, provocando el movimiento del aire que proviene de la tierra y dando lugar al viento. A escala global se debe a las diferencias de temperatura que provoca la radiación solar sobre las distintas partes del globo terrestre.

La velocidad del viento es el resultado de la acción de las fuerzas de origen diversos: la rotación y translación de la tierra, la radiación solar, la gravedad, gradiente de presión o fuerza bórica, Coriolis y rozamiento.

El gradiente de presión crea movimiento de masa de aire, cuando mayor sea su valor, mayor será su velocidad. En condiciones de atmosfera libre, es decir sin rozamiento, por efecto de la fuerza de Coriolis el viento se mueve de forma paralela a las isobaras, de tal forma que, en el hemisferio norte, deja a su derecha la zona de altas presiones y a su izquierda las bajas depresiones; la situación se invierte en el hemisferio sur, en esta atmosfera libre, donde la fuerza bórica se equilibra con la fuerza de Coriolis y se genera el denominado viento geostrófico sin rozamiento.<sup>6</sup>

---

<sup>4</sup> HERNÁNDEZ, Luis. Los PLC's y la generacion de energia electrica mediante energia eolica y biomasa. Trabajo de diploma Santa Clara: Universidad central "Marta Abreu" de las Villas. 2016. 4, 5 p.

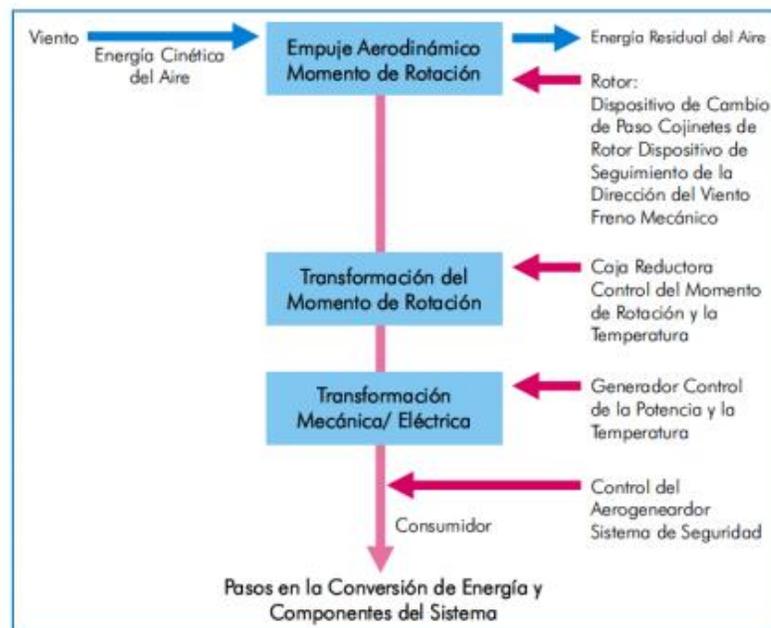
<sup>5</sup> MALLAGUARI, Alan. SHICAY, Freddy. Determinacion de parametros para la enseñanza de las energias renovables (solar, eolica, hidrógeno-electrosis y pilas de combustible) utilizando el equipo de laboratorio " clean energy trainer". Tesis para obtener el titulo de Ingenieria Mecanica Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana. 38 p.

<sup>6</sup> VILLARRUBIA, Miguel. Ingeniería De La Energía Eólica. México Barcelona: Alfaomega: Marcombo, México Barcelona: Alfaomega: Marcombo, 2013.

## 1.4 AEROGENERADOR

Los aerogeneradores son dispositivos que utilizan la energía entregada por las corrientes de aire (Viento), es decir, energía cinética para convertirla en energía mecánica. Para que se dé esto, el viento hace girar aspas (álabes) unidas a un eje, que a su vez es el eje de un generador eléctrico; donde la energía mecánica que trae el eje se convierte en electricidad. Dicha electricidad se puede utilizar al instante de ser generada o también, se puede almacenar en baterías para ser aprovechada después. Teóricamente, los aerogeneradores pueden llegar a tener una eficiencia del 50%, pero la práctica se tiene eficiencias entre el 36% y 40%, esto se ve en el límite de Betz.<sup>7</sup>

Figura 4. Esquema de conversión de energía eólica



Fuente: UAZ. Sistema de control para aerogeneradores empleando lógica difusa. [Sitio web] Disponible: <http://editorial-uaie.uaz.edu.mx/index.php/difu100cia/article/view/4/4> [Consultado: 1 noviembre 2018].

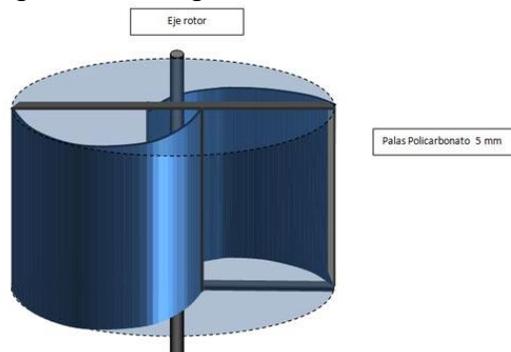
<sup>7</sup> LMG. AeroGeneradores-G4. Bogotá Colombia, 2017

## 1.4.1 Tipos de aerogeneradores.

1.4.1.1 Eje vertical. Las turbinas eólicas de eje vertical son aquellas donde el eje de rotación se encuentra perpendicular al suelo. Tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección de viento. Trabajan, ya sea por la diferencia de coeficiente de arrastre entre las dos mitades de la selección expuesta al viento, o por la fuerza de sustentación que experimentan los perfiles aerodinámicos de que están hechos los álabes, al interactuar con la corriente de aire. La diferencia de fuerzas de direcciones relativamente opuestas hace que el rotor sea propenso a girar sobre su eje en una dirección específica.<sup>8</sup>

- Savonius. Es el modelo más simple de rotor, consiste en cilindros huecos partidos por la mitad respecto a su eje, de forma que ofrecen la parte cóncava al empuje del viento, ofreciendo su parte convexa una menor resistencia al giro, por lo que girarán en el sentido que menos resistencia ofrezcan. Este sistema tiene el inconveniente de presentar una sobre presión en el interior de las zonas cóncavas al no poder salir el aire perjudicando el rendimiento; el sistema queda mejorado separando ambas palas y dejando un hueco entre ambas para que exista un flujo de aire.

Figura 5. Aerogenerador Savonius



Fuente: CALLE, Rafael. Aerogenerador savonius casero. [sitio web]. [Consultado: 1 noviembre 2018]. Disponible en: <http://elnegrillo.blogspot.com/2012/04/aerogenerador-savonius-casero.html>

<sup>8</sup> ORDUZ, Oscar. SUÁREZ, Julian. Diseño y construcción de un prototipo de una turbina de eje vertical para la generación de baja potencia. Trabajo de grado para obtener el título de ingeniero mecánico Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2011. 34 p.

- Darrieus. Patentado por G. J. M. Darrieus en 1931, permite mayores velocidades que las del rotor Savonius, pero no alcanza las velocidades al de uno de eje horizontal. Consiste en un eje vertical asentado sobre el rotor, con dos o más palas finas en curva unidas al eje por los extremos, el diseño de las palas es simétrico y similar a las de un avión, sin embargo, la unión de estas es compleja.

Figura 6. Aerogenerador Darrieus



Fuente:  
WINDTURBINEMODELS. [sitio web]. [Consultado: 1 noviembre 2018]. Disponible en:  
<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/93-dornier-darrieus-55>

- Giromill. Este tipo de generadores también fueron patentados por G. J. M. Darrieus. Consisten en palas verticales unidas al eje por unos brazos horizontales, que pueden salir por los extremos del aspa e incluso desde su parte central.

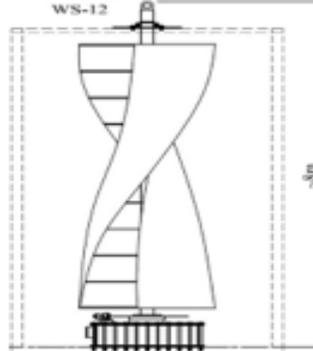
Figura 7. Aerogenerador Giromill



Fuente: MAKENU. [sitio web].  
[Consultado: 1 noviembre 2018].  
Disponible en:  
<https://www.makemu.it/prodotto/m2-8-rotor-de-viento/?lang=es>

- Windside. Este aerogenerador de eje vertical es un prototipo concebido por la empresa finlandesa Windside, tiene la particularidad de producir energía a partir de 1.5 m/s y soportar velocidades de hasta 60m/s, es un sistema similar al rotor Savonius, en vez de la estructura cilíndrica para aprovechamiento del viento, consiste en un perfil alabeado con torsión que asciende por el eje vertical. La principal diferencia frente a otros sistemas de eje vertical es el aprovechamiento del concepto aerodinámico, que le acerca a las eficiencias de los aerogeneradores de eje horizontal.

Figura 8. Aerogenerador Windside



Fuente: WINDSIDE. [sitio web].  
[Consultado: 1 noviembre 2018].  
Disponible en:  
<http://www.windside.com/products>

- WM (palas abatibles). Consiste en un molino provisto de brazos giratorios alrededor de un eje de giro con la particularidad de que a dichos brazos se unen articuladamente unas palas abatibles, las palas abatibles ofrecen la máxima resistencia al viento cuando se sitúan en la zona de avance de giro y prácticamente nula resistencia al viento cuando están en la zona de retorno del generador.

Figura 9. Aerogenerador WM



Fuente: SUÁREZ, Ángel. Generador eólico eje vertical WM. [sitio web]. [Consultado: 1 noviembre 2018]. Disponible en: <https://www.google.com.co/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwidycut-9LeAhXtwVkkHWJwBCYQjhx6BAgBEAI&url=http%3A%2F%2Fwww.apea.com.es%2Fpdf%2Fponencias%2Fiii-jornadas%2FAeroGenVertical.pdf&psig=AOvVaw1NAr4kw2XPzNFQUMh9IUZK&ust=1542253004953969>

1.4.1.2 Eje horizontal. Este tipo de turbina tiene su eje de rotación horizontal al suelo y casi en paralelo a la dirección del viento tal como las hélices de los aviones y los antiguos molinos de viento. La mayor parte de las turbinas eólicas caen en esta categoría. Las máquinas de eje horizontal tienen distintas ventajas, tales como una baja velocidad de arranque (cut-in) y un coeficiente de potencia relativamente alto. Dependiendo de la cantidad de palas, las "Horizontal Axis Wind Turbine" (HAWT) son clasificadas en mono-pala, bi-pala, tri-pala y multipala. La mayoría de las actuales turbinas en el comercio son de tres palas. Estas son más estables debido a que la carga aerodinámica es relativamente uniforme.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> LÓPEZ, Diego. Regulación de potencia de un aerogenerador de eje horizontal a partir de un sistema de control de velocidad de rotación. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista Bogotá D.C.: Universidad de la Salle. 2014. 19 p.

Figura 10. Aerogenerador tripala



Fuente: TecnoblogSanMartin. ¿Cómo funciona un aerogenerador?. [sitio web]. [Consultado: 1 noviembre 2018]. Disponible en:  
<https://tecnoblogsanmartin.wordpress.com/tag/aerogenerador/>

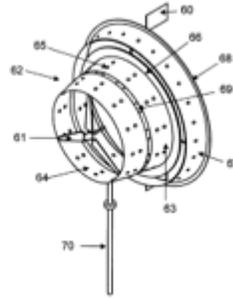
Otro tipo de aerogenerador de eje horizontal es el llamado difusor, estos permiten incrementar el flujo de entrada de aire a un aerogenerador y consecuentemente mejorar su coeficiente de potencia.

Las superficies exterior e interior de dicho difusor presentan una pluralidad de hendiduras configuradas para transformar la capa límite laminar generada respectivamente en cada una de dichas superficies en capa límite turbulenta. El extremo de mayor sección del difusor comprende un bisel configurado para que durante el uso del dispositivo, crear una región turbulenta de bajas presiones a la salida de dicho difusor, ejerciendo un efecto de succión sobre el aire presente en torno a la entrada de dicho difusor, incrementando la velocidad del flujo de aire a la entrada.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> ALONSO ESTÉBANEZ, Alejandro. CASTRO FRESNO, Daniel. PASCUAL MUÑOZ, Pablo. DEL COZ DÍAZ, Juan José. ÁLVAREZ RABANAL, Felipe Pedro. Sistema de aceleración del flujo del aire para aerogeneradores. Tesis de grado. Universidad de Cantabria y Universidad de Oviedo. España-2014. p. 6. Disponible en:  
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/5429/ES2514990A1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Figura 11. Aerogenerador difusor



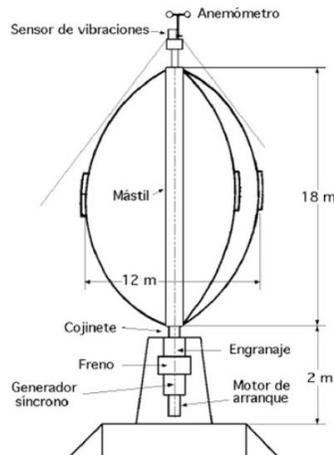
Fuente: ALONSO ESTÉBANEZ, Alejandro. CASTRO FRESNO, Daniel. PASCUAL MUÑOZ, Pablo. DEL COZ DÍAZ, Juan José. ÁLVAREZ RABANAL, Felipe Pedro. Sistema de aceleración del flujo del aire para aerogeneradores. Tesis de grado. Universidad de Cantabria y Universidad de Oviedo. España- 2014. p. 1. [Consultado: 1 noviembre 2018]. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/5429/ES2514990A1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

#### 1.4.2 Partes de los aerogeneradores.

Las partes importantes del aerogenerador para los requerimientos del proyecto son según el eje del rotor son siguientes;

1.4.2.1 Para eje vertical. Aunque el modelo puede cambiar las partes estándares son iguales para todos los modelos.

Figura 12. Partes de un aerogenerador de eje vertical



Fuente: ROJA, Amancio. Dispositivos y aerogeneradores de eje vertical. [En línea]. Chimbote, Perú. Universidad nacional del santo, 2017. [Consultado:10 mayo 2019]

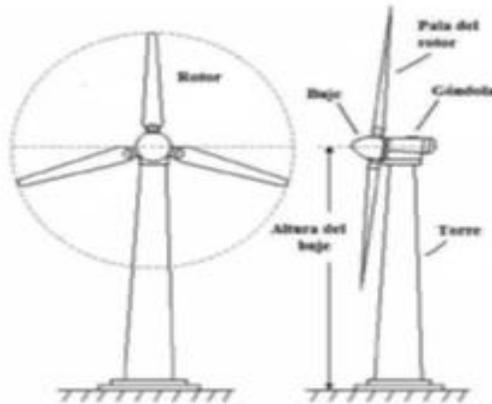
- Buje. Es el encargado de transformar la energía cinética del viento en energía de rotación en el eje de la transmisión.
- Transmisión. Es la encargada de transportar y adecuar la energía del rotor a la carga de trabajo del generador.
- Mástil. Es un elemento estructural que soporta por un lado el peso de elementos mecánicos del aerogenerador y por otro lado las cargas exteriores.
- Zapata. Garantiza la estabilidad del conjunto.
- Generador. Es el elemento que convierte la energía mecánica en energía eléctrica.<sup>11</sup>

1.4.2.2 Para eje horizontal. Los componentes principales de los aerogeneradores de eje horizontal son los siguientes;

---

<sup>11</sup> QUINTANA, David. Diseño y cálculo de aerogenerador de eje vertical. [En línea]. Proyecto final de carrera. Universidad de la Rioja, 2015. [Consultado 1 noviembre 2018]. p. 16. Disponible en: [https://biblioteca.unirioja.es/tfe\\_e/R000001958.pdf](https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/R000001958.pdf)

Figura 13. Partes de un aerogenerador de eje horizontal



Fuente: VILLARRUBIA, Miguel. Ingeniería De La Energía Eólica. México Barcelona: Alfaomega: Marcombo, México Barcelona: Alfaomega: Marcombo, 2013. p. 151. [Consultado: 10 mayo 2019].

- Álabes o palas. Debido a ellas se trasmite la energía cinética del viento en energía mecánica. Las palas determinan las cargas que se transmiten a toda la máquina.
- Buje. Parte de la turbina donde van acopladas las balas.
- Transmisión. Es una caja donde se aumenta la velocidad del giro.
- Góndola. Es la pieza que sostiene todos los elementos de la turbina, que va unida a la torre.
- Torre. Es la pieza estructural más grande.

### 1.5 MATERIAL ESTRUCTURAL

Las torres y su desarrollo son diseñadas específicamente por los fabricantes de turbinas. La fabricación de las torres cónicas hechas en base a chapas de acero se inicia con el corte de la chapa, su curvado en un proceso de tres rodillos para su posterior soldadura por arco sumergido.

Para la fabricación de las palas del aerogenerador se podrían hacer en acero o aluminio, pero se necesita más aerodinámica en el material de las palas por esta razón se utilizan mallas de fibra de vidrio impregnadas de poliéster (GRP = Glass fibre reinforced polyester) o resina epoxicas.

Aunque algunos fabricantes no los suelen usar por tema de costos y todavía no se encuentran más materiales disponibles como la madera epoxi.<sup>12</sup>

1.5.1 Acero. El acero es una aleación de hierro con una cantidad de carbono que puede variar entre 0,03% y 1,075% en peso de su composición, dependiendo del grado.

El acero conserva las características metálicas del hierro en estado puro, pero la adición de carbono y de otros elementos tanto metálicos como no metálicos mejora sus propiedades fisicoquímicas, sobre todo su resistencia.

Existen muchos tipos de acero según el/los elemento/s aleante/s que estén presentes. Cada tipo de acero permitirá diferentes aplicaciones y usos, lo que lo hace un material versátil y muy difundido en la vida moderna, donde podemos encontrarlo ampliamente.

Los dos componentes principales del acero se encuentran en abundancia en la naturaleza. El acero se puede reciclar indefinidamente sin perder sus atributos, lo que favorece su producción a gran escala.

Esta variedad y disponibilidad lo hace apto para numerosos usos como la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas, aeronáutica, industria automotriz, instrumental médico, etc... contribuyendo al desarrollo tecnológico de las sociedades industrializadas, pues ningún material logra igualarlo cuando se trata de resistencia al impacto o la fatiga.<sup>13</sup>

Los aceros fundidos son los más utilizados para la fabricación de las torres de los aerogeneradores. En el cuadro 1, se pueden ver las propiedades de cada uno de los aceros.

---

<sup>12</sup>ARQUITECTURA EN ACERO. El acero en las torres de generación eléctrica eólica. [Sitio web]. Brasil: alacero. [Consultado: 4 febrero 2019]. Disponible en: <http://www.arquitecturaenacero.org/uso-y-aplicaciones-del-acero/soluciones-constructivas/el-acero-en-las-torres-de-generacion-electrica>

<sup>13</sup>ALACERO. ¿Qué es el acero?. [Sitio web]. Brasil. [Consultado: 4 febrero 2019]. Disponible en: <https://www.alacero.org/es/page/el-acero/que-es-el-acero>

Cuadro 1. Propiedades de los aceros ASTM

MATERIAL SPECIFICATIONS													
ASTM	SAE	ASME	Heat Treatment	Chemical Composition (Max % unless range is given)						Mechanical Composition (Min)			
				C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Tensile ksi	Yield ksi	% Elong	% RA
<b>LOWER ALLOYED CARBON STEELS</b>													
	1020		N or N&T	.20-.25	60-90	0.60							
	1025		N or N&T	.20-.30	60-90	0.60							
	1030		N or N&T, Q&T	.28-.34	60-90	0.60							
	1035		N or N&T, Q&T	.32-.38	60-90	0.60							
	1040		N or N&T, Q&T	.37-.44	60-90	0.60							
A27 Gr N-1			Normalize	0.25	0.75	0.60							
A27 Gr 60-30			N or N&T	0.25	0.75	0.60			60	30	24	35	
A27 Gr 65-35			N or N&T	0.30	0.60	0.60			65	35	24	35	
A27 Gr 70-36			N or N&T	0.35	0.70	0.60			70	36	22	30	
A27 Gr 70-40			N or N&T	0.25	1.20	0.60			70	40	22	30	
A216 Gr WCA		SA-216 Gr WCA	N or N&T	0.25	0.70	0.60			60-85	30	24	35	
A216 Gr WCB		SA-216 Gr WCB	N or N&T	0.30	1.00	0.60			70-95	36	22	35	
A216 Gr WCC		SA-216 Gr WCC	N or N&T	0.25	1.20	0.60			70-95	40	22	35	
A352 Gr LCA		SA-352 Gr LCA	Q&T	0.25	0.70	0.60			60-85	30	24	35	
A352 Gr LCB		SA-352 Gr LCB	Q&T	0.30	1.00	0.60			65-90	35	24	35	
A352 Gr LCC		SA-352 Gr LCC	Q&T	0.25	1.20	0.60			70-95	40	22	35	
<b>HIGHER ALLOYED CARBON STEELS</b>													
A217 Gr WC6		SA-217 Gr WC6	N&T	.05-.20	50-80	0.60		1.00-1.50	45-65	70-95	40	20	35

Fuente: EAGLE GROUP MANUFACTURES. Material specifications. Estados Unidos. 2017. [Consultado 4 febrero 2019]. Disponible en: [http://www.eaglegroupmanufacturers.com/wp-content/uploads/2015/06/Brochure-Material-Specifications\\_2015.pdf](http://www.eaglegroupmanufacturers.com/wp-content/uploads/2015/06/Brochure-Material-Specifications_2015.pdf)

1.5.2 Materiales compuestos para los álabes. Son materiales de la combinación macroscópica de dos o más materiales como las aleaciones metálicas. La principal ventaja del diseño de estos materiales es que se pueden utilizar todas sus propiedades de cada uno de sus componentes. Las propiedades que pueden verse más beneficiadas para la utilización de los materiales compuestos son;

- Rigidez
- Resistencia mecánica
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia al desgaste
- Peso
- Resistencia a la fatiga conductividad térmica

Los componentes que forman un material compuesto se clasifican en dos categorías principales:

- Material de refuerzo o fase secundaria
- Matriz o fase primaria

La mayor atención se encuentra en los materiales fibrosos por lo que estos tienen las mejores propiedades mecánicas.

1.5.3 Material de refuerzo. Como su nombre lo indica se encarga de reforzar el material compuesto. Existe una variedad de refuerzos usados en la industria los cuales son;

- Refuerzo de fibras
- Refuerzo de material particulado
- Refuerzo en hojuelas

1.5.3.1 Fibras para los álabes. Las fibras son filamentos de material de refuerzo que tienen mayor resistencia y rigidez debido a la menor cantidad de defectos por unidad de masa y a la mejor orientación de los cristales que lo forman.

Las fibras se caracterizan geoméricamente por tener dos parámetros fundamentales que son: la elevada razón entre la longitud y su diámetro, y el valor del diámetro en estado cuasi cristalino. Las propiedades más importantes de estos materiales y que son más explotadas a la hora de evaluar los materiales son la resistencia y la rigidez, como se puede observar en el cuadro 1 son las propiedades que se puede demostrar el potencial de cada material.<sup>14</sup>

Cuadro 2. Propiedades mecánicas de fibras

Fibra	Peso Específico ( $\gamma$ ) [kN/m <sup>3</sup> ]	Resistencia a la Tracción (S) [Gpa]	Resistencia a la Tracción Especifica (S/ $\gamma$ ) [km]	Rigidez (E) [Gpa]	Rigidez Especifica (E/ $\gamma$ ) [Mm]
Aluminio	26.3	0.6	24.0	73.0	2.8
Titanio	46.1	1.9	41.0	115.0	2.5
Acero	76.6	4.1	54.0	207.0	2.7
Vidrio Tipo E	25.0	3.4	136.0	72.0	2.9
Vidrio Tipo S	24.4	4.8	197.0	86.0	3.5
Carbono	13.8	1.7	123.0	190.0	14.0
Berilio	18.2	1.7	93.0	300.0	16.0
Boro	25.2	3.4	137.0	400.0	16.0
Grafito	13.8	1.7	123.0	250.0	18.0

Tabla 1. Propiedades mecánicas de fibras de mayor aplicación [3]

Fuente: ALDERETE, Nicolas. 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. 13. Disponible en: [https://ri.itba.edu.ar/bitstream/handle/123456789/252/500778\\_Alderete\\_Cabral.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ri.itba.edu.ar/bitstream/handle/123456789/252/500778_Alderete_Cabral.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

<sup>14</sup>Ibid., p. 13.

Los materiales más utilizados como materiales de refuerzo de materiales compuestos son;

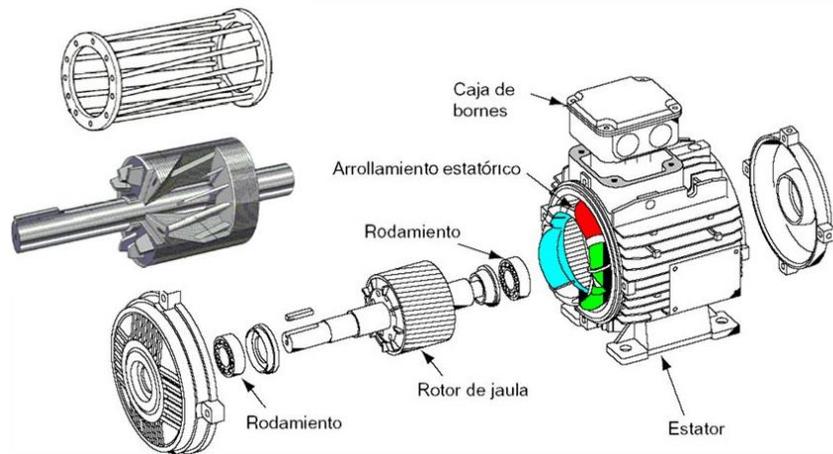
- Fibras de vidrio tipo E1 (vidrio de aluminio-borosilicato con menos de 1% peso/peso de óxidos alcalinos)
- Fibras de vidrio tipo S (vidrio aluminio-silicatos sin CaO, pero con alto contenido de MgO, con alta resistencia a la tracción)
- Fibras de carbono
- Fibras de boro
- Fibras de aramidas (Kevlar)
- Fibras metálicas

## 1.6 GENERADORES

El generador transforma la energía mecánica que viene del buje, en energía eléctrica. Depende el tipo de generador que se vaya a utilizar, se tiene diferentes características el uno del otro, a continuación, se mencionan los tipos de generadores.

1.6.1 Generador asíncrono con jaula de ardilla. Es un generador contactado directamente a la red o a una batería de condensadores trabajando en modo aislado. Solo pueden trabajar superando las velocidades de sincronismo, esta configuración precisa de una caja de engranajes para alcanzar la velocidad de sincronismo.

Figura 14. Generador asíncrono con jaula de ardilla

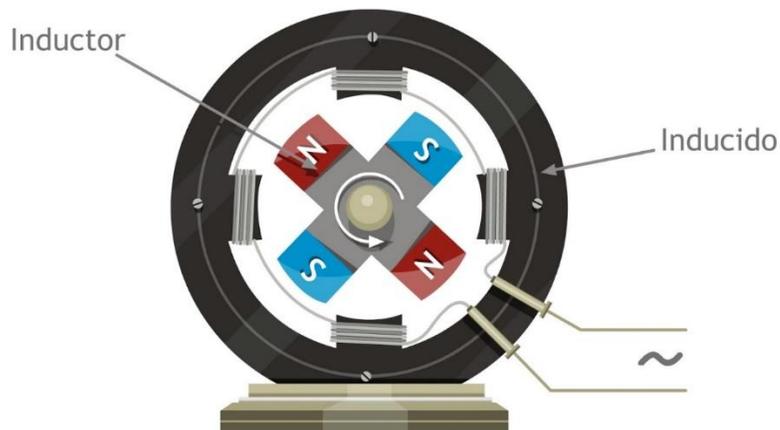


Fuente: MANOLO, Camilo. Motores de corriente alterna. 2015 [Consultado: 13 diciembre 2018]

1.6.2 Generador síncrono. Se pueden distinguir dos tipos de generadores, de imanes permanentes o de electroimanes.

1.6.2.1 Electroimanes. Permite conectar de forma directa el alternador a red controlando la energía entregada a red según el control aplicado al electroimán. Otra posibilidad es utilizar convertidores electrónicos para rectificar la tensión de salida y posteriormente ondularla para inyectarla a red.

Figura 15. Generador sincrónico de electroimanes

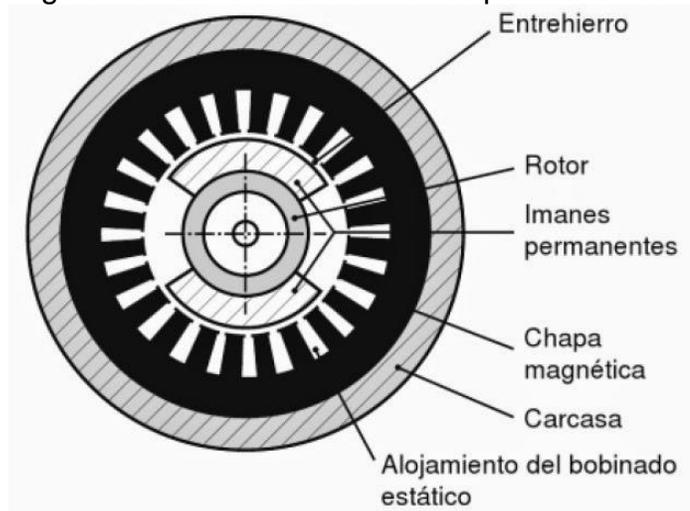


Fuente: GENERADORES SINCRONOS. Principio de funcionamiento y construcción del generador síncrono. 2017. [Consultado 13 diciembre 2018].

1.6.2.2 Imanes permanentes. La frecuencia y la tensión del estator de la maquina dependen de la velocidad de rotación del aerogenerador. Por lo tanto, necesita un convertidor AC/AC con bus de continua para poder conectar el generador a red trabajando a velocidad variable.

El diseño de estos tipos de generadores, suelen ser con gran número de polos, para poder disminuir la velocidad de sincronismo y poder operar sin necesidad de caja de engranajes y trabajar a frecuencia distinta de la red.

Figura 16. Generador de imanes permanentes

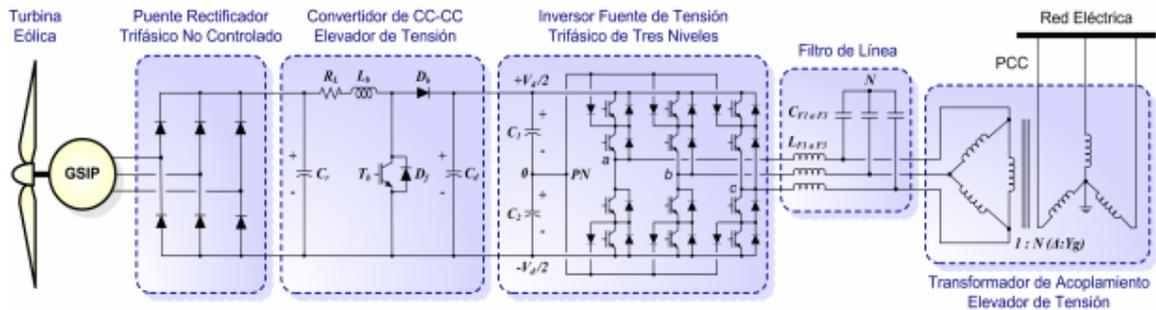


Fuente: MAQUINAS ELECTRICAS. [Sitio Web]. 2015. [Consultado: 13 diciembre 2018].

## 1.7 SISTEMA ELÉCTRICO DE UN AEROGENERADOR

Es sistema eléctrico se utiliza para llevar la energía eléctrica generada por el aerogenerador, a la línea de corriente del hogar, pasando por una serie de dispositivos encargados de manipular la carga y la tensión para aprovecharla en la vivienda, se puede observar el esquema en la figura 17.

Figura 17. Esquema sistema eléctrico.



Fuente: Mercado, P; Molina M. ESTRATEGIA DE CONTROL PARA MAXIMIZAR LA POTENCIA EXTRAÍDA DE AEROGENERADORES DE VELOCIDAD VARIABLE CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA. [En línea]. San Juan, Argentina. ASADES. 2008. [Consultado 14 julio 2019]. 67 p. Disponible en: <https://www.mendoza-conicet.gov.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2008/2008-t006-a010.pdf>

1.7.1 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.

1.7.2 Filtrado. El voltaje soportado por las baterías es de un 10%, lo cual, hace necesaria la regulación del voltaje de entrada a las baterías para no acortar la vida útil de estas. Para ello se usa un Filtro, el cual reduce el voltaje.<sup>15</sup>

1.7.3 Regulador. Las dos funciones principales del regulador eólico son;

Proteger la batería de sobrecargas y descargas profundas e invertir la corriente alterna producida por el generador en corriente continua que pueda almacenarse en baterías.

El regulador debería trabajar en tres fases;

- Regulación del ingreso de la energía cuando hay ráfagas de viento.
- Corte del ingreso de energía cuando la batería esté cargada.

<sup>15</sup> 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. 53 – 54 p.

- Corte de la energía al usuario si la batería se encuentra en los límites de descarga recomendados.

1.7.4 Batería. Estas baterías están diseñadas para almacenar la energía eléctrica de manera autónoma, sin conexión a la red; generadas durante las horas de viento, para usarlas en las horas donde el viento es menos fuerte, generalmente en la noche. Estas baterías transforman la energía eléctrica en energía química para poder almacenarse.

1.7.5 Inversor. Es un dispositivo que se encarga de convertir la corriente continua que viene de las baterías en corriente alterna.<sup>16</sup>

1.7.6 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.

## 1.8 APLICACIONES

1.8.1 Generación eléctrica a escala “mini”. Son las turbinas de una potencia inferior a los 10 KW, aunque la generación de energía de esta tecnología es limitada puede ser suficiente para cubrir pequeños consumos, como viviendas o aplicaciones que requieren de una energía mínima y tiene un buen número de ventajas con respecto a la gran eólica que se refiere a los aerogeneradores de alta generación;

- Puede suministrar electricidad en lugares aislados de la red eléctrica
- Causa menor impacto visual que las máquinas grandes
- Genera la energía junto a los puntos de consumo, por lo que reduce las pérdidas
- Es accesible a muchos usuarios, sin apenas necesitar obra civil y su instalación es sencilla
- Funciona con vientos moderados y no requiere estudios de viabilidad complicados

---

<sup>16</sup> 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>

Son utilizados para el autoconsumo de edificaciones aisladas. Además, suelen ir acompañados de paneles solares fotovoltaicos formando parte de pequeños sistemas híbridos, incluyen unas baterías donde se almacena la energía sobrante para cuando no haya viento ni sol.

1.8.2 Bombeo de agua. Son aerobombas que extraen agua del subsuelo, funcionan bien con vientos moderados, por lo general cuenta con un número de pala entre 12 y 24 y su máximo rendimiento aerodinámico alcanza el 30%. Las instalaciones de molino suelen emplearse en explotaciones agropecuarias aisladas, cuyas necesidades de agua no sean elevadas, ya que su limitada potencia impide su aplicación con caudales grandes o a mucha profundidad.

El sistema de funcionamiento es sencillo: el molino comienza a trabajar a partir de vientos de 3 m/s y la rotación de la rueda múltipara acciona solidariamente, a través de la biela y los vástagos, la bomba de pistón colocada en el fondo del pozo que se quiere extraer el agua. La bomba gavián, cuenta con un pistón y un sistema de válvulas que van impulsando el agua por el interior de los tubos hasta que esta sale finalmente a la superficie.

1.8.3 Hidrógeno “Verde”. En el caso de la eólica, cuando haya viento se podría utilizar la electricidad generada por los aerogeneradores para extraer hidrógeno del agua mediante un proceso de electrolisis, una ventaja es que se podría almacenar para utilizarlo como combustible cuando no hubiese viento y los aerogeneradores estuvieran parados. Además, la pila de combustible permite utilizar el hidrógeno para transformarlo en electricidad y con ella mover un carro o calentar e iluminar un hogar.

Aunque de momento se trata de una hipótesis para el futuro, son muchas las empresas y los centros de investigación que tratan de poner a punto la pila de combustible y la tecnología necesaria para la obtención del hidrógeno a partir de energías limpias.

1.8.4 Desalinización. Mediante la aplicación del sistema de ósmosis inversa se puede actualmente desalar agua de mar, hoy en día las plantas necesitan un mínimo de 4KWh para desalar cada metro cubico, el aerogenerador puede suministrar esa energía, este sistema resolvería además la cuestión del impacto ambiental causado en las costas por la salmuera generado en la desalación.<sup>17</sup>

## 1.9 PARQUE EÓLICO JEPÍRACHI

Jeppírachi significa vientos del nordeste, en Wayuunaiki, legua nativa Wayuu; se localiza en la costa nororiental de la Costa Atlántica, en el municipio de Uribí.

---

<sup>17</sup> INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. Energía eólica. España 2006. 61 - 67 p.

Tiene una capacidad instalada de 19.5 MW, con 15 aerogeneradores de 1.3 MW, sometidos a los vientos alisios que soplan casi todo el año en esta parte de la península, a un promedio de 9.8 metros por segundo.

El parque entró en operación comercial plena el 19 de abril de 2004, y hace parte de un programa mayor para el aprovechamiento de la energía eólica en la Alta Guajira.

Jepírachi está registrado como Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) por la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático. Fue uno de los primeros proyectos MDL firmados en el país y uno de los primeros en todo el mundo, lo cual se constituye en un hito importante en la historia del mercado del carbono. Igualmente, las metodologías de estimación de emisiones y sobre todo las de concertación del proyecto con la comunidad Wayuu, fueron consideradas como ejemplares por el Banco Mundial y como referencias obligatorias para el desarrollo de proyectos similares en otras partes del mundo.<sup>18</sup>

Figura 18. Parque eólico Jepírachi



Fuente: EPM. Parque eólico Jepírachi. [En línea]. Colombia. [Consultado: 14 julio 2019]. Disponible en: <https://www.epm.com.co/site/home/institucional/nuestras-plantas/energia/parque-eolico>

---

<sup>18</sup> Ibid., p.1.

## 2. PARAMETROS Y REQUERIMIENTOS

### 2.1 MUNICIPIO DE SABOYÁ

La cabecera del municipio de Saboyá se encuentra a los 5°42'03" de latitud norte y 73°46'08" de longitud oeste a una altura de 2600 msnm, se encuentra ubicado en el departamento de Boyacá, Colombia. El área municipal abarca 246.9 Km2 en terreno montañoso, atravesado por el río Suarez y de clima frío.

Cuenta con dos vías de acceso principal, ubicadas sobre la vía nacional que conduce del municipio de Chiquinquirá al Municipio de Barbosa, El municipio de Saboyá presenta como divisiones administrativas el sector urbano y el sector rural. En la actualidad se reconoce como perímetro urbano el establecido por el inventario predial catastral. El sector rural del municipio está dividido en 13 veredas y un centro poblado conocido como Corregimiento de Garavito.

Las veredas más pequeñas se localizan hacia el sector occidental del municipio, puede explicarse por el alto número de divisiones territoriales en predios, la diversidad en el uso de la tierra, la de población que buscan unas formas de organización comunitaria y la cercanía a la cabecera municipal.

Figura 19. División política



Fuente: MUNICIPIO DE SABOYÁ. División política. [sitio web]. Saboyá, Colombia. 2017. [Consultado 1 marzo 2019]. Disponible en: <http://www.dapboyaca.gov.co/wp-content/uploads/2015/06/SABOYÁ-VEREDAL.pdf>

2.1.2 Geología estructural. El área queda limitada al oriente por la falla de Peña Blanca y al occidente por el núcleo del anticlinal.

- Relieve montañoso estructural erosional. Se ubica al oriente y occidente de la cabecera del municipio de Saboyá, en alturas entre 2800 y 3400 msnm, comprende relieves en materiales sedimentarios constituidos principalmente por alternancia de areniscas y lutitas conglomeraticas conocidas como Formación Areniscas de Chiquinquirá. Este gran paisaje es importante por los nacederos de agua los cuales abastecen al municipio, por presentar condiciones para el sometimiento y preservación de la biodiversidad y por ser área de acuíferos y a su vez tener un potencial de acuíferas altas.
- Las pendientes son: ligeramente inclinadas 3-7%, moderadamente inclinada 7-12% y escalonado 50-75%, los cuales corresponden a las veredas de Pantanos, Molino, Lajita, Monte de Luz, Velandia, Mata de Mora y Merchán.
- Los suelos son, en general, superficiales y moderadamente profundos, limitados en algunos sectores por la roca; texturas Franco Limosas, Franco Arcillosas, Francas y Franco Arenosas; estructuras blocosas subangulares y blocosas angulares moderadas; bien drenado; fertilidad natural, baja y moderada, destacándose el alto contenido de aluminio y la baja saturación de bases.<sup>19</sup>

2.1.1 Ubicación del aerogenerador. La ubicación del aerogenerador es a una altura de 3030 msnm, temperatura promedio 16 °C, relieve montañoso estructural, roca, presión 1014hPa equivalente a 1 atmosfera, humedad relativa del 82% promedio al día, el aerogenerador estará ubicado a 10 metros respecto a la casa. Ver Anexo A.

## 2.2 ENERGÍA ELÉCTRICA

El cubrimiento de servicio de energía en el sector urbano es de 96,5% y 71% para el resto del municipio.

La energía se ha definido como la capacidad o movimiento de hacer un trabajo, esta se encuentra presente en todos los lugares en forma de luz y calor, es la encargada de mover al mundo.

Las fuentes de energía o recursos energéticos son materiales o fenómenos que posee la naturaleza y son aprovechados de dos formas: fuentes renovables, las que al usarlas no se agotan; las no renovables, son las que se renuevan en un largo periodo de tiempo.

---

<sup>19</sup>Plan municipal de gestión del riesgo de desastres. [en línea]. Saboyá, Colombia, 2012. [Consulta: 26 diciembre 2018]. p. 10 - 11. Disponible en: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/374/PMGRD%20Saboyá.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

El planeta está lleno de energía y la fuente principal es el sol, el cual envía 170000 TW de energía, pero solo 40000 TW está disponible para la evaporación de agua el resto es reflejada para las capas de la atmosfera y radiada al espacio. 400 TW para otros tipos de movimientos de la tierra como el movimiento del aire, las olas. 40 TW para la fijación de la energía necesaria como la fotosíntesis. En si el sol es la fuente principal de energía del viento, la biomasa, la hidrogenaría y de la energía de las olas.

Las fuentes de energía más solicitadas son aquellas cuyo principal contenido de energía este concentrado en grandes cantidades en los principales depósitos como el petróleo, el carbón, el gas y el mineral de uranio. Esto quiere decir energía concentrada, diferente de energía difusa.

En el caso de las fuentes renovables, los recursos son prácticamente inagotables. La cantidad retenida diariamente es aproximadamente 8 kW/m<sup>2</sup>. Es posible explotar directamente esa energía con la ayuda de captadores tales como colectores planos o células fotovoltaicas que convierten la energía solar en electricidad.<sup>20</sup>

En Colombia la energía eléctrica proviene principalmente de plantas de generación hidráulica (77% aproximadamente y en una menor proporción de plantas de generación térmica (18%). Por lo tanto, al depender de los aportes hidrológicos, las épocas de sequía que se presentan durante eventos como el niño, hace indispensable contar con plantas de generación con energía firme.

Por estas consideraciones para suplir la demanda se encontró indispensable implementar un esquema de remuneración que permita hacer viable la inversión en los recursos de generación necesarios para atender la demanda de manera eficiente en condiciones críticas de abastecimiento hídrico, a través de la estabilización de los ingresos del generador. Este esquema está incorporado en la legislación colombiana desde la ley 143 de 1994, artículo 23.<sup>21</sup>

2.2.1 Potencia requerida. Según la empresa en el CODENSA, la carga instalada es el total de la carga correspondiente a una instalación o sistema eléctrico.

Es la suma de todas las potencias de los equipos y aparatos eléctricos conectados a la instalación, esta carga instalada es de 4KWh para una casa de 4 integrantes<sup>22</sup>; sin embargo, en la finca la empresa EBSA, empresa de energía de Boyacá S.A.E.S.P proporciona una carga instalada de 800 W lo cual está por debajo de la carga mínima requerida, se puede evidenciar en el recibo de la luz en el Anexo B.

---

<sup>20</sup> La energía como tema interdisciplinar en la educación ambiental, p 21-22

<sup>21</sup> CARGO POR CONFIABILIDAD. [en línea]. Colombia, 2017. [Consulta: 27 febrero 2018]. p. 4. Disponible en: <http://www.creg.gov.co/cxc/download/documentos/CargoxConfiabilidad.pdf>

<sup>22</sup> Enel CODENSA. Generalidades 7.1. Acometidas eléctricas y medidores. Definiciones. [Sitio web]. 2015. [Consultado: 1 marzo 2019]. Disponible en:

## 2.3 VIENTO

2.3.1 Tipo de viento. El conocimiento de los vientos es importante para la correcta utilización y ubicación de proyectos de este tipo. El viento sinóptico sopla prácticamente en la horizontal, lo que permite esquematizar su movimiento por un vector orientado en el sentido hacia el cual sopla y cuyo origen está situado en el lugar de observación.

La dirección del viento a nivel del suelo, medida generalmente a algunos metros sobre el mismo, fuertemente influenciada por la situación topográfica del lugar considerado.

La frecuencia de las direcciones no es siempre una característica general en consonancia con la situación isobárica media como puede ser la posición respectiva media de los anticiclones y de las depresiones en el transcurso de los años.

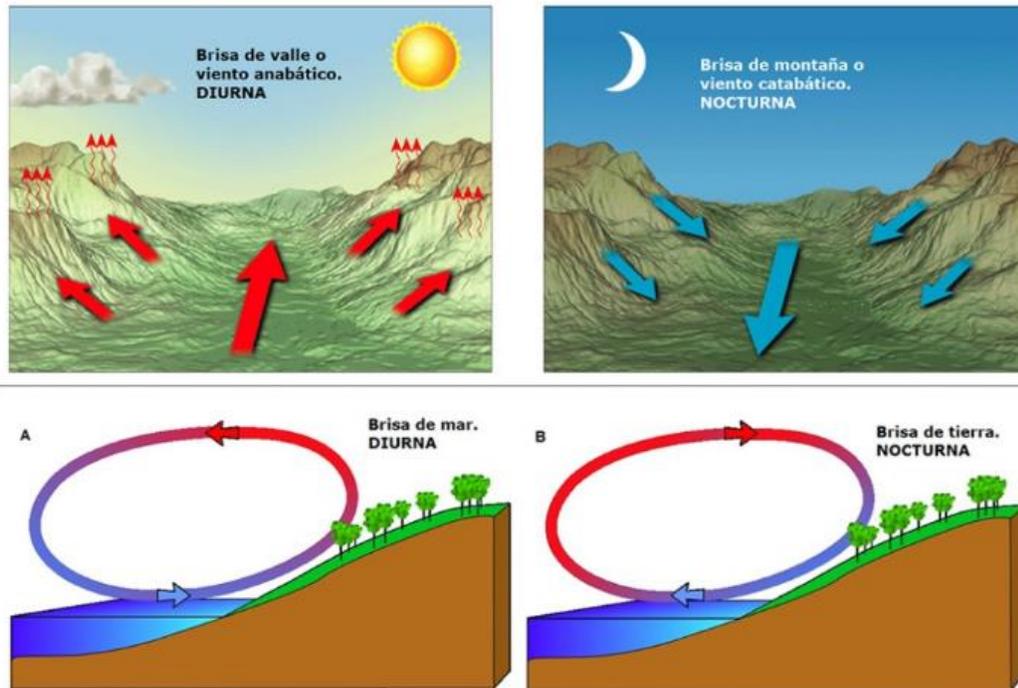
2.3.1.1 Brisas. Estas brisas son del aire tanto, tierra-mar en las costas como, tierra-agua en los lagos durante el día y la noche; en las faldas de las montañas el aire se calienta durante el día y se va hacia las alturas, mientras que en la noche el aire frío es más pesado y baja hacia los valles tal como se observa en la figura 20.<sup>23</sup>

---

[https://likinormas.micodensa.com/Norma/acometidas\\_medidores/generalidades\\_ae/generalidades\\_7\\_1\\_actualizacion\\_generalidades](https://likinormas.micodensa.com/Norma/acometidas_medidores/generalidades_ae/generalidades_7_1_actualizacion_generalidades)

<sup>23</sup> DÍEZ, Pedro. Energía eólica. [en línea]. Departamento de ingeniería eléctrica y energética. Universidad de Cantabria, España. p. 9. [Consulta: 1 marzo 2019].

Figura 20. Brisa en montañas y valles

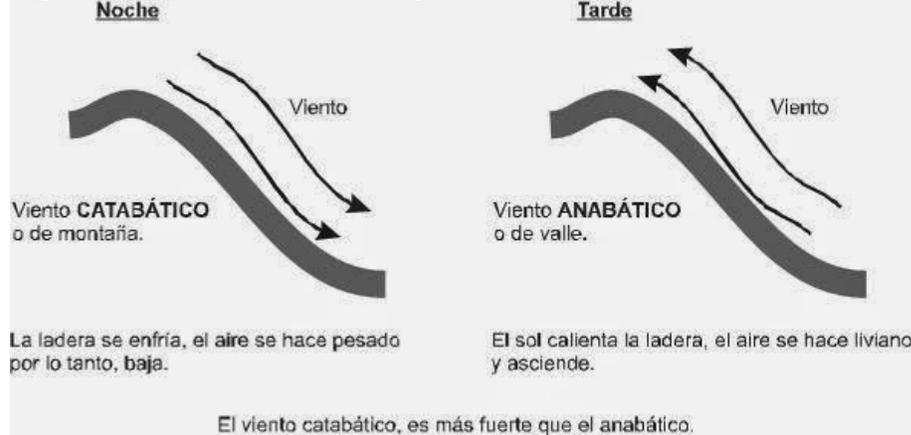


Fuente: TIEMPO. Brisas de montañas y valles. [sitio web]. Colombia, 2018. [Consulta: 1 marzo 2019]. Disponible en: <https://www.tiempo.com/noticias/divulgacion/brisas-los-vientos-que-te-refrescan.html>

Los movimientos característicos del aire durante el día y la noche dan lugar a las brisas. En los valles y en las zonas entre montañas afectan enormemente el potencial al aumentar la acción del viento, que varía en las alturas. Esta variación es consecuencia de la capa límite que se produce en el contacto de los fluidos viscosos con las superficies.

2.3.1.2 Vientos catabáticos y anabáticos. El viento catabático, es el producido por el descenso del aire fresco desde lugares altos o lugares bajos, en forma de brisa, a través de laderas y valles. El viento anabático es el que presenta un componente vertical ascendente, siendo opuesto al catabático, tal como se ve en la figura 21.

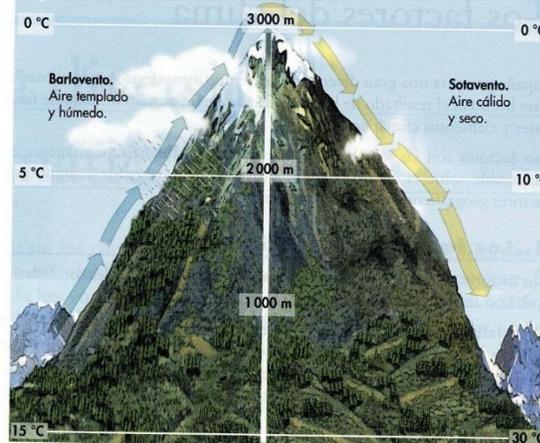
Figura 21. Viento catabático y anabático



Fuente: SISTEMA SOLAR. El viento. [sitio web]. España, 2018.  
[Consultado: 1 marzo 2019]. Disponible en:  
<http://misistemasolar.com/viento-catabatico/>

2.3.1.3 Föhn. Es un viento fuerte, seco y cálido, que se produce en ocasiones a sotavento en los sistemas montañosos, cuando es fuerte se presenta bajas presiones que avanza ocasionando fuertes vientos en la troposfera media y alta. Cuando se acerca a una montaña, el aire sube por la ladera de barlovento, enfriándose por debajo de la temperatura de condensación, formando nubes que se mantienen arrimadas a las cimas de las montañas, que provocan precipitaciones, por lo que la humedad del aire baja y el aire que bajo por sotavento baja seco, como se muestra en la figura 22.

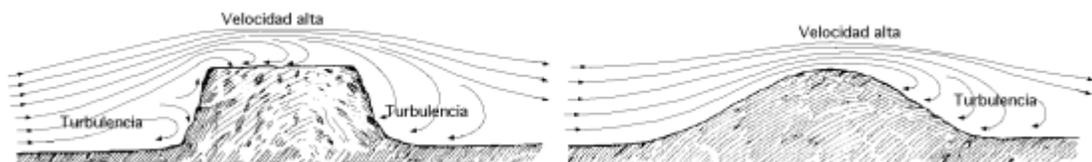
Figura 22. Föhn



Fuente: METEOROLOGÍA EN RED. ¿Qué es el efecto foehn?. [sitio Web]. 2017. [Consultado: 1 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.meteorologiaenred.com/efecto-foehn.html>

También influye en la velocidad del viento la forma del relieve de la superficie de la tierra por donde circula la corriente. Superficies de pendientes suaves y sin obstáculos son los mejores lugares de potencial eólico, puesto que se van juntando las líneas de corriente del fluido y hacen que su velocidad aumente, como se muestra en la figura 23.<sup>24</sup>

Figura 23. Influencia de obstáculos



Fuente: DÍEZ, Pedro. Energía eólica. [en línea]. Departamento de ingeniería eléctrica y energética. Universidad de Cantabria, España. p. 9. [Consulta: 1 marzo 2019].

2.3.2 Velocidad del viento. Este definido por dos parámetros esenciales que son la dirección y su velocidad. La dirección del viento conduce a la ejecución de la llamada rosa de los vientos.

<sup>24</sup> Ibid., p. 10

Las velocidades del viento varían entre 3 y 7 m/s, según diversas situaciones meteorológicas; en las costas es más elevada superando los 6 m/s, en otras regiones, en general, las velocidades son de 3 a 4 m/s, siendo bastante elevadas en las montañas, dependiendo de la altitud y la topografía.

La velocidad del viento es débil en las horas de la noche e incrementa a partir de la salida del sol, alcanzando su máxima velocidad entre las 12 y 16 horas solares. Para realizar la medida de la velocidad del viento es necesario utilizar el anemómetro, los cuales se pueden clasificar en anemómetros de rotación y anemómetros de presión y la dirección del viento se comprueba con una veleta.

El anemómetro de rotación más caracterizado es el de papillon, que es un molino de eje vertical con cazoletas en forma de semiesfera o el de aletas oblicuas de Jules Richard. El anemómetro de presión se basa en el método del tubo de Pitot.

En el cuadro 3 se observa las equivalencias de velocidad del viento (adaptada de Retallack, 1973) donde se tienen unas escalas que determinan el tipo o nombre del viento que pasa en ese instante, a la vez se evidencia la gravedad de la velocidad del viento.

Cuadro 3. Equivalencias de velocidad del viento

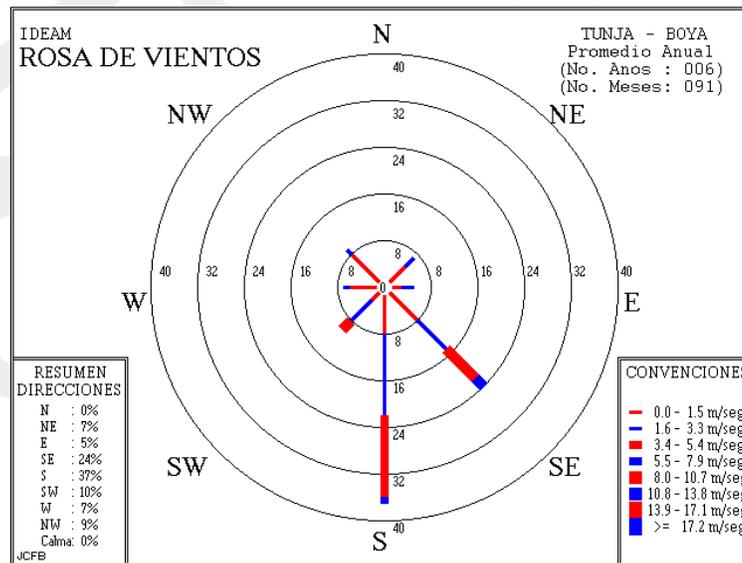
Fuerza Beaufort	Nombre	Equivalencia de la velocidad a una altura de 10 metros sobre terreno llano y descubierto			Características para la estimación de la velocidad en tierra
		Nudos	m/s	km/h	
0	Calma	1	0,0 - 0,2	1	Calma, el humo se eleva verticalmente.
1	Ventolina	1,0 - 3,0	0,3 - 1,5	1,0 - 5,0	La dirección del viento se revela por el movimiento del humo, pero no por las veletas.
2	Brisa muy débil	4,0 - 6,0	1,6 - 3,3	6,0 - 11,0	El viento se percibe en el rostro; las hojas se agitan, la veleta se mueve.
3	Brisa débil	7,0 - 10,0	3,4 - 5,4	12,0 - 19,0	Hojas y ramitas agitadas constantemente; el viento despliega las banderolas.
4	Brisa moderada	11,0 - 16,0	5,5 - 7,9	20 - 28	El viento levanta el polvo y hojitas de papel; ramitas agitadas.
5	Brisa fresca	17 - 21	8,0 - 10,7	29 - 38	Los arbustos con hojas se balancean; se forman olitas con cresta en las aguas interiores (estanques).
6	Viento fresco	22 - 27	10,8 - 13,8	39 - 49	Las grandes ramas se agitan; los holas telegráficos silban; el uso del paraguas se hace difícil.
7	Viento fuerte	28 - 33	13,9 - 17,1	50 - 61	Los arboles enteros se agitan; la marcha en contra del viento se dificulta.
8	Viento duro	34 - 40	17,2 - 20,7	62 - 74	El viento rompe las ramas; es imposible la marcha contra viento.
9	Viento muy duro	41 - 47	20,8 - 24,4	75 - 88	El viento ocasiona ligeros daños en las viviendas (arranca cañerías, chimeneas, tejados)
10	Temporal	48 - 55	24,5 - 28,4	89 - 102	Raro en los continentes; arboles arrancados; importantes daños en las viviendas.
11	Borrascas	56 - 63	28,5 - 32,6	103 - 117	Observado muy raramente; acompañado de extensos destrozos.
12	Huracán	64 o mas	32 o mas	118 o mas	Estragos graves y extensos.

Fuente: elaboración propia, con base en. VELOCIDAD DEL VIENTO. UNAL. [Consultado 1 marzo 2019]. Disponible en: [http://bdigital.unal.edu.co/7965/25/10214128.\\_1989\\_Parte9.pdf](http://bdigital.unal.edu.co/7965/25/10214128._1989_Parte9.pdf)

2.3.2.1 Velocidad del viento en la finca “El alto del Gavilán”, en Boyacá. Se tomaron datos del IDEAM y se tomaran datos propios a través del anemómetro en diferentes puntos.

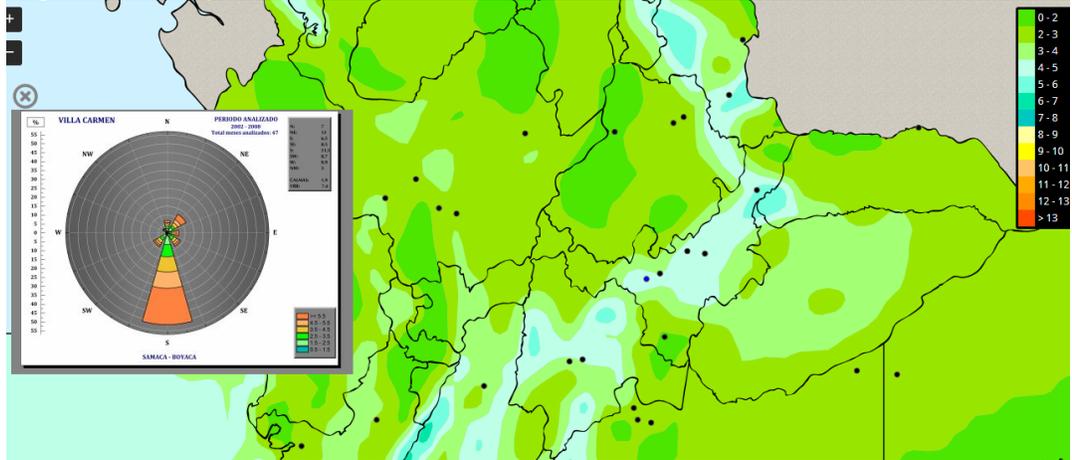
- Datos IDEAM. Se tiene una fuente cercana a la ubicación donde se pretende instalar el aerogenerador, en Boyacá el promedio anual de velocidades oscila de 6 a 7 m/s que equivale al rango de 21.6 a 25.2 Km/h.

Figura 24. Rosa de los vientos en Tunja, Boyacá



Fuente: INFORMACIÓN AERONÁUTICA. Climatología de los principales aeropuertos. [sitio web]. Régimen anual de viento. [Consultado: 4 marzo 2019]. Disponible en: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/rosas/viento.htm>

Figura 25. Mapa velocidad del viento en Colombia



Fuente: ATLAS DE VIENTOS DE COLOMBIA. UPTC. [sitio web]. [Consultado: 4 marzo 2019]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

- Datos obtenidos a través del anemómetro. Se seleccionaron varios puntos para la toma de estos datos. Estos datos fueron tomados en puntos diferentes de la finca “El alto del Gavilán”, en Boyacá.

Tabla 1. Velocidad del viento

Toma	Velocidad del viento	
	Km/h	m/s
1	5	1.39
2	9.1	2.53
3	13.3	3.69
4	12.6	3.50
5	14	3.89
6	20.5	5.69
7	15.9	4.42

Fuente: elaboración propia.

Se tomó el punto donde hubo mayor velocidad del viento y en distintos momentos del día se realizaron 3 tomas más.

Tabla 2. Punto seleccionado

Punto seleccionado		
Toma	Km/h	m/s
1	20.5	5.69
2	24	6.67
3	26.7	7.42

Fuente: elaboración propia.

### 3. ALTERNATIVAS DE DISEÑO

#### 3.1 PLANTEAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS

Para la selección de alternativas es importante tener en consideración los requerimientos anteriormente mencionados, con unos criterios de selección que se verán más adelante en la tabla 3.

3.1.1 Alternativa N° 1. Aerogenerador de eje horizontal tripala. Este tipo de aerogeneradores están especialmente para instalaciones fuera de red o más comúnmente conocidas como instalaciones de auto consumo, ya que son capaces de generar energía suficiente para cargar baterías desde 300 Ah hasta 18000 Ah.

Su uso está recomendado no solo para la generación de electricidad de uso doméstico, sino para aplicaciones como bombeo de agua, iluminación exterior, sistemas combinados de energía fotovoltaica y eólica.<sup>25</sup>

Cuadro 4. Eje horizontal tripala

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
Velocidad de arranque	2.5 m/s	Velocidad máxima de operación	45 m/s
Velocidad nominal	10 m/s	Velocidad de giro del generador	200 rpm
Turbina			
Altura total	6.4 m	Diametro total	6.4 m
Palas del rotor: numero de palas	3	Altura de palas	3.2 m
Generador de imanes permanentes			
Tipo de generador	Imanes permanentes trifasico		
Aerogenerador			
Altura	12 m		
Potencia	5 KWh		

Fuente: elaboración propia, con base en. NOHANA. Eólica. Catálogo de productos. [en línea]. Málaga, España. [Consultado 5 marzo 2019]. Disponible en: <http://www.nohana3000.com/wp-content/uploads/110823-Catalogo-Espa%C3%B1ol-Eolica.pdf>

<sup>25</sup>NOHANA. Eólica. Catálogo de productos. [En línea]. Málaga, España. [Consultado: 5 marzo 2019]. p. 17. Disponible en: <http://www.nohana3000.com/wp-content/uploads/110823-Catalogo-Espa%C3%B1ol-Eolica.pdf>

Figura 26. Aerogenerador tripala



Fuente: SCIELO. Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador de eje vertical para oxigenar estanques de peces. [sitio web]. México. 2012. [Consultado: 5 marzo 2019]. Disponible en:

[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342012000900002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000900002)

3.1.2 Alternativa N° 2. Aerogenerador de eje vertical Darrieus Tipo H. Aerogenerador de 5KWh de potencia, con velocidad de arranque de 3,5 m/s, velocidad nominal de 11 m/s y velocidad máxima de operación de 18 m/s. Es un sistema mini eólico totalmente silencioso perfecto para instalaciones agrícolas, ganaderas, esto se puede montar tanto en suelo como en cubierta siempre con un estudio previo. Rotor de acero inoxidable con sistema de rodamientos fuerte y compacto, al ser un sistema mecánico vertical no requiere de un difícil mantenimiento, al estar sus mecanismos totalmente compensados.<sup>26</sup>

---

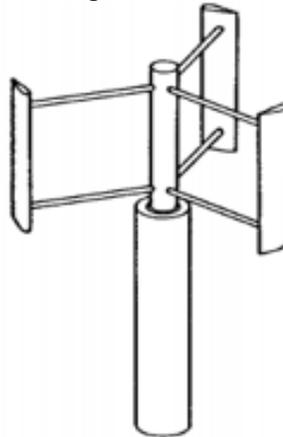
<sup>26</sup> TECHNOWIND. Aerogeneradores Techno Wind. Catálogo 201t. [En físico]. FICOSA renovables [Consultado: 5 marzo 2019]. p. 10.

Cuadro 5. Aerogenerador Darrieus tipo H

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
Velocidad de arranque	3.5 m/s	Velocidad maxima de operación	18 m/s
Velocidad nominal	11 m/s	Velocidad de giro del generador	220 rpm
Turbina			
Altura total	14,4 m	Diametro total	5 m
Palas del rotor: numero de palas	3	Altura de palas	5m
Generador de imanes permanentes			
Tipo de generador	Imanes permanentes trifasico		
Mástil			
Altura mástil	11 m		
Potencia	5 KWh		

Fuente: Elaboración propia, basada en: TECHNOWIND. Aerogeneradores Techno Wind. Catálogo 201t. [en físico]. FICOSA renovables [Consultado: 5 marzo 2019]. p. 10.

Figura 27. Aerogenerador Darrieus tipo H



Fuente: RIVERO, Alonso. Análisis CFD sobre la influencia de la solidez en aerogeneradores H Darrieus con perfiles asimétricos NACA 7425. [en línea]. Proyecto de grado para el título de Ingeniería Mecánica. Valladolid, España. [Consultado 5 marzo 2019]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/1434/96f7c1a86b9acf3292f845327ef37b62385a.pdf>

3.1.3 Alternativa N° 3. Aerogenerador de eje horizontal tipo difusor. Se adapta a las condiciones del diseño, basándose en la teoría de Venturi, donde se aumenta la velocidad del viento con la disminución del área de la sección transversal, de un tamaño adecuado para realizar una instalación fácil y menos costosa que otros aerogeneradores, el mantenimiento que se le realiza es mínimo y no requiere de herramientas de alto costo.<sup>27</sup>

Cuadro 6. Aerogenerador de eje horizontal tipo difusor

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
Velocidad de arranque	2.5 m/s	Velocidad máxima de operación	18 m/s
Velocidad nominal	5 m/s	Velocidad de giro del generador	200 rpm
Turbina			
Altura total	1.8 m	Diametro total	1.8 m
Palas del rotor: numero de palas	8	Altura de palas	0.89 m
Generador de imanes permanentes			
Tipo de generador	Imanes permanentes trifasico		
Aerogenerador			
Altura	3 m		
Potencia	4 KWh		

Fuente: elaboración propia, con base en. Fuente: RIVERO, Alonso. Análisis CFD sobre la influencia de la solidez en aerogeneradores H Darrieus con perfiles asimétricos NACA 7425. [en línea]. Proyecto de grado para el título de Ingeniería Mecánica. Valladolid, España. p. 4. [Consultado 5 marzo 2019]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/1434/96f7c1a86b9acf3292f845327ef37b62385a.pdf>

---

<sup>27</sup> ALONSO. Op. cit., p. 4

Figura 28. Aerogenerador tipo difusor



Fuente: ELECTRICA PERU. La turbina “Lente de Viento” podría triplicar la generación de energía eólica. [sitio web]. Perú, 2010. [Consultado: 13 mayo 2019]. Disponible en: <https://electricaperu.wordpress.com>

### 3.2 EVALUACION DE ALTERNATIVAS

A través del método de ponderación lineal (Scoring), se realizará la evaluación de las alternativas de diseño donde elegirá la mejor alternativa que cumpla con los parámetros y requerimientos propuestos.

Se tiene en el modelo de ponderado de la ecuación 1;

Ecuación 1. Score para la alternativa

$$S_j = \sum_i w_i r_{ij}$$

Donde;

$r_{ij}$ : Rating de la Alternativa j en función del criterio i.

$w_i$ : Ponderación para cada criterio i.

$S_j$ : Score para la alternativa j.

Asignación de la ponderación  $w_i$  para cada criterio mediante el empleo de una escala de 5 puntos:

1 = Muy poco importante.

2 = Poco importante.

3 = Importancia media.

4 = Algo importante.

5 = Muy importante.

Se plantearon diferentes criterios y teniendo en cuenta lo anterior se designó la ponderación para cada uno de ellos.

- Velocidad de arranque de la turbina. Es un criterio importante debido a que es un dato fundamental para el diseño de la turbina, es un dato promedio estándar, previamente establecido con una velocidad máxima de 5.31 m/s.
- Dimensión. Teniendo en cuenta la ubicación, el espacio en donde se pretende realizar el diseño es reducido para la construcción del aerogenerador.
- Fácil mantenimiento. Ya que este sistema no va estar controlado una persona especializada en mantenimiento, se sugiere que el mantenimiento sea el mínimo y a la vez reduciendo costos.
- Montaje. Se va adaptar a la comodidad de la persona que realice la instalación, requiriendo los mínimos elementos para la instalación.
- Capacidad de entrega. Este criterio también es de alta importancia debido a que el requerimiento mínimo de potencia es de 4 KW.
- Ruido. Tiene menor peso, pero también es importante mantener un nivel de Db bajos, para no generar contaminación auditiva, ya que va estar cerca de la vivienda y de la ganadería.
- Costos. Es un criterio importante, porque se busca mayor economía en el diseño.
- Impacto ambiental. La zona en la se pretende instalar el aerogenerador es de mucha vegetación, por lo cual es importante tener un impacto ambiental moderado.
- Materiales. Según la humedad relativa del sector estos materiales deben ser resistentes a la humedad y medio ambiente.

Tabla 3. Criterios de selección

Criterios	Ponderación $W_i$
Facilidad de arranque de la turbina	5
Dimensión	4
Fácil mantenimiento	3
Montaje	4
Capacidad de entrega	5
Ruido	3
Costos	5
Impacto ambiental	4
Material	5

Fuente: elaboración propia.

Establecer el rating de satisfacción para cada alternativa empleando una escala de 9 puntos:

1 = Extra bajo.

2 = Muy bajo.

3 = Bajo.

4 = Poco bajo.

5 = Medio

6 = Poco alto.

7 = Alto.

8 = Muy alto.

9 = Extra alto.

Tabla 4. Puntaje para cada alternativa

Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Facilidad de arranque de la turbina	7	8	9
Dimensión	7	8	9
Facilidad de mantenimiento	5	8	9
Fácil instalación	5	7	9
Capacidad de entrega	9	7	5
Ruido	7	9	7
Costos	6	7	8
Impacto ambiental	5	8	9
Material	9	9	9

Fuente: elaboración propia.

Se calcula el Score para cada alternativa, el que obtenga el valor más alto quiere decir que es la mejor alternativa a recomendar.

Tabla 5. Evaluación Scoring

Criterios	Ponderación $W_i$	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Facilidad de arranque de la turbina	5	7	8	9
Dimensión	4	7	8	9
Facilidad de mantenimiento	3	5	8	9
Fácil instalación	4	5	7	9
Capacidad de entrega	5	9	7	5
Ruido	3	7	9	7
Costos	5	6	7	8
Impacto ambiental	4	5	8	9
Material	5	9	9	9
Score $S_j$		259	298	311

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con el ponderado lineal Scoring la mejor alternativa a recomendar es el aerogenerador de eje horizontal difusor.

## 4. DISEÑO DETALLADO

### 4.1 POTENCIAL EÓLICO

Con los valores del viento obtenidos a través del anemómetro, se utiliza la velocidad mayor obtenida durante el día, en la temporada de diciembre – enero donde los vientos en esta zona son menores al resto del año esta velocidad es de 7.43 m/s; el potencial eólico se define por la ecuación 2.

#### Ecuación 2. Potencial eólico

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

Fuente: VILLARRUBIA, Miguel.  
Ingeniería De La Energía Eólica.  
México Barcelona: Alfaomega:  
Marcombo, México Barcelona:  
Alfaomega: Marcombo, 2013. p.  
94. [Consultado: 12 mayo 2019].

Donde;

$P_d$  = Potencia disponible (W).

$\rho$  = Densidad del aire a 16 °C (Kg/m<sup>3</sup>).

$A$  = Área de barrido (m<sup>2</sup>).

$F_e$  = Factor de energía eólico.

$v$  = velocidad máxima del viento (m/s).

Para la densidad es necesario utilizar un recurso para saber la altura sobre el nivel del mar utilizando Google maps se sabe que la altura es de 3030 msnm y la temperatura promedio es de 16 °, se utiliza la ecuación 3.

#### Ecuación 3. Densidad en el sitio

$$\rho_{sitio} = \rho_{aire} * \frac{288 K}{T + 273} * e^{-\frac{h}{8435msnm}}$$

Donde;

$T$  = Temperatura (°C).

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

$$\rho = 1.225 \frac{kg}{m^3} * \frac{288 K}{16 ^\circ C + 273} * e^{-\frac{3030 msnm}{8435 msnm}} = 0.852 \frac{kg}{m^3}$$

Para el factor de energía eólica es necesario usar herramientas estadísticas para determinar la desviación típica y el factor de forma.

Tabla 6. Periodo del viento anual

Intervalo de clase	Centro de la clase	Frecuencia de la clase	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada	Frecuencia acumulada	Productos	
Periodo	vi (m/s)	ni (días)	fi = ni/N	Fi	F1' = 1-Fi	f <sub>i</sub> *vi	f <sub>i</sub> vi <sup>2</sup>
Enero	3.9	31	0.085	0.085	0.915	0.331	1.292
Febrero	3.7	28	0.077	0.170	0.830	0.284	1.050
Marzo	3.7	31	0.085	0.247	0.753	0.314	1.163
Abril	3.6	30	0.082	0.332	0.668	0.296	1.065
Mayo	4.3	31	0.085	0.414	0.586	0.365	1.570
Junio	4.4	30	0.082	0.499	0.501	0.362	1.591
Julio	4.6	31	0.085	0.581	0.419	0.391	1.797
Agosto	4.9	31	0.085	0.666	0.334	0.416	2.039
Septiembre	4.3	30	0.082	0.751	0.249	0.353	1.520
Octubre	3.5	31	0.085	0.833	0.167	0.297	1.040
Noviembre	3.3	30	0.082	0.918	0.082	0.271	0.895
Diciembre	3.9	31	0.085	1.000	0.000	0.331	1.292
Total	48.1	365					

Fuente: elaboración propia, con base en. ATLAS DE VIENTOS DE COLOMBIA. UPTC. [sitio web]. [Consultado: 12 marzo 2019]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

Tabla 7. Intervalos del viento

Intervalo de la clase	Centro de la clase	Frecuencia de la clase	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada "menor o igual que"	Frecuencia relativa acumulada "mayor que"	Producto		
(m/s)	vi (m/s)	ni (días)	fi = ni/N	Fi	Fi' = 1 - Fi	<V> = $\frac{\sum f_i v_i}{\sum f_i}$	f_i v_i^2	$\delta = \frac{\sum f_i (v_i - \langle v \rangle)^2}{\sum f_i}$
0 ≤ v ≤ 1	0.50	0	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
1 < v ≤ 2	1.50	0	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
2 < v ≤ 3	2.50	30	0.08	0.08	0.92	0.21	0.51	0.14
3 < v ≤ 4	3.50	85	0.23	0.32	0.68	0.82	2.85	0.30
4 < v ≤ 5	4.50	120	0.33	0.64	0.36	1.48	6.66	0.13
5 < v ≤ 6	5.50	130	0.36	1.00	0.00	1.96	10.77	0.25
Total		365				4.46	20.80	0.92

Fuente: elaboración propia, con base en. ATLAS DE VIENTOS DE COLOMBIA. UPTC. [sitio web]. [Consultado: 12 marzo 2019]. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>

A partir de los resultados que se obtuvieron, se determina la velocidad media anual y esta dio 4.46 m/s, la desviación media es igual a 0.92 con estos datos se halla el factor de forma con la ecuación 4.

Ecuación 4. Factor de forma

$$k = 0.9791 * \left( \frac{\langle v \rangle}{\delta} \right)^{1.1058}$$

Donde;

k = Factor de forma.

<v> = Velocidad media anual (m/s).

σ = Desviación típica (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>).

La constante de conversión 0.9791 se utiliza para cancelar las unidades de metros por segundos y así el factor de forma queda constante.

$$k = 0.9791 * \left( \frac{4.53 \frac{m}{s}}{0.92 \frac{m^2}{s^2}} \right)^{1.1058} = 5.609$$

Interpolando el factor de forma de la distribución Weibull K del libro de Villarubia<sup>28</sup> para obtener el factor de energía eólica, el cual, da como resultado una constante, con valor 1.13.

Para el área de barrido se utiliza la ecuación 5.

Ecuación 5. Área de barrido

$$A = \frac{2 * E_d}{\eta_{ea} * k_t * T * \rho * v^{*3}}$$

Fuente: VILLARRUBIA, Miguel. Ingeniería De La Energía Eólica. México Barcelona: Alfaomega: Marcombo, México Barcelona: Alfaomega: Marcombo, 2013. p. 247. [Consultado: 12 mayo 2019].

Donde;

A = Área de barrido (m<sup>2</sup>).

E<sub>d</sub> = Energía eléctrica demandada anual (KWh/año).

η<sub>ea</sub> = Rendimiento eléctrico global anual.

K<sub>t</sub> = Coeficiente global de energía.

T = Periodo de tiempo (8760 horas anuales).

ρ = Densidad (kg/m<sup>3</sup>).

v\* = Velocidad eficaz (m/s).

Para la energía eléctrica demandada anual se tiene en cuenta que la energía eléctrica demandada es de 4KWh por 24 h que es el tiempo de operación 96 KWh/día, este se pasa a anual de la siguiente manera.

Ecuación 6. Energía eléctrica demandada anual

$$E_d = 4 \frac{KWh}{día} * \frac{1 día}{24 h} * \frac{8760 h}{1 año} = 1460 \frac{KWh}{año}$$

---

<sup>28</sup> Fuente: VILLARRUBIA, López, Miguel, Ingeniería de la Energía eólica, 2013, Barcelona España. [Consultado 15 marzo 2019]. p. 73

La velocidad efectiva se halla utilizando el factor de energía y la velocidad media anual de la siguiente manera:

Ecuación 7. Velocidad efectiva

$$v^* = Fe^{\frac{1}{3}} * < V >$$

$$v^* = 1.13^{\frac{1}{3}} * 4.46 \frac{m}{s} = 4.65 \frac{m}{s}$$

Para el rendimiento eléctrico global medio se toma un valor de 0.30, y para hallar el coeficiente global de energía los factores de comportamiento (kc) y de utilización (ku), que son necesarios para hallar el factor de corrección (kt), por esta razón se toma que el producto entre kc, ki, ka, kp, ku es igual a 0,9<sup>29</sup> y se multiplica por el coeficiente de corrección por densidad kd que se halla de la siguiente forma.

Ecuación 8. Coeficiente de corrección por densidad

$$k_d = \left( \frac{288}{T + 273} \right) * e^{-\frac{h}{8435}}$$

Donde;

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

T = Temperatura (°C).

$$k_d = \left( \frac{288}{16 + 273} \right) * e^{-\frac{3030}{8,435}} = 0.7$$

Por tanto, kt;

$$kt = 0.9 * 0.7 = 0.63$$

Reemplazando los valores obtenidos, se determina el área de barrido; un W equivale a J/s, y un J equivale a Kg\*m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>.

$$A = \frac{2 * 1460 * 10^3 \frac{Wh}{año}}{0.3 * 0.63 \frac{m^2}{s^2} * 8760 \frac{h}{año} * 0.852 \frac{kg}{m^3} * 4.65 \frac{m}{s}} = 20.76 m^2$$

El diámetro del aerogenerador se determina de la siguiente manera.

---

<sup>29</sup> Ibid., p. 248.

Ecuación 9. Diámetro

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 20.76 \text{ m}^2}{\pi}} = 5.14 \text{ m}$$

Con estos valores hallados se reemplazan para hallar el potencial eólico.

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

$$P_d = \frac{1}{2} * 0.852 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 20.76 \text{ m}^2 * 1.13 * \left(7.42 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 = 4.09 \text{ kW}$$

El potencial eólico, es el potencia que entrega el sector a las condiciones anteriores, este potencial es igual a 4.09 kW.

#### 4.2 TOBERA

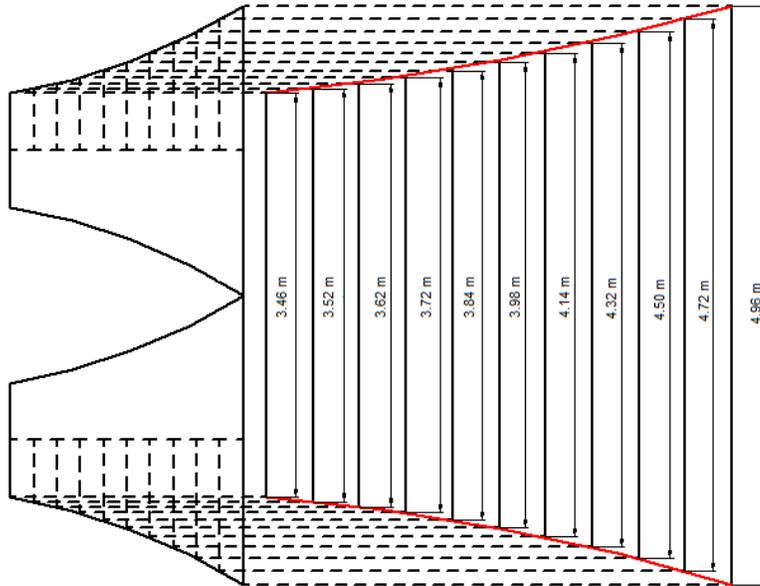
El diseño de la tobera, es hecho por los autores, donde el material de la tobera es en aluminio aleado 6061, dimensiones en el Anexo H, para la fabricación de la tobera se tiene que hacer el desarrollo de la lámina de la tobera que se puede observar en la Figura 30.

Figura 29. Tobera



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Desarrollo tobera



Fuente: elaboración propia.

### 4.3 DISEÑO DE LOS ÁLABES

Para la selección de los álabes se tiene en cuenta los siguientes factores.

- Número de Reynolds (Re), para la determinación del perfil aerodinámico, este factor varió de acuerdo a las diferentes condiciones del flujo de viento y del sector donde se va a ubicar el aerogenerador.

Ecuación 10. Número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho * v * l}{\mu} = \frac{v * l}{\vartheta}$$

Fuente: BASTIANON, Ricardo. Cálculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas, 2008. [Consultado: 16 marzo 2019]. p. 8.

Donde;

Re = Número de Reynolds.

$\rho$  = Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>).

v = velocidad del viento (m/s).

$l$  = longitud de la cuerda del perfil del álabe (m).

$\mu$  = Viscosidad dinámica (Kg/m s).

$\vartheta$  = Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s).

La viscosidad cinemática se obtiene del Anexo C donde a 1 atmosfera, el valor se interpola para 16 °C y el valor es  $1.4792 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s.

Para determinar el valor promedio de la longitud de la cuerda, se usa la ecuación 11.

Ecuación 11. Longitud de la cuerda

$$l = \frac{S * \pi * R}{N}$$

Donde;

$l$  = longitud de la cuerda (m).

$S$  = Solidez.

$R$  = Radio de la pala (m).

$N$  = Número de palas.

Para hallar la solidez conociendo que la relación de la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento para un aerogenerador bipala este coeficiente es  $\lambda$  igual a 5, según el libro de Bastianon<sup>30</sup> y se utiliza la ecuación 12, que solo se puede usar en casos donde la velocidad específica sea menor de 10.

Ecuación 12. Solidez

$$S = \frac{0.872}{\lambda} - 0.086$$

Fuente: BASTIANON, Ricardo. Energía del viento y Diseño de turbinas eólicas. [Consultado 16 marzo 2019].

$$S = \frac{0.872}{5} - 0.086$$

---

<sup>30</sup> BASTIANON. Op.cit., p 31.

$$S = 0.09$$

Se reemplaza la solidez en la ecuación para determinar la longitud de la cuerda.

$$l = \frac{0.09 * \pi * 0.77 \text{ m}}{2}$$

$$l = 0.11 \text{ m}$$

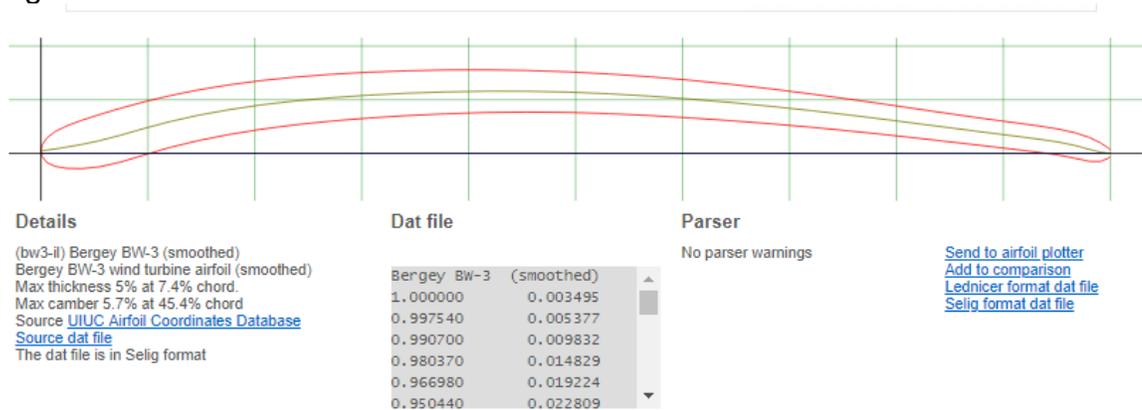
Se reemplaza para hallar el número de Reynolds.

$$Re = \frac{7.56 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.11 \text{ m}}{1.4792 * 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}$$

$$Re = 55634.9$$

Como se puede observar se obtuvo un flujo turbulento, con este número de Reynolds y apoyándose de la base de datos Airfoil Tools se puede obtener el perfil para el aerogenerador el cual se tendrá a consideración el que tenga la mayor relación de coeficiente de arrastre con coeficiente de sustentación  $C_l/C_{dmax}$ , los perfiles seleccionados son los siguientes;

Figura 31. Perfil BW-3



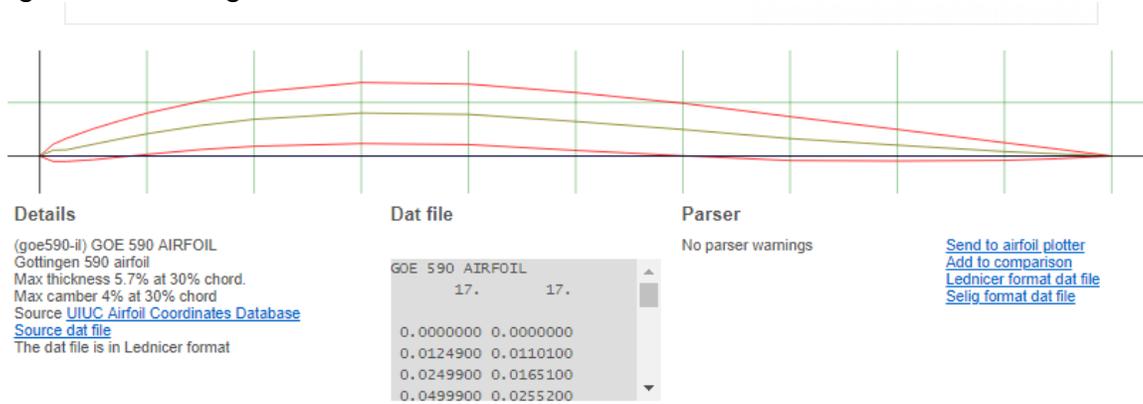
Fuente: AIRFOIL TOOLS. Bergy BW-3 (smoothed) (bw3-il). Bergy BW-3 (smoothed) - Bergy BW-3 wind turbine airfoil (smoothed). [en línea]. [Consultado: 17 marzo 2019]. Disponible en: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=bw3-il>

Figura 32. Perfil goe391



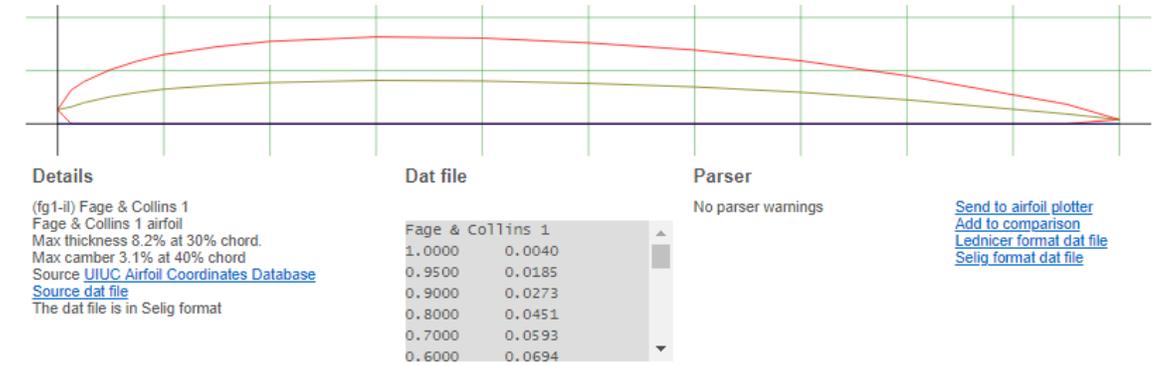
Fuente: AIRFOIL TOOLS. GOE 391 AIRFOIL (goe391-il). GOE 391 AIRFOIL - Gottingen 391 airfoil. [en línea]. [Consultado: 17 marzo 2019]. Disponible en: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=goe391-il>

Figura 33. Perfil goe590



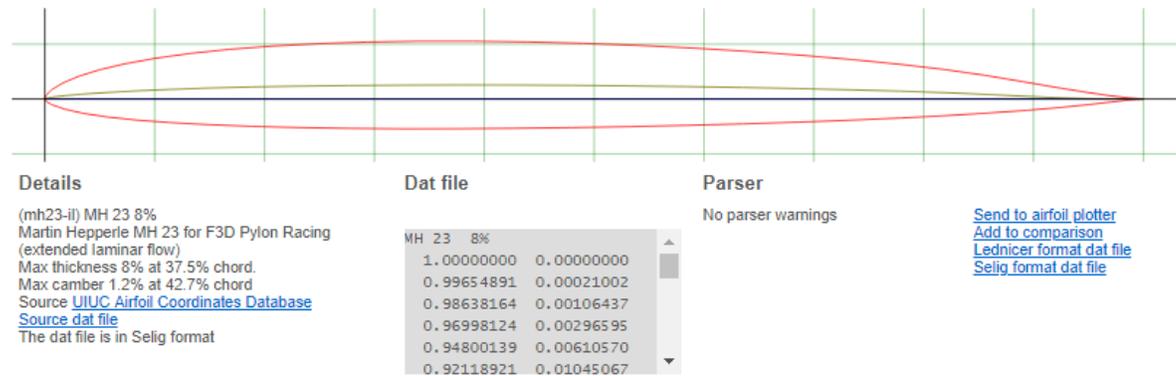
Fuente: AIRFOIL TOOLS. GOE 590 AIRFOIL (goe590-il). GOE 590 AIRFOIL - Gottingen 590 airfoil. [en línea]. [Consultado: 17 marzo 2019]. Disponible en: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=goe590-il>

Figura 34. Perfil fg1



Fuente: AIRFOIL TOOLS. Fage & Collins 1 (fg1-il) Xfoil prediction polar at RE=50,000 Ncrit=9. [en línea]. [Consultado: 17 marzo 2019]. Disponible en: <http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-fg1-il-50000>

Figura 35. Perfil mh23



Fuente: AIRFOIL TOOLS. MH 23 8% (mh23-il). MH 23 8% - Martin Hepperle MH 23 for F3D Pylon Racing (extended laminar flow) [en línea]. [Consultado: 17 marzo 2019]. Disponible en: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=mh23-il>

Para estos perfiles se obtuvieron los siguientes datos y se selección el perfil Bergey BW-3.

Tabla 8. Datos Airfoil Tools

Perfil	Cl/Cdmax	$\alpha$	Cl	Cd
Bergey BW-3	46.73	5.5°	1.1387	0.02437
Goe 391	39.62	5°	0.7888	0.01991
Goe 590	37.3	5.75°	0.8437	0.02262
Fage & Collins 1	37.88	4.75°	0.9053	0.0239
MH 23 8%	34.07	5°	0.7018	0.0206

Fuente: elaboración propia, con base en. Airfoil Tools. [sitio web]. [Consultado: 17 marzo 2019] Disponible en: <http://airfoiltools.com/>

Para diseñar los álabes se divide en 5 secciones del total de cada radio.

Tabla 9. Sección Álabes

Sección	Álabe 1 (m)	Álabe 2 (m)	Álabe 3 (m)	Álabe 4 (m)	Álabe 5 (m)	Álabe 6 (m)
1	0.77	0.68	0.60	0.52	0.46	0.40
2	0.62	0.54	0.48	0.42	0.40	0.39
3	0.46	0.41	0.36	0.31	0.30	0.29
4	0.31	0.27	0.24	0.21	0.20	0.18
5	0.15	0.14	0.12	0.10	0.09	0.08

Fuente: elaboración propia.

Se procede a determinar la longitud óptima de la cuerda con la ecuación 13.

### Ecuación 13. Longitud de cuerda óptima

$$l_{optima} = \frac{2 * \pi * R * 8}{N * 9 * Cl * \lambda^2 * \left(\frac{r}{R}\right)}$$

Fuente: DÍEZ, Pedro. Energía eólica. [en línea]. Departamento de ingeniería eléctrica y energética. Universidad de Cantabria, España. p. 76. [Consulta: 17 marzo 2019].

Donde;

$L_{optima}$  = Longitud de la cuerda optima (m).

R = Radio de la pala (m).

r = Radio de la sección (m).

N = Número de palas.

Se determina para la sección 1 del álabe 1 la longitud optima de la cuerda.

$$l_{optima} = \frac{2 * \pi * 0.77 \text{ m} * 8}{2 * 9 * 1.1387 * 5^2 * \left(\frac{0.77 \text{ m}}{0.77 \text{ m}}\right)}$$

$$l_{optima} = 0.08 \text{ m}$$

Las palas tienen una variación a lo largo de su trayectoria, esta variación es conocida como ángulo de calaje  $\beta$ , para hallar este ángulo es necesario conocer el ángulo formado entre el plano de giro de la pala  $\theta$  y la velocidad relativa. Para hallar el ángulo  $\theta$  se utiliza la ecuación 14.

### Ecuación 14. Ángulo $\Theta$

$$\theta = \frac{2}{3} * \tan^{-1} \left( \frac{1}{SR} \right)$$

Donde;

SR = Factor de forma de la pala

Para hallar el factor SR se utiliza la ecuación 15.

Ecuación 15. Factor de forma de la pala

$$SR = \frac{\lambda * r}{R}$$

Reemplazando los valores en la ecuación 15, se determina el valor SR.

$$SR = \frac{5 * 0.77 \text{ m}}{0.77 \text{ m}}$$

$$SR = 5$$

Una vez conocido este factor se procede a calcular el ángulo  $\theta$ .

$$\theta = \frac{2}{3} * \tan^{-1}\left(\frac{1}{5}\right)$$

$$\theta = 7.54^\circ$$

Para hallar el ángulo de calaje  $\beta$ , se utiliza la ecuación 16.

Ecuación 16. Angulo de anclaje

$$\beta = \theta - \alpha$$

Donde;

$\alpha$  = Ángulo de ataque

$$\beta = 7.54^\circ - 5.5^\circ = 2.04^\circ$$

Este procedimiento se aplica a las demás secciones de todos los álabes y se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 10. Sección Álabes

Sección	Álabe 1 (m)	loptima (m)	SR	$\theta$ (grados)	$\beta$ (grados)
1	0.77	0.08	5	7.54	2.04
2	0.62	0.09	4	9.36	3.86
3	0.46	0.13	3	12.29	6.79
4	0.31	0.19	2	17.71	12.21
5	0.15	0.38	1	30	24.50

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Sección Álabes 2

Sección	Álabe 2 (m)	loptima (m)	SR	$\theta$ (grados)	$\beta$ (grados)
1	0.68	0.07	5	7.54	2.04
2	0.54	0.08	4	9.36	3.86
3	0.41	0.11	3	12.29	6.79
4	0.27	0.17	2	17.71	12.21
5	0.14	0.33	1	30	24.50

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Sección Álabes 3

Sección	Álabe 3 (m)	loptima (m)	SR	$\theta$ (grados)	$\beta$ (grados)
1	0.60	0.06	5	7.54	2.04
2	0.48	0.07	4	9.36	3.86
3	0.36	0.10	3	12.29	6.79
4	0.24	0.15	2	17.71	12.21
5	0.12	0.29	1	30	24.50

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Sección Álabes 4

Sección	Álabe 4 (m)	loptima (m)	SR	$\theta$ (grados)	$\beta$ (grados)
1	0.52	0.05	5	7.54	2.04
2	0.42	0.06	4	9.36	3.86
3	0.31	0.09	3	12.29	6.79
4	0.21	0.13	2	17.71	12.21
5	0.10	0.26	1	30	24.50

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Sección Álabes 5

Sección	Álabes 5 (m)	loptima (m)	SR	$\theta$ (grados)	$\beta$ (grados)
1	0.46	0.05	4	7.54	2.04
2	0.40	0.05	4	9.36	3.86
3	0.30	0.07	3	12.29	6.79
4	0.20	0.11	2	17.71	12.21
5	0.09	0.23	1	30	24.50

Fuente: elaboración propia.

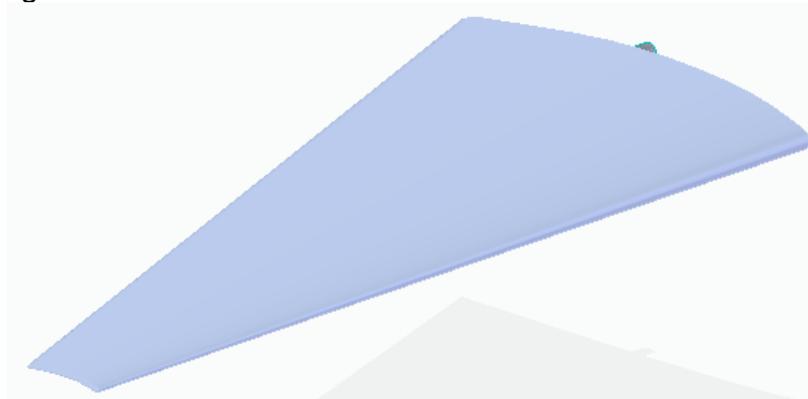
Tabla 15. Sección Álabes 6

Sección	Álabes 6 (m)	loptima (m)	SR	$\theta$ (grados)	$\beta$ (grados)
1	0.40	0.04	5	7.54	2.04
2	0.39	0.04	5	9.36	3.86
3	0.29	0.05	4	12.29	6.79
4	0.18	0.09	2	17.71	12.21
5	0.08	0.20	1	30	24.50

Fuente: elaboración propia.

Utilizando el software Solidworks y apoyándose en la base de datos Airfoil Database donde los valores correspondientes al Anexo C, se multiplican por la longitud de la cuerda óptima y se obtienen los perfiles aerodinámicos o álabes de cada sección.

Figura 36. Diseño del álabes



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4 FUERZAS AERODINÁMICAS

Para hacer el cálculo de las fuerzas aerodinámicas, primero se tiene que calcular la velocidad del viento cuando toca el primer álabe de la turbina.

Teniendo en cuenta que la carcasa de la turbina es tipo difusor, el aire se obliga a pasar por dentro de esta, lo cual, hace que la velocidad aumente, a medida que el diámetro del difusor disminuya; se sabe que el flujo másico en todo el difusor es constante y se halla de la siguiente manera.

Ecuación 17. Flujo másico

$$\dot{m} = \rho * v_0 * \pi * r^2$$

Fuente: CENGEL, Yunes. BOLES, Michael. Energía, Transferencia de energía y análisis general de energía. En: Termodinámica. Séptima edición. New York: The McGraw-Hill Companies, 2011. p. 54.

Donde;

$\dot{m}$  = Flujo másico (kg/s).

$v_0$  = Velocidad inicial (m/s).

$\rho$  = Densidad del aire a 16 °C (kg/m<sup>3</sup>).

$r$  = radio inicial del difusor (m).

$$\dot{m} = 0.852 \frac{kg}{m^3} * 5.69 \frac{m}{s} * \pi * (1.2 m)^2$$

$$\dot{m} = 21.94 \frac{kg}{s}$$

Sabiendo que el flujo másico es constante se halla la velocidad en el punto en que el viento toca el álabe.

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho * \pi * r^2}$$

$$v_1 = \frac{21.94 \frac{kg}{s}}{0.852 \frac{kg}{m^3} * \pi * (0.82 m)^2} = 13.82 \frac{m}{s}$$

$$v_2 = \frac{21.94 \frac{kg}{s}}{0.852 \frac{kg}{m^3} * \pi * (0.73 m)^2} = 15.29 \frac{m}{s}$$

$$v_3 = \frac{21.94 \frac{kg}{s}}{0.852 \frac{kg}{m^3} * \pi * (0.65 m)^2} = 19.5 \frac{m}{s}$$

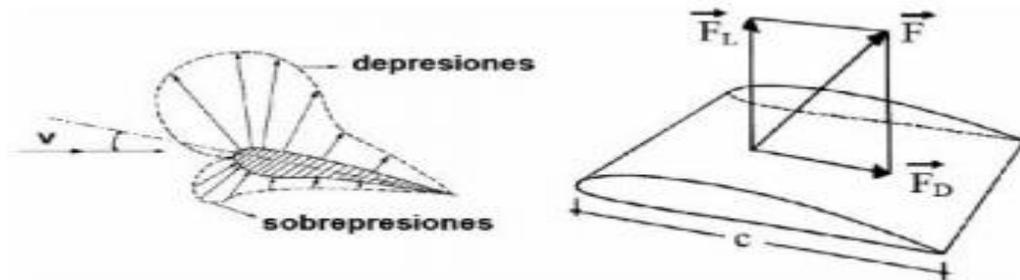
$$v_4 = \frac{21.94 \frac{kg}{s}}{0.852 \frac{kg}{m^3} * \pi * (0.57 m)^2} = 24.9 \frac{m}{s}$$

$$v_5 = \frac{21.94 \frac{kg}{s}}{0.852 \frac{kg}{m^3} * \pi * (0.51 m)^2} = 31.81 \frac{m}{s}$$

$$v_6 = \frac{21.94 \frac{kg}{s}}{0.852 \frac{kg}{m^3} * \pi * (0.45 m)^2} = 40.46 \frac{m}{s}$$

Para encontrar la fuerza aerodinámica, primero hay que hallar la fuerza de sustentación y de arrastre.

Figura 37. Distribución de presiones sobre un álabes con perfil aerodinámico



Fuente: VILLARRUBIA, Miguel. Ingeniería De La Energía Eólica. México Barcelona: Alfaomega: Marcombo, México Barcelona: Alfaomega: Marcombo, 2013. p. 111. [Consultado: 18 marzo 2019].

Las propiedades físicas características de cada álabe se determinan a través del Software Solidwords, el material que se utiliza usualmente en los álabes de las turbinas tienen que ser de alta resistencia a la fatiga por las cargas dinámicas y de bajo peso para facilitar el movimiento, los más usados y que se consiguen en el mercado son de aleaciones de acero, fibra de vidrio y fibra de carbono. En este caso se va a utilizar la fibra de vidrio tipo S.

Cuadro 7. Propiedades de los álabes

Propiedades	Álabe 1	Álabe 2	Álabe 3	Álabe 4	Álabe 5	Álabe 6
Densidad (kg/m³)	2480	2480	2480	2480	2480	2480
Masa (kg)	1.66	1.35	0.78	0.51	0.35	0.23
Área de superficie (m²)	0.36	0.28	0.22	0.17	0.13	0.1
Centro de masa (m)	X = 0.13	X = 0.11	X = 0.10	X = 0.08	X = 0.08	X = 0.07
	Y = 0.01					
	Z = 0.53	Z = 0.21	Z = 0.18	Z = 0.16	Z = 0.14	Z = 0.12

Fuente: elaboración propia, con base en. Software Solidwords.

Para hallar la fuerza de sustentación se utiliza la ecuación 18.

Ecuación 18. Fuerza de sustentación

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

Fuente: VILLARRUBIA, Miguel. Ingeniería De La Energía Eólica. México Barcelona: Alfaomega: Marcombo, México Barcelona: Alfaomega: Marcombo, 2013. p. 113. [Consultado: 18 marzo 2019].

Donde;

$C_d$  = Coeficiente de sustentación.

$\rho$  = Densidad del aire a 11 °C (kg/m³).

$v$  = velocidad relativa entre el fluido y la pala (m/s).

$A$  = Área característica del cuerpo (m²).

La velocidad relativa se toma como la velocidad absoluta, ya que en inicio la pala se encuentra en reposo con el fin de obtener las condiciones máximas. El área característica del cuerpo se toma del programa solidwork.

$$Fd_1 = 0.02437 * \frac{0.852 \frac{kg}{m^3} * \left(13.82 \frac{m}{s}\right)^2}{2} * 0.36 m^2 = 0.71 N$$

$$Fd_2 = 0.02437 * \frac{0.852 \frac{kg}{m^3} * \left(15.29 \frac{m}{s}\right)^2}{2} * 0.28 m^2 = 0.68 N$$

$$Fd_3 = 0.02437 * \frac{0.852 \frac{kg}{m^3} * \left(19.5 \frac{m}{s}\right)^2}{2} * 0.22 m^2 = 0.87 N$$

$$Fd_4 = 0.02437 * \frac{0.852 \frac{kg}{m^3} * \left(24.9 \frac{m}{s}\right)^2}{2} * 0.17 m^2 = 1.09 N$$

$$Fd_5 = 0.02437 * \frac{0.852 \frac{kg}{m^3} * \left(31.81 \frac{m}{s}\right)^2}{2} * 0.13 m^2 = 1.36 N$$

$$Fd_6 = 0.02437 * \frac{0.852 \frac{kg}{m^3} * \left(40.46 \frac{m}{s}\right)^2}{2} * 0.1 m^2 = 1.7 N$$

Para la fuerza de arrastre se sigue la misma ecuación y queda de la siguiente manera.

Ecuación 19. Fuerza de arrastre

$$Fl = Cl * \frac{\rho * v^2}{2} * A$$

Donde;

Cl = Coeficiente de arrastre.

$$Fl_1 = 1.1387 * \frac{0.852 \frac{kg}{m^3} * \left(13.82 \frac{m}{s}\right)^2}{2} * 0.36 m^2 = 33.37 N$$

$$Fl_2 = 1.1387 * \frac{0.852 \frac{kg}{m^3} * \left(15.29 \frac{m}{s}\right)^2}{2} * 0.28 m^2 = 31.78 N$$

$$Fl_3 = 1.1387 * \frac{0.852 \frac{kg}{m^3} * \left(19.5 \frac{m}{s}\right)^2}{2} * 0.22 m^2 = 40.56 N$$

$$Fl_4 = 1.1387 * \frac{0.852 \frac{kg}{m^3} * \left(24.9 \frac{m}{s}\right)^2}{2} * 0.17 m^2 = 51.16 N$$

$$Fl_5 = 1.1387 * \frac{0.852 \frac{kg}{m^3} * \left(31.81 \frac{m}{s}\right)^2}{2} * 0.13 m^2 = 63.83 N$$

$$Fl_6 = 1.1387 * \frac{0.852 \frac{kg}{m^3} * \left(40.46 \frac{m}{s}\right)^2}{2} * 0.1 m^2 = 79.45 N$$

Por medio del teorema de Pitágoras se halla la fuerza aerodinámica.

Ecuación 20. Fuerza aerodinámica

$$F_{aerodinamica} = \sqrt{Fd^2 + Fl^2}$$

$$F_{aerodinamica1} = \sqrt{(0.71 N)^2 + (33.37 N)^2} = 33.37 N$$

$$F_{aerodinamica2} = \sqrt{(0.68 N)^2 + (31.78 N)^2} = 31.78 N$$

$$F_{aerodinamica3} = \sqrt{(0.87 N)^2 + (40.56 N)^2} = 40.57 N$$

$$F_{aerodinamica4} = \sqrt{(1.09 N)^2 + (51.16 N)^2} = 51.17 N$$

$$F_{aerodinamica5} = \sqrt{(1.37 N)^2 + (63.83 N)^2} = 63.84 N$$

$$F_{aerodinamica6} = \sqrt{(1.7 N)^2 + (79.45 N)^2} = 79.47 N$$

Para hallar el torque utiliza el valor máximo de la longitud de cuerda calculado anteriormente, y la fuerza aerodinámica, esta fuerza se encuentra ubicada en el centro de presión la cual está a 25% del borde de ataque sobre la longitud de la cuerda, por tanto, el borde de fuga es el 75% de la longitud de la cuerda, el torque se halla con la ecuación 21.

Ecuación 21. Torque ejercido sobre el eje

$$T = F_{aerodinamica} * 0.75 * l_{maxima}$$

$$T_1 = 33.37 N * 0.75 * m = 9.45 N m$$

$$T_2 = 31.78 N * 0.75 * m = 7.95 N m$$

$$T_3 = 40.57 N * 0.75 * m = 8.95 N m$$

$$T_4 = 51.17 \text{ N} * 0.75 * m = 9.79 \text{ N m}$$

$$T_5 = 63.84 \text{ N} * 0.75 * m = 12.21 \text{ N m}$$

$$T_6 = 79.47 \text{ N} * 0.75 * m = 15.2 \text{ N m}$$

$$\sum T_{total} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6$$

$$\sum T_{total} = 9.45 \text{ N m} + 7.95 \text{ N m} + 8.95 \text{ N m} + 9.79 \text{ N m} + 12.21 \text{ N m} + 15.2 \text{ N m}$$

$$\sum T_{total} = 63.56 \text{ N m}$$

Para la potencia generada por la turbina se utiliza el torque total y la velocidad angular ultima del aerogenerador.

Ecuación 22. Velocidad angular

$$\omega = \frac{v_{ultima}}{r_{ultima}}$$

$$\omega = \frac{40.46 \frac{m}{s}}{0.45 m} = 89.92 \frac{rad}{s}$$

Remplazando la velocidad angular se halla la potencia entregada por la turbina.

Ecuación 23. Potencia

$$P = T_{total} * \omega$$

$$P = 63.56 \text{ N m} * 89.92 \frac{rad}{s} = 5714.94 \text{ W} = 5.715 \text{ kW}$$

Donde;

P = Potencia (W).

W = Velocidad angular (rad/s).

Esta potencia es mayor al potencial eólico debido a que el aerogenerador es tipo difusor, el cual, aumenta la velocidad del viento disminuyendo el diámetro en cada sección.

#### 4.5 DISEÑO DEL EJE

Para el diseño del eje se selecciona el material de acero al carbono AISI SAE 1020 laminado en caliente, que consta de las siguientes propiedades físicas.

Cuadro 8. Propiedades AISI SAE 1020

PROPIEDADES MECÁNICAS					
Estado de suministro	Resistencia a la tracción MPa	Límite elástico MPa	Alargamiento %	Reducción de área %	Dureza Brinell aprox.
Laminado en caliente	441	196	25	45	140 / 180
Normalizado	490 - 588	343	30	55	150
Recocido	441 - 539	294	35	60	130 / 150
Calibrado	539 - 686	441	10	35	180 / 220
Cementado, templado y rev.	686 - 833	441	15	45	-----

Fuente: CIA. GENERAL DE ACEROS S.A. SAE 1020 y SAE 1045. [en línea]. Colombia. [Consultado: 18 marzo 2019]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7826/VasquezTorresEdwinLibardo2013Anexos.pdf?sequence=2>

Para determinar las dimensiones reales del eje que se va a utilizar en el aerogenerador se debe utilizar la ecuación 24.

Ecuación 24. Diámetro del eje

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

Fuente: MOTT, Robert. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México, 2006. [Consultado: 18 marzo 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.

Se utilizará 2 en el valor de diseño N dado que el libro de Mott sugiere un valor de 2 a 2,5 para diseño de elementos de máquinas bajo cargas dinámicas con confianza en los datos de diseño.

$S'_n$  = Resistencia de fatiga.

M = Momento flector.

T = Torque.

$S_y$  = Esfuerzo de fluencia.

Para hallar el valor de la resistencia real a la fatiga se utiliza la ecuación 25.

Ecuación 25. Resistencia a la fatiga

$$S'_n = s_n(C_m)(C_{st})(C_r)(C_s)$$

Donde;

$C_m$  = Factor de material.

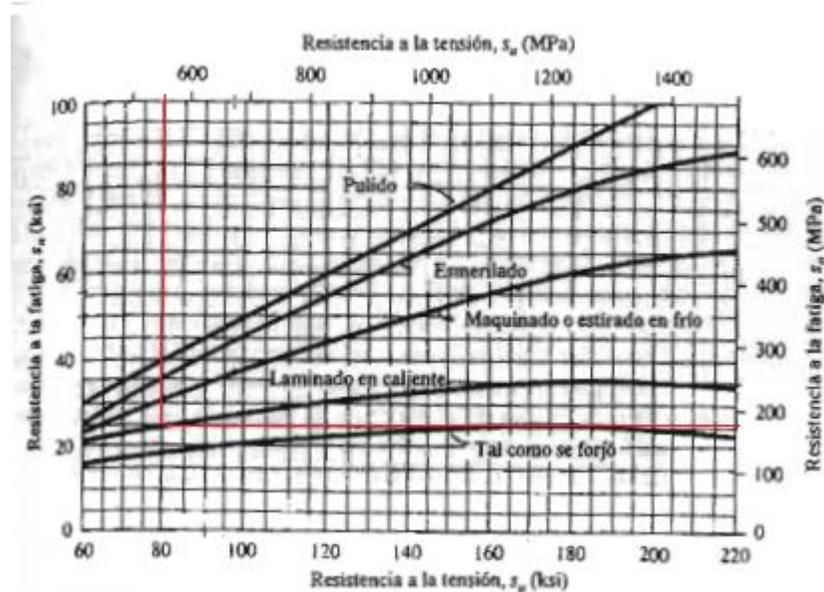
$C_{st}$  = Factor de tipo de esfuerzo.

$C_r$  = Factor de confiabilidad.

$C_s$  = Factor de tamaño.

Para hallar el  $S_n$  conociendo el tipo de acabado superficial y el esfuerzo máximo, y de la gráfica 1, se tiene una resistencia a la fatiga aproximadamente de 196 MPa.

Gráfica 1. Resistencia a la fatiga



Fuente: MOTT, Robert. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México, 2006. [Consultado: 18 marzo 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 tabla 16 con una confiabilidad deseada de 0.99 el cual es  $C_r = 0.81$ .

Tabla 16. 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 marzo 2019] p. 173.

Se aplica un factor de tamaño  $C_S$  según la tabla 17.

Tabla 17. Factor de tamaño  $C_S$

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 marzo 2019] p. 173.

Se estima un diámetro del tamaño del eje aproximado de 100 mm y se utiliza la ecuación 26 para hallar el factor de tamaño.

Ecuación 26. Rango de tamaño

$$C_S = 0.859 - 0.000837 * D$$

$$C_s = 0.859 - 0.000837 * 110 = 0.76693$$

Ahora reemplazando estos valores se halla resistencia a la fatiga real.

$$S'n = 196 \text{ MPa}(1)(1)(0.81)(0.76693)$$

$$S'n = 121.7578 \text{ MPa}$$

Para hallar la fuerza que ejerce cada par de álabes se multiplica el peso por 2 y la gravedad que es de  $9.81 \text{ m/s}^2$ .

Tabla 18. Peso de los álabes

Componente	Masa (kg)	Peso (N)
Álabe 1 (x2)	3.32	32.5692
Álabe 2 (x2)	2.7	26.487
Álabe 3 (x2)	1.56	15.3036
Álabe 4 (x2)	1.02	10.0062
Álabe 5 (x2)	0.7	6.867
Álabe 6 (x2)	0.46	4.5126

Fuente: elaboración propia.

Para definir de manera óptima el diámetro mínimo del eje, también se debe tener en cuenta el torque en el eje, este se halla con la ecuación 27, sabiendo que la potencia es  $5.715 \text{ W}$  que es igual a  $7.66 \text{ HP}$ .

Ecuación 27. Torque

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

Donde;

$n$  = Número de revoluciones por minutos (rpm).

$P$  = Potencia (HP).

$$T_1 = \frac{63000 * 7.66 \text{ HP}}{160.12 \text{ rpm}} = 3017.27 \text{ lb in} = 340.91 \text{ N m}$$

$$T_2 = \frac{63000 * 7.66 \text{ HP}}{199.49 \text{ rpm}} = 2420.23 \text{ lb in} = 273045 \text{ N m}$$

$$T_3 = \frac{63000 * 7.66 \text{ HP}}{287.06 \text{ rpm}} = 1681.94 \text{ lb in} = 190.03 \text{ N m}$$

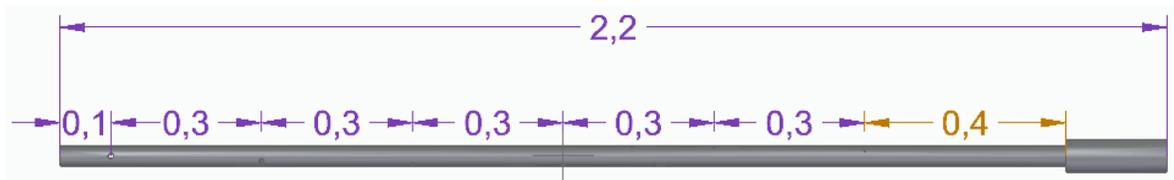
$$T_4 = \frac{63000 * 7.66 \text{ HP}}{414.55 \text{ rpm}} = 1164.7 \text{ lb in} = 131.59 \text{ N m}$$

$$T_5 = \frac{63000 * 7.66 \text{ HP}}{598.46 \text{ rpm}} = 806.77 \text{ lb in} = 91.15 \text{ N m}$$

$$T_6 = \frac{63000 * 7.66 \text{ HP}}{858.64 \text{ rpm}} = 562.31 \text{ lb in} = 63.53 \text{ N m}$$

Para calcular la fuerza que debe soportar la chumacera se hace el diagrama de cuerpo libre en un plano X-Z y X-Y donde el peso de cada par de álabes va estar en equilibrio en el centro del eje de transmisión. Medidas en metros, teniendo en cuenta que los álabes están separados cada 60 grados, se calcula las fuerzas llevándolas a el plano Z y al plano Y.

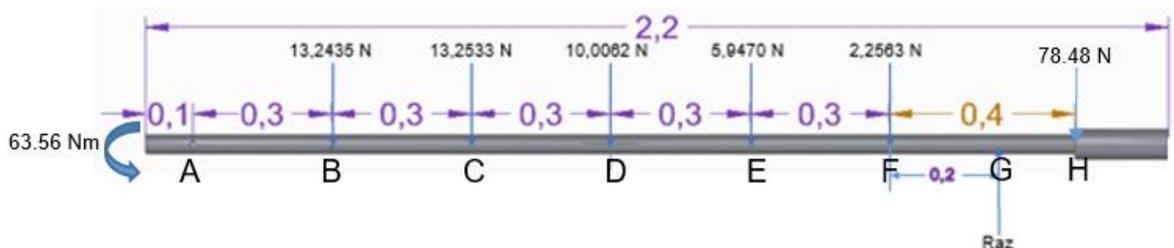
Figura 38. Eje



Fuente: elaboración propia.

Plano X-Z

Figura 39. Reacción en X - Z



Fuente: elaboración propia.

Para la reacción en a se hace una sumatoria de fuerzas que es igual a 0

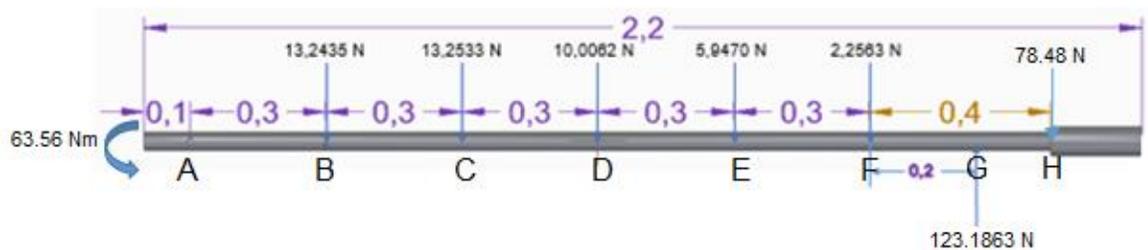
$$\sum F = F_a + F_b + F_c + F_d + F_e + F_f - R_{az} + F_h = 0$$

$$0 + 13.2435 \text{ N} + 13.2533 \text{ N} + 10.0062 \text{ N} + 5.947 \text{ N} + 2.2563 \text{ N} + 78.48 \text{ N} = R_{az}$$

$$R_{az} = 123.1863 \text{ N}$$

Con las reacciones ya encontradas, se hace el arreglo en la dirección correcta de las reacciones y sus valores.

Figura 40. Fuerzas en X -Z

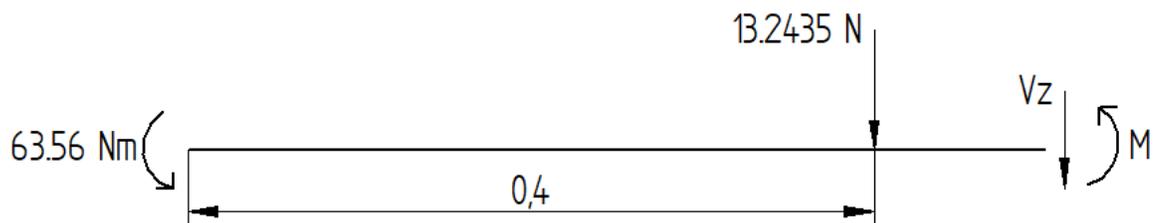


Fuente: elaboración propia.

Para las gráficas de esfuerzo cortante y el momento flector, se parte por secciones.

Sección A-B

Figura 41. Sección A-B



Fuente: elaboración propia.

$$+\downarrow \sum F = 0$$

$$V_z = -13.2435 \text{ N}$$

$$+\circlearrowleft \sum M = 0$$

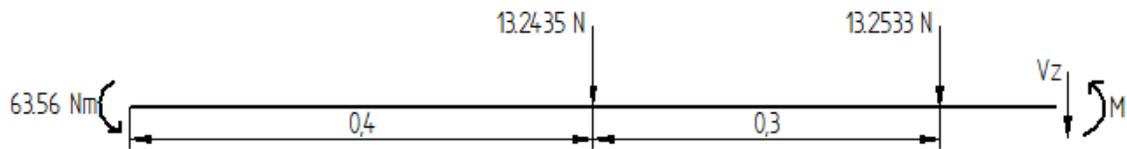
$$M + 63.56 \text{ Nm} + 13.2435 \text{ N} * (X - 0.4 \text{ m}) = 0$$

$$M = -63.56 \text{ Nm} - 13.2435 \text{ N} * X + 5.2974 \text{ Nm}$$

$$M = -13.2435 \text{ N} * X - 58.2626 \text{ Nm}$$

Sección A-C

Figura 42. Sección A-C



Fuente: elaboración propia.

$$+\downarrow \sum F = 0$$

$$V_z = -13.2435 \text{ N} - 13.2533 \text{ N} = -26.4968 \text{ N}$$

$$+\circlearrowleft \sum M = 0$$

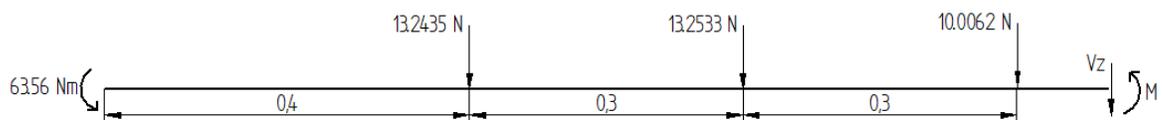
$$M + 63.56 \text{ Nm} + 13.2435 \text{ N} * (X - 0.4 \text{ m}) + 13.2533 \text{ N} * (X - 0.7 \text{ m}) = 0$$

$$M = -63.56 \text{ Nm} - 13.2435 \text{ N} * X + 5.2974 \text{ Nm} - 13.2533 \text{ N} * X + 9.2773 \text{ Nm}$$

$$M = -26.4968 \text{ N} * X - 48.9853 \text{ Nm}$$

Sección A-D

Figura 43. Sección A-D



Fuente: elaboración propia.

$$+\downarrow \sum F = 0$$

$$V_z = -13.2435 N - 13.2533 N - 10.0062 N = -36.503 N$$

$$+\curvearrowright \sum M = 0$$

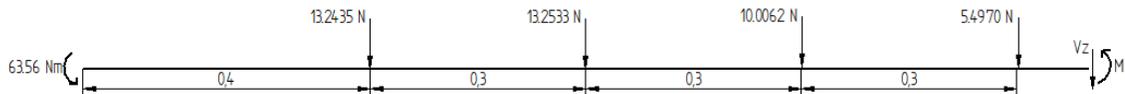
$$M + 63.56 Nm + 13.2435 N * (X - 0.4 m) + 13.2533 N * (X - 0.7m) + 10.0062 N (X - 1 m) = 0$$

$$M = -63.56 Nm - 13.2435 N * X + 5.2974 Nm - 13.2533N * X + 9.2773Nm - 10.0062 N * X + 10.0062 Nm$$

$$M = -36.503 N * X - 38.9791 Nm$$

Sección A-E

Figura 44. Sección A-E



Fuente: elaboración propia.

$$+\downarrow \sum F = 0$$

$$V_z = -13.2435 N - 13.2533 N - 10.0062 N - 5.4970 N = -42 N$$

$$+\curvearrowright \sum M = 0$$

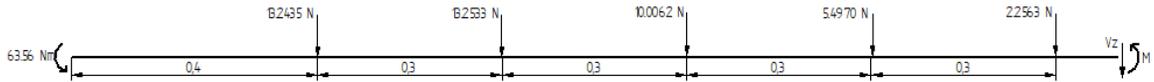
$$M + 63.56 Nm + 13.2435 N * (X - 0.4 m) + 13.2533 N * (X - 0.7m) + 10.0062 N (X - 1 m) + 5.4970 N * (X - 1.3 m) = 0$$

$$M = -63.56 Nm - 13.2435 N * X + 5.2974 Nm - 13.2533N * X + 9.2773Nm - 10.0062 N * X + 10.0062 Nm - 5.4970N * X + 7.7311 Nm$$

$$M = -42 N * X - 31.8330 Nm$$

Sección A-F

Figura 45. Sección A-F



Fuente: elaboración propia.

$$+\downarrow \sum F = 0$$

$$V_z = -13.2435 \text{ N} - 13.2533 \text{ N} - 10.0062 \text{ N} - 5.4970 \text{ N} - 2.2563 \text{ N} = -44.2563 \text{ N}$$

$$+\curvearrowright \sum M = 0$$

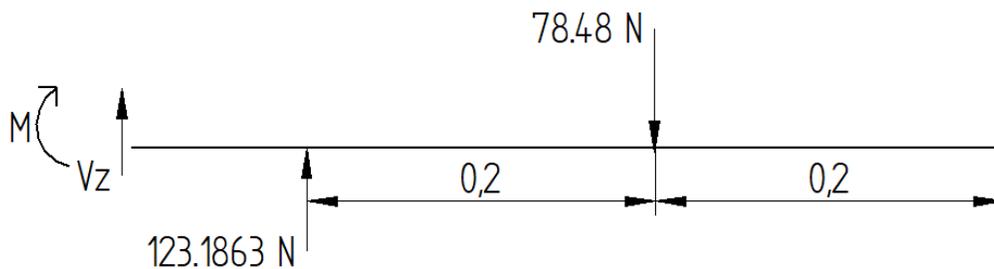
$$M + 63.56 \text{ Nm} + 13.2435 \text{ N} * (X - 0.4 \text{ m}) + 13.2533 \text{ N} * (X - 0.7 \text{ m}) + 10.0062 \text{ N} * (X - 1 \text{ m}) + 5.4970 \text{ N} * (X - 1.3 \text{ m}) + 2.2563 \text{ N} * (X - 1.6) = 0$$

$$M = -63.56 \text{ Nm} - 13.2435 \text{ N} * X + 5.2974 \text{ Nm} - 13.2533 \text{ N} * X + 9.2773 \text{ Nm} - 10.0062 \text{ N} * X + 10.0062 \text{ Nm} - 5.4970 \text{ N} * X + 7.7311 \text{ Nm} - 2.2563 \text{ N} * X + 3.6101 \text{ Nm}$$

$$M = -44.2563 \text{ N} * X - 28.2291 \text{ Nm}$$

Sección G - I

Figura 46. Sección G-I



Fuente: elaboración propia.

$$+\downarrow \sum F = 0$$

$$V_z = -123.1863 \text{ N} + 78.48 \text{ N} = -44.7063 \text{ N}$$

$$+\zeta \sum M = 0$$

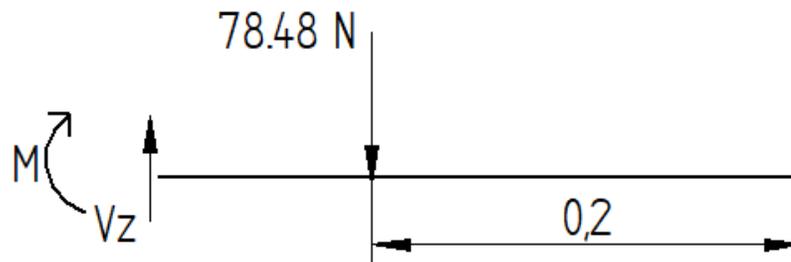
$$-M + 123.1863 \text{ N} * (X - 0.4 \text{ m}) - 78.48 \text{ N} * (X - 0.2 \text{ m})$$

$$M = 123.1863 \text{ N} * X - 49.2745 \text{ Nm} - 78.48 \text{ N} * X + 15.696 \text{ Nm}$$

$$M = 44.7063 \text{ N} * X - 33.5785 \text{ Nm}$$

Sección H-I

Figura 47. Eje sección H-I



Fuente: Elaboración propia.

$$+\downarrow \sum F = 0$$

$$V_z = -78.48 \text{ N}$$

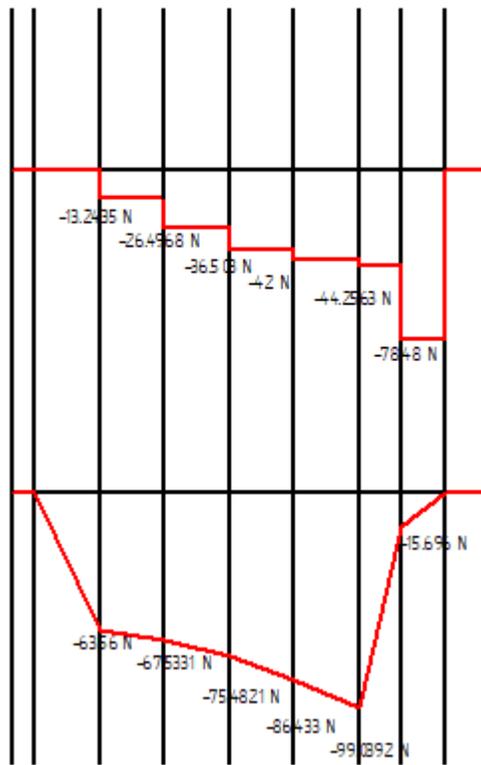
$$+\zeta \sum M = 0$$

$$-M - 78.48 \text{ N} * (X - 0.2 \text{ m})$$

$$M = -78.48 \text{ N} * X + 15.696 \text{ Nm}$$

Grafica de momento flector y esfuerzo cortante.

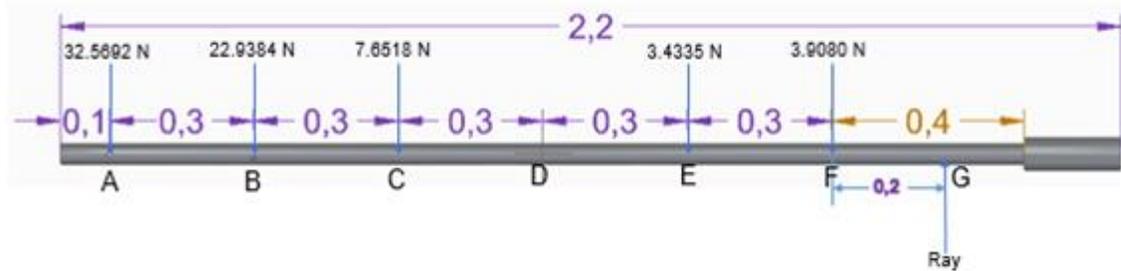
Gráfica 2. Momento flector y esfuerzo cortante plano X-Z



Fuente: elaboración Propia.

Plano Y-Z

Figura 48. Reacción en Y-Z



Fuente: elaboración propia.

Para la reacción en a se hace una sumatoria de fuerzas que es igual a 0

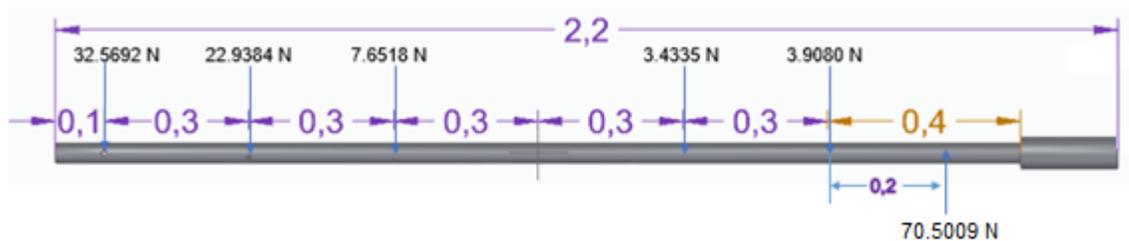
$$\sum F = F_a + F_b + F_c + F_d + F_e + F_f - R_{ay} = 0$$

$$32.5692N + 22.9384N + 7.6518N + 0 + 3.435N + 3.908N = R_{ay}$$

$$R_{ay} = 70.5009 N$$

Con las reacciones ya encontradas, se hace el arreglo en la dirección correcta de las reacciones y sus valores.

Figura 49. Fuerzas en Y-Z

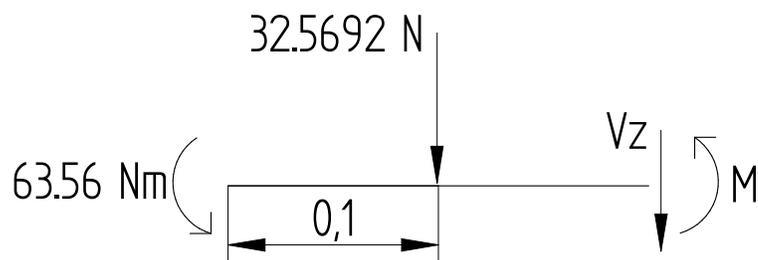


Fuente: elaboración propia.

Para las gráficas de esfuerzo cortante y el momento flector, se parte por secciones.

Sección A-B

Figura 50. Sección A-B



Fuente: elaboración propia.

$$+\downarrow \sum F = 0$$

$$V_z = -32.5692 N$$

$$+\circlearrowleft \sum M = 0$$

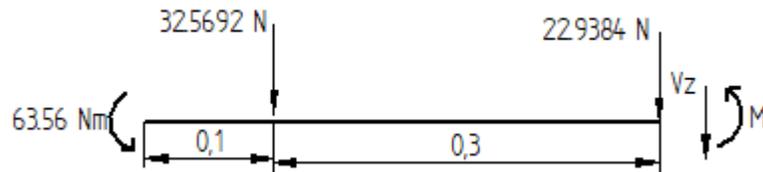
$$M + 63.56 \text{ Nm} + 32.5692 \text{ N} * (X - 0.1 \text{ m}) = 0$$

$$M = -63.56 \text{ Nm} - 32.5692 \text{ N} * X + 3.2569 \text{ Nm}$$

$$M = -32.5692 \text{ N} * X - 60.3031 \text{ Nm}$$

Sección A-C

Figura 51. Sección A-C



Fuente: elaboración propia.

$$+\downarrow \sum F = 0$$

$$V_z = -32.5692 \text{ N} - 22.9384 \text{ N} = -55.5076 \text{ N}$$

$$+\circlearrowleft \sum M = 0$$

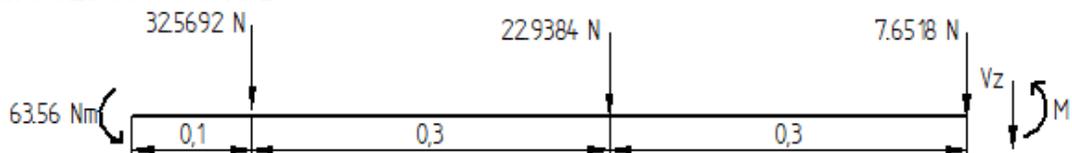
$$M + 63.56 \text{ Nm} + 32.5692 \text{ N} * (X - 0.1 \text{ m}) + 22.9384 \text{ N} * (X - 0.4 \text{ m}) = 0$$

$$M = -63.56 \text{ Nm} - 32.5692 \text{ N} * X + 3.2569 \text{ Nm} - 22.9384 \text{ N} * X + 9.1764 \text{ Nm}$$

$$M = -55.5076 \text{ N} * X - 51.1267 \text{ Nm}$$

Sección A-D

Figura 52. Sección A-D



Fuente: elaboración propia.

$$+\downarrow \sum F = 0$$

$$V_z = -32.5692 N - 22.9384 N - 7.6518 N = -63.1594 N$$

$$+\curvearrowright \sum M = 0$$

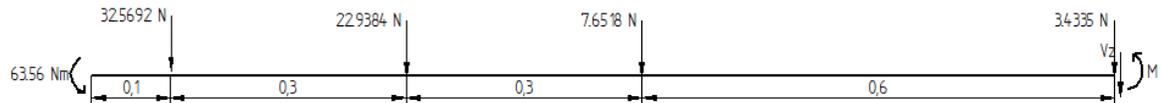
$$M + 63.56 Nm + 32.5692 N * (X - 0.1 m) + 22.9384 N * (X - 0.4 m) + 7.6518 N (X - 0.7 m) = 0$$

$$M = -63.56 Nm - 32.5692 N * X + 3.2569 Nm - 22.9384 N * X + 9.1764 Nm - 7.6518 N * X + 5.3563 Nm$$

$$M = -63.1594 N * X - 45.7704 Nm$$

Sección A-E

Figura 53. Sección A-E



Fuente: elaboración propia.

$$+\downarrow \sum F = 0$$

$$V_z = -32.5692 N - 22.9384 N - 7.6518 N - 3.4335 N = -66.5929 N$$

$$+\curvearrowright \sum M = 0$$

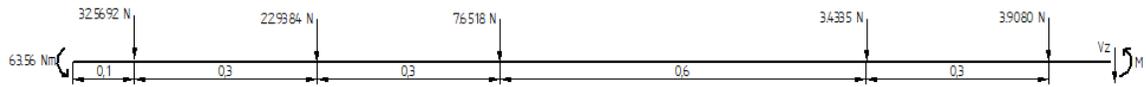
$$M + 63.56 Nm + 32.5692 N * (X - 0.1 m) + 22.9384 N * (X - 0.4 m) + 7.6518 N (X - 0.7 m) + 3.4335 N * (X - 1.3 m) = 0$$

$$M = -63.56 Nm - 32.5692 N * X + 3.2569 Nm - 22.9384 N * X + 9.1764 Nm - 7.6518 N * X + 5.3563 Nm - 3.4335 N * X + 4.4636 Nm$$

$$M = -66.5929 N * X - 41.3068 Nm$$

Sección A-F

Figura 54. Sección A-F



Fuente: elaboración propia.

$$+\downarrow \sum F = 0$$

$$V_z = -32.5692 N - 22.9384 N - 7.6518 N - 3.4335 N - 3.9080 N = -70.5009 N$$

$$+\curvearrowright \sum M = 0$$

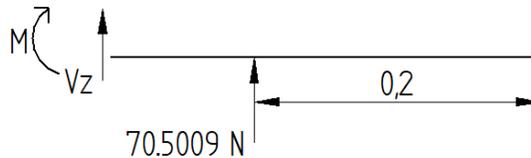
$$M + 63.56 Nm + 32.5692 N * (X - 0.1 m) + 22.9384 N * (X - 0.4 m) + 7.6518 N * (X - 0.7 m) + 3.4335 N * (X - 1.3 m) + 3.9080 N * (X - 1.6 m) = 0$$

$$M = -63.56 Nm - 32.5692 N * X + 3.2569 Nm - 22.9384 N * X + 9.1764 Nm - 7.6518 N * X + 5.3563 Nm - 3.4335 N * X + 4.4636 Nm - 3.9080 N * X + 6.2528 Nm$$

$$M = -70.5009 N * X - 35.0540 Nm$$

Sección G - I

Figura 55. Sección G-I



Fuente: elaboración propia.

$$+\downarrow \sum F = 0$$

$$V_z = -70.5009 N$$

$$+\curvearrowright \sum M = 0$$

$$-M + 70.5009 N * (X - 0.2 m)$$

$$M = 70.5009 N * X - 14.1002 Nm$$

Grafica de momento flector y esfuerzo cortante.

Gráfica 3. Momento flector y esfuerzo cortante plano Y-Z



Fuente: elaboración propia.

Reemplazando los valores se obtienen los distintos diámetros del eje de transmisión.

$$D_1 = \left[ \frac{32 * 2}{\pi} * \sqrt{\frac{3}{4} * \left[ \frac{340.905 N m}{441 * 10^6 Pa} \right]^2} \right]^{\frac{1}{3}} = 0.024 = 0.94 in$$

$$D_2 = \left[ \frac{32 * 2}{\pi} * \sqrt{\left( \frac{99.6893 \text{ N m}}{121.7578 \times 10^6 \text{ Pa}} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left[ \frac{273.45 \text{ N m}}{441 \times 10^6 \text{ Pa}} \right]^2} \right]^{\frac{1}{3}} = 0.027 \text{ m} = 1.06 \text{ in}$$

$$D_3 = \left[ \frac{32 * 2}{\pi} * \sqrt{\left( \frac{117.4492 \text{ N m}}{121.7578 \times 10^6 \text{ Pa}} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left[ \frac{190.03 \text{ N m}}{441 \times 10^6 \text{ Pa}} \right]^2} \right]^{\frac{1}{3}} = 0.028 \text{ m} = 1.10 \text{ in}$$

$$D_4 = \left[ \frac{32 * 2}{\pi} * \sqrt{\left( \frac{154.3481 \text{ N m}}{121.7578 \times 10^6 \text{ Pa}} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left[ \frac{131.59 \text{ N m}}{441 \times 10^6 \text{ Pa}} \right]^2} \right]^{\frac{1}{3}} = 0.029 \text{ m} = 1.14 \text{ in}$$

$$D_5 = \left[ \frac{32 * 2}{\pi} * \sqrt{\left( \frac{99.0392 \text{ N m}}{121.7578 \times 10^6 \text{ Pa}} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left[ \frac{91.15 \text{ N m}}{441 \times 10^6 \text{ Pa}} \right]^2} \right]^{\frac{1}{3}} = 0.0254 \text{ m} = 1 \text{ in}$$

$$D_6 = \left[ \frac{32 * 2}{\pi} * \sqrt{\left( \frac{148.0896 \text{ N m}}{121.7578 \times 10^6 \text{ Pa}} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left[ \frac{63.53 \text{ N m}}{441 \times 10^6 \text{ Pa}} \right]^2} \right]^{\frac{1}{3}} = 0.029 \text{ m} = 1.14 \text{ in}$$

$$D_7 = \sqrt{2.94 * (105.4963 \text{ N}) * \frac{2}{121.7578 * 10^6 \text{ Pa}}} = 0.0023 \text{ m} = 0.08 \text{ in}$$

$$D_8 = \left[ \frac{32 * 2}{\pi} * \sqrt{\left( \frac{15.696 \text{ N m}}{121.7578 \times 10^6 \text{ Pa}} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left[ \frac{63.53 \text{ N m}}{441 \times 10^6 \text{ Pa}} \right]^2} \right]^{\frac{1}{3}} = 0.015 \text{ m} = 0.6 \text{ in}$$

Para el diámetro del eje de transmisión se tiene que el valor máximo para aguantar el momento flector y par torsor, este valor es de 0.029 m (1.14 in). En este caso se va a utilizar un diámetro de 1 ½ in de tal forma que el eje no falle.

4.5.1 Unión roscada. Para determinar si el elemento roscado de cada álabe soporta las cargas primero se debe determinar la fuerza centrífuga que genera cada uno y así hallar el límite de fluencia que debe soportar el material y el límite de fluencia a tensión.

### Ecuación 28. Fuerza centrífuga

$$F_{centrifuga} = \frac{0.1034 * G * (k * v * RV_{cg})^2}{r_{cg}}$$

Fuente: DÍEZ, Pedro. Energía eólica. [en línea]. Departamento de ingeniería eléctrica y energética. Universidad de Cantabria, España. p. 67. [Consulta: 17 marzo 2019].

Donde;

G = Masa de la pala (Kg).

k = Constante de ajuste por unidad.

RV<sub>cg</sub> = Relación de velocidad en el centro de gravedad de la pala.

r<sub>cg</sub> = Distancia del eje de giro al centro de la gravedad de la pala (m).

La masa de cada pala se encuentra en la tabla 18, para la distancia del eje de giro se tiene en cuenta la siguiente relación de la investigación de Energía eólica de Pedro Fernández Díez.

### Ecuación 29. Distancia de giro

$$r_{cg} = \frac{r_{pala}}{4}$$

$$r_{cg1} = \frac{0.77 \text{ m}}{4} = 0.19 \text{ m}$$

$$r_{cg2} = \frac{0.68 \text{ m}}{4} = 0.17 \text{ m}$$

$$r_{cg3} = \frac{0.6 \text{ m}}{4} = 0.15 \text{ m}$$

$$r_{cg4} = \frac{0.52 \text{ m}}{4} = 0.13 \text{ m}$$

$$r_{cg5} = \frac{0.46 \text{ m}}{4} = 0.115 \text{ m}$$

$$r_{cg} = \frac{0.4 \text{ m}}{4} = 0.1 \text{ m}$$

La relación de velocidad en el centro de gravedad de la pala, se halla de la siguiente manera.

Ecuación 30. Relación del centro de gravedad de la pala

$$RV_{cg} = \frac{2 * \pi * r_{cg} * w}{60 * k * v}$$

$$RV_{cg1} = \frac{2 * \pi * 0.19 \text{ m} * 160.02 \text{ rpm}}{60 * 1 * 13.82 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.233$$

$$RV_{cg2} = \frac{2 * \pi * 0.17 \text{ m} * 199.49 \text{ rpm}}{60 * 1 * 15.29 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.232$$

$$RV_{cg3} = \frac{2 * \pi * 0.15 \text{ m} * 287.06 \text{ rpm}}{60 * 1 * 19.49 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.231$$

$$RV_{cg4} = \frac{2 * \pi * 0.13 \text{ m} * 414.55 \text{ rpm}}{60 * 1 * 24.9 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.227$$

$$RV_{cg5} = \frac{2 * \pi * 0.115 \text{ m} * 598.46 \text{ rpm}}{60 * 1 * 31.81 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.226$$

$$RV_{cg6} = \frac{2 * \pi * 0.1 \text{ m} * 858.63 \text{ rpm}}{60 * 1 * 40.46 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.222$$

Reemplazando los valores en la ecuación se tiene.

$$F_{centrifuga1} = \frac{0.1034 * 1.66 \text{ kg} * \left(1 * 13.82 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.233\right)^2}{0.19 \text{ m}} = 9.28 \text{ N} = 2.09 \text{ lbf}$$

$$F_{centrifuga2} = \frac{0.1034 * 1.35 \text{ kg} * \left(1 * 15.29 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.232\right)^2}{0.17 \text{ m}} = 10.36 \text{ N} = 2.33 \text{ lbf}$$

$$F_{centrifuga3} = \frac{0.1034 * 0.78 \text{ kg} * \left(1 * 19.49 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.231\right)^2}{0.15 \text{ m}} = 10.93 \text{ N} = 2.46 \text{ lbf}$$

$$F_{centrifuga4} = \frac{0.1034 * 0.51 \text{ kg} * \left(1 * 24.9 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.227\right)^2}{0.13 \text{ m}} = 12.92 \text{ N} = 2.9 \text{ lbf}$$

$$F_{centrifuga5} = \frac{0.1034 * 0.35 \text{ kg} * \left(1 * 31.81 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.226\right)^2}{0.115 \text{ m}} = 16.35 \text{ N} = 3.67 \text{ lbf}$$

$$F_{centrifuga6} = \frac{0.1034 * 0.23 \text{ kg} * \left(1 * 40.46 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.222\right)^2}{0.1 \text{ m}} = 19.23 \text{ N} = 4.32 \text{ lbf}$$

Esta fuerza es cortante por tanto su esfuerzo se halla de la siguiente forma.

**Ecuación 31. Esfuerzo cortante**

$$\tau = \frac{F}{A_s}$$

Fuente: SHIGLEY, Joseph E.  
Diseño en ingeniería mecánica.8  
ed. México, 2008. p. 85.

Donde;

$A_s$  = Área del esfuerzo cortante

$$\tau_1 = \frac{2.09 \text{ lbf}}{\pi * (1.5 \text{ in})^2} = 0.29 \text{ psi} = 0.0066 \text{ MPa}$$

$$\tau_2 = \frac{2.33 \text{ lbf}}{\pi * (1.5 \text{ in})^2} = 0.33 \text{ psi} = 0.0073 \text{ MPa}$$

$$\tau_3 = \frac{2.46 \text{ lbf}}{\pi * (1.5 \text{ in})^2} = 0.35 \text{ psi} = 0.0077 \text{ MPa}$$

$$\tau_4 = \frac{2.9 \text{ lbf}}{\pi * (1.5 \text{ in})^2} = 0.41 \text{ psi} = 0.0091 \text{ MPa}$$

$$\tau_5 = \frac{3.67 \text{ lbf}}{\pi * (1.5 \text{ in})^2} = 0.52 \text{ psi} = 0.0115 \text{ MPa}$$

$$\tau_6 = \frac{4.32 \text{ lbf}}{\pi * (1.5 \text{ in})^2} = 0.61 \text{ psi} = 0.0136 \text{ MPa}$$

Una vez conocido el esfuerzo cortante, se utiliza la ecuación de factor de seguridad donde utilizando un factor de 2, se halla el límite de fluencia del material a un esfuerzo cortante.

Ecuación 32. Factor de seguridad

$$n = \frac{\tau_y}{\tau}$$

Donde;

$\tau_y$  = Límite de fluencia del material a un esfuerzo cortante

$$\tau_{y1} = 2 * 0.0066 \text{ MPa} = 0.0131 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y2} = 2 * 0.0073 \text{ MPa} = 0.0146 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y3} = 2 * 0.0077 \text{ MPa} = 0.0154 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y4} = 2 * 0.0091 \text{ MPa} = 0.0182 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y5} = 2 * 0.0115 \text{ MPa} = 0.0231 \text{ MPa}$$

$$\tau_{y6} = 2 * 0.0136 \text{ MPa} = 0.0272 \text{ MPa}$$

El límite de fluencia del material a un esfuerzo cortante, donde el límite de fluencia del material es a tensión.

$$\tau_y = 0.577 * \sigma_y$$

Dónde:

$\delta_y$  = Límite de fluencia a tensión

$$\sigma_{y1} = \frac{0.0131 \text{ MPa}}{0.577} = 0.0235 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y2} = \frac{0.0146 \text{ MPa}}{0.577} = 0.0263 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y3} = \frac{0.0154 \text{ MPa}}{0.577} = 0.0277 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y4} = \frac{0.0182 \text{ MPa}}{0.577} = 0.0328 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y5} = \frac{0.0231 \text{ MPa}}{0.577} = 0.0414 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{y6} = \frac{0.0272 \text{ MPa}}{0.577} = 0.0488 \text{ MPa}$$

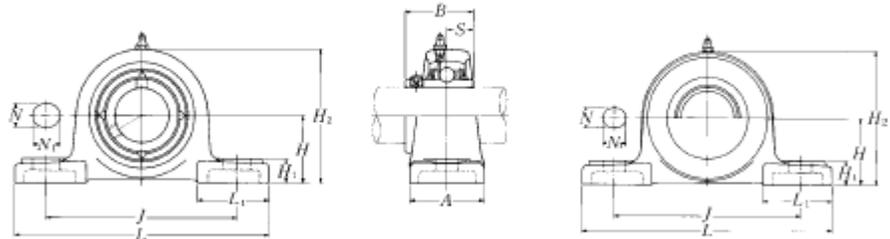
Con respecto a la fibra de vidrio el material aguanta los esfuerzos tanto a tensión, como a compresión.

#### 4.6 SELECCIÓN DEL APOYO DE RODAMIENTO

Para esta selección se tuvo en cuenta, las reacciones que se hallaron anteriormente, en el catálogo de la empresa NTN, Anexo E, se puede seleccionar un rodamiento que acople con el eje de serie UCP2, número UCP208-108D1.

Figura 56. Apoyo de rodamiento

**Chumacera tipo puente, alojamiento de acero fundido  
Con tornillo de fijación (Prisionero)**



**Tipo con guardapolvo de acero prensado**  
Extremo abierto: S-UCP---D1  
Extremo cerrado: SM-UCP---D1

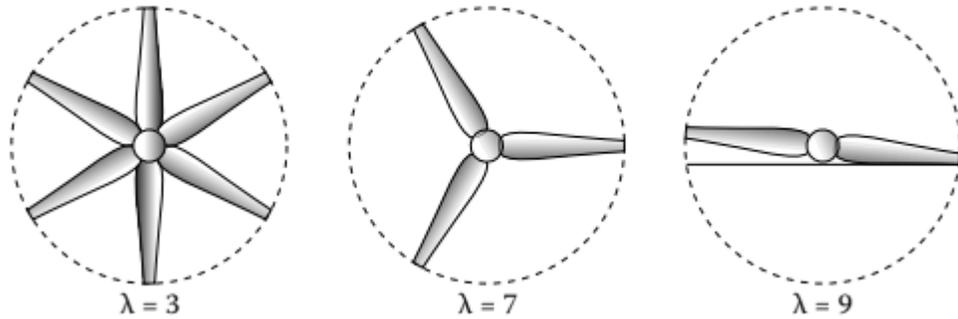
Fuente: NTN. Catálogo de Chumaceras. [en línea]. [Consultado: 30 Abril 2019].

Para saber los tipos de pernos que se necesitan para anclarlo al soporte se hace el mismo procedimiento de la sección 4.5.1 donde el esfuerzo cortante es igual a 1.73 MPa y el esfuerzo a tensión es de 3.01 MPa, el perno es tipo hexagonal M14 de acero resistente a la intemperie el cual tiene un esfuerzo cortante de 510MPa y un esfuerzo a tensión de 723 MPa, acero

#### 4.7 SELECCIÓN DEL GENERADOR

Para la selección del generador, se tiene en cuenta el requisito de potencia mínima de 4 KW, se selecciona un generador síncrono de imanes permanentes, monofásico y de corriente directa.

Figura 57. Velocidad específica del rotor



Fuente: VILLARRUBIA, Miguel. Ingeniería de la energía eólica. España: Barcelona, 2012. p.

Utilizando la ecuación de la velocidad específica se halla la velocidad de rotación del rotor.

Ecuación 33. Velocidad específica

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

Fuente: BASTIANON, Ricardo. Energía del viento y Diseño de turbinas eólicas. p. 30. [Consultado 30 abril 2019].

Donde;

$\lambda$  = Velocidad específica (figura 57)

R = Radio del rotor (m)

n = Velocidad de rotación del rotor (rpm)

v = Velocidad del viento nominal (m/s)

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

$$n = \frac{60 * 22.53 \frac{m}{s} * 9}{2 * \pi * 0.98 m} = 1976 \text{ rpm}$$

La velocidad angular del rotor del generador tiene que ser de 1976 rpm, con estas especificaciones se procede a buscar en catálogos de generadores, el indicado para el proyecto, utilizando un factor de potencia  $\cos\phi=0.8$ , por tanto, para una equivalencia  $1KW = 1.25KVA$ , se eligió un alternador modelo G161AISR el cual maneja  $8KVA = 6.4 KW$ .

Este tipo de generador no necesita de acoples externos debido que vienen fabricados con acople interno del rotor al eje de transmisión.

Tabla 19. Selección del aerogenerador

Three-Phase Alternators with Single-Phase Connection  
12 Leads / 4 Poles

200 / 240 V (60 Hz) | 1.0 P.F.

Line	Model	200 - 240V <sup>(1)</sup>					
		$\Delta T$	80 °C	105 °C	125 °C	150 °C	163 °C
G Plus	161AISR	WA	6.5	7.5	8.5	9.0	9.5
	161AHS	WA	8.0	9.0	10.1	11.0	11.5
	161AIHH	WA	9.0	10.5	11.6	12.5	13.0
	161AIHI	WA	11.0	13.0	14.3	15.5	16.0
	161AIHJ	WA	12.0	13.5	15.0	16.0	17.0
	162AVD	WA	18.0	21.0	23.1	25.0	26.0
	201AHS	WA	23.9	27.4	29.9	32.8	34.1
	201AIHW	WA	31.0	35.5	38.8	42.5	44.3
	201AIB	WA	37.7	43.1	47.1	51.5	53.8
	201AIE	WA	38.7	44.4	48.4	53.0	55.3
	202AVS	WA	48.0	55.0	59.0	65.0	66.0
	202AVJ	WA	62.0	71.1	77.5	85.0	88.6
	251AID	WA	77	88	96	105	110
	251AIE	WA	99	113	124	135	141
AG 10	250SH0AI	WA	108	125	135	144	150
	250SI20AI	WA	135	155	169	182	188
	250MI00AI	WA	148	169	188	200	219
	250MI10AI	WA	174	199	218	238	260
	250MI20AI	WA	203	233	254	275	292
	280MI20AI	WA	219	254	274	297	308
	280MI30AI	WA	238	280	297	323	340
	280MI40AI	WA	263	300	329	346	375
	315MI10AI	WA	277	325	346	372	387
	315MI15AI	WA	305	349	381	419	444
	315MI20AI	WA	346	404	433	469	487
	315MI30AI	WA	388	445	485	531	553
	315MI40AI	WA	443	508	554	589	612

Fuente: WEG. Synchronous Alternators [en línea]. [Consultado 8 abril 2019]. Disponible en: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h82/h22/WEG-synchronous-alternators-g-plus-and-ag10-line-60-hz-50051554-brochure-english.pdf>

Tabla 20. Parámetros del generador seleccionado

Line	Model	Xd' (%)	Xd'' (%)	Efficiency (%) for 240/480 V			Inertia <sup>(1)</sup> J (kgm <sup>2</sup> )	Weight <sup>(2)</sup> (kg)
		Full load	Full load	% loads				
		240/480 V	240/480 V	50	75	100		
G Plus	161AISR	14.61	10.36	70.60	74.90	76.50	0.17	106
	161AHS	15.85	11.49	76.40	78.20	77.80	0.18	118
	161AIHH	15.00	11.04	81.00	81.50	80.50	0.18	123
	161AIHI	16.67	12.44	83.30	83.10	81.70	0.19	132
	161AIHJ	12.17	9.18	86.60	86.40	85.30	0.22	145
	162AND	11.00	8.52	84.80	86.00	85.80	0.26	181
	201AHS	22.59	17.98	88.86	87.72	85.87	0.36	231
	201AHV	24.10	20.29	90.00	88.50	86.70	0.40	245
	201AIB	23.91	20.41	89.40	88.60	87.10	0.45	267
	201AIE	22.25	19.12	84.30	86.40	86.90	0.49	281
	202ANS	22.30	19.21	89.66	88.84	87.41	0.52	311
	202ANJ	21.27	18.60	92.60	91.50	90.30	0.63	355
	251AHD	23.70	16.20	91.50	90.40	89.00	1.30	428
	251AIE	22.80	15.90	89.90	89.60	88.50	1.42	460

Fuente: WEG. Synchronous Alternators [en línea]. [Consultado 8 abril 2019]. p. 14. Disponible en: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h82/h22/WEG-synchronous-alternators-g-plus-and-ag10-line-60-hz-50051554-brochure-english.pdf>



#### 4.8 SELECCIÓN DEL FRENO

Los aerogeneradores cuentan con un sistema de freno a parte del sistema implementado de control de potencia. Para este caso se va a seleccionar un freno mecánico de disco.

Para el cálculo del freno de disco se tiene en cuenta el torque necesario para el sistema con la ecuación 34.

Ecuación 34. Torque freno

$$T_{freno} = T_{eje} * Factor\ de\ seguridad$$

$$T_{freno1} = 340.91\ N\ m * 1.5 = 511.365\ N\ m$$

$$T_{freno2} = 273.45\ N\ m * 1.5 = 410.18\ N\ m$$

$$T_{freno3} = 190.03\ N\ m * 1.5 = 285.04\ N\ m$$

$$T_{freno4} = 131.59\ N\ m * 1.5 = 197.39\ N\ m$$

$$T_{freno5} = 91.15\ N\ m * 1.5 = 136.73\ N\ m$$

$$T_{freno6} = 63.53\ N\ m * 1.5 = 95.295\ N\ m$$

Se usa el método de presión uniforme, ya que no se tiene ningún tipo de desgaste previo. Teniendo el torque del freno, el diámetro interno del disco que será igual al diámetro del eje de transmisión, se utilizará la ecuación 35 para determinar el diámetro exterior del disco.

Ecuación 35. Diámetro externo del disco de freno

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

Fuente: SHIGLEY, Joseph E. Diseño en ingeniería mecánica. 8 ed. México, 2008. p. 828.

Donde;

D = Diámetro exterior del disco (m)

Pa = Presión máxima (N/m<sup>2</sup>)

d = Diámetro interno del disco (m)

f = Coeficiente de fricción

Para saber el coeficiente de fricción y la presión máxima se selecciona el material del disco y utilizando la tabla 21, se obtienen los valores.

Tabla 21. Características de materiales de fricción para frenos

Material	Coeficiente de fricción f	Presión máxima P <sub>máx</sub> , psi	Temperatura máxima		Velocidad máxima, V <sub>máx</sub> , pie/min	Aplicaciones
			Instantánea, °F	Continua, °F		
Cermet	0.32	150	1 500	750		Frenos y embragues
Metal sinterizado (seco)	0.29-0.33	300-400	930-1 020	570-660	3 600	Embragues y frenos de disco de yugo
Metal sinterizado (húmedo)	0.06-0.08	500	930	570	3 600	Embragues
Asbesto moldeado rígido (seco)	0.35-0.41	100	660-750	350	3 600	Frenos y embragues de tambor
Asbesto moldeado rígido (húmedo)	0.06	300	660	350	3 600	Embragues industriales
Zapatas de asbesto moldeado rígido	0.31-0.49	750	930-1 380	440-660	4 800	Frenos de disco
Que no sea asbesto moldeado rígido	0.33-0.63	100-150		500-750	4 800-7 500	Embragues y frenos
Asbesto moldeado semirrígido	0.37-0.41	100	660	300	3 600	Embragues y frenos
Asbesto moldeado flexible	0.39-0.45	100	660-750	300-350	3 600	Embragues y frenos
Hilo y alambre de asbesto arrollado	0.38	100	660	300	3 600	Embragues de automóviles
Hilo y alambre de asbesto tejido	0.38	100	500	260	3 600	Embragues y frenos industriales
Algodón tejido	0.47	100	230	170	3 600	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.

Utilizando el mayor torque de frenado se reemplaza en la ecuación y se obtiene el diámetro exterior del disco.

$$D = \sqrt[3]{\left(\frac{12 * 681.81 N}{\pi * 0.49 * 5'171,062.5 \frac{N}{m^2}}\right) + 0.0381 m^3} = 0.0829 m = 8.29 cm$$

Teniendo el diámetro exterior, se determina la fuerza de frenado con la ecuación 36.

Ecuación 36. Fuerza de frenado

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

Fuente: Ibíd. p. 807.

$$F_{frenado} = \frac{\pi * 5'171,062.5 \frac{N}{m^2}}{4} * (0.0829 m^2 - 0.0381 m^2)$$

$$F_{frenado} = 22,000 N = 4,945.8 lbf$$

Especificaciones para freno de Disco.

Cuadro 9. Especificaciones para freno de Disco

Tipo de freno	Freno de disco
Torque	340.91 kN
Fuerza de frenado	22 kN
Presión maxima	750 psi $\approx$ 51.71 Bar

Fuente: elaboración propia.

Según los datos obtenidos, se selecciona el freno de la compañía RINGSPANN el cual tiene una fuerza de frenado máxima de 28kN y una presión máxima de 90 Bar; para ver más detalles ver Anexo F. Este sistema de freno es accionado de forma hidráulica, el cual recibe la señal de salida del PLC para accionar el disco de freno y así detener el rotor cuando las ráfagas de viento sean máximas.

Figura 59. Mordaza



Fuente: RINGSPANN. Catálogo de mordazas. [en línea]. [Consultado: 30 abril 2019].

El freno de disco va estar ubicado después de la chumacera apoyando la mordaza en una placa que va ir unida al generador, para la unión del disco del freno se utilizaran 8 tornillos los cuales se selección a través del anterior método del numeral 4.5.1.

$$\tau = \frac{F}{A_s}$$

Donde;

$A_s$  = Área del esfuerzo cortante

La fuerza que se utiliza es de 8,173.77 lbf, esta fuerza se divide en 8 debido que la carga se reparte entre los 8 tornillos y cada uno tiene una carga de 1,021.72 lbf.

$$\tau = \frac{1,021.72 \text{ lbf}}{\pi * (0.125 \text{ in})^2} = 20.81 \text{ kpsi}$$

Una vez conocido el esfuerzo cortante, se utiliza la ecuación de factor de seguridad donde utilizando un factor de 2, se halla el límite de fluencia del material a un esfuerzo cortante.

$$n = \frac{\tau_y}{\tau}$$

Donde;

$\tau_y$  = Límite de fluencia del material a un esfuerzo cortante

$n$  = Factor de seguridad

$$\tau_y = 2 * 20.81 \text{ kpsi} = 41.62 \text{ kpsi}$$

El límite de fluencia del material a un esfuerzo cortante, donde el límite de fluencia del material es a tensión.

$$\tau_y = 0.577 * \sigma_y$$

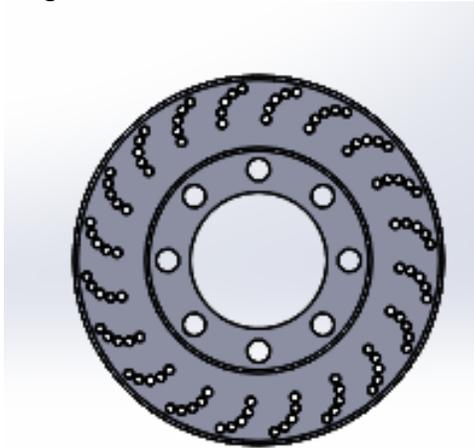
Dónde:

$\sigma_y$  = Límite de fluencia a tensión

$$\sigma_{y1} = \frac{41.62 \text{ kpsi}}{0.577} = 72.13 \text{ kpsi}$$

Para la selección de los tornillos se busca en las tablas de especificaciones ASTM para tornillos, según los datos obtenidos el que se acomoda es el A-307 de ¼ de pulgada.

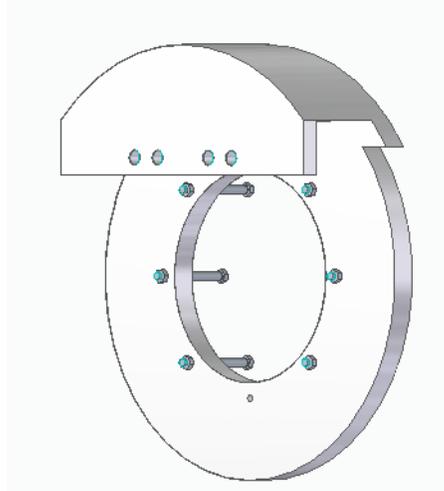
Figura 60. Disco de freno



Fuente: elaboración propia.

Para la mordaza se utiliza una placa que va ir unida al generador por medio de 7 tornillos los cuales tienen una resistencia a esfuerzo cortante de 1.032 MPa y la resistencia a tensión es de 1.789 MPa, perno tipo hexagonal M11 de acero resistente a la intemperie.

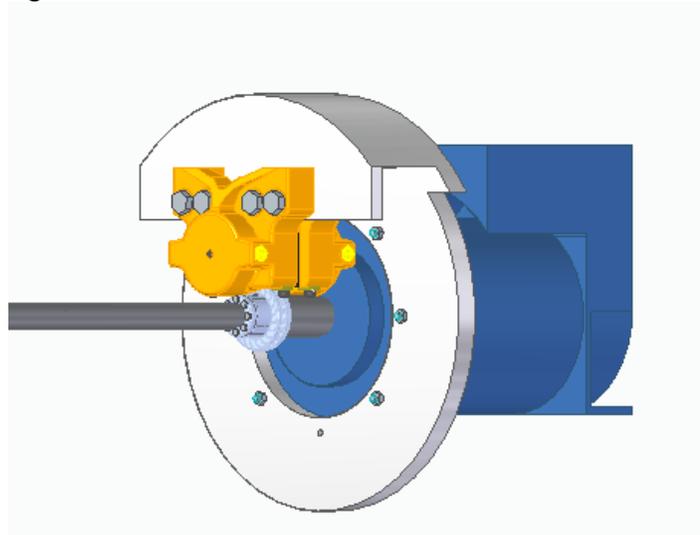
Figura 61. Placa para la mordaza



Fuente: elaboración propia.

Para unir la mordaza a la placa se utilizar 4 tornillos que tienen una resistencia a esfuerzo cortante de 0.065 MPa y una resistencia a tensión de 0.112 MPa, perno de cabeza tipo hexagonal M24 de acero resistente a la intemperie.

Figura 62. Sistema de freno de disco



Fuente: elaboración propia.

#### 4.9 DISEÑO DEL SOPORTE

El soporte es utilizado para anclar las partes del generador y juntarlas con la estructura, el cálculo que se hará a continuación es para garantizar que el material soporte el peso de cada componente.

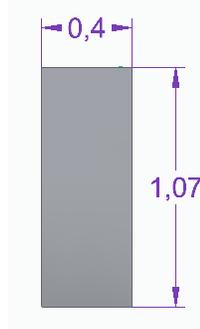
Figura 63. Soporte



Fuente: elaboración propia.

Este soporte este hecho de aluminio aleado 6061 que tiene un esfuerzo de fluencia de 286 MPa y un módulo de elasticidad de 70 GPa.

Figura 64.  
Soporte 1



Fuente:  
elaboración  
propia.

Datos iniciales para el diseño de elementos sometidos a compresión.

Cuadro 10. Datos iniciales soporte 1

N° Soporte	bi (m)	hi (m)	l (m)	Ai (m <sup>2</sup> )	xi (m)	yi (m)	Ai*xi (m <sup>3</sup> )	Ai*yi (m <sup>3</sup> )
Soporte 1	0.4	0.3	1.07	0.12	0.2	0.15	0.024	0.018

Fuente: elaboración propia, con base en. MOTT, Robert. Centroides y momentos de inercia de área. En: Resistencia de materiales. Quinta edición. Pearson Educación, 2009. p. 317-328.

Se halla el momento de inercia en xi y yi se utilizan las siguientes ecuaciones.

Para xi;

Ecuación 37. Momento de inercia en xi

$$I_{xi} = \frac{1}{12} bh^3$$

$$I_{xi} = \frac{1}{12} * 0.4 m * (0.3 m)^3 = 0.0009 m^4$$

Para yi;

Ecuación 38. Momento de inercia en yi

$$I_{yi} = \frac{1}{12} b^3 h$$

$$I_{yi} = \frac{1}{12} * (0.4 \text{ m})^3 * 0.3 \text{ m} = 0.0016 \text{ m}^4$$

Con estos momentos de inercia y utilizando el teorema de ejes paralelos (Stainer) se halla el momento de inercia total en xi y yi.

Para xi;

Ecuación 39. Teorema de ejes paralelos en xi

$$I_{xcgi} = I_{xi} + A_i * y_i^2$$

$$I_{xcgi} = 0.009 \text{ m}^4 + 0.12 \text{ m}^2 * (0.15 \text{ m})^2 = 0.0036 \text{ m}^4$$

Para yi;

Ecuación 40. Teorema de ejes paralelos en yi

$$I_{ycgi} = I_{yi} + A_i * x_i^2$$

$$I_{ycgi} = 0.0016 \text{ m}^4 + 0.12 \text{ m}^2 * (0.2 \text{ m})^2 = 0.0064 \text{ m}^4$$

Con la siguiente fórmula se determina el radio de giro mínimo entre xi y yi.

Para xi;

Ecuación 41. Radio de giro en xi

$$r_{xi} = \sqrt{\frac{I_{xcgi}}{A_{gross}}}$$

$$r_{xi} = \sqrt{\frac{0.0036 \text{ m}^4}{0.12 \text{ m}^2}} = 0.173205 \text{ m}$$

Para yi;

Ecuación 42. Radio de giro en yi

$$r_{yi} = \sqrt{\frac{I_{ycgi}}{A_{gross}}}$$

$$r_{yi} = \sqrt{\frac{0.0064 \text{ m}^4}{0.12 \text{ m}^2}} = 0.2309 \text{ m}$$

El radio mínimo es de 0.2309 m, el cual se utilizará para determinar si el elemento sometido a compresión es corto o largo de la siguiente manera.

Ecuación 43. Elemento sometido a compresión

$$\lambda = \frac{kl}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_y}{\varepsilon}}$$

Fuente: MCCORMAC, Jack. CSERNAK, Stephen. Introducción a los miembros cargados axialmente a compresión. En: Diseño de estructuras en acero. Quinta edición. New Jersey, 2012. p. 149.

Donde;

K = factor de longitud efectiva.

l = Longitud del elemento (m).

r = Radio de giro mínimo (m).

$\sigma_y$  = Esfuerzo de fluencia del material (MPa).

$\varepsilon$  = Modulo de elasticidad del material (GPa).

Este elemento se tomará como una columna empotrada a un extremo para ello el factor de longitud efectiva es de 2.

$$\lambda = \frac{2 * 1.07 \text{ m}}{\pi * 0.1732 \text{ m}} \sqrt{\frac{286 * 10^6 \text{ Pa}}{70 * 10^9 \text{ Pa}}}$$

$$\lambda = 0.2514 \leq 1.5$$

Para este valor se dice que la columna es corta y se halla el esfuerzo crítico de la siguiente manera.

Ecuación 44. Esfuerzo crítico

$$\sigma_{cr} = (0.658^{\lambda^2}) \sigma_y$$

Resolviendo;

$$\sigma_{cr} = (0.658^{0.2514^2})286 * 10^6 Pa = 278.53 * 10^6 Pa$$

Se halla la resistencia de diseño con la ecuación 45.

Ecuación 45. Resistencia de diseño

$$Rd = \phi * A_{gross} * \sigma_{cr}$$

Donde;

$\Phi$  = Factor de resistencia (0.85).

Resolviendo;

$$Rd = 0.85 * 0.12 m^2 * 278.53 * 10^6 Pa = 28,410.52 kN$$

Comparando con la carga mayoritaria la cual tiene que ser menor a la resistencia de diseño, esta se halla con la ecuación 46.

Ecuación 46. Carga

$$Pu = 1.4 D$$

Donde;

$P_u$  = Carga mayoritaria (kN).

$D$  = Carga muerta (N).

$$P_u = 1.4 (5629.959 N) = 7.881 kN \leq 28,410.52 kN$$

Cumple con la condición de diseño donde el elemento a compresión aguanta la carga aplicada, ahora se comprueba el chequeo por esbeltez donde este valor debe ser menor a 200.

Ecuación 47. Relación de esbeltez

$$\frac{kl}{r} \leq 200$$

Resolviendo;

$$\frac{2 * 1.07 m}{0.1732 m} \leq 200$$

$$12.3553 \leq 200$$

También cumple por esbeltez, este procedimiento se aplica a los otros soportes de la misma manera, en el cuadro 11 se observa que todos los elementos cumplen y así el soporte aguanta las cargas aplicadas.

Condiciones iniciales;

Cuadro 11. Cargas aplicadas

N° Soporte	bi (m)	hi (m)	l (m)	Ai (m <sup>2</sup> )	xi (m)	yi (m)
Soporte 1	0.4	0.3	1.07	0.12	0.2	0.15
Soporte 2	0.1	0.2	0.95	0.02	0.05	0.1
Soporte 3	0.2	0.2	0.23	0.04	0.1	0.1
Soporte 4	1.79	0.2	0.2	0.358	0.9	0.1
Soporte 5	r (m)	0.1	0.16	0.0314	0.1	0.1

Fuente: elaboración propia.

Con esas condiciones se halla el radio mínimo de cada elemento;

Cuadro 12. Radio mínimo

ixi (m <sup>4</sup> )	lyi (m <sup>4</sup> )	ixcgi (m <sup>4</sup> )	lycgi (m <sup>4</sup> )	rx (m)	ry (m)
0.0009	0.0016	0.0036	0.0064	0.173205	0.23094
6.66667E-05	1.66667E-05	0.000266667	6.66667E-05	0.11547	0.057735
0.000133333	0.000133333	0.000533333	0.000533333	0.11547	0.11547
0.001193333	0.095588983	0.004773333	0.382355933	0.11547	1.033457
7.85398E-05	7.85398E-05	0.000392699	0.000392699	0.111803	0.111803

Fuente: elaboración propia.

Todos son columnas cortas por tanto la ecuación para hallar el esfuerzo critico no cambia.

Cuadro 13. Esfuerzo crítico

$\lambda$	$\sigma_{cr}$ (Pa)
0.25138379	278534525.1
0.669573647	237067191
0.081053652	285214652.3
0.070481436	285405965.3
0.029117166	285898530.6

Fuente: elaboración Propia.

Y la comparación entre resistencia de diseño y carga mayoritaria se mantiene y eso indica que el soporte aguanta las cargas.

Cuadro 14. Comparación de la resistencia de diseño y carga mayoritaria

N° Soporte	Rd (pa)	Pu (Pa)
Soporte 1	28410521.56	7881.9426
Soporte 2	4030142.246	868.26348
Soporte 3	9697298.18	7652.3101
Soporte 4	86849035.24	11716.083
Soporte 5	7634502.15	19063.479

Fuente: elaboración propia.

Y el chequeo por esbeltez también cumple cada elemento;

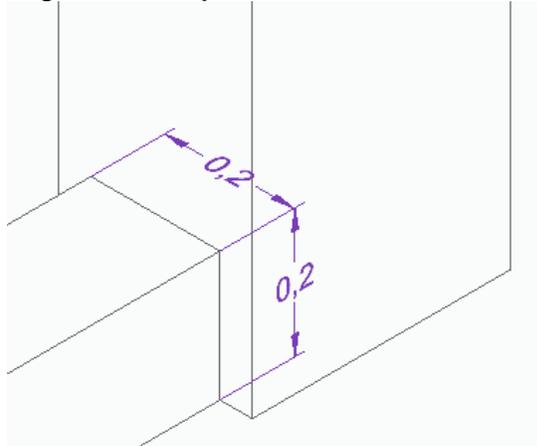
Cuadro 15. Esbeltez

N° Soporte	Esbeltez
Soporte 1	12.3553
Soporte 2	32.90897
Soporte 3	3.983717
Soporte 4	3.464102
Soporte 5	1.431084

Fuente: elaboración propia.

4.9.1 Unión por soldadura. Para la sujeción del soporte se necesita un tamaño de soldadura adecuado, el cual se calcula con las siguientes fórmulas dependiendo a que esfuerzo están actuando. Para ello se maneja que geometría debe llevar el cordón de soldadura con los siguientes términos a evaluar  $A_w$ ,  $S_w$  y  $J_w$ .

Figura 65. Sujeción de soldadura



Fuente: elaboración propia.

Ecuación 48. Área de la soldadura

$$S_w = bd + \frac{d^2}{3}$$

Fuente: MOTT, Robert. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México, 2006. [Consultado: 1 mayo 2019] p. 786.

Donde;

b: Alto de la parte soldada.

d: Ancho de la parte soldada.

$$S_w = 0.2 \text{ m} * 0.2 \text{ m} + \frac{0.2 \text{ m}^2}{3} = 0.053 \text{ m}^2$$

Ecuación 49. Perímetro de la soldadura

$$A_w = 2b + 2d$$

$$A_w = 2 * 0.2 \text{ m} + 2 * 0.2 \text{ m} = 0.8 \text{ m}^2$$

Ecuación 50. Volumen de la soldadura

$$J_w = \left(\frac{b + d}{6}\right)^3$$

$$J_w = \left(\frac{0.2 \text{ m} + 0.2 \text{ m}}{6}\right)^3 = 0.01066 \text{ m}^3$$

Para esto se deberá calcular de la fuerza por metro del cortante directo vertical causado de la carga de 5.629 kN que es la suma de los pesos en este soporte. Con la ecuación 51.

Ecuación 51. Fuerza por metro cortante

$$f_s = \frac{P}{A_w}$$

Dónde;

P = Fuerza debido al cortante vertical (kN).

$$f_s = \frac{5.629 \text{ kN}}{0.8 \text{ m}} = 7.36 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Luego se procede a calcular el torque causado por la carga a la distancia de soldadura.

$$T = 5.269 \text{ kN} * 0.05 \text{ m} = 0.5629 \text{ kNm}$$

Como la carga aplicada es a torsión se utiliza la ecuación 52, para calcular la fuerza por metro debido a la torsión por lado vertical y lado horizontal en el centroide debido a que la geometría es cuadrada estas fuerzas son iguales.

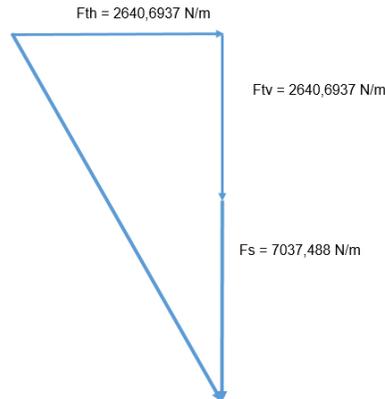
Ecuación 52. Fuerza debido a la torsión

$$f = \frac{T_c}{J_w}$$

$$f_{dh} = f_{dv} = \frac{0.5629 \text{ kNm} * 0.05 \text{ m}}{0.01066 \text{ m}^3} = 2.64 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Para calcular la fuerza por metro resultante se tienen en cuenta la figura 66, donde la resultante se halla usando el teorema de Pitágoras.

Figura 66. Análisis de fuerzas



Fuente: elaboración propia, con base en. MOTT, Robert. En: Diseño de elementos de máquinas. 4 ed. México, 2006. [Consultado: 1 mayo 2019] p. 788.

Ecuación 53. Fuerza resultante

$$f_R = \sqrt{f_{dh}^2 + (f_{tv} + f_s)^2}$$

$$f_R = \sqrt{\left(2.64 \frac{kN}{m}\right)^2 + \left(2.64 \frac{kN}{m} + 7.036 \frac{kN}{m}\right)^2} = 10.032 \frac{kN}{m} = 57.2865 \frac{lb}{in}$$

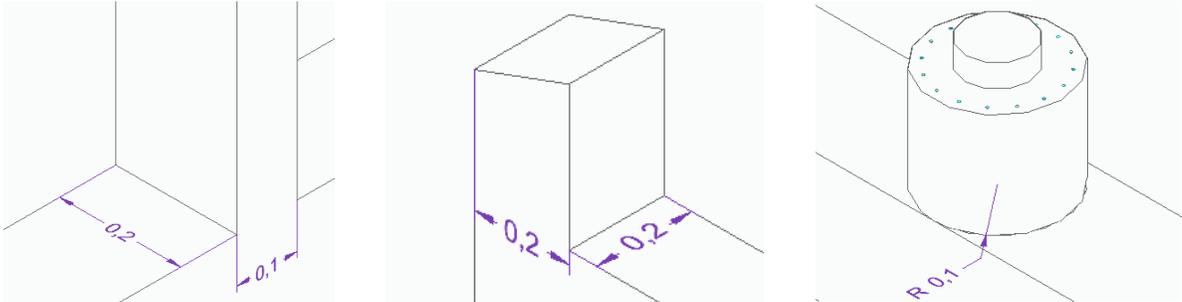
Con el resultado anterior se calcula la longitud necesaria del lado del cordón con un tipo de electrodo ER4043 para soldar aluminio de la serie 6XXX que tiene un límite permisible de 13,050 psi.

$$w = \frac{57.2865 \frac{lb}{in}}{13,050 \frac{lb}{in} \text{ por pulgada}} = 0.0044 \text{ in}$$

La longitud necesaria del lado es de 0.0044 in, entonces para el espesor de la placa >6 el tamaño mínimo del cordón es de 5/8 in (0.625).

Este procedimiento se hace para juntar las demás placas incluyendo la tobera que se junta contra el soporte obteniendo los siguientes resultados.

Figura 67. Junta de las placas



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 16. Parámetros de soldadura

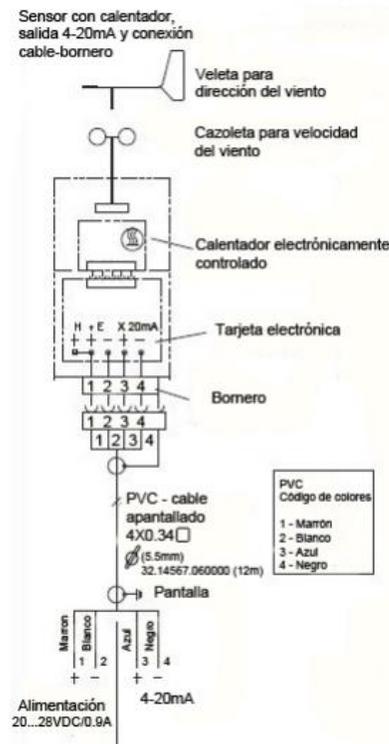
	Fr (lb/in)	w (in)	Electrodo	Diámetro (in)
Soporte1	57.2865	0.0044	ER4043	5/8
Soporte2	5.9023	0.0004	ER4044	5/8
Soporte3	39.0141	0.003	ER4045	5/8
Soporte4	247.4979	0.019	ER4046	5/8

Fuente: elaboración propia.

#### 4.10 SISTEMA DE ORIENTACIÓN

Sera necesario un sistema de orientación para el aprovechamiento del viento, debido a que el generador es a barlovento. Este sistema de orientación realiza la orientación de manera forzada mediante una corona dentada que mueve un motor reductor, este motor reductor se acciona mediante una señal que es enviada por un sensor a través de una veleta.

Figura 68. Anemómetro y veleta

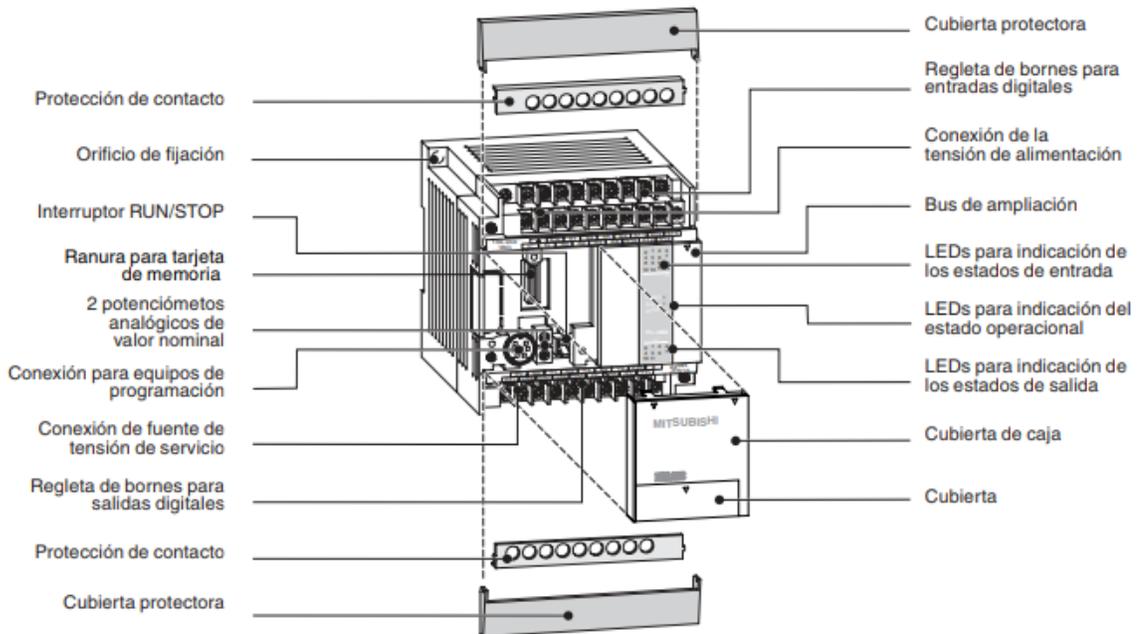


Fuente: DURAN Electrónica. Anemómetro cazoleta-veleta. [en línea]. [Consultado 15 abril 2019]. España: Madrid, 2012. Disponible en: [http://www.duranelectronica.com/docs/21\\_1704\\_E-manWINDindustry-v01.pdf](http://www.duranelectronica.com/docs/21_1704_E-manWINDindustry-v01.pdf).

Para el control tanto del sistema de freno como el sistema de orientación se hace a través de un PLC, el cual, se seleccionó de la marca Mitsubishi, el modelo FX1N, necesita menor espacio y permite ahorrar gastos y tiempo gracias a sus potentes herramientas de posicionamiento integradas. Además de los dos contadores de alta velocidad que pueden procesar señales de hasta 60 kHz, hay disponibles dos salidas de cadenas de pulsos de hasta 100 kHz. Con ellas es posible, sin módulos adicionales, realizar un sistema de posicionamiento sencillo de dos ejes en combinación con servoaccionamientos o con motores paso a paso<sup>31</sup>, se puede ver la descripción en la figura 69.

<sup>31</sup> Mitsubishi electric. Familia FX. [En línea]. 2004. [Consultado: 15 julio 2019]. Disponible en: <https://logismarketes.cdnwm.com/ip/mitsubishi-electric-europe-plcs-compactos-catalogo-de-plcs-compactos-melsec-que-componen-la-serie-fx-632609.pdf>

Figura 69. PLC Mitsubishi FX1N



Fuente: Mitsubishi electric. Manual de instrucción Fx series. [en línea]. 2005. [Consultado 15 julio 2019]. 34 p. Disponible en: [https://instrumentacionycontrol.net/wp-content/uploads/2017/11/lyCnet\\_Manual\\_Introduccion\\_fx-min.pdf](https://instrumentacionycontrol.net/wp-content/uploads/2017/11/lyCnet_Manual_Introduccion_fx-min.pdf)

La fuerza axial se ejerce por el peso de todos los componentes, la fuerza radial viene dada por la ecuación 54 donde el coeficiente de potencia no puede superar el límite de Betz, el cual está en un rango de 0.45 y 0.5<sup>32</sup>, teniendo en cuenta lo anterior se toma un coeficiente de potencia 0.5.

Ecuación 54. Fuerza radial

$$F_r = C_p * (v_{max})^2 * A_{proyectada}$$

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;

$F_r$  = Fuerza radial (N)

$C_p$  = Coeficiente de potencia

<sup>32</sup> Ingeniería de la energía eólica.

$V_{\max}$  = Velocidad máxima del viento (m/s)

$A_{\text{proyectada}}$  = Área proyectada ( $m^2$ )

$$F_r = 0.5 * \left(7.42 \frac{m}{s}\right)^2 * 20.76 m^2 = 571.49 N$$

Para la fuerza axial se tiene en cuenta la sumatoria del peso de todos los componentes, como se muestra en el cuadro 17.

Cuadro 17. Fuerza total axial

Componente	Masa (kg)	Peso (N)
Tobera	528.38	5183.408
Eje	22.91	224.7471
Generador	180	1765.8
Freno	8	78.48
Álabe1 (x2)	3.32	32.5692
Álabe2 (x2)	2.7	26.487
Álabe3 (x3)	1.56	15.3036
Álabe4 (x4)	1.02	10.0062
Álabe5 (x5)	0.7	6.867
Álabe6 (x6)	0.46	4.5126
Apoyo de rodamiento	1.9	18.639
Corona	1.3	12.753
Motoreductor	7.8	76.518
Soporte	635.48	6234.059
Veleta	5	49.05
Placa freno	35	343.35
Placa motorreductor	3.56	34.9236
Total	1439.09	14117.47

Fuente: elaboración propia, con base en. datos obtenidos por el software Solidworks.

Para la selección del motor reductor se utiliza el torque ejercido por la fuerza aerodinámica calculada anteriormente y la velocidad de giro depende de la estructura que gire de  $0^\circ$  a  $270^\circ$ , lo cual la velocidad de giro va a ser de  $270^\circ/s$  que equivales a 45 RPM. Con estos datos se procede a calcular la potencia del motor con la ecuación 55.

Ecuación 55. Potencia del motor

$$P_{motor} = \frac{T * RPM}{9549.2965}$$

$$P_{motor} = \frac{15.2 Nm * 45 rpm}{9549.2965}$$

$$P_{motor} = 0.07KW$$

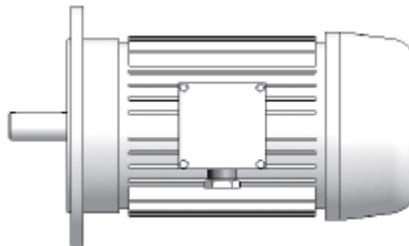
El motor reductor tendrá varios arranques en el transcurso del funcionamiento del aerogenerador, por esto es necesario multiplicar por un factor de seguridad el cual es de 1.5 y se procede a seleccionar del catálogo según la potencia calculada.

$$P_{motor} = 0.07 KW * 1.5$$

$$P_{motor} = 0.107KW \cong 0.14 HP$$

Con los datos obtenidos se hace la selección del motorreductor de la empresa WEQ, de 0,12 KW a 51,7 RPM con una fuerza radial máxima de 3500 N, especificaciones ver Anexo F.

Figura 70. Motorreductor



Fuente: WEQ. Reductores y motorreductores de Ejes Concéntricos. [Catalogo]. p. 5.

Ahora se hace la selección de la corona, la cual va estar unida por medio de pernos tanto al soporte como a la estructura, de la empresa iglidur® PRT, modelo PRT-01-100, ver especificaciones en el Anexo G.

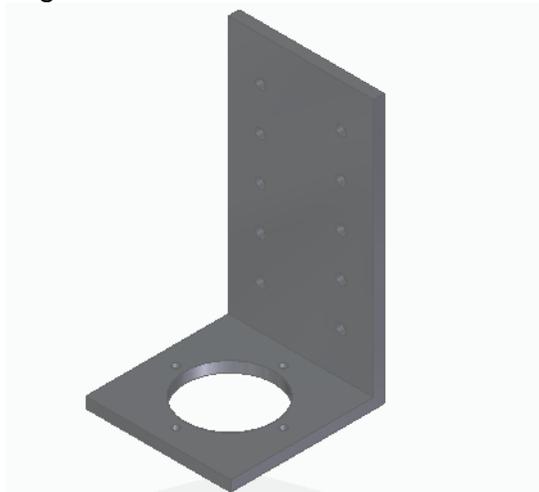
Figura 71. Corona



Fuente: IGLIDUR PRT. Slewing Ring Bearing. [Catalogo]. p. 1.

Para sostener el motorreductor, se diseñó una placa que va estar unida al soporte por medio de pernos M10, los cuales estarán sometidos a Límite de fluencia del material a un esfuerzo cortante de 0.03246 MPa y Límite de fluencia a tensión de 0.02814 MPa, en acero negro.

Figura 72. Placa motorreductor



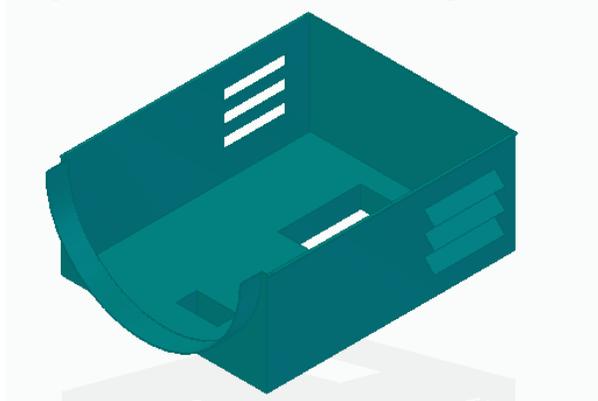
Fuente: elaboración propia.

#### 4.11 DISEÑO DE LA GÓNDOLA

La góndola es diseñada por los autores como se observa en las figuras 73, 74 y 75, teniendo en cuenta que esta servirá para la protección ambiental de los elementos tales como, el apoyo de rodamiento, el generador, el PLC, el freno y el eje.

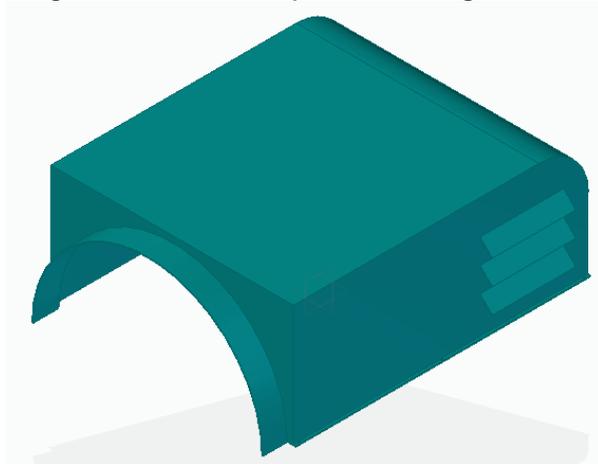
La góndola es de polietileno de alta densidad, al ser un material resistente al clima y soporta temperaturas altas para evitar que se derrita; además es un material liviano por lo que no afecta los cálculos anteriores, este está dividido en dos partes para su instalación y unidos por 6 pernos M6 de cabeza Hexagonal y acero negro.

Figura 73. Parte inferior de la góndola



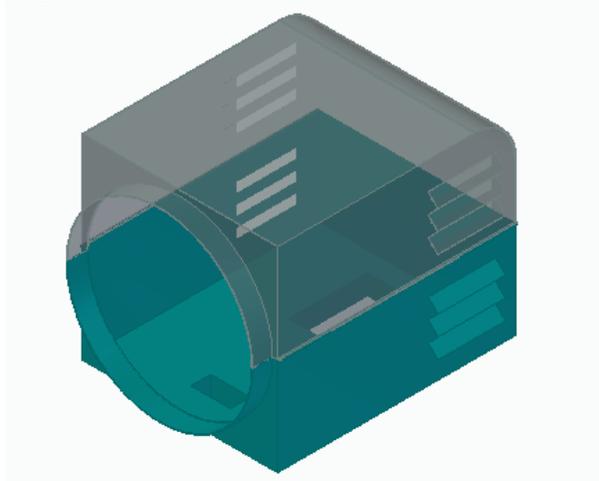
Fuente: elaboración propia.

Figura 74. Parte superior de la góndola



Fuente: elaboración propia.

Figura 75. Góndola



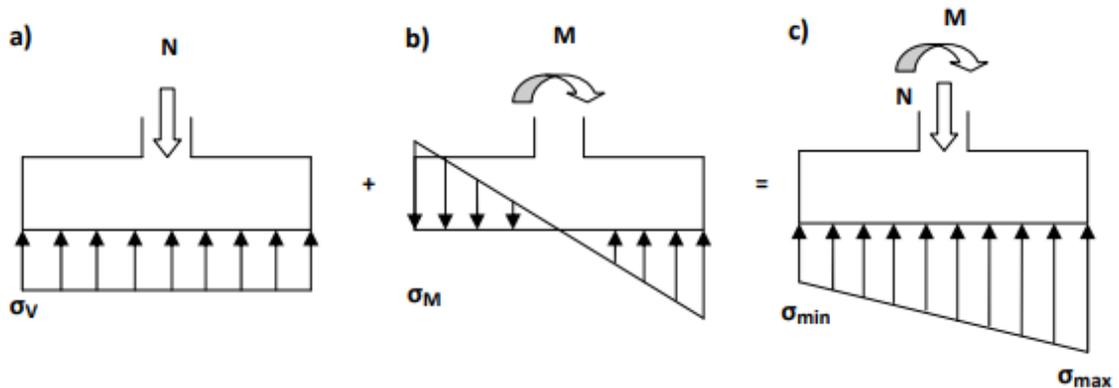
Fuente: elaboración propia.

#### 4.12 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

4.12.1 Material. El material seleccionado por sus propiedades y por su exposición al ambiente es el acero estructural A-36 el cual tiene un límite elástico de 248.1082 MPa (25.3 kgf/mm<sup>2</sup>) y el último esfuerzo de 400.1113 MPa (40.8 kgf/mm<sup>2</sup>).

4.12.2 Cimentación. La función que desempeña la cimentación es asegurar la estabilidad de la torre durante su vida útil, prácticamente la totalidad de la carga vertical proviene del peso de las partes del aerogenerador, pero la carga más significativa proviene directamente de los esfuerzos causados por el viento ver figura 76.

Figura 76. Fuerza sobre cimentación



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 abril 2019]. p. 45. 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>

El tipo que se va a elegir por las características del terreno explicada anteriormente es la cimentación onshore de geometría cuadrada y con un material de hormigón armado.

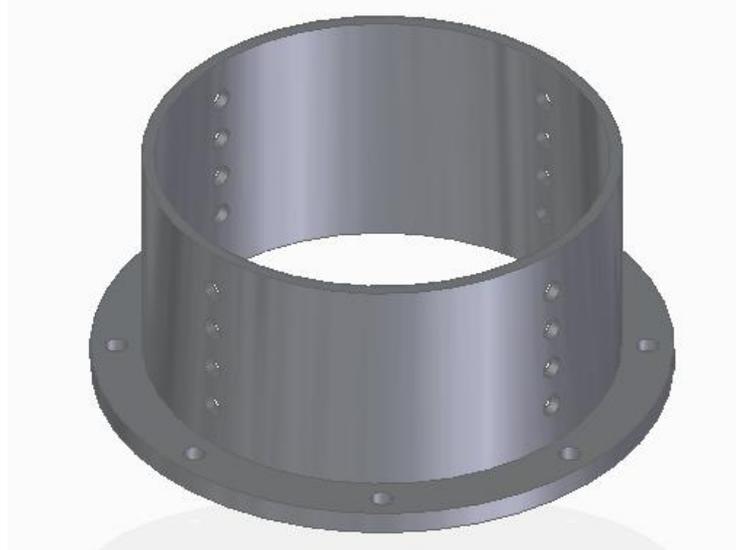
Cuadro 18. Tipo de terreno

Tipo de terreno	Tipo de cimentación
Roca próxima a la superficie	Superficial de hormigón armado apoyado 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 abril 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>

Para la unión de la estructura con la cimentación, se va a diseñar una placa que estará atornillada tanto en la parte de la estructura como en la parte de la cimentación, con pernos tipo cabeza Hexagonal M10.

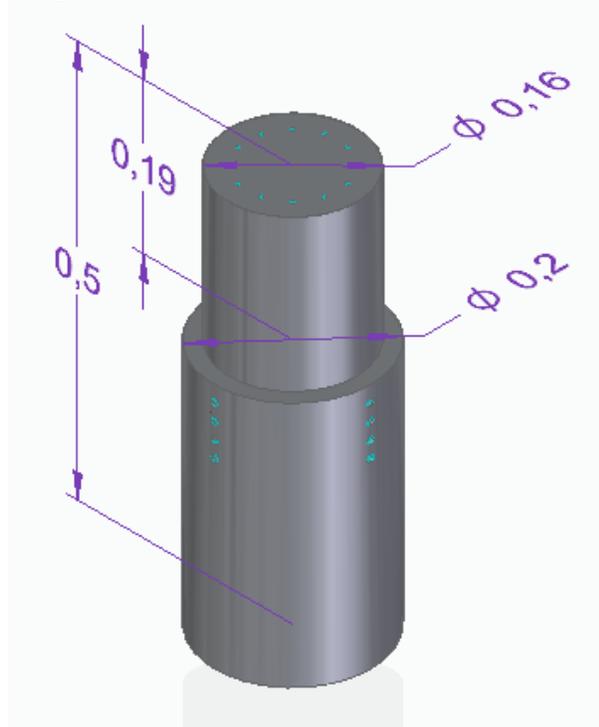
Figura 77. Unión para la estructura con la cimentación



Fuente: elaboración propia.

4.12.3 Dimensiones de la estructura. La estructura será circular, el único dato conocido es el diámetro exterior que será el mismo de la polea del sistema de orientación. Las dimensiones de la estructura serán definidas por los autores del proyecto con su respectivo estudio de cargas.

Figura 78. Dimensiones de la estructura

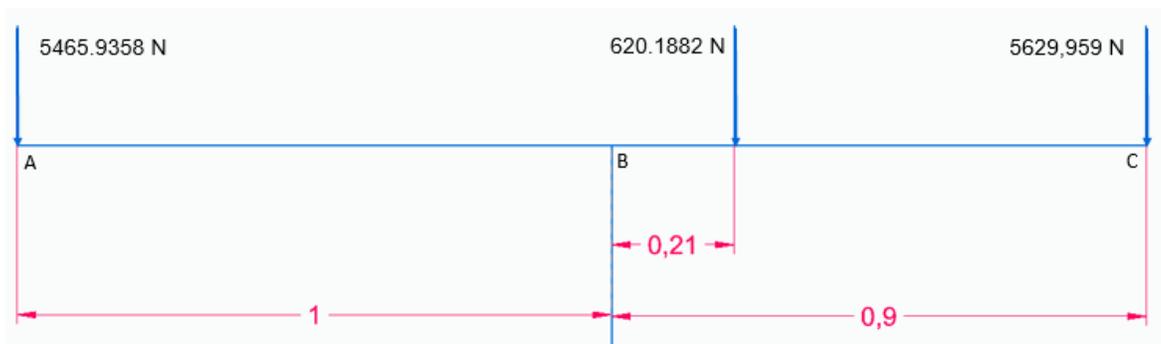


Fuente: elaboración propia.

4.12.4 Estudio de cargas. El método empleado para el diseño de la estructura será similar al diseño de una columna empotrada a un extremo y libre al otro.

Primero se comprueba el equilibrio ocasionados por los pesos de los componentes mirando los momentos que se generan a la izquierda y a la derecha, tal como se muestra en la figura 79.

Figura 79. Cargas de la estructura



Fuente: elaboración propia.

Ecuación 56. Momento lado derecho

$$\sum M_{der} = M_B + M_C$$

Donde;

$M_B$  = Momento en el centro de masa producido por el peso en el punto B

$M_C$  = Momento en el centro de masa producido por el peso en el punto C

$$620.1882 \text{ N} * 0.20593 \text{ m} + 5629.959 \text{ N} * 0.89698 \text{ m} = 5177.6759 \text{ Nm}$$

Ecuación 57. Momento lado izquierdo

$$\sum M_{izq} = M_A$$

Donde;

$M_A$  = Momento en el centro de masa producido por el peso en el punto A

$$5465.9358 \text{ N} * 0.99712 \text{ m} = 5450.1939 \text{ Nm}$$

El desequilibrio generado es de 272.518 N, esto debido a que en el punto A se tiene el peso de la tobera y del otro lado los demás componentes, en la norma NTC 2725 que titula: aerogeneradores. Requisitos de diseño para aerogeneradores pequeños, se basa en la norma ISO 2394 en su última actualización del 2015. En este documento se dice que no se dan requisitos mínimos para terremotos, por tanto, no se utiliza el reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10.

Se decide seguir la Norma Básica de Edificación Española (NBE), seguido del documento de proyecto de grado, Diseño de un aerogenerador para suministro de energía eléctrica para el alumbrado nocturno-externo de la planta vidrio andino S.A., estos dicen "la norma nombra 7 ítems de estudio" los cuales se van a describir a continuación.

4.12.4.1 Momento flector. El momento flector máximo se encuentra en el empotramiento de la torre, este debido a la fuerza del viento que se ejerce en el rotor del aerogenerador y sobre la estructura. El momento máximo será la sumatoria de estos.

Para hallar el momento sobre el rotor se tiene en consideración la Fuerza radial que genera el viento y la altura a la que se encuentra el rotor.

Ecuación 58. Momento en el rotor

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

Donde;

Fr = Fuerza radial (N).

H = Altura (m).

Anteriormente se calcula esta fuerza radial en el ítem 4.10 que afecta al rotor, resolviendo la ecuación se halla el momento flector sobre el rotor.

$$M_{rotor} = 571.49 \text{ N} * 1.7179 \text{ m} = 981.7741 \text{ Nm}$$

Se sabe que el viento ejerce una carga que no está distribuida uniformemente sobre la estructura, ya que esta velocidad del viento varía según su altura, y varía en forma de parábola, para hallar la fuerza puntual se utiliza la ecuación 59.

Ecuación 59. Carga ejercida por el viento

$$F = 0,5 * \rho * A_{proyectada} * (v)^2 * Ct$$

Donde;

Ct = Coeficiente de empuje (1,5)<sup>33</sup>

Resolviendo;

$$F = 0,5 * 0.852 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 20.76 \text{ m}^2 * \left(7.42 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 * 1.5 = 730.3584 \text{ N}$$

Para hallar la ubicación de esta fuerza se toma el centro de masa de una parábola y utilizando únicamente la posición Y.

Ecuación 60. Ubicación en Y

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

Donde;

b = Distancia del suelo hasta el rotor (m).

$$\bar{y} = \frac{3 * 1.71792 \text{ m}}{8} = 0.6443 \text{ m}$$

Una vez obtenida la ubicación de la carga se calcula la magnitud de esta, la cual es el área bajo la curva. A continuación, se utiliza la siguiente integral para determinar la fuerza distribuida sobre la estructura.

---

<sup>33</sup> NASA, Shape effects on drag. Drag coefficient. USA: National Aeronautics and Space Administration.

Ecuación 61. Magnitud de la fuerza

$$F_w(h) = \frac{1}{2} \rho \varphi C \int_h^H V^2 D dz$$

Donde;

$V$  = Velocidad del viento (m/s).

$\varphi$  = Factor de ráfaga (0.85).

$D$  = Diámetro exterior de la estructura (m).

$C$  = Factor de forma (1.5).

Este factor de ráfaga es igual a 0.85 debido a que la estructura es rígida, igual que el factor de forma que tiene un valor de 1.5, para este caso que la estructura es cilíndrica no se va a variar el diámetro y se tiene que es una estructura maciza. Para efectos de cálculos se va a tomar la ecuación 62 la cual es para una estructura cónica.

Ecuación 62. Variación de diámetro

$$D(z) = D_0 - \frac{D_0 - D_1}{L} * Z$$

Donde;

$(z)$  = Diámetro a una altura determinada (m).

$D_0$  = Diámetro inferior (m).

$D_1$  = Diámetro superior (m).

$L$  = Longitud (m).

$Z$  = Altura a la cual se determina el diámetro  $D(z)$ .

Remplazando las funciones en la integral y con el fin de dejar una cantidad de variables se reduce y se iguala a las constantes  $k_1$  y  $k_2$ ; Guidelines for Design of Wind Turbines.

Ecuación 63. Fuerza ejercida por el viento

$$F_w = \frac{(V^2 * D)}{h^{2\alpha}} \int_0^3 Z^{2\alpha} dz - \frac{V^2}{h^{2\alpha}} * \frac{D_0 - D_1}{L} \int_0^3 Z^{2\alpha+1} dz$$

$$k1 = \frac{v^2 * D}{h^{2\alpha}}$$

$$k2 = \frac{V^2}{h^{2\alpha}} * \frac{Do - D1}{L}$$

Reemplazando los valores en las ecuaciones;

$$k1 = \frac{(7.42 \frac{m}{s})^2 * 0,6 m}{(3 m)^{2(0.21)}} = 20.8241 \frac{m}{s^2}$$

$$k2 = \frac{(7.42 \frac{m}{s})^2}{(3 m)^{2(0.21)}} * \frac{0.6 m}{3 m} = 6.9414 \frac{m}{s^2}$$

Uniendo los valores de las constantes anteriores se obtiene;

$$Fw = \frac{1}{2} * 0.852 \frac{kg}{m^3} * 1.5 * 0.85 * \left[ \left( 20.8241 \frac{m}{s^2} * \frac{(3 m)^{2(0.21)+1}}{2(0.21) + 1} \right) - \left( 6.9414 \frac{m}{s^2} * \frac{(3 m)^{2(0.21)+2}}{2(0.21) + 2} \right) \right]$$

$$Fw = 15.6561 N$$

El momento flector para la estructura es igual;

Ecuación 64. Momento en la estructura

$$M_{estructura} = Fw * \bar{y}$$

$$M_{estructura} = 15.6561 N * 0.64422 m = 10.086 Nm$$

El momento máximo en el empotramiento es igual a 991.86 Nm.

4.12.4.2 Tensión máxima. Sobre la estructura actúan cargas axiales que generan esfuerzos normales y cargas radiales que generan un momento flector máximo en el empotramiento; como se observa en la figura 76, para determinar la tensión máxima, se debe relacionar la compresión máxima y el momento flector máximo.

Ecuación 65. Tensión máxima

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{m\acute{a}x} * Y_{m\acute{a}x}}{I} + \frac{N}{Ac}$$

Donde;

$M_{m\acute{a}x}$  = Momento máximo (Nm).

$Y_{\text{máx}} = \text{Radio (m)}$ .

$I = \text{Momento de inercia (m}^4\text{)}$ .

$N = \text{Peso de todo el sistema (N)}$ .

$A_c = \text{Área mínima de la sección transversal (m}^2\text{)}$ .

El momento de inercia de un cilindro es igual a;

Ecuación 66. Momento de inercia

$$I = \frac{1}{4} \pi r^4$$

$$I = \frac{1}{4} \pi * (0.3 \text{ m})^4 = 0.00636 \text{ m}^4$$

Resolviendo la ecuación se obtiene;

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{991.86 \text{ Nm} * 0.3 \text{ m}}{0.00636 \text{ m}^4} + \frac{27357.7356 \text{ N}}{\frac{\pi}{4} (0.3\text{m})^2} = 387,032.789 \text{ Pa}$$

Se comprueba si el material resiste estas cargas, utilizando la siguiente condición.

Ecuación 67. Condición

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

Donde;

F.S = Factor de seguridad.

$\sigma_y = \text{Esfuerzo máximo del material (MPa)}$ .

El valor mínimo permitido para el factor de seguridad es de 1.5, según el encuentro de ingenieros de Suelos y Estructuras<sup>34</sup>, este valor se va a tomar como referencia y resuelve la ecuación.

$$0.387032 \text{ MPa} \leq \frac{248.1082 \text{ MPa}}{1.5}$$

$$0.387032 \text{ MPa} \leq 165.4054$$

---

<sup>34</sup> V Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras en el año 2.009

Como se puede observar la estructura no va a fallar por tensión.

4.12.4.3 Desplazamiento horizontal. Este es ocasionado por las fuerzas horizontales a las que está expuesta la estructura y el rotor, analíticamente se pueden calcular de la siguiente manera<sup>35</sup>, sin embargo en la simulación de la estructura se pueden comprobar los datos obtenidos en esta. El desplazamiento del rotor por la acción de viento se determina de la siguiente manera;

Ecuación 68. Desplazamiento horizontal del rotor

$$D_{rotor} = \frac{Fr * H^3}{3 * \varepsilon * I}$$

Donde;

Fr = Fuerza del viento sobre el rotor (N).

H = Altura de la torre (m).

$$D_{rotor} = \frac{571.49 * (3 \text{ m})^3}{3 * 200 * 10^9 \text{ Pa} * 0.00636 \text{ m}^4} = 4.0435 * 10^{-6} \text{ m}$$

Para el desplazamiento horizontal de la estructura se toma la ecuación 69.

Ecuación 69. Desplazamiento horizontal de la estructura

$$D_{estructura} = \frac{Fr * a}{6 * \varepsilon * I} * (3 * L - a)$$

Donde;

Fr = 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).

L = Longitud de la torre (m).

$$D_{estructura} = \frac{571.49 \text{ N} * 0.64422 \text{ m}}{6 * 200 * 10^9 \text{ Pa} * 0.00636 \text{ m}^4} * (3 * 3 \text{ m} - 0.64422 \text{ m})$$

$$D_{estructura} = 4.0181 * 10^{-7} \text{ m}$$

---

<sup>35</sup> NÚÑEZ. Op. cit., p. 46

El desplazamiento horizontal total será la suma de los dos desplazamientos y esta será igual a  $4.4453 \cdot 10^{-6}$  m, como se puede observar este desplazamiento es mínimo. Para confirmar que este desplazamiento no afecte la estructura se debe cumplir con la siguiente condición<sup>36</sup>;

Ecuación 70. Condición desplazamiento horizontal

$$\frac{L}{500 * D_{total}} > 1$$

$$\frac{3 \text{ m}}{500 * 4.4453 * 10^{-6} \text{ m}} > 1$$

$$1349.7352 > 1$$

Esta condición también se cumple.

4.12.4.4 Desplazamiento vertical. Ocasionado por el peso total de los componentes, se halla con la ecuación 71.<sup>37</sup>

Ecuación 71. Desplazamiento vertical

$$V_z = \frac{N}{\varepsilon * Ac} * L$$

$$V_z = \frac{27357.7356 \text{ N}}{200 * 10^9 \text{ Pa} * \frac{\pi}{4} * (0.3 \text{ m})^2} * 3 \text{ m} = 5.8055 * 10^{-6} \text{ m}$$

El desplazamiento vertical en la estructura se debe a la compresión que ejerce el peso de la góndola. La condición propuesta por la NBE para verificar el valor de desplazamiento vertical es;

Ecuación 72. Condición de desplazamiento vertical

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

$$\frac{3 \text{ m}}{500 * 5.8055 * 10^{-6} \text{ m}} > 1$$

$$1033.5042 > 1$$

Se cumple la condición.

<sup>36</sup> GÁLVEZ, Raquel. Diseño y cálculo preliminar de la torre de un aerogenerador. Trabajo de grado Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica. España. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, 2005. P.77

<sup>37</sup> Ibid. p. 78

4.12.4.5 Pandeo. Para este caso el análisis de la estructura es parecido al análisis de columnas. La mayoría de las columnas tienden a fallar por pandeo. Este efecto se produce sobre miembros estructurales que son esbeltos y largos.

Para este caso se utilizan las mismas ecuaciones del ítem 4.9 diseño del soporte, con las siguientes condiciones.

Cuadro 19. Condiciones iniciales estructura

	bi (m)	hi (m)	l (m)	Ai (m <sup>2</sup> )	xi (m)	yi (m)	Ai*xi (m <sup>3</sup> )	Ai*yi (m <sup>3</sup> )
Estructura	r (m)	0.3	0.3	0.2827	0.15	0.15	0.042412	0.042412

Fuente: elaboración propia.

Con esas condiciones se halla el radio mínimo de cada elemento;

Cuadro 20. Radio mínimo de giro

lx (m <sup>4</sup> )	ly (m <sup>4</sup> )	lx <sub>cg</sub> (m <sup>4</sup> )	ly <sub>cg</sub> (m <sup>4</sup> )	rx (m)	ry (m)
7.85398E-05	7.85398E-05	0.006440265	0.006440265	0.150923	0.150923

Fuente: elaboración propia.

Todos son columnas cortas por tanto la ecuación para hallar el esfuerzo crítico no cambia.

Cuadro 21. Esfuerzo crítico

$\lambda$	$\sigma_{cr}$ (Pa)
0.022285443	248056631.3

Fuente: elaboración propia.

Y la comparación entre resistencia de diseño y carga mayoritaria se mantiene y eso indica que el soporte aguanta las cargas.

Cuadro 22. Resistencia de diseño y carga mayorada

Rd (pa)	Pu (Pa)
59628299.73	38300.83

Fuente: elaboración propia.

Y el chequeo por esbeltez también cumple cada elemento;

Cuadro 23. Esbeltez

esbeltez
1.987767

Fuente: elaboración propia.

## 5. PLANOS CONSTRUCTIVOS

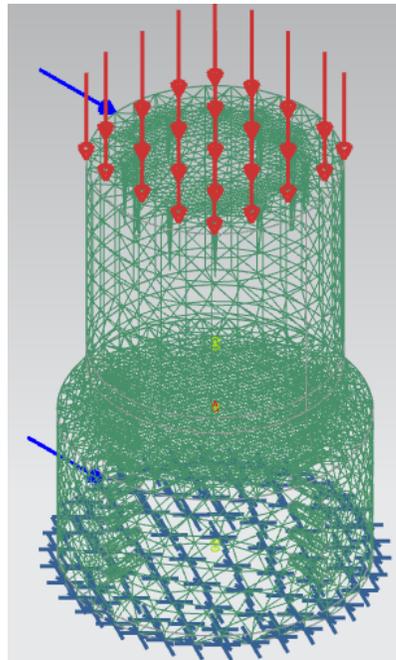
Ver Anexos

## 6. SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DE LA ESTRUCTURA

Para la simulación de la estructura se utiliza el software NX, para validar los resultados anteriormente calculados en el ítem 4.11.4, el material que se utiliza es el ASTM A36.

Las cargas que va a soportar la estructura, una es de tipo axial y se debe al peso total de los componentes que equivale a 27357.7357 N, y las dos carga generadas por el viento, para la carga sobre la estructura se mencionó anteriormente que es variable con la altura en forma parabólica, debido a que es complejo ingresar este tipo de cargas para el software, se decide utilizar la carga resuelta de la integral de 15.6561 N, a una distancia ya determinada por el centro de masa de una parábola que es de 0.6443m con respecto a la cimentación es decir a una distancia de 2.06443m del borde inferior de la estructura, y para la carga sobre el rotor se toma al borde superior de la estructura que es de 571.49 N.

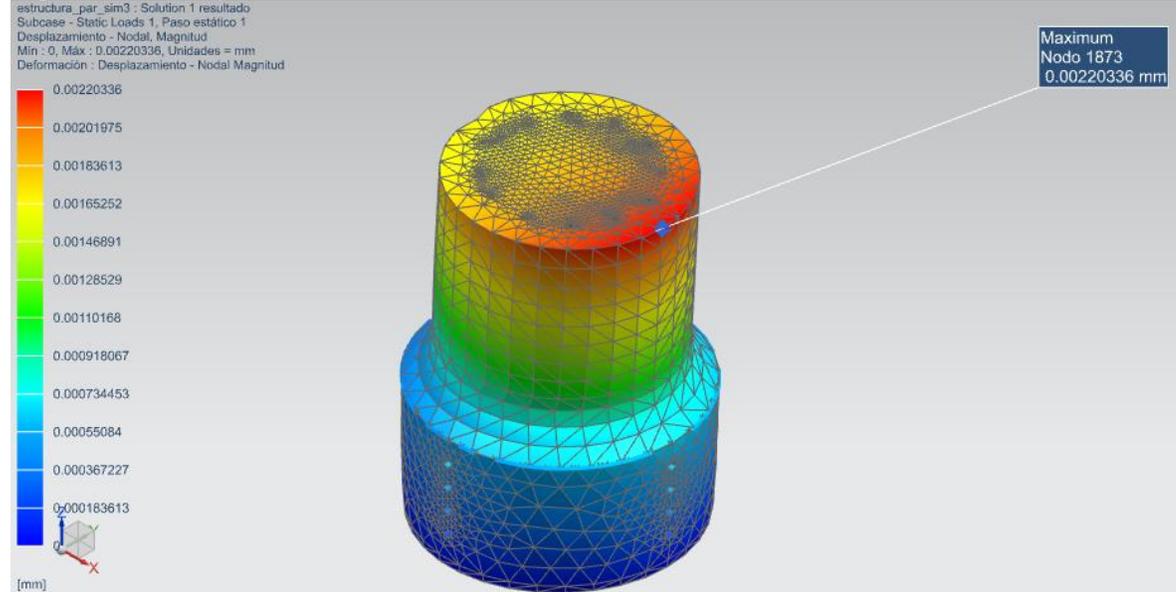
Figura 80. Condiciones de la estructura



Fuente: elaboración propia.

Lo máximo que se desplaza horizontalmente es 0.00220336 mm ( $2.20336 \cdot 10^{-6}$  m).

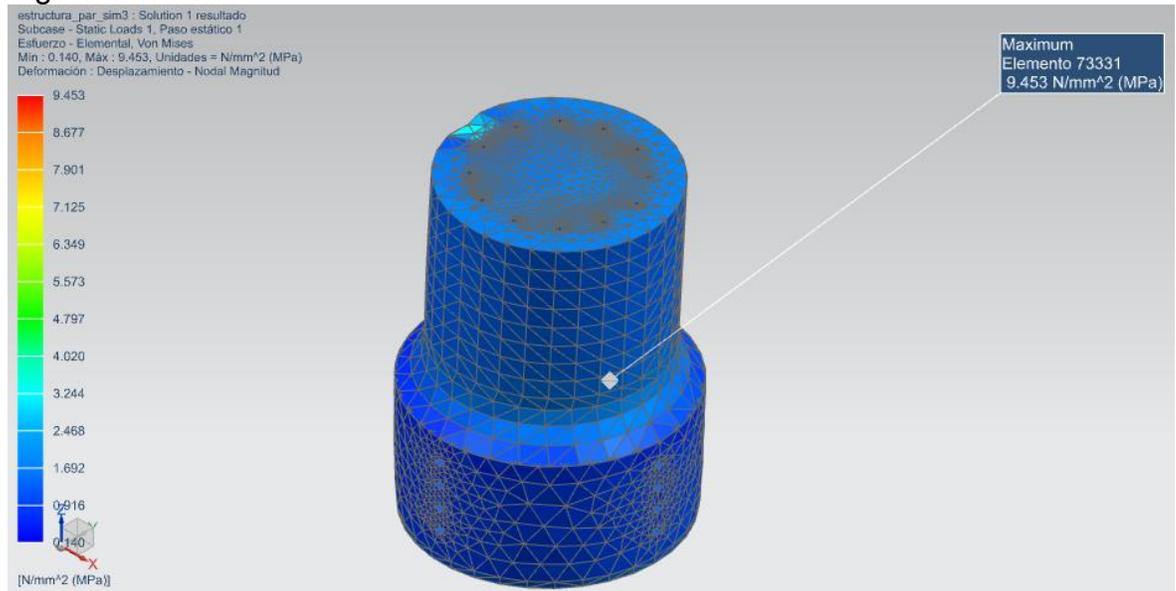
Figura 81. Desplazamiento horizontal



Fuente: elaboración propia.

El esfuerzo Von mises mayor es de 9.453 MPa, lo que indica que la estructura va a soportar las cargas viento y la carga axial del peso de los componentes.

Figura 82. Esfuerzo Von Mises



Fuente: elaboración propia

## 7. MANUALES

### 7.1 MANUAL DE CONSTRUCCIÓN

Para la cimentación se procede hacer un descapote del suelo no mayor a un área de 16m<sup>2</sup> para esto se necesita material como hormigón armado ya que el terreno es firme y el tipo de suelo es de roca poco fracturada y maquinaria de construcción de obras.

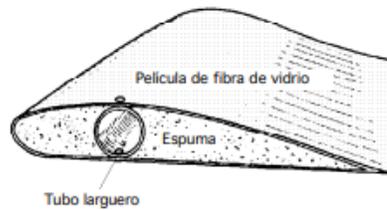
Figura 83. Construcción de la cimentación



Fuente: Optimización del diseño de la cimentación para un aerogenerador de gran altura. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/17202?locale-attribute=es>.

Para el proceso de fabricación de los álabes se utiliza un material sintético combinado con fibra de vidrio. Para este se usa un proceso de extrusión porque es menos costoso.

Figura 84. Material de fabricación de los álabes



Fuente: MÁQUINAS EÓLICAS. CARGAS, ORIENTACIÓN Y REGULACIÓN. p. 48.

Se requiere de grúa para trasladar la tobera al sitio de instalación ya que es de dimensiones grandes y pesada. También para el transporte de varios equipos que requieren para dicha construcción.

Para el proceso de fabricación de la tobera se obtiene una lámina de aluminio, con la cual se le hace un proceso de laminado en caliente y suelda con un electrodo ER4043 de tipo TIG.

Figura 85. Carro grúa



Fuente: MAQUINAS DE PANELES DE MADERA. Grúa telescópica autopropulsada. [sitio web]. 2018. [Consultado: 13 mayo 2019]. Disponible en: <http://abakan-teach.ru/grua-telescopica-autopropulsada/>

Para la construcción del eje se usa un material de acero al carbono ASTM A36 el cual se le hace un mecanizado y un taladrado para la sujeción de los álabes cuando se vayan a unir al eje.

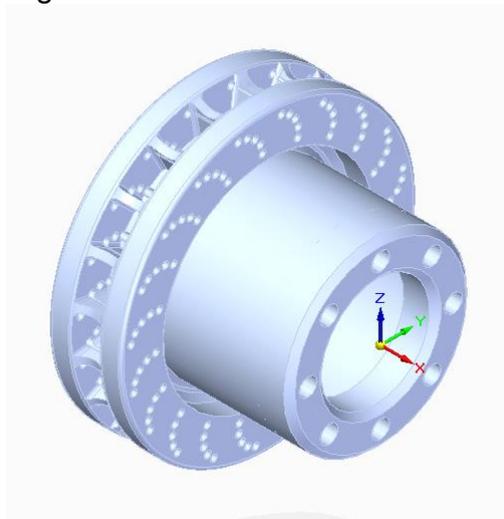
Para la fabricación de disco de freno se hace un proceso de fundición el cual requiere de moldes de arena, tal como se muestra en la figura 86, que juntos forman la forma del freno de disco donde el hierro es vertido a una temperatura de 3400°C, luego un tratamiento térmico para mejorar sus condiciones del material y se procede a separar sus impurezas. El material es fundición gris nodular de grafito laminar, ya que garantiza estabilidad en las prestaciones de servicio.

Figura 86. Fabricación del disco de freno



Fuente: NG BRAKE DISC. ¿Cómo se fabrican los discos de freno?. [en línea]. 2018. [Consultado: 8 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.ngbrakedisc.com/contacto/>

Figura 87. Disco de freno



Fuente: elaboración propia.

Para la fabricación del soporte de los componentes del aerogenerador se usa un material de aluminio para este se requiere de soldadura tipo TIG con el electrodo ER4043 para soldar aluminio y unir las 5 partes del soporte.

Para el proceso de fabricación de la estructura se hace por fundición del acero estructural y luego un debido tratamiento térmico como el temple para endurecer y aumentar la resistencia luego se procede a hacer un taladrado para la unión de los demás componentes.

Figura 88.  
Estructura



Fuente: elaboración propia.

## 7.2 MANUAL DE INSTALACIÓN

Para hacer las debidas instalaciones de los componentes del aerogenerador se requieren de las siguientes herramientas.

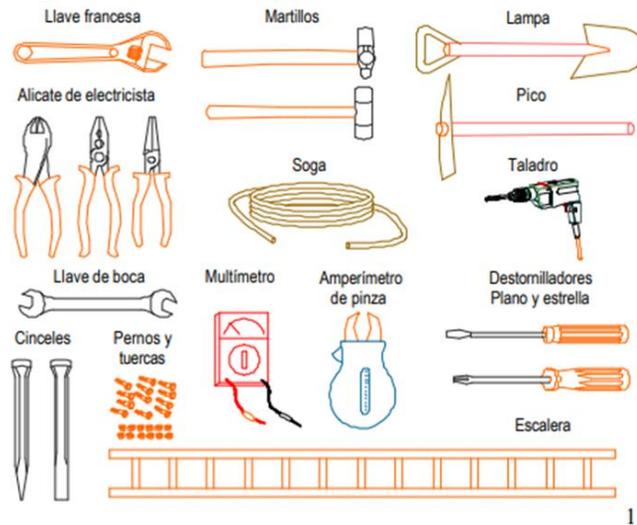
Figura 89. Juego de boquillas hexagonales



Fuente: ALIEXPRESS. 10 unids/set 6mm-17mm boquillas de manga hexagonal tuerca magnética juego de broca adaptador herramientas eléctricas hexagonales. [sitio web]. Colombia. 2013. [Consultado: 22 mayo 2019]. Disponible en: <https://es.aliexpress.com/item/10pcs-Set-6mm-17mm-Hex-Socket-Sleeve-Nozzles-Magnetic-Nut-Driver-Set-Drill-Bit-Adapter-Hex/32817665773.html>

Un conjunto de boquillas hexagonales, como se muestra en la figura 89, para el debido ajuste de cada perno y la unión de sus componentes según el tamaño de la rosca. Es necesario también tener en cuenta los siguientes instrumentos de instalación.

Figura 90. Instrumentos de instalación

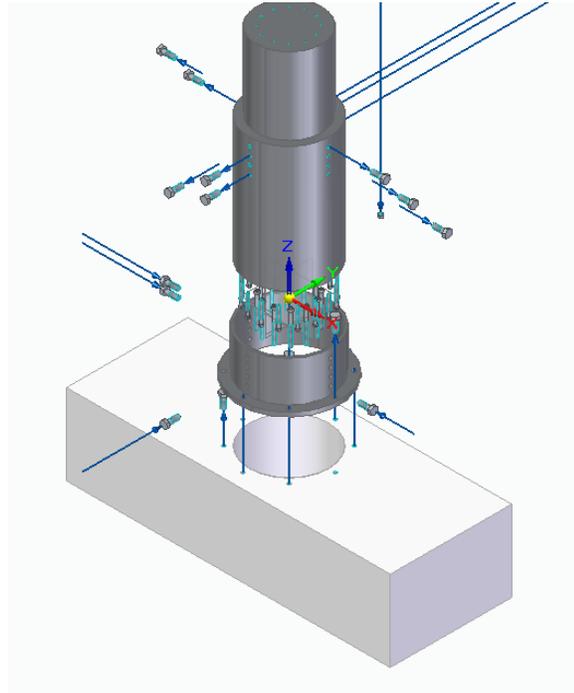


11

Fuente: MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS. Manual de instalación, reparación y mantenimiento de aerogeneradores de baja potencia. [en línea]. Lima, 2004. [Consultado 22 mayo 2019]. Disponible en: [https://www.calculosolar.com/curso/pdfs/8\\_aerogeneradores\\_manual\\_usuario\\_e\\_instalacion\\_aerogenerador.pdf](https://www.calculosolar.com/curso/pdfs/8_aerogeneradores_manual_usuario_e_instalacion_aerogenerador.pdf)

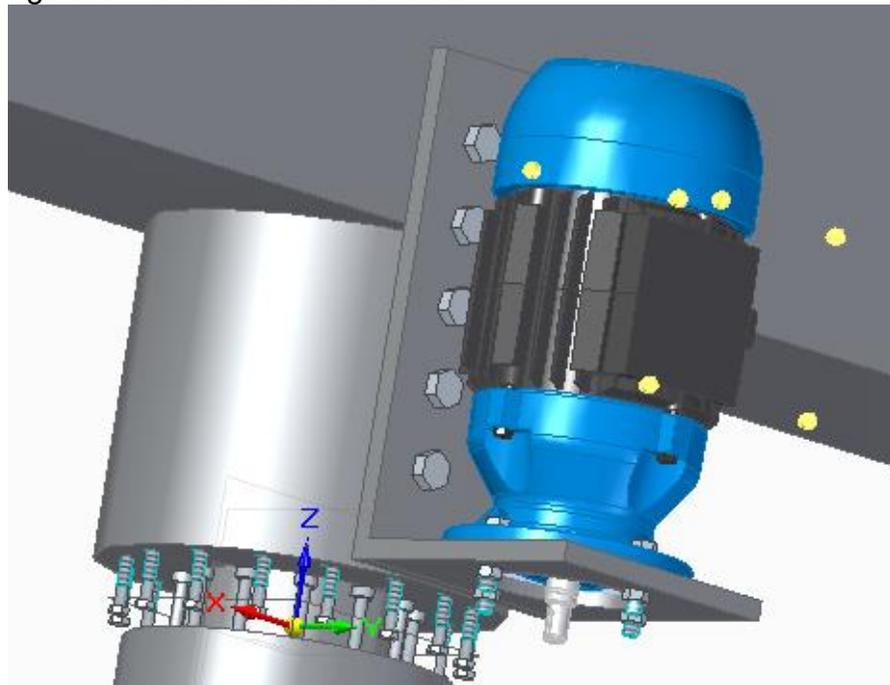
A continuación, con la instalación de la estructura que es donde va a ir soportada del resto de los elementos, va a ir atornillada en la parte inferior a la cimentación y en la parte superior al soporte. Este contendrá el sistema de orientación donde va a ir atornillado el motorreductor seleccionado del catálogo, tal como se muestra en la figura 91 y 92.

Figura 91. Unión de la estructura con la cimentación



Fuente: elaboración propia.

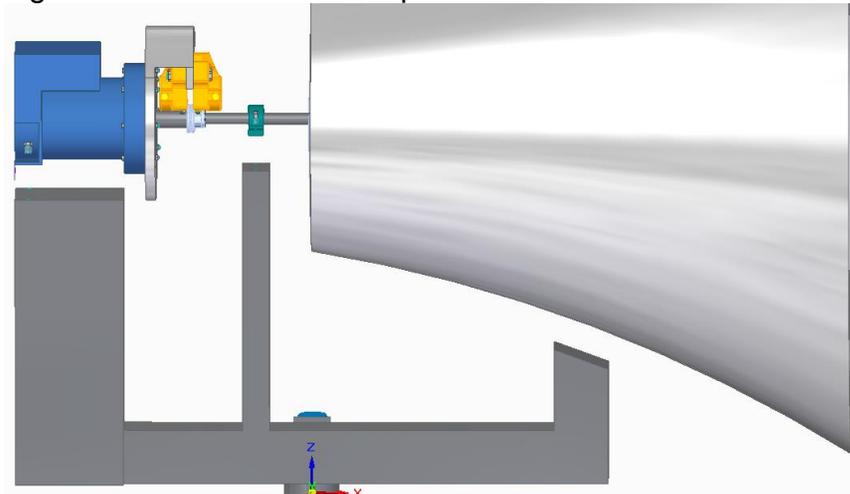
Figura 92. Sistema de Orientación



Fuente: elaboración propia.

Luego con una grúa se monta el soporte y se atornilla la parte interior a la torre, la parte superior derecha del soporte va a ir sujeta la tobera, en la parte superior central del soporte va a ir atornillada la chumacera y en la parte superior izquierda va a ir atornillado el generador, tal como se muestra en la figura 93.

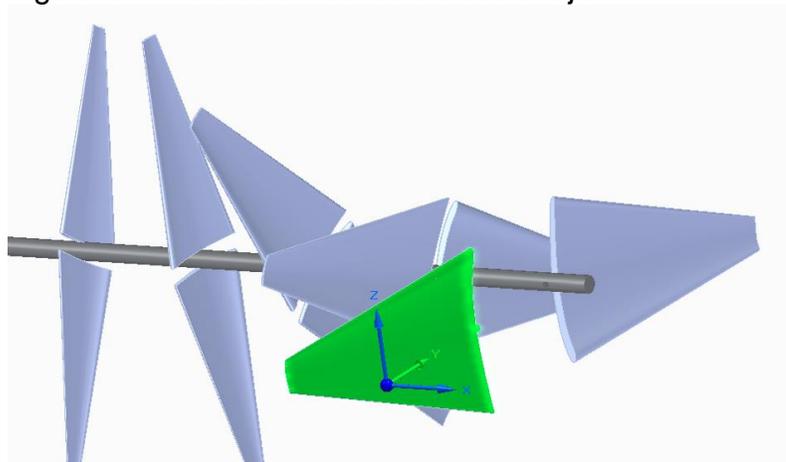
Figura 93. Instalación del soporte



Fuente: elaboración propia.

Para el montaje del eje y sus aspas, este va a tener agujeros roscados donde se van a dividir en 6 partes en el cual van a ir roscados los distintos álabes, como se observa en la figura 94.

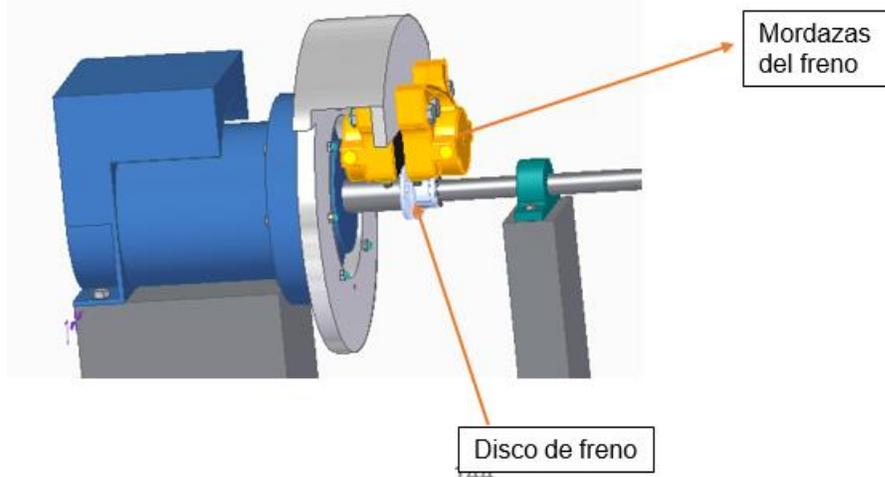
Figura 94. Instalación de los álabes al eje



Fuente: elaboración propia.

El generador y el apoyo de rodamiento, como ya se nombró anteriormente van a ir a atornillados al soporte. El generador contiene una placa donde va a ir atornilladas las mordazas del disco de freno como se ve en la figura 95.

Figura 95. Instalación del disco sistema de freno



Fuente: elaboración propia.

### 7.3 MANUAL DE OPERACIÓN

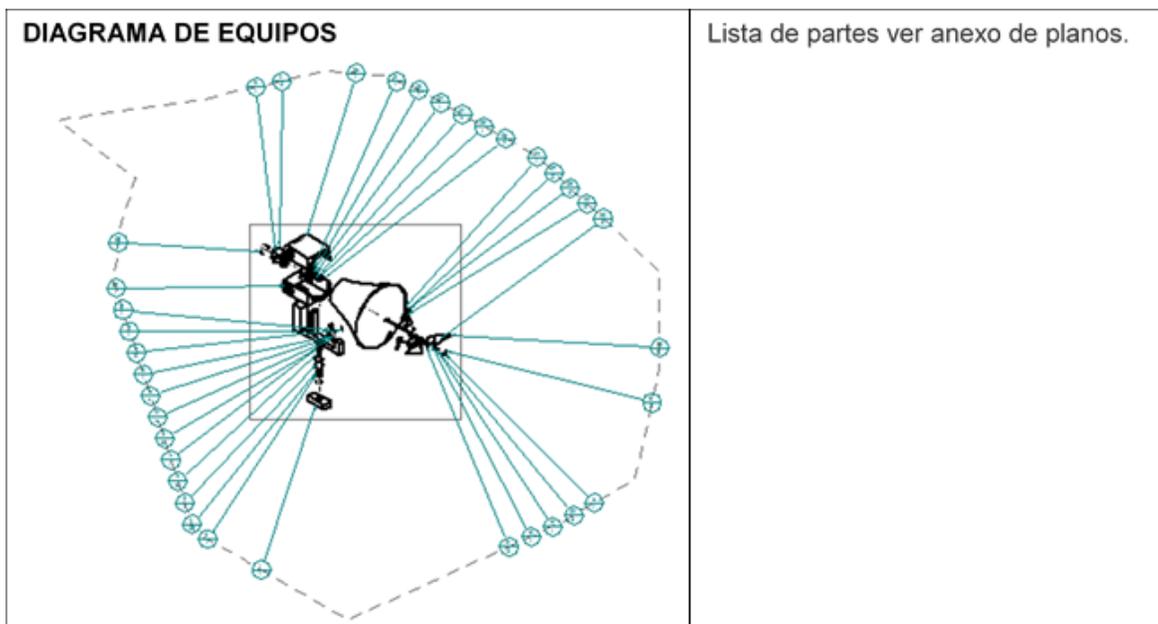
El sistema puede funcionar interrumpidamente sin intervención alguna, sin embargo, se recomienda monitorear el sistema, para mejorar su funcionamiento y prolongar la vida útil del mismo.

- El operador deberá revisar la maquina antes de manipular los componentes.
- Asegurar un sistema remoto de monitoreo.
- Revisar el manual de seguridad, antes de realizar cualquier operación, para saber que elementos de protección utilizar.
- Antes de realizar el arranque, verificar que todos los componentes estén en buen estado, de lo contrario realizar un mantenimiento correctivo a la pieza.
- Por medio de escalera realizar la inspección visual de cada componente de la máquina.
- Si se ausenta por varios días, activar el freno hidráulico.

- Realizar correctamente las tareas de mantenimiento.
- El paro del aerogenerador se debe hacer programado, según lo que indique el manual de mantenimiento.
- Realizar el procedimiento para la parada segura del rotor, por medio del freno hidráulico.
- Si hay viento suficiente y las aspas no giran, se debe a que el molino esta frenado, alguno de los diodos esta quemado, el rodamiento esta gastado o corto circuito.
- Si la torre vibra mucho, las aspas están desbalanceadas.

#### 7.4 MANUAL DE MANTENIMIENTO

<b>Molino de bolas horizontal</b>		Modelo de bolas húmedas Modelo MQG 1212	
		Datos técnicos	
		Potencia (kW)	5.715
		Velocidad de arranque (m/s)	2.4
		Peso (kg)	
		Altura (m)	2.95
		Longitud (m)	3.2
		Ancho (m)	2.5
		Modelo del generador	G Plus Line (160 Frame)
		Marca del generador	WEQ
<b>Descripción</b>	El objetivo principal es aprovechar la velocidad del viento, que está presente como energía cinética, por medio de una turbina se transforma esta energía en energía mecánica, que a su vez está conectada a un generador convirtiéndola en energía eléctrica, este generador va conectado a la línea eléctrica.		
<b>CARACTERÍSTICAS</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La capacidad del generador es de 6.4 KW, esta capacidad esta sobre la que entrega el aerogenerador para evitar sobrecargo en el generador.</li> <li>• El eje soporta las cargas de los alabes.</li> <li>• La tobera y el soporte están hechos de Aleación de aluminio 6061, este material fue seleccionado por su resistencia a las condiciones ambientales.</li> </ul>			

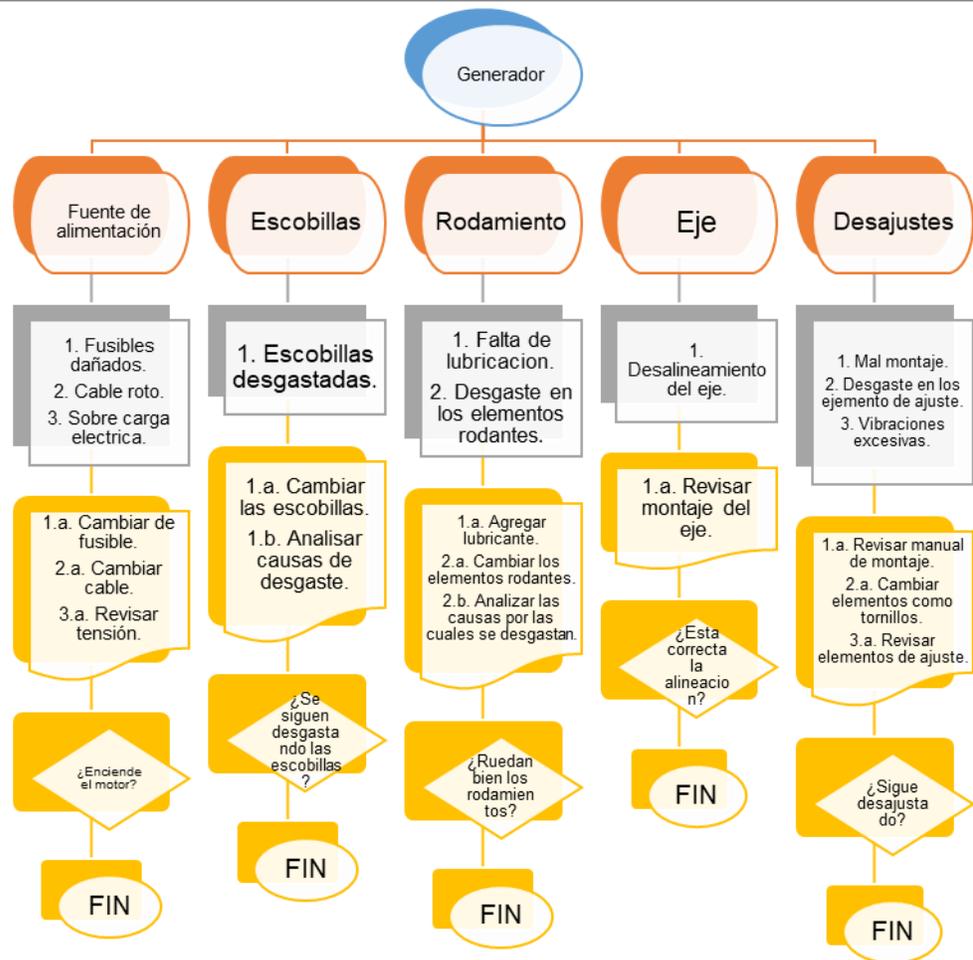


- LISTADO DE REPUESTOS**
- |                 |                |
|-----------------|----------------|
| 1. Rodamientos. | 7. Electrodos. |
| 2. Mordaza.     | 8. Corona.     |
| 3. Piñón.       |                |
| 4. Tuercas.     |                |
| 5. Pernos.      |                |
| 6. Tornillos.   |                |

**LISTA DE FALLAS**

FALLA	CARACTERISTICA	CAUSA	SOLUCIÓN	RECURSOS
Generador	No enciende	1. Falla eléctrica. 2. Falla mecánica.	1.a. Revisar los fusibles. 1.b. Revisar el cable de la fuente de alimentación. 1.c. Cambiar cable. 2.a. Revisar parámetros de operación. 2.b. Cambiar motor.	1.a. Técnico de mantenimiento. 1.b. Técnico de mantenimiento. 1.c. Herramientas. 2.a. Personal especializado. 2.b. Herramientas Motor nuevo.
Apoyo de Rodamientos	Los rodamientos se encuentran frenados	1. Lubricación.	1.a. Agregar lubricante. 1.b. Lubricante inadecuado.	1.a. Lubricante adecuado. 1.b. Personal especializado.
Dificultad en el arranque del motorreductor	Se presenta una dificultad al movimiento de los motores	1. Desgaste en las escobillas.	1.a. Verificar estado de las escobillas. 1.b. Cambiar las escobillas.	1.a. Técnico de mantenimiento 1.b. Escobillas nuevas.

Góndola	Grieta en la Góndola	<ol style="list-style-type: none"> <li>Vibraciones.</li> <li>Sobrecarga.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Disminuir las RPM.</li> <li>Verificar los parámetros de diseño y trabajar por debajo el máximo de carga permisible.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Técnico, tablero de control.</li> <li>Personal especializado.</li> </ol>
Corona-Piñón	Hay interferencia en los engranajes	<ol style="list-style-type: none"> <li>Picaduras en los dientes.</li> <li>Mal montaje.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Cambiar los engranajes.</li> <li>Verificar que pueda actuar libremente sin trabas.</li> </ol> <ol style="list-style-type: none"> <li>Corregir el montaje.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Juego de engranajes.</li> <li>Técnico, tablero de control.</li> <li>Personal especializado, Manual de montaje.</li> </ol>



INSPECCIONES			
Aspecto	Revisar	Periodicidad	Actividad
Infraestructura	Estructura.	Semanal	Visual
	Recursos: Técnico de mantenimiento.		
Sistema Eléctrico	Toma corriente no esté sobrecargado.	Semanal	Visual
	Recursos: Técnico de mantenimiento.		
	Conexiones.	Diario	Visual
	Recursos: Técnico.		
Sistemas Mecánicos	Revisar que no halla ruidos extraños en el generador.	Semanal	Visual / Auditivo
	Recursos: Técnico de mantenimiento.		
	Control visual de los pernos.	Semestral	Visual
	Recursos: Técnico de mantenimiento.		
	Revisar el acoplamiento.	Semestral	Visual
	Recurso: Técnico de mantenimiento.		
	Revisar grasas de los engranajes.	Semestral	Visual
Recursos: Personal especializado.			
Sistemas Hidráulicos	Comprobar el nivel de aceite para el freno.	Semestral	Visual
	Recurso: Técnico en mantenimiento, instrumento de medición de nivel.		
	Analizar lubricante.	Anual	Visual / Olfativa
	Recursos: Personal especializado.		

### ANÁLISIS

TIPO	DESCRIPCIÓN	PARTE	VERIFICAR
Ultrasonido	Analizar el comportamiento de los rodamientos y los engranajes.	Rodamientos y engranajes.	Con el detector de ultrasonido verificar los KHz.
Termografía	Verificar si hay alguna fuga de electricidad.	Generador y líneas de electricidad.	Con una cámara termografía verificar la temperatura.
Análisis de vibraciones	Analizar las vibraciones y mirar que amplitud tienen y si presenta desbalanceo el eje.	Generador y motorreductor.	Con el análisis de vibraciones verificar la amplitud de la onda.

### Procedencia

País	Colombia
Dirección	-Calle 42 F Sur No. 72 i – 38.
	-Transversal 34 No. 40 – 39 sur.
	Bogotá-Colombia.
Contacto	E-mail.: nadagoco08@gmail.com
	Juancho9628.jdsh@gmail.com
	Tel.: + 57 3196885758
	+ 57 320 882 9066

## 7.5 MANUAL DE SEGURIDAD

Para la operación de cada componente del aerogenerador, se debe tener en cuenta los siguientes riesgos.

Cuadro 24. Riesgos

Riesgos	Factor de riesgos
Atrapamiento	Eje, acoplamiento, disco de freno y mordaza, generador, grúa, rotor.
Contacto eléctrico	Generador, moto reductor.
Desplome	Aerogenerador, aspas.
Explosión	Arco eléctrico.
Exposición a agentes químicos	Lubricante, grasa, polvo y resinas en reparación
Caída de altura	Plataformas, escalera.
Sobreesfuerzos	Manipulación de cargas.

Fuente: elaboración propia

A continuación, se describe un proceso de seguridad en las actividades, antes, durante y después.

En el trabajo de mantenimiento el principal peligro está en la corriente eléctrica, las caídas de altura, caída de objetos; al realizar las tareas de mantenimiento se debe tener en cuenta los requisitos de la norma ICONTEC ISO 45001:2018 de “sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo” y la norma técnica Colombiana NTC-OHSAS 18001 de “Sistemas de gestión en seguridad y salud ocupacional. Requisitos”;

- Medidas preventivas específicas frente al riesgo de caída de altura, el trabajo se considera de riesgo por alturas a una altura después o igual a los 1.5 metros desde el suelo según la Resolución 1409 del ministerio de trabajo de Colombia del 2012, en consideración se debe tener la protección que se observa en la figura 96;

Figura 96. Equipo con arnés



Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Aerogeneradores (III): Medidas de prevención y protección durante el mantenimiento. [en línea]. España, 2014. [Consultado 3 mayo 2019]. p. 3. Disponible en: <https://www.aeeolica.org/uploads/documents/10172-aerogeneradores-iii-medidas-de-prevencirn-y-proteccirn-durante-el-mantenimiento.pdf>

Cuadro 25. Principales medidas de prevención en la estructura

Fase	Riesgo	Medida preventiva/protección
Estructura	Caída de altura	Protección colectiva en aberturas y huecos.
		Mantenimiento periódico de la estructura.
		Orden y limpieza.
	Desplome de estructura de torre, plataforma.	Respetar el peso máximo y número de personas indicado en las plataformas y señalizarlo.
		Revisión periódica de la estructura.
	Caída de objetos	Orden y limpieza.
		Utilizar medio de transporte adecuado de herramientas y equipos.
		Uso de casco de seguridad.
	Atrapamiento	Uso de guantes de protección mecánica y calzado de seguridad.
	Contacto eléctrico	Evitar el roce con elementos metálicos de los cables eléctricos.
No utilizar los conductores como punto de anclaje.		

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 3 mayo 2019]. p. 7. Disponible en: <https://www.aeeolica.org/uploads/documents/10172-aerogeneradores-iii-medidas-de-prevencirn-y-proteccirn-durante-el-mantenimiento.pdf>

Cuadro 26. Principales medidas de prevención en la góndola, álabes y eje

Fase	Riesgo	Medida preventiva/protección
Góndola, alabes y eje	Caída de altura	Protección colectiva en aberturas y huecos.
		Mantenimiento periódico de la estructura.
		Orden y limpieza.
	Desplome de estructura de torre, plataforma.	Respetar el peso máximo y número de personas indicado en las plataformas y señalizarlo.
		Revisión periódica de la estructura.
	Atrapamiento	Uso de guantes de protección mecánica y calzado de seguridad.
	Contacto térmico	Uso de guantes protección térmica.
		Señalización de las zonas peligrosas.
	Explosión circuitos a presión	Evitar llevar elementos que puedan quedar atrapados con elementos móviles.
	Proyecciones de partículas	Uso de gafas de seguridad.
Explosión	Evaluación específica del riesgo eléctrico y medidas de prevención y control, contemplando el derivado de arco eléctrico.	
Golpes, cortes y atrapamiento	Mantenimiento preventivo periódico.	
	Uso de guantes protección metálica.	

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 3 mayo 2019]. p. 8. Disponible en: <https://www.aeeolica.org/uploads/documents/10172-aerogeneradores-iii-medidas-de-prevencirn-y-proteccirn-durante-el-mantenimiento.pdf>

## 8. EVALUACIÓN IMPACTO AMBIENTAL

Para la evolución del impacto ambiental del proyecto se utiliza el método CONESA, que es uno de los métodos más utilizados, el cual tiene una parte cualitativa y una parte cuantitativa; se evaluara las etapas de instalación que generen impacto al ambiente, con los siguientes criterios se define la parte cuantitativa.

Figura 97. Criterios de evaluación

NATURALEZA		INTENSIDAD (I) ( Grado de destrucción)	
Impacto beneficioso	+	Baja	1
Impacto perjudicial	-	Media	2
		Alta	4
		Muy alta	8
		Total	12
EXTENSION (EX) (Area de influencia)		MOMENTO (MO) (Plazo de manifestación)	
Puntual	1	Largo plazo	1
Local	2	Medio plazo	2
Extenso	4	Corto plazo	4
Total	8	Inmediato	4
Crítica	(+4)	Crítico	(+4)
PERSISTENCIA (PE) (Permanencia del efecto)		REVERSIBILIDAD (RV)	
Fugaz	1	Corto plazo	1
Temporal	2	Medio plazo	2
Permanente	4	Irreversible	4
SINERGIA (SI) (Regularidad de manifestación)		ACUMULACION (AC) (Incremento progresivo)	
Sin sinergismo	1	simple	1
Sinérgico	2	acumulativo	4
Muy sinérgico	4		
EFFECTO (EF) (Relación causa – efecto)		PERIODICIDAD (PR) (Regularidad de la manifestación)	
Indirecto (secundario)	1	Irregular o periódico y discontinuo	1
Directo	4	Periódico	2
		Continuo	4
RECUPERABILIDAD (MC) (Reconstrucción por medios humanos)		IMPORTANCIA (I)	
Recuperable de manera inmediata	1	$I = +/- (3 I + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC)$	
Recuperable a medio plazo	2		
Mitigable	4		
Irrecuperable	8		

Fuente: CUESTA, Diana. Gestión ambiental. [Diapositivas]. Bogotá D.C. 12 p. [Consultado: 10 mayo 2019].

La evaluación ambiental da como resultado una actividad severa, que es el ensamblaje de la pieza, para mitigar esto se debe contar con una licencia ambiental, para las otras actividades se tiene un impacto moderado e irrelevante.

MATRIZ CUALITATIVA												
Elemento	Agua		Suelo		Aire		Ecosistemas Terrestres		Social		Económico	
Actividad	Calidad del Agua	Dinámica Fluvial	Propiedad de Físicas y Químicas	Paisaje	Material Particulado o Gases y Olores	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
Construcción de la Cimentación	X		X		X		X	X			X	X
Ensamblaje	X		X	X	X	X	X	X			X	X
Producción de Energía				X		X	X	X		X	X	

MATRIZ CUANTITATIVA													
Elemento	Impacto Ambiental	NATURALEZA	EXTENSIÓN	INTENSIDAD	MOMENTO	DURACIÓN	REVERSIBILIDAD	SINERGA	ACUMULACIÓN	EFECTO	PERIODICIDAD	RECUPERABILIDAD	IMPORTANCIA AMBIENTAL
Agua	Modificación de la calidad del agua. (Remoción de la capa vegetal).	-	1	2	1	1	1	4	1	1	1	1	-19
Suelo	Cambios de las propiedades físicas y químicas. (Contrucción).	-	1	4	1	4	4	4	1	4	1	4	-37
Aire	Material particulado, gases y olores. (Ensamblaje).	-	2	12	4	2	1	4	4	4	1	1	-61
Ecosistemas Terrestres	Afectación a biotopos. (Producción de energía).	-	1	4	1	4	1	1	4	1	4	8	-38
Social	Implementación de un servicio público. (Producción de energía).	+	1	4	2	4	4	1	4	1	4	1	35
Económico	Genera empleo. (Ensamblaje).	+	1	2	4	2	1	1	1	4	2	1	24

## 9. ANÁLISIS DE COSTOS

Para el análisis de costos se tendrá en cuenta solo la parte de fabricación donde se cotiza cada parte del aerogenerador; también se tendrá en cuenta los costos de ingeniería.

Cuadro 27. Costos de fabricación

Costos de fabricación					
Componentes	Ítem	Unidad	Cantidad	Valor	Total
Cimentación	Cemento	Kg	20	\$ 452	\$ 9,040
	Arena	Kg	20	\$ 240	\$ 4,800
	Grava 3/4	Kg	12	\$ 160	\$ 1,920
	Mortero	Kg	20	\$ 1,200	\$ 24,000
	Varilla (1/2 in)	Kg	6	\$ 3,230	\$ 19,380
Estructura	Fundición	Kg	103.14	\$ 8,300	\$ 856,062
Unión	Fundición	Kg	3.86	\$ 8,300	\$ 32,038
Corona		Unidad	1	\$ 187,920	\$ 187,920
Soporte	Fundición	Kg	635.48	\$ 5,100	\$ 3,240,948
	Servicio de soldadura	HH	4	\$ 50,000	\$ 200,000
Placa motorreductor	Fundición	Kg	3.56	\$ 5,100	\$ 18,156
Motorreductor		Unidad	1	\$ 168,900	\$ 168,900
Tobera	Lamina	Unidad	1	\$ 1,585,140	\$ 1,585,140
Apoyo de rodamiento		Unidad	1	\$ 14,000	\$ 14,000
Generador		Unidad	1	\$ 2,400,000	\$ 2,400,000
Álabes	Espuma	Kg	10	\$ 3,150	\$ 31,500
	Fibra de vidrio	Kg	10	\$ 3,300	\$ 33,000
	Servicio de mecanizado	HH	4	\$ 121,600	\$ 486,400
Eje	Material en bruto	Unidad	1	\$ 78,624	\$ 78,624
Perno	M6	Unidad	8	\$ 920	\$ 7,360
	M8	Unidad	10	\$ 518	\$ 5,180
	M10	Unidad	34	\$ 1,413	\$ 48,042
	M11	Unidad	7	\$ 338	\$ 2,366
	M12	Unidad	2	\$ 2,140	\$ 4,280
	M20	Unidad	2	\$ 627	\$ 1,254
	M26	Unidad	8	\$ 676	\$ 5,408
Sistema de orientación	PLC Mitsubishi FxN1-32mr	Unidad	1	\$ 319,000	\$ 319,000
	Cable programador USB	Unidad	1	\$ 150,000	\$ 150,000
	Veleta	Unidad	1	\$ 100,000	\$ 100,000
					\$ 10,034,718

Fuente: elaboración propia.

Para los costos de ingeniería se tiene en cuenta los costos de valor humano, gastos de maquinaria y equipos, fungibles y otros gastos.

Cuadro 28. Costos de ingeniería

Costos de ingeniería					
Componentes	Ítem	Unidad	Cantidad	Valor	Total
Talento humano	proyectista (x2)	HH	254	\$ 7,000	\$ 3,556,000
Gastos maquinaria y equipo	Anemómetro	Cantidad	1	\$ 30,000	\$ 30,000
	Computadora	Cantidad	1	\$ 2,800,000	\$ 2,800,000
Fungibles	Papel	Resma	6	\$ 11,500	\$ 69,000
	Tinta	Cartucho	2	\$ 36,900	\$ 73,800
Otros gastos	Servicios públicos	-	254	\$ 221	\$ 56,134
	Viajes (x2)	Pasajes	5	\$ 20,000	\$ 200,000
Total antes de imprevistos					\$ 6,784,934
Imprevistos 2-6% (4%)					\$ 271,397
Total					\$ 7,056,331

Fuente: elaboración propia.

Para el total del proyecto se hace la sumatoria de estos dos costos.

Cuadro 29. Costo total de proyecto

TOTAL DE PROYECTO	
Costos de ingeniería	\$ 7,056,331
Costos de fabricación	\$ 10,034,718
Total	\$ 17,091,049

Fuente: elaboración propia.

En comparación a tres aerogeneradores de la misma capacidad el costo es menor, aerogenerador de eje vertical Darrieus modelo ARVCOF-20KW precio 10,000 dólares más envío (33,780,000 pesos colombianos); Aerogenerador tripala modelo FD5-5000 precio 6,800 dólares más envío (22,970,400 pesos colombianos).

## 10. CONCLUSIONES

- El aerogenerador produce 5.715 KWh cuando la velocidad es igual a 5.5 m/s, cumpliendo el requisito mínimo de energía, para la finca esta energía es 7 veces mayor a la capacidad instalada que entrega EBSA.
- El aerogenerador es de tipo difusor, por lo cual supera el potencial eólico de 4.09 KWh, al incrementar la velocidad en cada sección del difusor.
- Desde el punto de vista económico el aerogenerador es más económico que un aerogenerador comercial de la misma potencia, además de presentar un tamaño más pequeño y de fácil instalación.
- En la parte ambiental el aerogenerador no causa impactos severos, por lo cual es una fuente limpia de energía, el impacto más notable es en la instalación donde se puede observar que presenta un impacto moderado.

## 11. RECOMENDACIONES

- El proyecto cuenta con un impacto moderado, se recomienda consultar con la autoridad de licencias ambientales ANLA, para la construcción e instalación del aerogenerador.
- El proyecto no cuenta con escaleras externas para la accesibilidad hacia la góndola, así que se recomienda un sistema de elevación, que permita acceder a la misma y a los equipos internos de la góndola.
- Se recomienda hacer un estudio de velocidad y dirección de viento con ayuda de una veleta y un anemómetro en la zona que se va a instalar el aerogenerador, para mayor precisión en los datos.
- El proyecto esta cuenta con el diseño del aerogenerador, se recomienda el diseño de la instalación eléctrica a la línea de corriente de la casa, incluyendo la programación del PLC.
- Ya que el material de la pastilla de la mordaza es en asbesto, se recomienda hacer el diseño del sistema de freno con un material diferente.

## 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, Nicolas. 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](https://ri.itba.edu.ar/bitstream/handle/123456789/252/500778_Alderete_Cabral.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

ALONSO ESTÉBANEZ, Alejandro. CASTRO FRESNO, Daniel. PASCUAL MUÑOZ, Pablo. DEL COZ DÍAZ, Juan José. ÁLVAREZ RABANAL, Felipe Pedro. Sistema de aceleración del flujo del aire para aerogeneradores. [en línea]. Tesis de grado. Universidad de Cantabria y Universidad de Oviedo. España- 2014. [Consultado 1 de noviembre 2018]. Disponible en:  
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/5429/ES2514990A1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ARQUITECTURA EN ACERO. El acero en las torres de generación eléctrica eólica. [Sitio web]. Brasil: alacero. [Consultado: 4 febrero 2019]. Disponible en:  
<http://www.arquitecturaenacero.org/uso-y-aplicaciones-del-acero/soluciones-constructivas/el-acero-en-las-torres-de-generacion-electrica>

BASTIANON, Ricardo. Calculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas, 2008. [Consultado: 16 marzo 2019].

BASTIANON, Ricardo. Energía del viento y Diseño de turbinas eólicas. [Consultado 16 marzo 2019].

CARGO POR CONFIABILIDAD. [en línea]. Colombia, 2017. [Consulta: 27 febrero 2018]. Disponible en:  
<http://www.creg.gov.co/cxc/download/documentos/CargoxConfiabilidad.pdf>

CENGEL, Yunes. BOLES, Michael. Energía, Transferencia de energía y análisis general de energía. En: Termodinámica. Séptima edición. New York: The MacGraw-Hill Companies, 2011.

DÍEZ, Pedro. Energía eólica. [en línea]. Departamento de ingeniería eléctrica y energética. Universidad de Catabria, España. [Consulta: 1 marzo 2019].

EKIDON. (2018). Ekidon. Obtenido de <<http://www.ekidom.com/historia-de-la-energia-eolica>>

Enel CODENSA. Generalidades 7.1. Acometidas eléctricas y medidores. Definiciones. [Sitio web]. 2015. [Consultado: 1 marzo 2019]. Disponible en: [https://ikinormas.micodensa.com/Norma/acometidas\\_medidores/generalidades\\_a\\_e/generalidades\\_7\\_1\\_actualizacion\\_generalidades](https://ikinormas.micodensa.com/Norma/acometidas_medidores/generalidades_a_e/generalidades_7_1_actualizacion_generalidades)

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

GÓMEZ, Laura. Análisis de viabilidad técnica y financiera de la generación de energía eléctrica a partir del recurso eólico en el municipio de Pereira. Trabajo de grado Medellín: Universidad EAFIT. 2015.

HERNÁNDEZ, Luis. Los PLC's y la generación de energía eléctrica mediante energía eólica y biomasa. Trabajo de diploma Santa Clara: Universidad central "Marta Abreu" de las Villas. 2016.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. Energía eólica. España 2006.

LMG. AeroGeneradores-G4. Bogotá Colombia, 2017.

LÓPEZ, Diego. Regulación de potencia de un aerogenerador de eje horizontal a partir de un sistema de control de velocidad de rotación. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista Bogotá D.C.: Universidad de la Salle.

LÓPEZ, Masao. La energía eólica: régimen jurídico económico y régimen de autorización de sus instalaciones de producción. Tesis de doctoral Granada: Universidad de Granada. 2008. 45 p.

MALLAGUARI, Alan. SHICAY, Freddy. Determinación de parámetros para la enseñanza de las energías renovables (solar, eólica, hidrógeno-electrolisis y pilas de combustible) utilizando el equipo de laboratorio " clean energy trainer". Tesis para obtener el título de Ingeniería Mecánica Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.

MCCORMAC, Jack. CSERNAK, Stephen. Introducción a los miembros cargados axialmente a compresión. En: Diseño de estructuras en acero. Quinta edición. New Jersey, 2012.

MOTT, Robert. Centroides y momentos de inercia de área. En: Resistencia de materiales. Quinta edición. Pearson Educación, 2009.

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

NOHANA. Eólica. Catálogo de productos. [En línea]. Málaga, España. [Consultado: 5 marzo 2019]. Disponible en: <http://www.nohana3000.com/wp-content/uploads/110823-Catalogo-Espa%C3%B1ol-Eolica.pdf>

ORDUZ, Oscar. SUÁREZ, Julián. Diseño y construcción de un prototipo de una turbina de eje vertical para la generación de baja potencia. Trabajo de grado para obtener el título de ingeniero mecánico Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2011.

Plan municipal de gestión del riesgo de desastres. [en línea]. Saboyá, Colombia, 2012. [Consulta: 26 diciembre 2018]. Disponible en: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/374/PMGRD%20Saboyá.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

SHIGLEY, Joseph E. Diseño en ingeniería mecánica. 8 ed. México, 2008

QUINTANA, David. Diseño y cálculo de aerogenerador de eje vertical. [En línea]. Proyecto final de carrera. Universidad de la Rioja, 2015. [Consultado 1 noviembre 2018]. Disponible en: [https://biblioteca.unirioja.es/tfe\\_e/R000001958.pdf](https://biblioteca.unirioja.es/tfe_e/R000001958.pdf)

TECHNOWIND. Aerogeneradores Techno Wind. Catálogo 201t. [En físico]. FICOSA renovables [Consultado: 5 marzo 2019].

VILLARRUBIA LÓPEZ, Miguel. Ingeniería De La Energía Eólica. México Barcelona: Alfaomega: Marcombo, México Barcelona: Alfaomega: Marcombo, 2013.

ANEXOS

## ANEXO A. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE SABOYA



ANEXO B.  
RECIBO DE LUZ


**EBSA**  
 Empresa de Energía de Boyacá S.A.E.S.P.  
 Para Energía Boyacense  
 Nit 891.800.219-1  
 O.R: EBSA E.S.P. Cra 10 N 15-87 Tunja Tel: 7405000 www.ebsa.com.co

Tarifa: 012511881026477  
**NÚMERO CUENTA**  
 FACTURA DE VENTA No. **179000559**  
 MES DE SERVICIO **115544006**  
 PERIODO **02/Jun al 02/Sep**  
**SEP/2018**  
 EMISION 02/Sep/2018

**INFORMACIÓN CLIENTE**

Cliente: **SANCHEZ LUIS**  
 Dirección: **MOLINO**  
 Municipio: **Saboya**  
 Nit C.C: **153951**  
 Ruta Entrega: **8000000007772050**  
 Contacto AP: **7255120**

**INFORMACIÓN TÉCNICA**

Clase de Servicio: **Estrato**  
 Nivel Tensión: **1 Secundaria**  
 Carga Instalada: **800**  
 Residencial  
 Modo Conexión: **38400**  
 Circuito: **14973**  
 Nombre: **4**

**DETERMINACIÓN DEL CONSUMO**

Marca	# Contador	Lectura Anterior	Lectura Actual	Factor	Obs	Consumo (Kwh)	Consumo (Kwh) Prefacturado	Consumo (Kwh) Total
ABB TPL A	1674629	11758	11869	1	0	111	0	111

**CONSUMOS ANTERIORES**

Consumo (Kwh)
111
63

## ANEXO C. PROPIEDADES DEL AIRE

Propiedades del aire a 1 atm de presión

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico $c_p$ $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

Nota: Para gases ideales,  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$  y Pr son independientes de la presión. Las propiedades  $\rho$ ,  $\nu$  y  $\alpha$  a una presión  $P$  distinta a 1 atm se determinan cuando se multiplican los valores de  $\rho$  a la temperatura dada por  $P$  (en atm) y cuando se dividen  $\nu$  y  $\alpha$  entre  $P$  (en atm).

Fuente: Datos generados a partir del Software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermann, IFI/Plenum, NY, 1970. ISBN 0-306067020-8.

ANEXO D.  
COORDENADAS AIRFOIL TOOLS

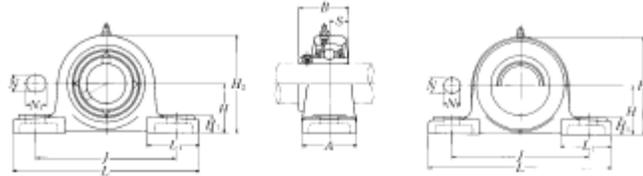
Bergey BW-3	(smoothed)		0.00098	0.007575	0
1	0	0	0	0.002374	0
0.99754	0.005377	0	0.00098	-0.002675	0
0.9907	0.009832	0	0.00548	-0.008511	0
0.98037	0.014829	0	0.01338	-0.012196	0
0.96698	0.019224	0	0.02433	-0.013947	0
0.95044	0.022809	0	0.03811	-0.014217	0
0.93064	0.025869	0	0.05468	-0.012611	0
0.90775	0.028919	0	0.07395	-0.008303	0
0.88202	0.03237	0	0.09576	-0.001757	0
0.8537	0.03637	0	0.11999	0.005319	0
0.82309	0.040841	0	0.14648	0.011745	0
0.79048	0.045621	0	0.17504	0.017421	0
0.75616	0.050519	0	0.20549	0.022413	0
0.72043	0.055358	0	0.2376	0.02661	0
0.68359	0.059983	0	0.2712	0.030055	0
0.64594	0.064264	0	0.30609	0.032881	0
0.60778	0.068087	0	0.34204	0.035149	0
0.56937	0.071364	0	0.37887	0.036877	0
0.53099	0.074019	0	0.41638	0.03804	0
0.49265	0.076004	0	0.45435	0.038516	0
0.45435	0.077273	0	0.49265	0.038182	0
0.41638	0.077828	0	0.53099	0.037048	0
0.37887	0.077706	0	0.56937	0.035252	0
0.34204	0.076951	0	0.60778	0.032983	0
0.30609	0.075596	0	0.64594	0.030383	0
0.2712	0.07364	0	0.68359	0.027494	0
0.2376	0.071048	0	0.72043	0.02432	0
0.20549	0.067764	0	0.75616	0.020901	0
0.17504	0.063738	0	0.79048	0.017338	0
0.14648	0.058982	0	0.82309	0.013759	0
0.11999	0.053604	0	0.8537	0.010295	0
0.09576	0.047811	0	0.88202	0.007041	0
0.07395	0.041881	0	0.90775	0.004033	0
0.05468	0.036113	0	0.93064	0.001266	0
0.03811	0.03075	0	0.95044	-0.001411	0
0.02433	0.025682	0	0.96698	-0.00458	0
0.01338	0.020381	0	0.98037	-0.007425	0
0.00548	0.014376	0	0.9907	-0.007524	0
			0.99754	-0.004897	0
			1	0	0

## ANEXO E. CATÁLOGO DE APOYO DE RODAMIENTO

**UCP2**

**NTN**

Chumacera tipo puente, alojamiento de acero fundido  
Con tornillo de fijación (Prisionero)



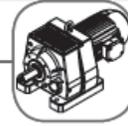
Tipo con guardapolvo de acero prensado  
Extremo abierto: S-UCP-D1  
Extremo cerrado: SM-UCP-D1

Diámetro del eje mm pulg.	Número 1) de la chumacera	Dimensiones nominales												Tamaño del perno mm pulg.	Número del rodamiento
		mm						pulg.							
		N	L	J	A	N	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7		
12	UCP201D1	30.2	127	95	38	13	16	14	62	42	31	12.7	M10	UC201D1	
1/2	UCP201-008D1	1 3/8	5	3 3/4	1 1/2	1/2	5/8	5/8	2 1/4	1 3/4	1.2205	0.500	3/8	UC201-008D1	
15	UCP202D1	30.2	127	95	38	13	16	14	62	42	31	12.7	M10	UC202D1	
5/8	UCP202-009D1	1 3/8	5	3 3/4	1 1/2	1/2	5/8	5/8	2 1/4	1 3/4	1.2205	0.500	3/8	UC202-009D1	
5/8	UCP202-010D1	30.2	127	95	38	13	16	14	62	42	31	12.7	M10	UC202-010D1	
17	UCP203D1	30.2	127	95	38	13	16	14	62	42	31	12.7	M10	UC203D1	
1 1/8	UCP203-011D1	1 3/8	5	3 3/4	1 1/2	1/2	5/8	5/8	2 1/4	1 3/4	1.2205	0.500	3/8	UC203-011D1	
20	UCP204D1	33.3	127	95	38	13	16	14	65	42	31	12.7	M10	UC204D1	
3/4	UCP204-012D1	1 3/8	5	3 3/4	1 1/2	1/2	5/8	5/8	2 5/8	1 3/4	1.2205	0.500	3/8	UC204-012D1	
25	UCP205D1	36.5	140	105	38	13	16	15	71	42	34.1	14.3	M10	UC205D1	
1 3/8	UCP205-013D1	1 3/8	5 1/2	4 1/4	1 1/2	1/2	5/8	5/8	2 3/4	1 3/4	1.3425	0.563	3/8	UC205-013D1	
1 1/4	UCP205-014D1	36.5	140	105	38	13	16	15	71	42	34.1	14.3	M10	UC205-014D1	
1 1/8	UCP205-015D1	36.5	140	105	38	13	16	15	71	42	34.1	14.3	M10	UC205-015D1	
1	UCP205-100D1	36.5	140	105	38	13	16	15	71	42	34.1	14.3	M10	UC205-100D1	
30	UCP206D1	42.0	165	121	48	17	20	17	83	54	38.1	15.9	M14	UC206D1	
1 1/8	UCP206-101D1	1 3/4	6 1/2	4 3/4	1 3/4	3/4	1 1/4	1 1/4	3 1/4	2 1/4	1.5000	0.626	1/2	UC206-101D1	
1 1/4	UCP206-102D1	42.0	165	121	48	17	20	17	83	54	38.1	15.9	M14	UC206-102D1	
1 1/8	UCP206-103D1	42.0	165	121	48	17	20	17	83	54	38.1	15.9	M14	UC206-103D1	
1 1/4	UCP206-104D1	42.0	165	121	48	17	20	17	83	54	38.1	15.9	M14	UC206-104D1	
35	UCP207D1	47.6	167	127	48	17	20	18	93	54	42.9	17.5	M14	UC207D1	
1 1/4	UCP207-104D1	1 3/4	6 5/8	5	1 3/4	3/4	1 1/4	1 1/4	3 5/8	2 3/4	1.6890	0.689	1/2	UC207-104D1	
1 1/8	UCP207-105D1	47.6	167	127	48	17	20	18	93	54	42.9	17.5	M14	UC207-105D1	
1 1/8	UCP207-106D1	47.6	167	127	48	17	20	18	93	54	42.9	17.5	M14	UC207-106D1	
1 1/8	UCP207-107D1	47.6	167	127	48	17	20	18	93	54	42.9	17.5	M14	UC207-107D1	
40	UCP208D1	49.2	184	137	54	17	20	18	98	52	49.2	19	M14	UC208D1	
1 1/2	UCP208-108D1	1 3/8	7 1/4	5 3/8	2 1/4	3/4	1 1/4	1 1/4	3 7/8	2 1/4	1.9370	0.748	1/2	UC208-108D1	
1 1/8	UCP208-109D1	49.2	184	137	54	17	20	18	98	52	49.2	19	M14	UC208-109D1	
45	UCP209D1	54	190	146	54	17	20	20	106	60	49.2	19	M14	UC209D1	
1 3/8	UCP209-110D1	2 1/8	7 3/4	5 3/4	2 1/4	3/4	1 1/4	1 1/4	4 1/8	2 3/4	1.9370	0.748	1/2	UC209-110D1	
1 1/8	UCP209-111D1	54	190	146	54	17	20	20	106	60	49.2	19	M14	UC209-111D1	
1 1/4	UCP209-112D1	54	190	146	54	17	20	20	106	60	49.2	19	M14	UC209-112D1	

Observaciones: 1) Los números indican que son del tipo relubrificable. Si se necesita el tipo libre-de-mantenimiento, por favor ordene sin el sufijo "D1".  
NOTA: Por favor, refiérase a la página 36 para el tamaño de la grasa.

## ANEXO F. CATALOGO MOTORREDUCTOR

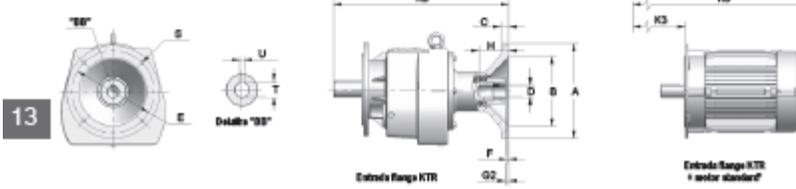
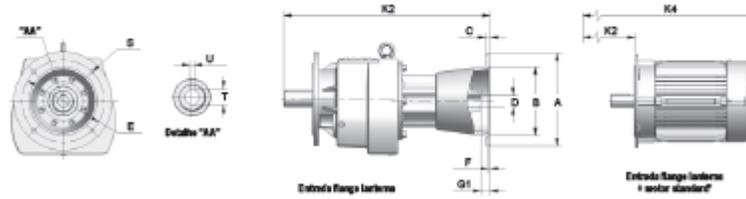
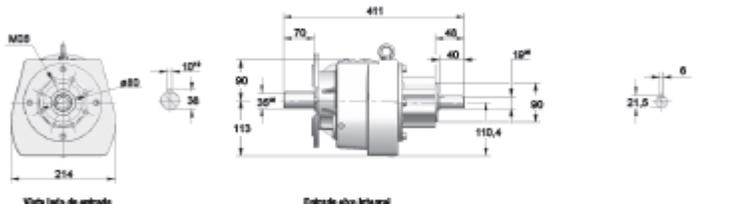
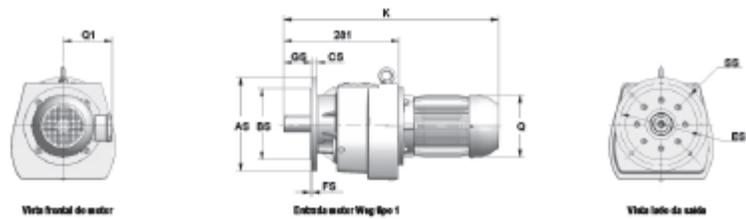
Potencia de entrada



**0,12 kW - 1750 rpm**



rpm	itot	fs	Fr (N)	código	páginas
					
428	4,09	29,89	900	C51212	100 a 102
349	5,01	29,24	900	C51214	100 a 102
306	5,72	29,36	800	C51215	100 a 102
267	6,57	29,31	800	C51216	100 a 102
248	7,05	29,24	800	C51217	100 a 102
235	7,45	28,68	900	C51218	100 a 102
191	9,14	23,38	800	C51219	100 a 102
168	10,4	20,49	900	C51220	100 a 102
146	12,0	17,86	1800	C51221	100 a 102
136	12,9	14,25	1900	C51222	100 a 102
126	13,9	14,24	2100	C51223	100 a 102
110	15,9	13,45	2200	C51224	100 a 102
97,4	18,0	11,90	2400	C51225	100 a 102
86,8	20,2	10,61	2500	C51226	100 a 102
75,5	23,2	9,22	2600	C51227	100 a 102
70,0	25,0	8,55	2800	C51228	100 a 102
63,8	27,4	7,79	2900	C51229	100 a 102
80,3	21,8	9,82	2950	C51327	100 a 102
67,2	26,0	8,21	3100	C51328	100 a 102
59,5	29,4	7,27	3200	C51329	100 a 102
55,1	31,8	6,73	3300	C51330	100 a 102
51,7	33,8	6,32	3500	C51331	100 a 102
43,3	40,4	5,29	3600	C51332	100 a 102
38,3	45,6	4,68	3800	C51333	100 a 102

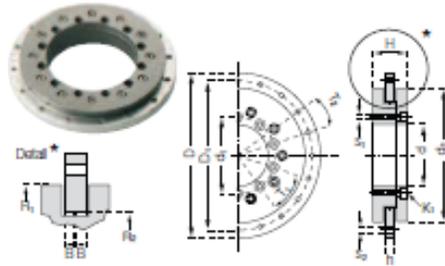


13

Carcapa	Flange Lanterna / KTR										Motor Eléctrico					Flange de saída												
	A	B	C	D	E	F	G1	G2	H	K2	K3	S	T	U	K	K4	K5	Q	Q1	Exec.	AS	BS	CS	ES	FS	GS	SS	
63	140	95 <sup>H</sup>	13	ø11	115	4	0	1	25	445	359	10	12,8	4	514,5	638	552	124	113	C	160	110 <sup>H</sup>	10	130	3,5	70	8,5	
71	160	110 <sup>H</sup>	14	ø14	130	4	0,5	1	34	446	359	10	16,3	5	546,5	664	577	139	121	D	200	130 <sup>H</sup>	12	165	3,5	70	11	
80	200	130 <sup>H</sup>	15	ø19	165	4	10	1	44	463	397,5	12	21,3	6	573,5	699	633,5	157	130	E	250	180 <sup>H</sup>	15	215	4	70	13,5	
90S	200	130 <sup>H</sup>	15	ø24	165	4	10	1	52	463	397,5	12	27,3	8	595,5	717	651,5	177	150									
90L	200	130 <sup>H</sup>	15	ø24	165	4	10	1	52	463	397,5	12	27,3	8	620,5	742	676,5	177	150									
100	250	180 <sup>H</sup>	16	ø28	215	5	20	1	63	475	420	15	31,3	8	670	791	736	198	160									
112	250	180 <sup>H</sup>	16	ø28	215	5	20	1	63	475	420	15	31,3	8	687	808	753	235	180									
132S	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	773	—	—	274	207									
132M	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	811	—	—	274	207									

## ANEXO G. CATALOGO CORONA

### Slewing ring bearing



Order key

**PRT-01-30-ES-H1**



#### Special properties

- Slewing ring with high stiffness
- Easy to fit
- High wear resistance
- Maintenance-free sliding pads made of iglidur® J [▶ page 109](#)
- Available in aluminium or stainless steel V4A



Available in stainless steel

#### Dimensions [mm]

Part Number	D*	D1	d1	d	d2	H	h	T1	T2	S1	S2	K1	R1	R2	B
					±0.2							for screw			
PRT-01-20	80	70	31	20	60	24	8	3 x 120°	6 x 60°	M4	4.5	DIN 7984 M4	30	20	3.5
PRT-01-30	100	91	42.5	30	82	29	10	8 x 45°	8 x 45°	M4	4.5	DIN 7984 M4	41	29	4.5
PRT-01-50	150	135	65	50	120	33	10	8 x 45°	16 x 22.5°	M6	6.6	DIN 912 M6	11.4	33	11.6
PRT-01-60	160	145	74	60	130	33	10	10 x 36°	20 x 18°	M5	5.5	DIN 912 M5	65	51.5	4.5
PRT-01-100	185	170	112	100	160	34	12	12 x 30°	16 x 22.5°	M5	5.5	DIN 912 M5	80	69	5.5
PRT-01-150	250	235	165	150	220	35	12	12 x 30°	16 x 22.5°	M5	5.5	DIN 912 M5	110	96.5	5.5
PRT-01-200	300	285	215	200	274	38	15	12 x 30°	16 x 22.5°	M6	6.6	DIN 912 M6	137	124	7.0
PRT-01-300	450	430	320	300	410	42	15	12 x 30°	16 x 22.5°	M8	9.0	DIN 7984 M8	205	186.6	7.0

\* Tolerance according to DIN ISO 2768 mK

Properties PRT-01-	Unit	-20	-30	-50	-60	-100	-150	-200	-300
Weight	kg	0.2	0.4	1.0	1.1	1.3	2.2	3.2	7.6
Max. axial load, static	N	15,000	27,000	40,000	50,000	55,000	80,000	100,000	150,000
Max. axial load, dynamic	N	4,000	7,000	10,000	15,000	16,000	25,000	30,000	90,000
Max. radial load, static	N	2,300	5,000	8,000	10,000	16,000	25,000	35,000	45,000
Max. radial load, dynamic	N	600	1,500	2,500	3,000	5,000	8,000	10,000	27,000
Max. rotat. speed dry running	1/min	300	250	200	200	150	100	80	50
Rigidity, axial	N/µm	80	100	250	300	400	450	500	500
Rigidity, radial	N/µm	10	50	60	65	65	65	65	65
Max. perm. tilting moment	Nm	100	200	600	800	1,500	2,000	3,800	5,000

ANEXO H.  
PLANOS Constructivos