

DISEÑO DE DETALLE DE UN GENERADOR EÓLICO TIPO SAVONIUS

NATALIA ARBELÁEZ JARAMILLO

DANIEL OCHOA PALACIO

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Mecatrónicos

Luis Vicente Wilches Peña

Mg. Ingeniería, Área de Materiales y Procesos



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
ENVIGADO
2013**

A las personas que propiciaron los medios para que el desarrollo de este proyecto fuera posible.

AGRADECIMIENTOS

Luis Vicente Wilches Peña, profesor de Ingeniería Mecatrónica y director del proyecto, por su constante apoyo, su gran acompañamiento durante el desarrollo y por todo el tiempo de ayuda continua que fortalecieron el contenido de este trabajo, además por su comprensión, tolerancia, respeto y puntualidad ante las necesidades y a los aportes para el enriquecimiento personal y profesional.

A los demás profesores del área de Ingeniería Mecatrónica que con sus asesorías dieron una orientación y lineamientos claves durante el proceso de desarrollo. Yesid Montoya, profesor de la de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, el cual fue un apoyo importante en la validación de los resultados teóricos por medio de herramientas de simulación FEA.

CONTENIDO

| | pág. |
|---|------|
| INTRODUCCIÓN..... | 19 |
| 1. PRELIMINARES..... | 21 |
| 1.1. Planteamiento del problema | 21 |
| 1.2. Objetivos del proyecto | 21 |
| 1.2.1. Objetivo General..... | 21 |
| 1.2.2. Objetivos Específicos | 21 |
| 1.3. Marco de referencia..... | 22 |
| 1.3.1. Recurso eólico | 22 |
| 1.3.1.1. Clasificación de los vientos | 23 |
| 1.3.1.2. Densidad y velocidad del viento | 23 |
| 1.3.1.3. Distribución de masas de aire en el globo, relación con las masas de agua y el relieve. | 24 |
| 1.3.2. Generadores eléctricos..... | 26 |
| 1.3.2.1. Generadores de eje horizontal | 26 |
| 1.3.3. Primeros Usos de la energía eólica | 29 |
| 1.3.3.1. Comienzos industriales en Dinamarca durante las guerras mundiales.... | 30 |
| 1.3.3.2. La industria de generación a partir de grandes generadores..... | 31 |
| 1.3.4. Perfiles aerodinámicos NACA..... | 31 |
| 1.3.5. Generadores de altitud | 32 |
| 1.3.6. Generadores de baja potencia..... | 32 |
| 1.3.7. Generadores tipo Savonius | 33 |
| 1.3.7.1. Manufactura de aerogeneradores Savonius..... | 34 |
| 1.3.7.2. Casos de éxito en la implementación del aerogenerador Savonius..... | 35 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 1.3.8. | Transmisión de energía eléctrica..... | 35 |
| 1.3.9. | Acumulación de energía eléctrica..... | 36 |
| 1.3.10. | Interconexión con otros sistemas de generación..... | 38 |
| 1.3.11. | Mantenimiento | 38 |
| 1.3.12. | Aprovechamiento energético del viento..... | 38 |
| 1.3.13. | Evaluación del recurso eólico en la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia) ... | 41 |
| 1.3.13.1. | Distribución de Weibull..... | 42 |
| 1.3.13.2. | Potencia y energía que se encuentra disponible en el viento y Límite de Betz... | 44 |
| 2. | METODOLOGÍA..... | 46 |
| 3. | DISEÑO DE CONCEPTO..... | 48 |
| 3.1. | Necesidades y medidas..... | 48 |
| 3.2. | Especificaciones..... | 51 |
| 3.3. | Definición de funciones..... | 52 |
| 3.4. | Diagrama de funciones..... | 53 |
| 3.5. | Solución de funciones..... | 53 |
| 3.6. | Matriz de funciones y soluciones | 58 |
| 3.8. | Calificación y selección..... | 62 |
| 3.9. | Relaciones funcionales..... | 66 |
| 4. | DISEÑO DE DETALLE | 67 |
| 4.1. | Reglas de simplicidad, claridad y seguridad | 67 |
| 4.2. | Principio de diseño aplicado | 67 |
| 4.3. | Lineamientos de diseño..... | 68 |
| 4.4. | Dimensionado de formas y selección de materiales | 68 |
| 4.4.1. | Dimensiones del rotor..... | 68 |
| 4.4.2. | Dimensiones del eje del rotor | 74 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.5. | Selección de sistema de transmisión..... | 76 |
| 4.6. | Selección de rodamientos | 77 |
| 4.7. | Calibres y espesores | 78 |
| 4.7.1. | El rotor y eje | 78 |
| 4.7.2. | La base | 85 |
| 4.8. | Sistema eléctrico | 86 |
| 4.8.1. | Fase de funcionamiento 1 (generación eléctrica)..... | 88 |
| 4.8.2. | Fase de funcionamiento 2 (rectificación y filtro) | 97 |
| 4.8.3. | Fase de funcionamiento 3 (almacenamiento de energía) | 100 |
| 4.8.4. | Fase de funcionamiento 4 (inversor)..... | 101 |
| 4.8.5. | Concepto del generador eléctrico | 102 |
| 4.9. | Descripción de detalle del montaje del aerogenerador | 106 |
| 4.10. | Descripción del ensamble | 119 |
| 4.10.1. | Rotor..... | 119 |
| 4.10.2. | Generador..... | 120 |
| 4.10.3. | Base | 124 |
| 4.11. | Cálculos del sistema por medio de herramientas cad | 126 |
| 4.12. | Simulación fea por medio de autodesk simulation multiphysics..... | 129 |
| 5. | CONCLUSIONES..... | 141 |
| 6. | RECOMENDACIONES..... | 143 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 144 |

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|------|
| Tabla 1. Promedio de las velocidades del viento en la Escuela de ingeniería de Antioquia desde el 19 de diciembre del 2012 al 26 de agosto del 2013..... | 42 |
| Tabla 2. Resultados de frecuencias de la velocidad de los vientos en la Escuela de Ingeniería de Antioquia, con datos tomados del 19 de diciembre del 2012 al 26 de agosto del 2013..... | 43 |
| Tabla 3. Lista de necesidades | 49 |
| Tabla 4. Lista de necesidades y medidas | 50 |
| Tabla 5. Función F1, Recibir energía mecánica del viento (ref imágenes anexo1)..... | 54 |
| Tabla 6. Función F2, Transmitir movimiento rotacional (ref imágenes anexo1)..... | 54 |
| Tabla 7. Función F3, Transmitir energía mecánica (ref imágenes anexo1)..... | 55 |
| Tabla 8. Función F4, Transformar energía mecánica a eléctrica (ref imágenes anexo1). | 55 |
| Tabla 9. Función F5, Almacenar energía (ref imágenes anexo1)..... | 56 |
| Tabla 10. Función F6, Transformar energía eléctrica (ref imágenes anexo1). | 56 |
| Tabla 11. Función F7, Visualizar datos (ref imágenes anexo1)..... | 57 |
| Tabla 12. Función F8, Controlar modo (ref imágenes anexo1). | 57 |
| Tabla 13. Matriz de funciones y soluciones para un aerogenerador Savonius (referencias en el Anexo 1). | 58 |
| Tabla 14. Matriz morfológica de soluciones para el generador eólico (referencias Anexo 1) | 61 |
| Tabla 15. Criterios de selección..... | 63 |
| Tabla 16. Suma de los criterios de selección, para la selección del concepto..... | 63 |
| Tabla 17. Puntaje de los criterios de selección. | 64 |
| Tabla 18. Concepto solución ganador (Referencia imagines en el anexo 1). | 65 |
| Tabla 19. Constantes usadas en los cálculos | 71 |
| Tabla 20. Evaluación de la potencia, el torque, y las RPM a partir de las variaciones de diámetro en las aspas..... | 72 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 21. Área del rotor seleccionada con los resultados de potencia, torque, RPM. | 73 |
| Tabla 22. Características del engrane con un ángulo de depresión de 20 grados comercial. | 76 |
| Tabla 23. Características del piñón con un ángulo de depresión de 20 grados comercial. | 77 |
| Tabla 24. Características del rodamiento 7217-B-TVP. | 77 |
| Tabla 25. Características del rodamiento 7208-B-TVP. | 78 |
| Tabla 26. Frecuencias cambiando la velocidad del viento. | 89 |
| Tabla 27. Cálculo de la longitud total de la bobina. | 94 |
| Tabla 28. Resultados de desplazamiento de la resonancia en el modelo de los cálculos encontrados en la simulación..... | 134 |
| Tabla 29. Resultados de desplazamiento de la resonancia en el modelo de los cálculos encontrados en la simulación..... | 135 |
| Tabla 30. Desplazamientos del eje macizo cuando se encuentra girando a 74 RPM..... | 137 |
| Tabla 31. Desplazamientos con las frecuencias naturales del sistema cuando es sometido a 74 RPM..... | 140 |

LISTA DE FIGURAS

pág.

| | |
|---|----|
| Ilustración 1. Distribución de vientos constantes en la Tierra. En gris se muestran los vientos polares fríos, en amarillo los vientos ecuatoriales calientes (alisios), y en rojo los vientos subtropicales (Junta de Andalucía, 2013). | 22 |
| Ilustración 2. Monzones, a la izquierda el monzón de verano, a la derecha el monzón de invierno. (e-ducativa. 2013) | 24 |
| Ilustración 3. Regulación del aire frío y caliente en los ciclones con descripción de cada parte. (e-ducativa. 2013)..... | 25 |
| Ilustración 4. Aerogenerador de eje horizontal con descripción de los componentes internos. (adformacion, 2013). | 27 |
| Ilustración 5. Posición de la cara del rotor respecto al viento, a la izquierda viento a barlovento, a la derecha viento a sotavento. (Moreno, 2013)..... | 28 |
| Ilustración 6. Configuraciones generadores de eje vertical tipo Darrieus. (EcoSource, 2008). | 29 |
| Ilustración 7. Configuraciones generadores de eje vertical tipo Windside, (Neil C. C. Gray Et Al, 2008) | 29 |
| Ilustración 8. Sistemas mecánicos para aprovechamiento de la energía del viento. A la izquierda panémoma o molino vertical (VI d.C), a la derecha un Molino Holandés de finales del s. XVI usado para drenaje. (Moragues Et Al, 2003)..... | 30 |
| Ilustración 9. Aerogenerador tipo Savonius. (Fernández P. Energía Eólica. p. 42). | 33 |
| Ilustración 10, Configuraciones de las aspas para un aerogenerador tipo Savonius, (a) Configuración de forma simple (C). (b) Configuración de forma "Cs". (c) Configuración de forma mejorada de la forma "Cs". (DiPrátula H, 2009). | 34 |
| Ilustración 11. La estructura tanto interna como externa de una batería de plomo-ácida, allí se observa la conexión en serie de las celdas. Las placas que tienen igual polaridad están conectadas en paralelo..... | 37 |
| Ilustración 12. Configuraciones de rotores tipo Savonius. (a) Tipo Cs interior. (b) Tipo C simple. (c) Tipo Cs externo. (d) Tipo Cs a tres aspas. (e) Configuración de altura. (f) Configuración de diámetro. (g) Configuración de tapas. (Fernández P. Energía Eólica).. | 39 |
| Ilustración 13. Etapas de un generador tipo Savonius (Vicente Et Al, 2012). | 40 |
| Ilustración 14. Relaciones de velocidad contra el coeficiente de potencia para hallar el número de etapas y aspas que cumplan los mejores estándares para el diseño del | |

| | |
|--|----|
| generador Savonius. (a) Relación para el número de etapas. (b) Relación para número de aspas (Suárez, 2011). | 40 |
| Ilustración 15. Zona segura para evitar rayos (PhoenixContact, 2013). | 41 |
| Ilustración 16. Distribución de la velocidad del viento por medio de una distribución de Weibull (Wind-data, 2013) | 43 |
| Ilustración 17. Coeficiente de potencia vs lambda, con muestra de los diferentes tipos de aerogeneradores (Funes Ruiz, 2009). | 45 |
| Ilustración 18. Diagrama de funciones del aerogenerador Savonius..... | 53 |
| Ilustración 19. Esquema de elementos funcionales del diagrama de caja transparente ... | 66 |
| Ilustración 20. Descripción geométrica del concepto solución para el aerogenerador de eje vertical tipo Savonius..... | 66 |
| Ilustración 21. Curvas de relación entre la potencia, el toque, y las RPM con respecto al área. | 73 |
| Ilustración 22. Dimensiones del rotor Savonius, con medidas en milímetros. | 74 |
| Ilustración 23. Aspa del Savonius. | 79 |
| Ilustración 24. Platina inferior y superior | 79 |
| Ilustración 25. Soporte en L para aspas..... | 80 |
| Ilustración 26. Soporte superior del eje..... | 80 |
| Ilustración 27. Tapa superior para prisioneros | 81 |
| Ilustración 28. Tubo número 1, eje principal..... | 81 |
| Ilustración 29. Soporte inferior del eje..... | 82 |
| Ilustración 30. Eje macizo número 1 | 82 |
| Ilustración 31. Soporte rodamiento principal | 82 |
| Ilustración 32. Tapa de rodamiento..... | 83 |
| Ilustración 33. Tubo número 2 | 83 |
| Ilustración 34. Eje macizo número 2 | 84 |
| Ilustración 35. Soporte rodamiento número 2 | 84 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 36. Base, pie amigo, mesa | 85 |
| Ilustración 45. Base de la mesa | 85 |
| Ilustración 46. Cubierta protectora | 86 |
| Ilustración 47. Puerta..... | 86 |
| Ilustración 48. Esquema del sistema eléctrico y de control. | 87 |
| Ilustración 49. Separación en grados entre los centros de los imanes, con sus polos intercalados. | 90 |
| Ilustración 50. Separación desde el centro de las bobinas..... | 91 |
| Ilustración 51. Configuración 3:2 de bobinas y polos. | 91 |
| Ilustración 52. Circuito rectificador trifásico de onda completa. | 99 |
| Ilustración 53. Forma de onda de salida y de entrada..... | 100 |
| Ilustración 54. Batería Ultracell de 12 voltios | 101 |
| Ilustración 55. Inversor comercial, Power Bright. | 102 |
| Ilustración 37. Base del generador..... | 102 |
| Ilustración 38. Eje del generador. | 103 |
| Ilustración 39. Soportes rodamientos del generador. | 103 |
| Ilustración 40. Tubo con brida soldada. | 104 |
| Ilustración 41. Platina circular para imanes..... | 104 |
| Ilustración 42. Separador..... | 105 |
| Ilustración 43. Tapa para engrane del generador..... | 105 |
| Ilustración 44. Estator | 106 |
| Ilustración 56. Sistema de empotramiento y protección contra el polvo. (a) Configuración de la unión del tubo número 1. (b) Sistema de tapa en la punta del eje para la protección interna del tubo número 1..... | 107 |
| Ilustración 57. Unión entre Tubo número 1(Pieza de color gris) y eje macizo número 1(Pieza de color marrón), (a) vista en corte isométrica, unión por soldadura del Tubo 1 con el eje macizo 1. (b) Vista frontal del ensamble del Tubo con el eje macizo. | 107 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 58. Ubicación del rodamiento, soporte para el rodamiento y retenedor con su respectiva tapa. (a) vista en corte isométrica. (b) Vista en corte frontal. | 108 |
| Ilustración 59. Acople del soporte del rodamiento con el refuerzo. (a) Vista frontal en corte con el acople del soporte del rodamiento con el refuerzo (b) Vista frontal en corte con la mayoría del refuerzo..... | 108 |
| Ilustración 60. Acople del eje macizo con el segundo tubo. (a) vista frontal en corte. (b) vista frontal. | 109 |
| Ilustración 61. Acople para el segundo rodamiento de alineación del subsistema eje con soporte anclado por tornillos al refuerzo. (a) Vista en corte frontal. (b) Vista en corte isométrica. | 109 |
| Ilustración 62. Acople entre el engrane y el eje macizo..... | 110 |
| Ilustración 63. Rotor tipo Savonius | 111 |
| Ilustración 64. Unión entre el soporte principal que une el eje y la platina | 111 |
| Ilustración 65. Acople de las aspas con las platinas. (a) Unión interna con ángulo a 90 grados. (b) Unión externa por medio de un prisionero. | 112 |
| Ilustración 66. Vista isométrica del refuerzo..... | 113 |
| Ilustración 67. Vista frontal del refuerzo. | 113 |
| Ilustración 68. Sistema de protección de la base. | 114 |
| Ilustración 69. Soporte del generador. (a) soporte del generador a la base principal del generador. (b) Vista en corte isométrica con el rodamiento acoplado entre el eje y el soporte del generador. | 115 |
| Ilustración 70. Configuración de los soportes para los rodamientos y el tubo con brida que une los soportes. (a) Vista en corte isométrica. (b) Vista frontal unión de los soportes con los respectivos rodamientos y su configuración. | 115 |
| Ilustración 71. Unión de la platina inferior de imanes. (a) Vista en corte isométrica. (b) Vista isométrica del subsistema..... | 116 |
| Ilustración 72. Sistema de sujeción de las dos platinas de imanes. (a) Vista isométrica del subsistema con las dos platinas de imanes. (b) Vista en corte del mismo subsistema... | 116 |
| Ilustración 73. Tapa del generador maquinada. (a) Vista en corte isométrica de la unión de la tapa. (b) Sistema de engranes unidos y acoplados a la tapa del generador..... | 117 |
| Ilustración 74. Posición del estator en el generador. (a) Vista isométrica de la configuración del estator. (b) Vista frontal en corte, con forma de acople de los tornillos sin cabeza que sujetan el estator. | 117 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 75. Vistas del diseño del aerogenerador. (a) Vista isométrica. (b) Vista lateral izquierda. (c) Vista frontal. (d) Vista lateral izquierda. (e) Vista superior. (f) Vista inferior | 118 |
| Ilustración 76. Unión entre las aspas y las platinas. (a) sujeción de la parte externa de una de las aspas. (b) Forma de fijación de la parte interna de las aspas. | 119 |
| Ilustración 77. Desensamble del sistema que une el rotor con el eje. (a) Sujeción superior. (b) Sujeción inferior..... | 119 |
| Ilustración 78. Vista de la base que acopla los dos rodamientos y alinea el sistema. | 120 |
| Ilustración 79. Base del generador con acoplamiento del eje y rodamiento inferior. (a) Desacople de las tres partes. (b) Forma de ensamble del eje con rodamiento al soporte del generador | 121 |
| Ilustración 80. Acople del tubo con brida al sistema anterior ensamblado. (a) Forma de ensamble del tubo con brida y sus respectivos soportes soldados a este. (b) Visualización una vez ensamblado en el soporte y encajada la pista exterior del rodamiento. | 121 |
| Ilustración 81. Acople del rodamiento superior de alineación. (a) Forma de ensamble del rodamiento superior. (b) Vista en corte isométrica del ensamble que se ha realizado. .. | 122 |
| Ilustración 82. Unión de la platina inferior de imanes, los separadores y el estator. (a) Platina de imanes y separadores colocados en su sitio. (b) Posicionamiento del estator. | 123 |
| Ilustración 83. Ensamble de la platina superior de imanes y fijación por medio de tornillos y tuercas. (a) Forma de fijación de los tornillos. (b) vista lateral del sistema con tornillería fijada en su sitio. | 123 |
| Ilustración 84. Ensamble entre la tapa hacia el subsistema del aerogenerador y ensamble del piñón sobre la tapa..... | 124 |
| Ilustración 85. Ensamble del generador a la base. (a) despiece de los tornillos para el ensamble del generador. (b) Ensamble de los tornillos para el generador. (c) Generador en posición con tuercas superiores para apoyo final de este. | 124 |
| Ilustración 86. Unión del protector con puerta corrediza | 125 |
| Ilustración 87. Acople de la base del rotor a la base. (a) Ensamble del sistema sobre la base. (b) Una de las cuatro bridas sujeta por tornillos sobre la base. | 126 |
| Ilustración 88. Sistema rotor con resultados obtenidos por medio de las herramientas CAD, a la izquierda se encuentran los cálculos generales de peso, momentos de inercia, volumen. A la derecha se muestra a detalle la orientación de los ejes, las inercias y los radios de giro. | 126 |
| Ilustración 89. Sistema rotor con eje ensamblado con muestra del sentido del eje coordinado y centro de volumen..... | 127 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 90. Sistema del generador eléctrico con resultados obtenidos por medio de las herramientas CAD, a la derecha se encuentran los cálculos generales de peso, momentos de inercia, volumen. A la izquierda se muestran a detalle la orientación de los ejes, las inercias y los radios de giro | 127 |
| Ilustración 91. Sistema rotatorio del generador con muestra del sentido del eje coordinado y centro de volumen. | 128 |
| Ilustración 92. Sistema completo con resultados obtenidos por medio de las herramientas CAD, a la derecha se encuentran los cálculos generales de peso, momentos de inercia, volumen. A la izquierda se muestran a detalle la orientación de los ejes, las inercias y los radios de giro..... | 128 |
| Ilustración 93. Sistema completo del aerogenerador, con muestra del sentido del eje coordinado y centro de volumen..... | 129 |
| Ilustración 94. Modelo con maya y velocidad del viento aplicada y salida del mismo..... | 129 |
| Ilustración 95. Presiones del viento aplicadas en el rotor y su distribución a través de este, con escala. | 130 |
| Ilustración 96. Velocidades del viento aplicadas en el rotor y su distribución a través de este, con escala. | 130 |
| Ilustración 97. Distribución de la velocidad del viento cada segundo de simulación, con distribución de las turbulencias (leer de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo). .. | 131 |
| Ilustración 98. Eje de simulación para deflexión. (a) Aplicando presión del viento. (b) Aplicando la fuerza teórica..... | 131 |
| Ilustración 99. Simulación con la presión del viento ejercida sobre el eje. (a) Desplazamiento del eje. (b) Esfuerzos de Von Mises..... | 132 |
| Ilustración 100. Fuerza de reacción resultante..... | 132 |
| Ilustración 101. Resonancia del sistema con su frecuencia natural. (a) Frecuencia mínima en el sistema de 18.9 ciclos/s. (b) Frecuencia máxima en el sistema de 319.5 ciclos/s. | 133 |
| Ilustración 102. Simulación con la fuerza teórica del viento ejercida sobre el eje. (a) Desplazamiento del eje. (b) Esfuerzos de Von Mises. | 134 |
| Ilustración 103. Resonancia del sistema con su frecuencia natural. (a) Frecuencia mínima en el sistema de 18.9 ciclos/s. (b) Frecuencia máxima en el sistema de 319.5 ciclos/s. | 135 |
| Ilustración 104. Eje macizo con maya y aplicación de la fuerza de reacción..... | 136 |
| Ilustración 105. Simulación obtenida de la fuerza resultante. (a) desplazamiento generado. (b) esfuerzo de Von Mises aplicado en el eje..... | 136 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 106. Desplazamiento máximo a la frecuencia mínima natural | 137 |
| Ilustración 107.Desplazamiento máximo a la frecuencia máxima natural..... | 137 |
| Ilustración 108. Distribución de las fuerzas y los apoyos sobre la pieza con maya. (a) isométrico. (b) Detalle de la parte superior..... | 138 |
| Ilustración 109. Simulación de la base sometida a las diferentes fuerzas. (a) Desplazamientos de la parte superior. (b) esfuerzos de Von Mises sobre la pieza. | 139 |
| Ilustración 110. Desplazamiento con la frecuencia natural mínima. | 139 |
| Ilustración 111. Desplazamiento con la frecuencia natural máxima. | 140 |

LISTA DE ANEXOS

| | pág. |
|--------------|------|
| ANEXO 1..... | 149 |
| ANEXO 2..... | 151 |
| ANEXO 3..... | 152 |
| ANEXO 4..... | 153 |
| ANEXO 5..... | 154 |

RESUMEN

En este trabajo se muestra el desarrollo del diseño conceptual y de detalle de un aerogenerador tipo Savonius útil para su emplazamiento en las instalaciones de la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia) sede Palmas. La generación de energía eólica a partir de velocidades del viento bajas a baja altitud fue el soporte principal de las necesidades y especificaciones definidas para el diseño conceptual. Las funciones y sub-funciones posteriormente definidas así como las soluciones dadas a las mismas respondieron adecuadamente a estas especificaciones, produciendo un concepto solución viable para el problema de generación de energía que fue posible desarrollar en una posterior etapa de diseño de detalle. En dicha etapa se realizaron los cálculos pertinentes para llevar el producto conceptual a un producto real y construible, teniendo en cuenta sollicitaciones mecánicas, esfuerzos y deflexiones así como el análisis del sistema eléctrico, para continuar con la selección de formas y materiales gracias a los resultados arrojados por los cálculos relacionados con ellos. Finalmente se realizó la construcción en software CAD del sistema completo del aerogenerador tipo Savonius siguiendo las pautas recomendadas por el método de diseño y desarrollo de producto relacionadas con la arquitectura o morfología de productos y la validación de algunos cálculos relevantes como lo es la fuerza del viento y las deflexiones en la herramienta FEA.

Palabras claves: Aerogenerador Savonius, diseño conceptual, diseño de detalle, generador eléctrico de flujo axial.

ABSTRACT

This paper shows the development of conceptual and detailed design of a wind turbine Savonius type useful for its placement at EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia) campus Palmas. The wind power generation from low wind speeds at low altitude was the mainstay of requirements and specifications defined for the conceptual design. The functions and sub - functions defined later as well as the solutions given to them, adequately respond to these specifications, producing a viable concept for power generation problem that is possible to develop in a subsequent detailed design stage. At this stage the relevant calculations were made to bring the product concept to areal product and buildable product, considering mechanical loads, forces and deflections as well as electrical system analysis, to continue with the selection of shapes and materials thanks to the results thrown by the calculations related to them. Finally the construction of the whole system was made by CAD software, following the guidelines recommended by the design and product method, related with the architecture or product morphology and validation some relevant calculations such as wind strength and deflections in FEA software.

Key words: Aero turbine, conceptual design, detailed design, flux axis electric generator, Savonius rotor.

INTRODUCCIÓN

La dependencia de los combustibles fósiles para satisfacer la creciente demanda energética de las crecientes poblaciones humanas ha sido uno de los rasgos característicos del triunfo de la economía de mercado y la expansión industrial registrado durante el último siglo. Sin embargo los costos derivados del uso de tales fuentes, medidos en tecnologías eficientes para la extracción de la energía, la inestabilidad política y económica generada por su extracción, y el impacto ambiental negativo asociado con el calentamiento global por emisiones de CO₂ y la contaminación de recursos hídricos producto de la extracción y procesamiento han comenzado a cambiar la mentalidad de las sociedades actuales, particularmente frente a la disponibilidad limitada de estos recursos, bien porque no son renovables o porque su explotación resulta muy costosa. (González, 2009).

Una de las más promisorias respuestas a esta realidad ha sido el uso de la energía nuclear, no obstante los riesgos implícitos a la operación de centrales termoeléctricas que usan el calor producido por la fisión nuclear traducido en accidentes graves (ThreeMile Island en USA o Chernobyl en Ucrania) han desestimado su implementación generalizada. (González, 2009).

Frente a los problemas que supone el uso de energía eléctrica obtenida con estos métodos, un notable y creciente desarrollo de tecnologías se ha venido implementando para el aprovechamiento de otras fuentes energéticas de carácter renovable y que precisan de medios con menores impactos para el medio ambiente: energía mecánica del aire y del agua, energía térmica y fotovoltaica obtenida del sol y combustión de biomasa son algunos de los recursos más usados con este objetivo. En este panorama el uso del viento como fuente energética derivada del calentamiento por radiación solar en el planeta se ha posicionado como una alternativa de gran proyección debido a su constante disponibilidad, al acceso tecnológico que se requiere para su aprovechamiento, a su bajo impacto ambiental y a la posibilidad de su implementación en zonas apartadas que no cuentan con interconexión eléctrica.

La Escuela de ingeniería de Antioquia a través del grupo de investigación MAPA (Materiales y Procesos Alternativos) ha venido adelantando proyectos de investigación orientados al aprovechamiento energético del viento, como un modo de apuntalar su visión institucional 2025 en la que desarrollos en energía tienen prioridad. Las condiciones climáticas y geográficas del campus Palmas ofrecen oportunidades para la implementación de generadores de baja altitud, entre los cuales la configuración tipo Savonius destaca por su facilidad de construcción y su probada efectividad.

Es por esto que se ha desarrollado el diseño de un generador tipo Savonius, apoyándose en datos obtenidos en la base meteorológica de la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia), para conocer cuán potente y veloz probablemente es el aerogenerador diseñado, una parte importante del desarrollo es el diseño total del todo el sistema tanto mecánico como eléctrico; el sistema mecánico se ha diseñado en su totalidad basándose en medidas comerciales estándares, además de todos los circuitos y arreglos eléctricos que han sido debidamente calculados, en las herramientas computacionales CAD/FEA se encuentra un apoyo bastante grande debido a que por medio de este software se puede conocer el comportamiento del aerogenerador diseñado, corroborando la buena ejecución de los

cálculos. El trabajo mostrado a continuación es un material de gran importancia para la implementación posterior de un aerogenerador tipo Savonius físicamente ya que todas las partes son explicadas y calculadas debidamente.

El diseño de concepto y de detalle son las grandes pautas para alcanzar un buen desarrollo del producto como lo es el generador eólico tipo Savonius, estas pautas poseen diferentes fases y procesos que son llevados a cabo para obtener satisfactoriamente un producto de buena calidad y que solucione el problema propuesto.

Este documento se ha organizado en seis capítulos, el primer capítulo posee los preliminares en los cuales se encuentra la formulación del problema, los objetivos del proyecto y los conceptos preliminares para tener una concepción más clara de todos los elementos claves para el desarrollo de un aerogenerador, desde la explicación del recurso eólico en la tierra, pasando por los antecedentes en la historia de los generadores eólicos, la definición de los tipos de aerogeneradores, tipos de generadores eléctricos, sistemas de almacenamiento de baterías, hasta la concepción de lo que es un aerogenerador tipo Savonius, sus características, desarrollos realizados con este tipo de generador y ventajas y desventajas.

En el segundo capítulo se lleva a cabo la explicación de la metodología optada para el desarrollo del diseño tanto de concepto como de detalle, seguido del tercer capítulo que consiste en la generación del concepto de acuerdo con los parámetros que trae consigo el diseño de concepto; inicialmente en este capítulo se obtiene información sobre los aerogeneradores y se acota un problema específico lo que posteriormente se traduce en necesidades, las cuales son utilizadas para dar creación a las especificaciones las cuales son la forma cuantitativa y cualitativa de ver las necesidades, luego de obtener las especificaciones de diseño se formulan las funciones, presentándose seguidamente las soluciones a dichas funciones, para hacer grupos de conceptos los cuales finalmente son calificados, resultando como concepto ganador el que mayor puntuación haya obtenido.

El cuarto capítulo consiste en el desarrollo de todo lo que concierne al diseño de concepto, como lo son los cálculos de deflexión, diámetros y rodamientos; además de los cálculos para el diseño de un generador eléctrico síncrono de imanes permanentes de flujo axial, todos estos cálculos dan como resultado las especificaciones de dimensiones, potencias y demás variables necesarias para que el sistema esté bien diseñado. Finalizando este capítulo se encuentra todo el desarrollo, diseño y selección de formas y partes del diseño mecánico mediante herramientas computacionales CAD, además de la utilización de la herramienta FEA para la validación de cálculos importantes en el desarrollo del diseño de detalle.

El quinto capítulo contiene las conclusiones obtenidas luego del desarrollo de todo el trabajo y último el sexto capítulo que habla de las recomendaciones a las que se llega al haber culminado el desarrollo del aerogenerador tipo Savonius.

1. PRELIMINARES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Cuál es el concepto de diseño de generador eólico vertical tipo Savonius de baja altitud apto para operar bajo las condiciones climáticas y geográficas similares a las registradas en la Escuela de Ingeniería de Antioquia sede Palmas?

1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1. Objetivo General

Diseñar un generador eólico vertical tipo Savonius siguiendo la metodología del diseño y desarrollo de producto en sus etapas de concepto y detalle.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Identificar especificaciones de diseño para un generador tipo Savonius de baja altitud para las condiciones geográficas de la Escuela de Ingeniería de Antioquia.
- Diseñar una estructura funcional que represente las tareas e interacciones de material, energía y señal necesarias para que el dispositivo cumpla con su propósito de generar energía.
- Generar un concepto solución acorde a las especificaciones de diseño y a la estructura funcional planteada para el generador eólico tipo Savonius.
- Aplicar principios de diseño de detalle para la obtención de medidas, materiales y recomendación de procesos de manufactura adecuados para los componentes y piezas del generador eólico tipo Savonius.
- Construir boceto tridimensional del concepto solución seleccionado para el generador tipo Savonius así como montaje final del mismo una vez aplicados los principios de diseño de detalle mediante el uso de herramientas CAD.

1.3. MARCO DE REFERENCIA

Para el desarrollo del proyecto de diseño se hace necesaria una revisión bibliográfica dividida en dos partes bien diferenciadas, destinada a mostrar conceptos básicos relacionados con el uso del viento como fuente energética. La primera de ellas se centra en definir términos básicos sobre el viento, su naturaleza, características y clasificación, la segunda se orienta a las máquinas usadas para generar energía eléctrica a partir del viento, siguiendo el devenir de su desarrollo tecnológico desde tiempos antiguos hasta los últimos años. Se hace especial énfasis en los generadores verticales de baja altitud, entre los que se encuentran las configuraciones tipo Savonius, tema central de este proyecto.

1.3.1. Recurso eólico

El calentamiento no uniforme de la tierra causado por los rayos solares, es el principal componente para que existan los vientos, debido a que en las partes más calientes (regiones ecuatoriales) de la superficie terrestre existen presiones más bajas y el aire tiene la posibilidad de subir, siendo reemplazado por aire proveniente de zonas más frías como los polos, cerrándose el ciclo cuando el aire caliente llega hacia ellos por la alta atmosfera.

El viento es un fenómeno que se presenta en casi todo el globo terráqueo, pero su intensidad y características son variables dependiendo de las circunstancias. Sin embargo es posible describir un comportamiento muy general en la Tierra, ya que en cada hemisferio aparecen dos corrientes de viento bien diferenciadas y frecuentes, una ubicada en latitudes bajas llamados vientos alisios y otra que se encuentra más allá de los de 30° de latitud norte o sur. En la ilustración 1 se aprecian las variaciones del viento a nivel global producto del calor entregado por el sol a la Tierra.

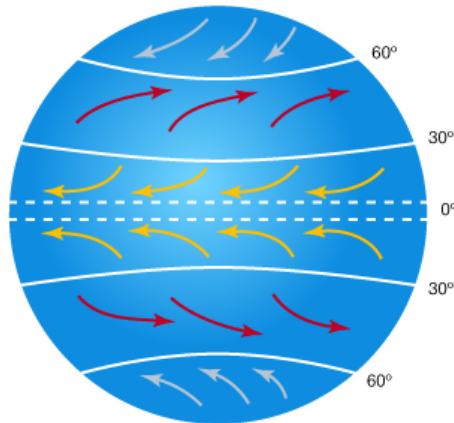


Ilustración 1. Distribución de vientos constantes en la Tierra. En gris se muestran los vientos polares fríos, en amarillo los vientos ecuatoriales calientes (alisios), y en rojo los vientos subtropicales (Junta de Andalucía, 2013).

Por otro lado existen otras formas de generación de viento atribuibles a las variaciones del relieve o a la cercanía de masas de agua. En las costas frecuentemente aparecen vientos

suaves y brisas marinas (pueden ser fuertes cuando estos se registran en estrechos) producto de cambios de la densidad del aire en contacto con el agua. En los valles de los ríos se registran corrientes que son paralelas al cauce de estos y la diferencia de temperatura entre una montaña y un valle puede dar lugar a un viento local (efecto ladera).

1.3.1.1. Clasificación de los vientos

Los vientos pueden ser clasificados según la intensidad y dirección. La primera se puede medir en una escala de Beaufort, la cual asigna cero a la calma total y doce a vientos de huracán, la dirección por su parte define de donde vienen los vientos y pueden ser clasificados a su vez en constantes (siempre soplan en la misma dirección) y en periodos que no poseen ninguna regularidad(UNAD, 2013).

Según su naturaleza geográfica, intensidad y dirección se suelen usar los siguientes términos para clasificar diferentes tipos de vientos:

Dominantes: Aquellos situados cerca del ecuador en una banda no superior a los 30° de latitud. Estos vientos corresponden a los llamados alisios arriba definidos. .

Estacionales: Son los vientos que se mantienen cerca al océano, cerca al continente y que son producto de cambios de densidades por la cercanía con el agua. Estos vientos se ven afectados por el calentamiento y enfriamiento producto del paso de las estaciones, generando flujos hacia tierra adentro gracias a la baja presión ubicada allí durante el verano y hacia el mar en invierno.

Locales: Son vientos que cambian constantemente como los vientos estacionales que varían día y noche por los cambios de temperatura o los vientos que varían producto de terrenos irregulares. Suelen provocar brisas, torbellinos y vientos asociados a tormentas.

Ciclónicos y anticiclónicos: La dirección de los vientos está determinada por el desplazamiento de ellos desde una zona donde la presión es mayor a la del aire circundante (anticiclones) hacia zonas que poseen una presión menor a la del aire denominadas borrascas o ciclones. La fuerza del viento se ve afectada por estos gradientes de presión, debido a que altos gradientes pueden formar vientos con una mayor fuerza, mientras que un gradiente pequeño crea vientos con fuerzas menores (Escuelas, 2013).

1.3.1.2. Densidad y velocidad del viento

La densidad del aire es la relación de su masa por unidad de volumen de la atmósfera. Depende principalmente de la temperatura, la presión y la altitud. En altas temperaturas la densidad disminuye ya que las moléculas del aire se encuentran más separadas y cuando la temperatura disminuye la densidad aumenta ya que las moléculas se encuentran unas muy cerca de las otras. Por otro lado, si la presión aumenta en la tierra, las partículas de aire se contraen aumentando la densidad. La altitud por consecuencia también afecta a la densidad ya que a medida que se asciende, la presión y la temperatura van a disminuir. (Pasionporvolar, 2013)

El contenido energético del viento está en la velocidad con la que corre, siendo por la altitud. Mientras más cerca al suelo se encuentre, el viento puede tomar velocidades muy bajas, pero si está en altitudes considerables puede alcanzar grandes velocidades, sin embargo la geografía hace que existan vientos más veloces o vientos más lentos, ya que en los lugares muy accidentados los vientos son frenados, mientras que en lugares abiertos corren libremente. (Escuelas, 2013)

1.3.1.3. Distribución de masas de aire en el globo, relación con las masas de agua y el relieve.

Una masa de aire se puede definir como una gran cantidad acumulada de aire que posee características meteorológicas propias bien definidas relacionadas con un punto o región geográfica de referencia, respecto a otras porciones de aire definidas de la misma manera.

Monzones: Hace referencia al cambio estacional en la dirección del viento, estos vientos soplan desde el suroeste en una mitad del año y desde el noreste en otra mitad. Los monzones son uno de los fenómenos meteorológicos más dramáticos del planeta, los mejores casos conocidos son el monzón asiático que afecta el suroeste de Asia y a la India, el monzón del norte Australia y el de África occidental.

Existen otros monzones denominados monzón de invierno, que se presenta cuando el aire enfriado de grandes alturas desciende causando altas presiones con tiempo despejado y el monzón de verano, cuyo origen se debe a la elevación del viento oceánico sobre los continentes, creando nubes y precipitaciones (UNAD, 2013).

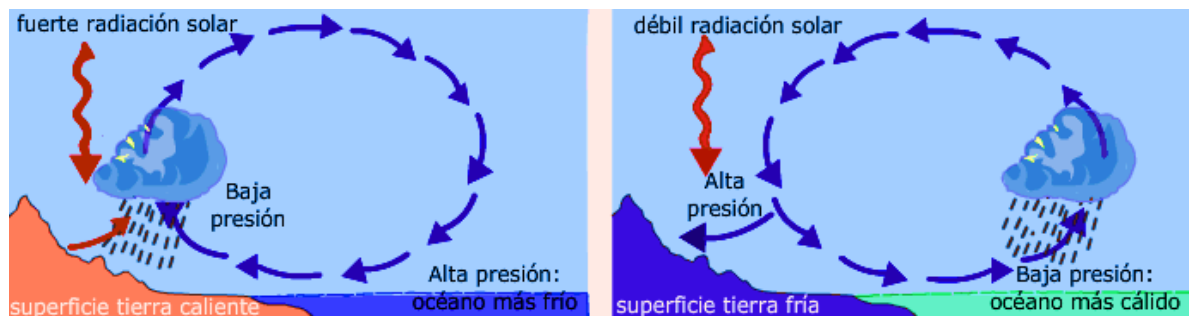


Ilustración 2. Monzones, a la izquierda el monzón de verano, a la derecha el monzón de invierno. (e-ducativa. 2013)

Ciclones: Remolino que abarca cientos de kilómetros cuadrados presentándose principalmente en los océanos tropicales, estos se conforman cuando la temperatura superficial del agua supera los 26°C haciendo que el aire caliente y húmedo asciendan generando la fuente de energía del ciclo (UNAD, 2013).

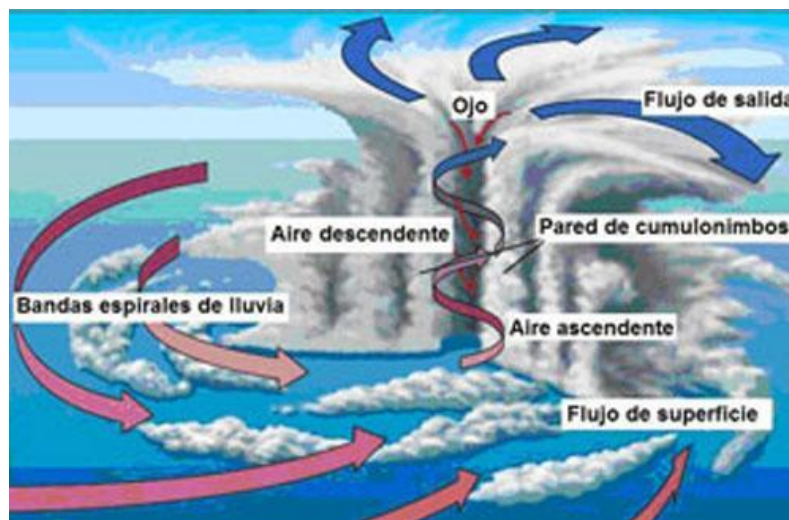


Ilustración 3. Regulación del aire frío y caliente en los ciclones con descripción de cada parte. (e-educativa. 2013).

Frentes Fríos: Es una franja de malos tiempos que se presenta cuando una masa de aire frío se aproxima a una masa de aire caliente, siendo el aire frío más denso el que penetra por debajo de la masa de aire caliente, causando perturbaciones atmosféricas (tormentas eléctricas, lluvias y vientos fuertes). Los frentes fríos comienzan a transitar desde diciembre a marzo por el mar caribe en las altas latitudes, generando altas mareas y aumentos significativos en la presión.

Por otro lado el agua en el viento juega un papel muy importante en términos de potencia de este.

La humedad del aire se refiere a la cantidad de vapor de agua que está contenido en la atmosfera, el vapor de agua en el aire es formado cuando el agua por algún medio es sometida a un calor que logra evaporarla, la mayor fuente que proporciona vapor al aire es la evaporación de los mares.

La cantidad contenida de vapor en el aire se expresa en gramos de vapor por metro cubico (humedad absoluta).La humedad relativa hace relación a la cantidad máxima que el aire saturado puede contener a una temperatura específica.

El contenido de agua en el aire, depende de la temperatura, mientras más caliente está el aire mayor cantidad de vapor de agua puede contener, mientras que en temperaturas bajas esta capacidad disminuye; teniendo como resultado la precipitación (lluvia) cuando el aire caliente se enfría por cualquier razón.

La potencia que el viento posee se ve afectada por la densidad del aire, esta densidad está ligada inversamente con la capacidad de almacenamiento de vapor de agua de este, debido a que las moléculas de vapor de agua son menos pesadas que las moléculas de oxígeno y nitrógeno, es decir que la potencia del viento disminuye a causa del aumento de la humedad del aire (HidroAir, 2013).

1.3.2. Generadores eléctricos

El uso del viento para la generación de energía eléctrica comenzó de manera tímida a finales del s. XIX como parte de la explosión de desarrollos técnicos derivados de aplicar principios de la electricidad y el magnetismo en Estados Unidos de América y Europa Occidental, siendo notable la implementación del primer generador construido en 1888 por Charles F. Brush (Green Energy Ohio, 2013). Desarrollos posteriores fueron registrados en diversos lugares, que fueron delineando lo que se conoce actualmente como turbina de generación eólica. Estos dispositivos se pueden clasificar básicamente en dos tipos.

1.3.2.1. Generadores de eje horizontal

También conocidos como HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine), se trata de la primera configuración de molinos de viento construidos para generación de energía eléctrica. Cuentan con el registro de la mayor eficiencia en la transformación de energía mecánica a eléctrica. Los aerogeneradores de eje horizontal suelen clasificarse según su velocidad de giro o el número de palas del rotor, los lentos poseen hasta 24 palas y por el contrario los rápidos menos de 4. Los aerogeneradores lentos constan de un gran número de palas y se suelen usar para bombeo de agua, la fuerza de arrastre es más importante que la de sustentación y el par de arranque necesario para las máquinas lentas es mucho mayor debido al gran número de palas.

Los aerogeneradores rápidos, que son los más usados para la generación de energía eléctrica, usan palas similares a las hélices de impulsión usadas por aeronaves, la forma de estas y la velocidad de rotación está en función de la potencia deseada, eligiéndose perfiles que eviten la creación de tensiones en los extremos de ellas por efectos de las fuerzas centrífugas.

Partes notables de un aerogenerador horizontal

La configuración de un aerogenerador vertical responde básicamente a la necesidad de colocar el sistema de generación sobre el eje de rotación horizontal. Es común el uso de un sistema de transmisión que aumente la velocidad sobre el sistema de generación, lo que define dos ejes diferentes (uno lento que articula en las palas y otro rápido que va al multiplicador). Todo el sistema se monta en una carcasa un aerogenerador horizontal (Barbero, 2012): elevada sobre una torre que permite a las palas enfrentar vientos de mayor velocidad. A continuación se hará una descripción más detallada de las partes notables que componen.

- Rotor: Es el componente del aerogenerador que contiene movimiento, este está compuesto por aspas con perfiles de acuerdo a las necesidades de potencia. Es el encargado de recibir la energía del viento, convirtiéndola en energía mecánica rotacional.
- Góndola: Se trata de un enorme bastidor que contiene los componentes claves del aerogenerador como los ejes, el multiplicador y el generador eléctrico.
- Buje del rotor: Esta acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador y tiene como función articular el eje sobre el que se montan las aspas respecto a la góndola.
- Palas del rotor: Son las que capturan el viento y transmiten la potencia hacia el buje.

- Eje de baja velocidad: Es el que conecta el buje del rotor con el multiplicador, suele contener ductos hidráulicos destinados al funcionamiento de frenos aerodinámicos que regulan la rotación.
- Eje de alta velocidad: Es el eje que está conectado a la salida del multiplicador, su alta velocidad de giro permite la generación de energía. Suele llevar un sistema de freno de disco mecánico de emergencia para proteger el generador eléctrico
- Multiplicador: Es el dispositivo mecánico capaz de aumentar las revoluciones producidas por el eje de baja velocidad.
- Generador eléctrico: Suele llamarse generador de inducción, el cual es el encargado de transformar la energía mecánica a energía eléctrica.
- Mecanismo de orientación: Sistema que vigila constantemente la dirección del viento (se usan anemómetros y veletas) para orientar el aerogenerador hacia la dirección de mayor densidad.
- Controlador electrónico: Contiene un ordenador que constantemente monitorea todas las variables necesarias para el funcionamiento del aerogenerador.
- Sistema hidráulico: Se utiliza para la operación y soporte de los frenos aerodinámicos.
- Unidad de refrigeración: Utilizada para enfriar el generador eléctrico, consta de un ventilador eléctrico y una unidad de refrigeración del aceite que se utiliza para refrigerar el multiplicador.
- Anemómetro y Veleta: Son los encargados de cerrar el lazo de control, los cuales miden la velocidad y dirección del viento.
- Torre del aerogenerador: Es la que soporta el rotor y la góndola.

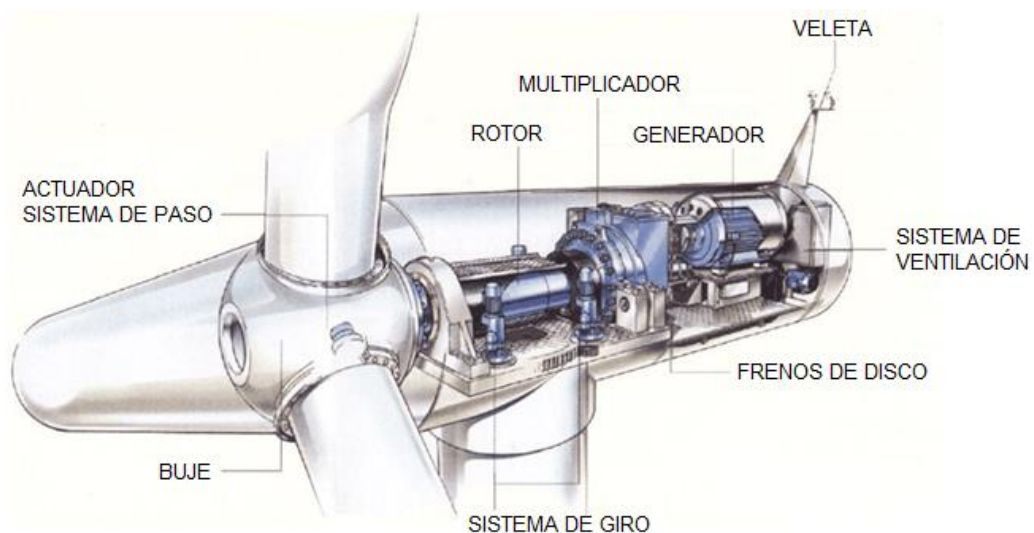


Ilustración 4. Aerogenerador de eje horizontal con descripción de los componentes internos. (adrformacion, 2013).

Los aerogeneradores de eje horizontal pueden tener diferentes configuraciones respecto a la forma como el viento se enfrenta a las paletas.

- Maquinas con rotor a barlovento: Estas máquinas poseen un rotor que le da la cara al viento, su principal ventaja es que evita el abrigo del viento detrás de la torre evitando fatigas y menores variaciones en el par del eje de baja velocidad. Su gran desventaja es que necesitan un dispositivo de orientación para que el rotor siempre busque la dirección de mayor densidad.

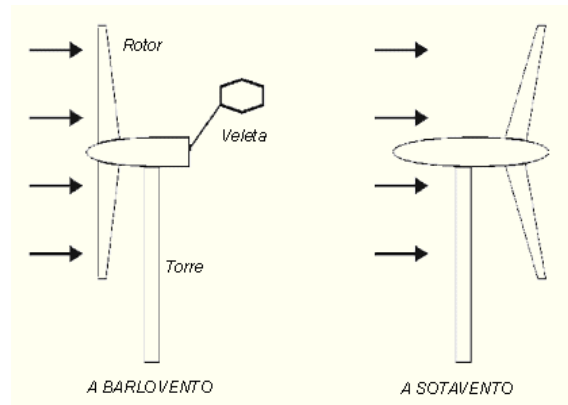


Ilustración 5. Posición de la cara del rotor respecto al viento, a la izquierda viento a barlovento, a la derecha viento a sotavento. (Moreno, 2013)

- Maquinas con rotor a sotavento: Poseen el rotor contra el viento. Poseen la ventaja de no necesitar dispositivos de orientación. Su principal inconveniente se basa en que se generan muchos esfuerzos de fatiga en la estructura de la turbina.

1.3.2.2. Generadores de eje vertical

También conocidos como VAWT (Vertical Axis Wind Turbine), su principal característica es que el eje principal es perpendicular al nivel del piso. Se suelen diferenciar por el tipo de aspa o hélice sobre la que incide el viento, siendo notables tres configuraciones: Los tipos Darrieus, Windside y Savonius. Debido a su importancia para este proyecto, los generadores tipo Savonius se discutirán en detalle más adelante.

Generadores tipo Darrieus: A principio de los años 20 en Francia, Georges Darrieus desarrolló una turbina de eje vertical que no gozó de gran popularidad, pero que posteriormente se convertiría en una de las configuraciones de mayor éxito entre los modernos aerogeneradores. El diseño original consistía en palas curvadas dispuestas de manera vertical para aprovechar el viento, usando perfiles aerodinámicos en ellas. Posteriormente, modificaciones en la forma de las aspas que dieron origen a otras configuraciones que mejoraron las características constructivas y de rendimiento de las turbinas. En la ilustración 6 se aprecian esquemas tanto del generador Darrieus original (izquierda) como de modelos posteriores mejorados. (Fernández D, Energía Eólica, p. 116).

Windside: Se trata de una novedosa configuración desarrollada por la empresa finlandesa del mismo nombre que se caracteriza por tener láminas giradas en envolvente que hacen las

veces de aspas. Esta estructura le permite obtener rendimientos similares a los aerogeneradores de eje horizontal (Cuesta M. Et Al, 2008, p. 10).

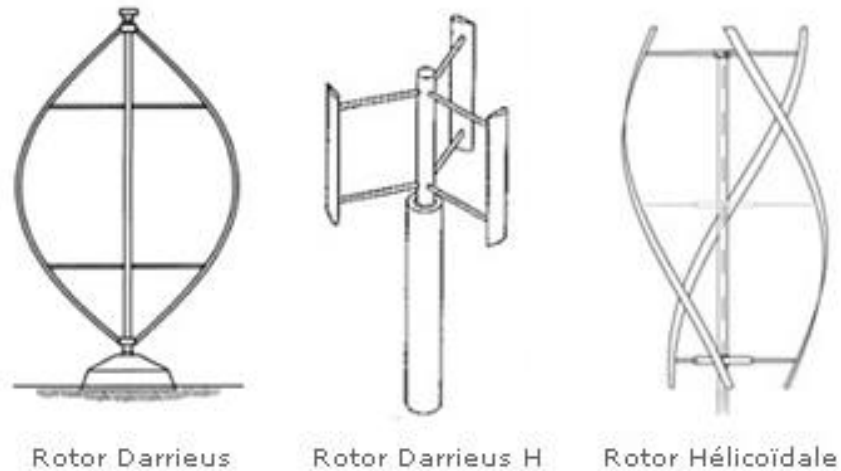


Ilustración 6.Configuraciones generadores de eje vertical tipo Darrieus. (EcoSource, 2008).

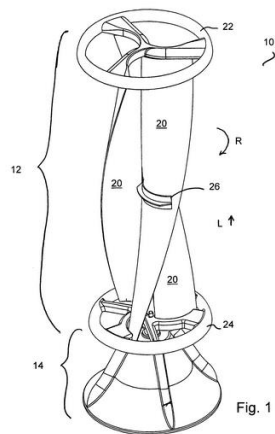


Ilustración 7.Configuraciones generadores de eje vertical tipo Windside, (Neil C. C. Gray Et Al, 2008)

1.3.3. Primeros Usos de la energía eólica

Se tiene documentación con 5000 años de antigüedad que muestra dibujos egipcios de naves fluviales que surcaban el Nilo con ayuda del viento. El viento sería la principal fuerza motriz que empujaría barcos por todo el globo durante milenios hasta la aparición de la máquina de vapor en el S.XIX. El uso de la fuerza motriz del viento para otras aplicaciones diferentes a la navegación también se remonta a tiempos antiguos. Las primeras máquinas eólicas destinadas a la molienda de grano y al bombeo de agua datan del siglo VI d.C. y se componía de ejes verticales que transmitían potencia a discos de fricción o mecanismos alternativos (Panémonas). Los registros históricos ubican estos artilugios en la región de

Sijiistán, entre Irán y Afganistán, no obstante tiempo después serían comunes por toda Asia menor. Posteriormente en las islas griegas se desarrollarían molinos de grano con eje horizontal, teniendo como característica la utilización de velas triangulares en modo de palas.

Mucho tiempo después, para el final de la Edad Media los holandeses eran los más adelantados de su tiempo en el uso de la energía eólica al usarla para drenar las regiones aledañas al río Rin. Posteriormente la energía eólica se emplearía para elaborar aceites, papel y procesar madera, luego los generadores eólicos se empezaron a utilizar para drenar pólders que son superficies terrestres cubiertas por el mar. Durante el siglo XIX más de 9000 molinos se encontraban en funcionamiento con múltiples propósitos en la región holandesa. (Moragues Et Al, 2003).

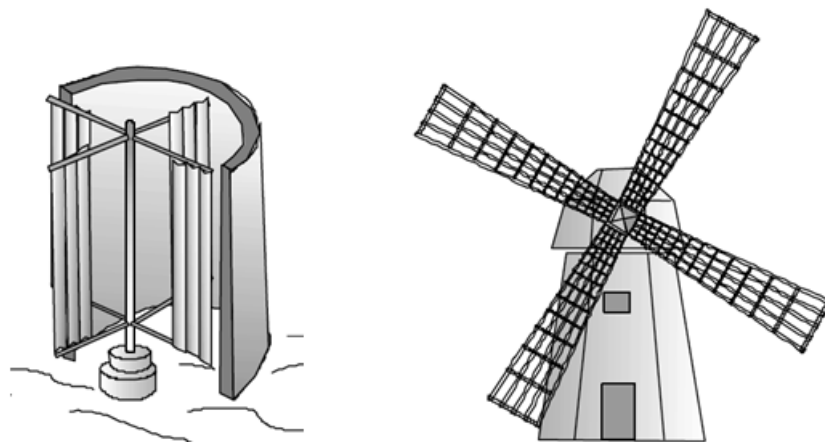


Ilustración 8. Sistemas mecánicos para aprovechamiento de la energía del viento. A la izquierda panémoma o molino vertical (VI d.C), a la derecha un Molino Holandés de finales del s. XVI usado para drenaje. (Moragues Et Al, 2003).

1.3.3.1. Comienzos industriales en Dinamarca durante las guerras mundiales

Para referirse a los desarrollos de la moderna industria de generación de energía eólica, es necesario hacer referencia a Dinamarca, país que ha sido pionero en el aprovechamiento del viento como fuente de energía. A comienzos del siglo XX Dinamarca era el país número uno en el aprovechamiento del viento como recurso energético con una potencia instalada de 30MW, la cual abastecían casi el 25% de las necesidades eléctricas del país. Esta potencia era suministrada por un parque eólico compuesto por 2500 turbinas industriales y 4600 de baja potencia instaladas en zonas agrícolas. Después de la Primera Guerra Mundial en Dinamarca se fabricaban aerogeneradores de 20kW, y para los años 30s el país comercializaba modelos de 30kW.

La Segunda Guerra Mundial implica una época notable en el desarrollo de la energía eólica. En esos años se lograron instalar 18 unidades con diseños aerodinámicos capaces de generar hasta 70kW, las plantas eólicas se incrementaron de 16 a 88 pero una vez

terminada la guerra sólo quedaban 57 plantas eólicas, desapareciendo totalmente a principios en los años 50.

A mediados de la década del cincuenta, se creó en Dinamarca una comisión de energía eólica que se encargaría de dirigir los trabajos para la construcción de un nuevo parque eólico para el país así como de un mapa eólico. Estas políticas fructificaron con la instalación en 1957 de un aerogenerador de 200kW en la ciudad de Gedser, situada en la isla de Falster. Esta planta pionera de gran tamaño funcionó durante 8 años siendo reconstruida en 1977 como laboratorio de pruebas hasta 1979. En la década siguiente, Dinamarca instaló 500 aerogeneradores de baja potencia de hasta 55kW en diferentes lugares de su geografía. Para 1985 ya se habían instalado 1400 aeroturbinas que poseían una potencia total de 50MW, en este mismo año el país comenzó a exportar turbinas con una capacidad de 100MW (Fernández D, Energía Eólica, p. 106).

1.3.3.2. La industria de generación a partir de grandes generadores

En los años 70 luego de haberse presenciado la primera crisis del petróleo, muchos países enfocaron su interés por energías basadas en recursos renovables. En Dinamarca, Suecia, Estados Unidos, Alemania y El Reino Unido, las compañías generadoras de energía pusieron su atención en la generación de energía eólica, construyendo grandes generadores. Resulta notable la construcción de dos generadores de 630kW en 1979, que usaban regulación de rotación por cambio de paso de pala y regulación por pérdida aerodinámica. A pesar de su gran potencia su costo era muy elevado, lo que limitó su aceptación.

Para 1980 se fabricaron aerogeneradores de hasta 55kW, que dieron pie a la ruptura industrial y tecnológica para los modernos aerogeneradores. Dichos aerogeneradores disminuyeron el costo del kilovatio hora de electricidad en un 50%, haciendo a la industria eólica mucho más competitiva (Barbero G, 2013).

1.3.4. Perfiles aerodinámicos NACA

El elemento primario de un aerogenerador es el rotor, conformado por una o varias hélices o palas que cuentan con un perfil aerodinámico que va desde un extremo romo o borde de ataque del viento hasta otro con forma afilada (salida del álabe). Generalmente los perfiles más utilizados en los generadores rápidos son de la serie NACA (National Advisory Comity of Aeronautics), estos perfiles son nombrados de acuerdo a un conjunto de cifras que definen su geometría, en esta nomenclatura se distinguen dos tipos:

Nomenclatura de perfiles NACA 4 cifras: En la primera cifra se tiene el significado geométrico indicando la máxima flecha de la línea media de la cuerda en porcentaje dando la máxima curvatura, la segunda cifra indica la distancia desde el borde de ataque hasta la posición de la máxima flecha de la línea media, Las últimas dos cifras indican el espesor relativo máximo en porcentaje respecto a la cuerda.

Nomenclatura de perfiles NACA 5 cifras: La primera cifra indica el valor de coeficiente de sustentación ideal de la curvatura del perfil multiplicado por 20/3, las dos cifras siguientes

hacen relación al doble de la posición de la flecha máxima de la línea media en porcentaje de la cuerda, las últimas dos cifras indican el espesor máximo relativo de la cuerda en porcentaje. El perfil se obtiene a través de una parábola cubica conectada a una línea recta que llega hasta el borde de salida.

En la actualidad también se utilizan otro tipo de perfiles, los de la serie NASA (antecesora de la NACA), que en la nomenclatura también incluyen su comportamiento aerodinámico (Fernández D, Energía Eólica, p. 24).

1.3.5. Generadores de altitud

Se consideran generadores de altitud aquellos que requieren infraestructuras entre los 100 y 300m de altura. Entre estos equipos, los aerogeneradores con tres palas son los dominantes en el mercado, presentándose en ellos continuas mejoras por parte de los fabricantes para incrementar su desempeño. Como ejemplo se pueden citar los avances registrados por la compañía alemana Enercon o la danesa Vestas, las cuales han desarrollado enormes generadores en tamaño y capacidad que sobrepasan los 6MW. El modelo E-126 de Enercon se eleva 198.5m sobre el suelo y produce 7,5MW, energía suficiente para cubrir la demanda anual de energía equivalente a 5000 viviendas, mientras que el modelo V 164 de Vestas construido para ser ubicado en el mar posee 187 metros de altura y entrega 7MW de potencia (Fernández A, 2011).

1.3.6. Generadores de baja potencia

Con los grandes aerogeneradores es fácil dejar a un lado el papel tan importante que pueden desempeñar los aerogeneradores de pequeña escala, estos dispositivos pueden entregar una potencia de hasta 100kW, sin embargo pueden ser muy útiles para zonas rurales, sistemas de comunicación y aplicaciones de autoconsumo con pocos usuarios. Aunque no existe ninguna legislación sobre la tecnología eólica de baja potencia, existe una norma (Norma IEC-61400-2 Ed. 2) de libre cumplimiento que define a un aerogenerador de baja potencia como aquel que su rotor no barra un área mayor a 200m². La potencia que corresponderá a esta área está ligada a la eficiencia del diseño (Cuesta M. Et Al, 2008, p. 3). Los aerogeneradores de baja potencia poseen características que los hacen muy atractivos para producir energía eléctrica tales como:

- Disminución de pérdidas en transporte de la energía (la energía será consumida en el mismo lugar de producción).
- No requieren grandes espacios para su correcta instalación.
- Esta tecnología permite que el mismo usuario sea quien produzca la energía.
- Los equipos requieren baja inversión para su instalación, operación y mantenimiento respecto a los generadores de altitud.

1.3.7. Generadores tipo Savonius

En 1924 el ingeniero finlandés Sigurd Savonius diseñó un rotor conformado por dos palas con forma de semicírculos alrededor del eje vertical que podía trabajar con velocidades de viento muy bajas debido a la diferencia del coeficiente de arrastre presente entre los dos semicírculos. La simplicidad del montaje y su gran capacidad para el bombeo de agua hicieron de este un diseño eficaz y útil con gran implementación que se ha mantenido vigente desde entonces. (Cuesta M. Et Al, 2008, p. 9).

La principal ventaja que posee el rotor Savonius es que trabaja con velocidades de viento muy bajas, debido a sus características aerodinámicas tiene un buen rendimiento a la hora del arranque y en la autorregulación (Cuesta M. Et Al, 2008, p. 9). Por otra parte el diseño de Sigurd presenta ventajas en cuanto a que el sistema soporta vientos turbulentos, el sistema frena por si solo al llegar a una velocidad límite. Debido a su simetría vertical no necesita de un sistema de orientación, disminuyendo costos de fabricación.

No obstante, la baja circulación de aire en cercanías del eje de rotación reduce la eficiencia de la turbina pues resta momento de rotación. Además, el viento que choca por detrás de las aspas puede generar paros repentinos en operaciones de alta velocidad (DiPrátula H, 2009). Esta última condición es más visible en las configuraciones tipo “C” que más adelante se explicará.

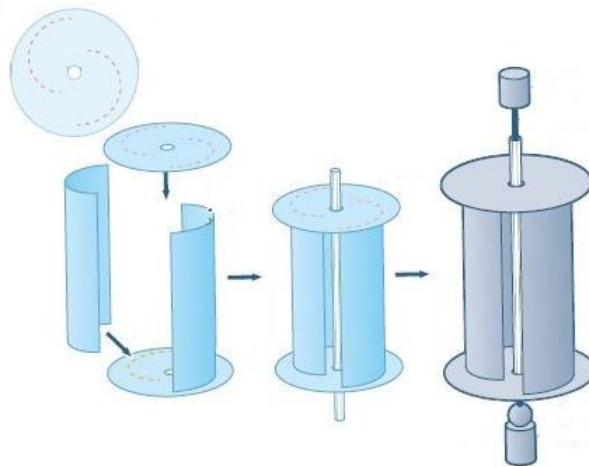


Ilustración 9. Aerogenerador tipo Savonius. (Fernández P. Energía Eólica. p. 42).

El diseño de generadores eólicos tipo Savonius se ha apoyado recientemente en el uso de herramientas computacionales CAD/CAE/FEA con el objeto de comparar y optimizar los componentes usados así como para evaluar desempeños de configuraciones particulares (Arbeloa Sola & Zurita Gabasa, 2012). De modo particular, las dimensiones y configuración de las aspas, son los aspectos más importantes puesto que suponen mejoras en el rendimiento de la turbina (Sheldahl R. Et Al, 1981). Existen múltiples diseños desarrollados a partir del diseño original que mejoran la eficiencia del dispositivo. A continuación se mostrarán las variaciones más notables de las turbinas tipo Savonius:

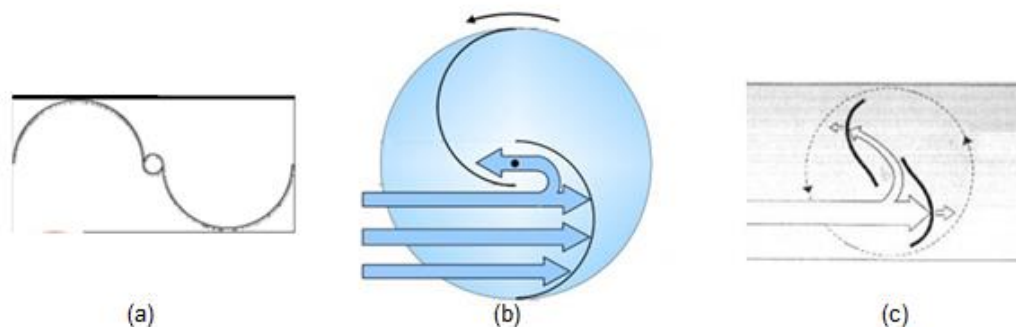


Ilustración 10, Configuraciones de las aspas para un aerogenerador tipo Savonius, (a) Configuración de forma simple (C). (b) Configuración de forma "Cs". (c) Configuración de forma mejorada de la forma "Cs". (DiPrátula H, 2009).

La configuración C (ilustración 13 a) es la forma menos viable, ya que el diseño primitivo de Siguard posee problemas en el momento de la rotación, debido a que se genera una fuerza de fricción con el aire de forma contraria al movimiento, ocasionando esto un descenso en la velocidad del dispositivo en dicha configuración.

La configuración en forma de "Cs" (ilustración 13 b) es un modelo construido sin que los extremos de los semicírculos se unan, haciendo que el viento circule entre las concavidades, beneficiando el movimiento del rotor y por consiguiente del eje vertical, su forma simple aumenta la viabilidad en el momento de hacer diseños e implementaciones físicas con la configuración de rotor tipo Savonius.

La forma mejorada de configuración en "Cs" (ilustración 13 c) posee un mayor aprovechamiento del viento ya que el espacio entre las dos aspas permite aprovechar mejor el impulso rotacional de este, dándole cierta fuerza de empuje al sistema, sin embargo este diseño representa un reto a la hora de construcción ya que las piezas que forman este rotor deben de estar perfectamente cortadas y tener las curvaturas simétricas. (DiPrátula H, 2009).

1.3.7.1. Manufactura de aerogeneradores Savonius

Diversos materiales son utilizados en la fabricación turbinas eólicas, sin embargo es posible clasificarlos según el propósito y las dimensiones de la turbina (generadores de alta y mediana escala). Los materiales comúnmente usados para fabricar las turbinas eólicas son el aluminio, cobre, madera, fibra de vidrio y plástico reforzado, y pueden seleccionarse fácilmente en función de la solicitud del equipo. (CHANDRA S. Et Al, 2011, p. 27)

Se pueden citar muchos métodos de manufactura para la fabricación de rotores de aerogeneradores pero el criterio de selección depende básicamente de los materiales con los que se quiere fabricar el rotor. Para la fabricación de las aspas es común usar madera sometida a fresado o a maquinado CNC, con máquinas de gran bancada que permitan maquinar álabes de hasta 1m (Clausen P, 2000, p. 189-201). Sin embargo este método es costoso y requiere de mucho cuidado debido a que el acabado final de la superficie debe ser de alta calidad para evitar fricciones indeseadas con el viento. (Song Q, 2012).

1.3.7.2. Casos de éxito en la implementación del aerogenerador Savonius

- El diseño Windside, desarrollado por la compañía finlandesa WindSide, es una mejora del diseño original de SigurdSavonius adicionando a este una forma en espiral al rotor primitivo en "S". Posee una potencia de hasta 50kW, alcanzando rendimientos parecidos a los de los aerogeneradores de eje horizontal. Este tipo de turbinas posee la ventaja que con muy poca velocidad del viento pueden generar grandes cantidades de energía. Las turbinas Windside se encuentran en operación, en diferentes países de Europa y Asia, en lugares como edificios, postes de iluminación, faros y lugares lejanos donde la turbina Windside es la mejor opción para generar energía (Cuesta M. Et Al, 2008, p. 9).
- La compañía británica SEaBEnergy diseñó un molino tipo Savonius llamado WindBuster™, que poseía una potencia de 5kW, suficiente para suministrar energía a una casa de 4 habitaciones. Para su instalación no se requiere de un experto y es fácil de conectar al sistema eléctrico de una vivienda. WindBuster™ no necesita cambio de orientación de aspas ya que su forma helicoidal permite una buena explotación de las corrientes de viento que provienen en cualquier dirección, además su funcionamiento es particularmente silencioso (SEaBEnergy, 2009).
- La compañía HuebnerGiessen desarrolló un aerogenerador de eje vertical llamado WindStreamer con una potencia máxima de 3kW, su diseño consiste en un híbrido de dos rotores, uno tipo Darrieus triple y otro Savonius doble. La velocidad mínima de operación es de 2.5 m/s, condición que la habilita para operar en casi cualquier zona geográfica (Industrial mining y compañía, 2013).

1.3.8. Transmisión de energía eléctrica

El generador en las turbinas eólicas es el instrumento que transforma la energía mecánica procedente del rotor en energía eléctrica, sus configuraciones varían así como su principio de funcionamiento. A continuación se citan algunos de los más usados para generación eléctrica (Cuesta M. Et Al, 2008, p. 12):

Generador de corriente continua (Dinamos): son máquinas eléctricas sencillas que no necesitan sistemas especializados para la carga de baterías y son capaces de generar corriente aún con bajas velocidades de giro del rotor, sin embargo su uso ha decrecido en beneficio de los generadores de corriente alterna, los cuales suelen ser más sencillos de mantener.

Generadores síncronos o alternadores: Estos generadores son de velocidad variable, es decir que entregan corrientes de frecuencias variables, lo que requiere un convertidor de corriente alterna como elemento intermediario entre el generador y la red. Este tipo de generadores se suelen usar en maquinarias que utilizan instalaciones autónomas o en sistemas de calefacción e iluminación.

Generadores asíncronos o de inducción: Es una máquina eléctrica que genera un campo magnético giratorio a través del estator, sus devanados están conectados a una

fuente exterior alterna, siendo esta máquina una consumidora de energía reactiva debido a que el embobinado es una carga inductiva y para generar el campo magnético consume una corriente desfasada de tensión.

1.3.9. Acumulación de energía eléctrica

Los sistemas que no se encuentran conectados a la red eléctrica, normalmente poseen un sistema de almacenamiento que permita disponer de energía eléctrica cuando haya ausencia de viento (Cuesta M. Et Al, 2008, p. 16). Los sistemas de acumulación más comunes son:

1.3.9.1. Baterías

En la actualidad es el sistema de acumulación de energía eléctrica generada más utilizado, permitiendo construir sistemas de pequeño tamaño como repetidores de señal, puestos de socorro remotos, estaciones de recolección de datos. Estos sistemas sólo utilizan baterías que permitan descargarse hasta un 60% sin causar daños, ya que en estas condiciones pueden durar de 5 a 7 años. Este sistema de almacenamiento de energía no es adecuado para la utilización en sistemas con grandes demandas de energía debido a su costo tan elevado y las dificultades de mantenimiento.

1.3.9.1.1. Tipos de baterías

- **Batería Níquel-Cadmio**

Este tipo de baterías se caracterizan por tener sus celdas selladas, son más tolerantes a las altas temperaturas a comparación de las baterías de plomo ácido convencionales, su tasa de auto-descarga es muy baja, sin embargo poseen un efecto memoria lo cual hace que se aceleren el proceso de descarga (Electrónica, 2013).

- **Batería Litio**

Son baterías de nueva tecnología, que ofrecen una mayor densidad de energía, cuenta con un mayor valor de voltaje por celda, lo que reduce el número de celdas en serie para que se pueda alcanzar cierto voltaje, estas baterías son más compactas, pero su alto coste es un limitante (Electrónica, 2013).

- **Batería Pb-ácido:**

Este tipo de baterías, son de uso común, ya que poseen una muy buena relación de desempeño-coste, sus diferentes configuraciones hacen que este tipo de baterías sean idóneas para ciclos de carga y descarga repetidos, además para ciclos cortos de carga.

Las baterías de Pb-ácido son imprescindibles en muchas aplicaciones actualmente, como en el área industrial, náutica, automotriz y sistemas de energías alternativas (Electrónica, 2013).

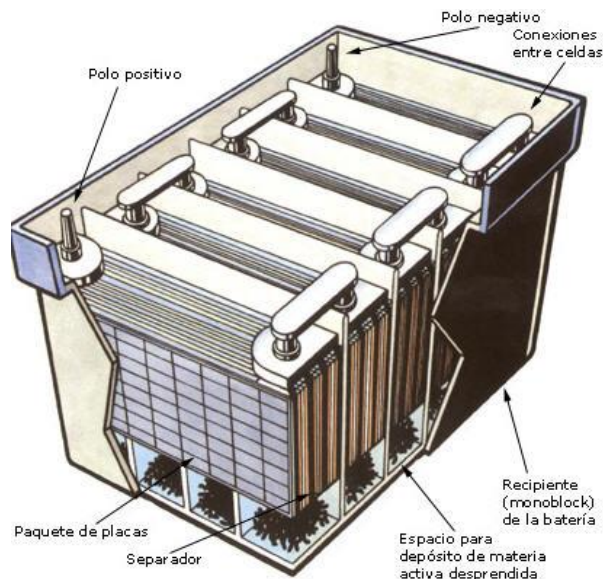


Ilustración 11. La estructura tanto interna como externa de una batería de plomo-ácida, allí se observa la conexión en serie de las celdas. Las placas que tienen igual polaridad están conectadas en paralelo.

- **Medidas útiles en las baterías**

Amperios hora Ah: Es una medida que permite conocer la capacidad de la batería, significa entonces la corriente que puede suministrar una batería durante un tiempo determinado. Por ejemplo una batería de 20AH está en la capacidad de entregar 20A durante una hora teóricamente.

Capacidad de arranque en frío CCA: Se refiere a la cantidad de corriente que la batería puede entregar en una temperatura de -18°C , en un tiempo de 30 segundos, sin bajar de 7.2 voltios para el caso de las baterías de 12 voltios.

Capacidad de reserva CR: Medida que indica el tiempo en minutos que una batería cargada completamente puede entregar 25 A antes de que el voltaje sea de 10.5 en el caso de las baterías de 12 voltios.

1.3.9.2. Bombeo de agua:

Durante los periodos de largas ventiscas en los que se presenta exceso de producción de energía eléctrica, se puede usar la energía mecánica para bombeo de agua hasta un depósito elevado.

1.3.9.3. Generación de hidrógeno y pila de combustible

En los periodos de exceso de generación de electricidad, se puede utilizar este exceso para descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno, para luego utilizar el hidrógeno como combustible y generar electricidad de corriente continua mediante una pila.

1.3.10. Interconexión con otros sistemas de generación

Existen diferentes configuraciones en las aplicaciones para generar energía con las turbinas tipo Savonius. (Cuesta M. Et Al, 2008, p. 18):

Sistemas individuales: Cuentan con un aerogenerador, una o más baterías para el almacenamiento de la energía generada y un regulador que es el encargado de controlar la carga y descarga de dichas baterías. Las turbinas de baja potencia se pueden utilizar en diferentes aplicaciones según las necesidades tanto con energía alterna como directa.

Sistemas Centralizados: Consisten en tener un sistema eólico central el cual posee varios aerogeneradores, para suplir la necesidad de una pequeña comunidad.

Sistemas Híbridos: Las turbinas de baja potencia eólica brindan una solución atractiva para suplir la demanda de electricidad de ciertos lugares, sin embargo la fluctuación del viento inhibe la producción de un fluido constante, por ello se combinan con otros tipos de generaciones de electricidad para garantizar estabilidad.

Sistemas Eólico-Fotovoltaicos: La unión de estas formas de generación mejora la constancia de generación de energía y hacen más rentable el consumo de esta. Estas instalaciones están constituidas por un aerogenerador que a través de un rectificador regulador de carga suministra la energía producida a las baterías y en paralelo se conecta un sistema de paneles solares que a través de su regulador de carga suministran energía a las baterías.

Sistema Eólico-Diésel: Este sistema permite una gran flexibilidad en su funcionamiento, el grupo diésel trabaja a toda carga cuando el viento está en calma y va variando su potencia cuando el aerogenerador comienza a producir energía, estos funcionan en una combinación de control eléctrico, con el fin de generar a la salida una corriente que no fluctúe.

1.3.11. Mantenimiento

El aerogenerador vertical tipo Savonius tiene como agregado que el gran torque generado en el momento que sus aspas giran no es un indicador decisivo para realizar un mantenimiento minucioso y detallado del sistema, ya que la turbina recibe muy pocos esfuerzos mecánicos y las partes del aerogenerador no sufren mucho desgaste debido a que son piezas que están relativamente estáticas. Además la baja altura del diseño tipo Savonius hace que el mantenimiento sea de fácil acceso y poco riesgo (Elswick S. 2005).

1.3.12. Aprovechamiento energético del viento

1.3.12.1. Factores importantes sobre generación eólica

La velocidad del viento: El potencial eólico se calcula principalmente en función de la velocidad del viento, es decir que si el viento tiene una doble velocidad puede generar hasta ocho veces más energía eléctrica, manteniendo las mismas condiciones mecánicas,

de presión y altitud, esto debido a que la potencia del viento está relacionada directamente con el cubo de la velocidad del viento.

Densidad del aire: La energía cinética del viento depende directamente de la densidad del aire, entonces cuanto más denso sea el aire más energía recibirá la turbina.

Forma en la que están colocados los aerogeneradores: En el caso de los aerogeneradores de eje vertical tipo Savonius no necesita ubicarse estratégicamente debido a que la geometría del rotor esta estratégicamente diseñada para que el aire incida en cualquier dirección.

Altitud para ubicar los aerogeneradores: Los aerogeneradores de eje vertical no requieren ser ubicados en lugares muy altos, puesto que aprovechan muy bien los vientos turbulentos o de bajas velocidades que son comunes en la cercanía del suelo.

1.3.12.2. Factores decisivos en el diseño de los aerogeneradores

Diseño del rotor: La configuración del rotor resulta decisiva para satisfacer las necesidades puntuales, además se debe tener presente el diámetro, su área de barrido, el número de aspas, y la velocidad nominal de giro. La disminución en el peso de este componente así como de todas las piezas en contacto con él supone aumentos en el rendimiento general del generador, no obstante resulta conveniente agregar un poco de inercia al sistema para mantener el rotor en movimiento cuando el impulso del viento desciende.

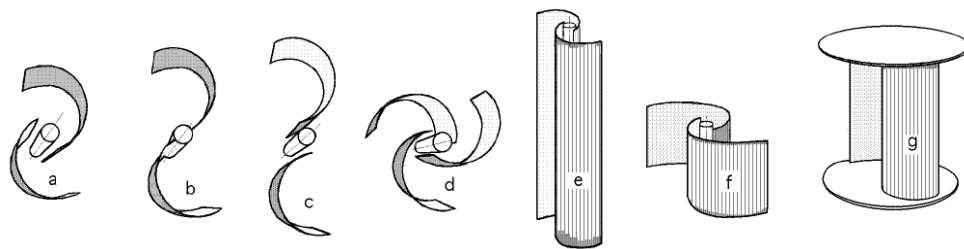


Ilustración 12. Configuraciones de rotores tipo Savonius. (a) Tipo Cs interior. (b) Tipo C simple. (c) Tipo Cs externo. (d) Tipo Cs a tres aspas. (e) Configuración de altura. (f) Configuración de diámetro. (g) Configuración de tapas. (Fernández P. Energía Eólica)

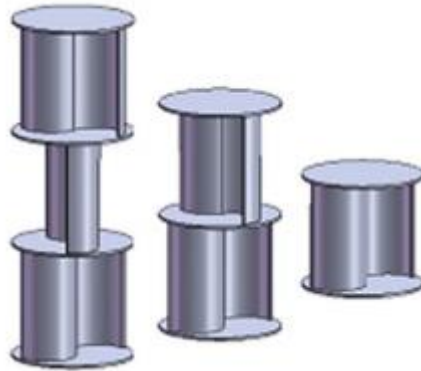


Ilustración 13. Etapas de un generador tipo Savonius (Vicente Et Al, 2012).

Para el diseño del número de etapas (Ilustración 13) y aspas de un generador eólico Savonius se debe tener una relación entre la velocidad del viento y el coeficiente de potencia, por medio de pruebas poder determinar cuál configuración satisface más las condiciones que se poseen, la siguiente ilustración muestra dos graficas en las cuales se observa la tabla de resultados para escoger el número de etapas (ilustración 14 a) por medio de una configuración tipo Cs de 2 aspas, donde hay una variación en el número de etapas y de esta forma se determina cual configuración muestra mejores resultados, por otra parte para escoger el número de aspas (ilustración 14 b), también en una configuración Cs, allí se varían tanto el número de etapas como el número de aspas, todo esto con el fin de determinar la configuración adecuada (Suárez, 2011).

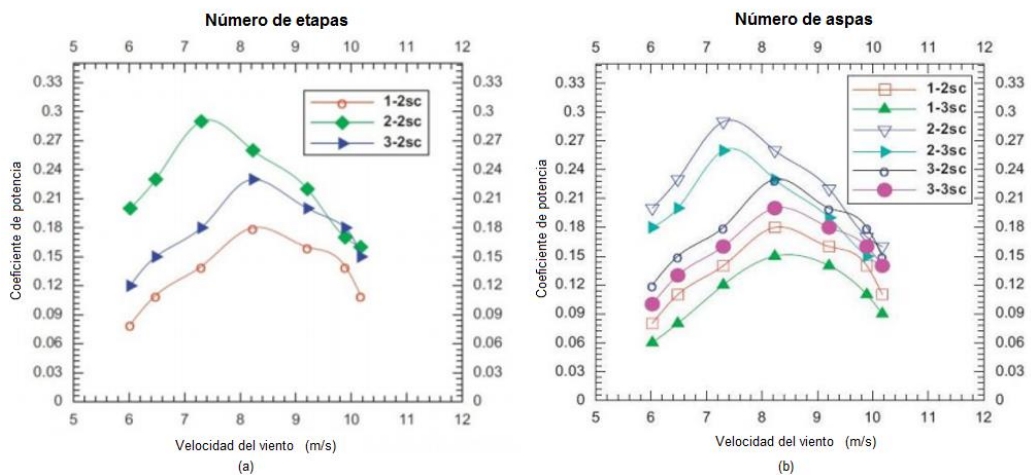


Ilustración 14. Relaciones de velocidad contra el coeficiente de potencia para hallar el número de etapas y aspas que cumplan los mejores estándares para el diseño del generador Savonius. (a) Relación para el número de etapas. (b) Relación para número de aspas (Suárez, 2011).

De la ilustración 14 se determina entonces que la configuración que posee un mayor coeficiente de potencia es la configuración de dos etapas con dos aspas para velocidades entre 5 y 12 m/s.

Características de la torre: Se debe tener presente la altura a la cual será colocado el rotor, ya que las especificaciones de altura para los generadores eólicos varían dependiendo del tipo, la posición de su eje y el diámetro de sus aspas; en el caso de los aerogeneradores con eje horizontal se necesitan torres muy altas para ubicarlos en zonas de vientos rápidos. Para los generadores de eje vertical, este aspecto no es tan decisivo toda vez que ellos pueden trabajar en bajas alturas, sin embargo emplazamientos altos permiten aprovechar densidades de viento mayores.

Generador: Se debe seleccionar el generador correcto según la necesidad que se posea y la aplicación o carga que suplirá con él. Si la energía generada se almacenará, se recomienda que este sea de corriente directa, si la energía es de consumo inmediato, lo mejor es que sea de corriente alterna.

Protección: Los generadores eólicos están sometidos a riesgos de descargas eléctricas provenientes de la atmósfera. Se utilizan pararrayos que por medio del método de la esfera rodante, se conoce el área de protección de estos. Como se muestra en la ilustración 15 el área protegida se encuentra debajo de las tres esferas (PhoenixContact, 2013).

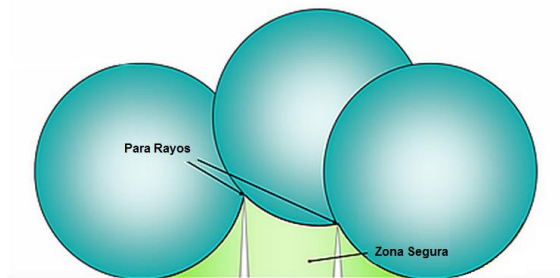


Ilustración 15. Zona segura para evitar rayos (PhoenixContact, 2013).

Transmisión: La unión que existe entre el generador eléctrico y el rotor se da a través de la transmisión, su selección debe hacerse acorde a las necesidades de generación, mediante dispositivos mecánicos que pueden ser engranajes, correas o bielas (Fernández P. Energía Eólica. p. 56).

1.3.13. Evaluación del recurso eólico en la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia)

El primer paso para iniciar una evaluación certera del recurso eólico con el que cuenta la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia), es tomar datos reales y consistentes de la velocidad, densidad y otras variables relacionadas con el viento siempre teniendo en cuenta que la frecuencia debe ser constante durante el registro de datos para obtener valores reales a la hora de realizar estadísticas.

Los datos utilizados para los siguientes procedimientos, han sido obtenidos de una base de datos que posee la Escuela de Ingeniería de Antioquia, campus Palmas, y que ha sido elaborada a partir de las mediciones hechas con una estación meteorológica ubicada en el campus. Los datos tanto de velocidad como densidad han sido obtenidos en un periodo del 19 de diciembre del 2012 al 26 de agosto del 2013, tomados con una frecuencia de 10 minutos por dato. En la tabla 1 se consignan los resultados de estas mediciones.

Tabla 1. Promedio de las velocidades del viento en la Escuela de ingeniería de Antioquia desde el 19 de diciembre del 2012 al 26 de agosto del 2013.

| Meses | Velocidad promedio mensual |
|----------------|----------------------------|
| Diciembre 2012 | 3.9 m/s |
| Enero 2013 | 4.3 m/s |
| Febrero 2013 | 3.4 m/s |
| Marzo 2013 | 4.0 m/s |
| Abril 2013 | 3.3 m/s |
| Mayo 2013 | 2.9 m/s |
| Junio 2013 | 4.1 m/s |
| Julio 2013 | 4.5 m/s |
| Agosto 2013 | 4.0 m/s |

1.3.13.1. Distribución de Weibull

Para evaluar la velocidad del viento se usa una distribución estadística tipo Weibull, de amplio uso en la implementación de máquinas eólicas (Seguro Et Al. 2000). La distribución de Weibull está dada por la siguiente ecuación (Wind-Data. 2013):

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}$$

Donde A es el parámetro de escala en m/s y es proporcional al valor medio de la velocidad del viento, k es el factor de Weibull, que varía entre 1 y 3 y v corresponde a la velocidad perpendicular del viento. Un valor de k pequeño significa que los vientos son muy variables, mientras que para valores de k altos hace referencia a que las velocidades del viento son constantes.

Para encontrar la distribución de Weibull se han ingresado los datos de la tabla 2, la cual muestra la frecuencia en porcentaje con la que las velocidades se repitieron en toda la muestra del 19 de diciembre del 2012 al 26 de agosto del 2013.

Tabla 2. Resultados de frecuencias de la velocidad de los vientos en la Escuela de Ingeniería de Antioquia, con datos tomados del 19 de diciembre del 2012 al 26 de agosto del 2013.

| Frecuencias de velocidad de vientos | | | | | |
|-------------------------------------|-------|------------|--------|-------|------------|
| Rangos | Datos | Frecuencia | Rangos | Datos | Frecuencia |
| 0-1 | 2853 | 8.095% | 8-9 | 766 | 2.173% |
| 1-2 | 3739 | 10.609% | 9-10 | 250 | 0.709% |
| 2-3 | 5126 | 14.544% | 10-11 | 105 | 0.298% |
| 3-4 | 6923 | 19.643% | 11-12 | 46 | 0.131% |
| 4-5 | 8584 | 24.356% | 12-13 | 6 | 0.017% |
| 5-6 | 2658 | 7.542% | 13-14 | 4 | 0.011% |
| 6-7 | 2518 | 7.144% | 14-15 | 0 | 0.000% |
| 7-8 | 1665 | 4.724% | 15-16 | 1 | 0.003% |
| Total | | | | 35244 | 100.000% |

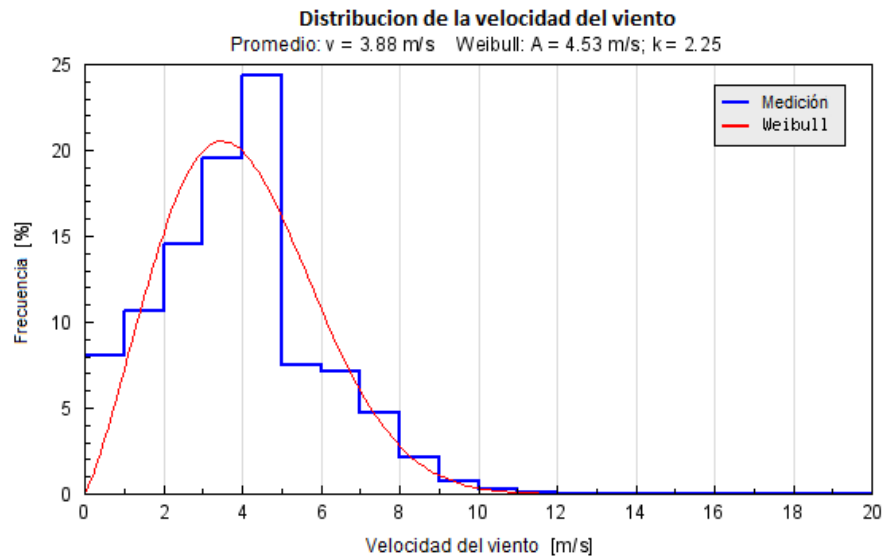


Ilustración 16. Distribución de la velocidad del viento por medio de una distribución de Weibull (Wind-data, 2013)

En la distribución de velocidades del viento de Weibull se ha obtenido que la velocidad promedio del viento fue de 3.88 m/s , y un valor de k de 2.25 , siendo este un valor alto indica que los vientos son constantes.

1.3.13.2. Potencia y energía que se encuentra disponible en el viento y Límite de Betz

El viento es una masa en movimiento que contiene una gran cantidad de energía cinética que es posible calcular con cierta exactitud usando modelos mecánicos sencillos. (Arbeloa et Al, 2012). Para comenzar, la energía cinética está dada por:

$$E_c = \frac{mv^2}{2}$$

Dado entonces que la potencia puede relacionarse con la cantidad de energía cinética se define la siguiente ecuación (Arbeloa et Al, 2012):

$$Potencia = \frac{Energía}{Tiempo}$$

Sin embargo la cantidad de energía que se puede extraer del viento depende de la densidad del aire, el área reflejada del rotor y la velocidad del viento. El área reflejada del rotor se definirá más adelante en la sección dedicada a generadores eólicos (apartado 4.8). El caudal másico del aire m que posee una densidad ρ y que fluye perpendicularmente a través de una superficie que posee un área A , está dado por la ecuación (Arbeloa et Al, 2012):

$$\dot{m} = \rho Av$$

Entonces la potencia extraíble del viento se expresa

$$P_v = \frac{\rho Av^3}{2}$$

Sin embargo, si toda la energía que el viento posee se extrae a través del generador eólico, implicaría que el aire se quedaría sin velocidad luego de pasar por el generador, cosa que no sucede. Para eliminar este problema se ha definido un límite para la cantidad de energía cinética que se puede extraer de un aerogenerador sin que la velocidad de salida del aire sea cero. Este límite se fijó en 59.25% de la energía cinética del viento antes de incidir en el generador. A esta corrección se le denominó el coeficiente de potencia (Betz, 1926); la gráfica 17 hace relación entre el tipspeed ratio (Velocidad entre la velocidad de punta del perfil y la velocidad del viento real) y el coeficiente de potencia.

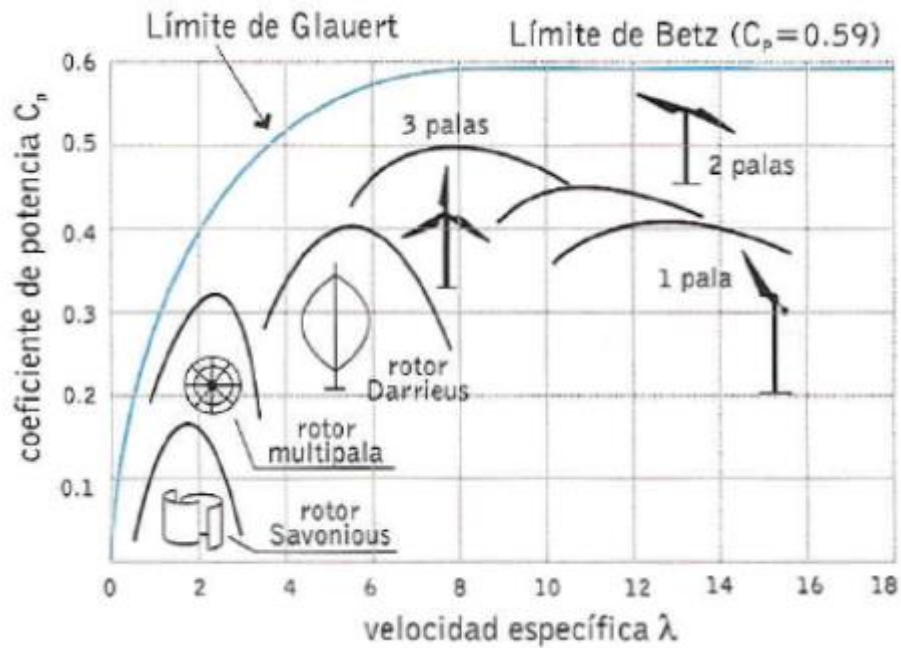


Ilustración 17. Coeficiente de potencia vs lambda, con muestra de los diferentes tipos de aerogeneradores (Funes Ruiz, 2009).

El coeficiente de potencia C_p se define como una relación entre la potencia extraída por el generador y la potencia disponible en el viento, como un porcentaje, mencionando anteriormente que un generador ideal solamente puede extraer el 59.25% de la potencia del viento, el coeficiente de potencia varía respecto a las configuraciones y tipos de aerogeneradores. El C_p afecta directamente a la solución de la ecuación de potencia del aerogenerador, debido a que esta es igual a la potencia del viento, multiplicada por el C_p (ABB, 2013).

$$P_{aerogenerador} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$

2. METODOLOGÍA

Durante el desarrollo de diseño de concepto y de detalle del aerogenerador Savonius, se han llevado a cabo dos etapas principales, las cuales son fundamentales para llevar a su finalidad el diseño del producto, siguiendo el modelo definido en el libro diseño y desarrollo de productos de Karl T Ulrich y Steven D. Eppinger. Las etapas poseen fases de trabajo las cuales son dependientes de las anteriores, es por esto que el método por el que se ha optado, se debe seguir tal cual como se propone a continuación:

2.1. ETAPAS DE DISEÑO DE CONCEPTO:

Esta etapa consiste en generar una descripción aproximada del producto, el diseño de concepto es una descripción que habla desde los principios básicos de funcionamiento, hasta la forma del producto físicamente, describiendo claramente como es la forma en la que este producto final satisface las necesidades de los clientes.

Las fases del diseño de concepto son:

- **Clarificación de la tarea / definición del problema:** La definición del problema consiste en conocer cuál es el problema al que se enfrenta el cliente y tener una idea de cómo solucionarlo. El problema debe ser entendido lo mejor posible, para llegar a una solución con la que cliente quede satisfecho.
- **Necesidades:** Son cualquier atributo o inquietud que posea el cliente respecto al producto potencial, estas necesidades son agrupadas y ordenadas por orden de prioridad para conocer claramente cuáles son los requisitos que el cliente tiene frente al producto.
- **Matriz de medidas y necesidades:** Posteriormente a tener claridad de las necesidades del cliente respecto al producto a desarrollar, se realiza una tabla en la cual se enfrentan las necesidades, con las medidas, estas medidas hacen referencia de manera directa al grado al que el producto satisface la necesidad el usuario. La matriz se realiza con el fin de conocer y tener una dimensión de las necesidades para posteriormente formular las especificaciones.
- **Especificaciones:** La formulación de las especificaciones hace referencia a darle valores medibles u objetivos a las necesidades del cliente, las especificaciones son las variables claves para el desarrollo de todo el diseño de concepto ya que estas dan un dimensionamiento a lo que puede ser el producto final.
- **Funciones y estructura funcional:** Debido a que la solución del problema puede ser muy compleja, entonces se procede a la división de sub-problemas, los cuales hacen referencia a las funciones que realizan acciones, para transformar de una u otra forma material, señales o energía. La formulación de las funciones es indispensable para conocer las partes funcionales del producto y para tener un concepto de la forma como estas se organizan satisfaciendo las necesidades del cliente en el producto final (Diagrama de funciones).
- **Búsqueda de soluciones:** La búsqueda de soluciones hace relación a las formas con las cuales se pueden solucionar los sub-problemas o funciones. Estas soluciones deben ser acordes con lo que el cliente hizo referencia en un principio, para que la solución a estos sub-problemas sea exitosa.
- **Generación de conceptos (Matriz morfológica):** La generación de conceptos consiste en unir los diferentes tipos de soluciones para cada función, haciendo grupos de conceptos.

La matriz morfología se relaciona con un método para combinar los diferentes conceptos anteriormente formados, la formación de esta matriz es un paso esencial en el diseño del concepto debido a que gracias a esta se pueden visualizar claramente las opciones que se tienen para seleccionar un concepto definitivo.

- **Calificación y selección de conceptos:** La selección de conceptos se centra en la mezcla de soluciones propuestas para cada una de las funciones en específico, estos conceptos son propuestos posteriormente en una matriz de conceptos solución; esta matriz es calificada por medio de criterios y puntajes para conocer cuál es el concepto ganador, concepto final que se implementa para satisfacer las necesidades del cliente.

2.2. ETAPAS DE DISEÑO DE DETALLE

En esta etapa se lleva a cabo la clarificación y materialización de los detalles necesarios para terminar el producto satisfactoriamente.

- **Relaciones funcionales:** Los elementos funcionales del producto son aquellas operaciones y transformaciones individuales que hacen que el producto posea un buen rendimiento. Mientras que los elementos físicos son las partes del producto que ponen en marcha las funciones que debe realizar el producto.
Las relaciones funcionales hacen referencia a la forma física y estructurada con que los elementos físicos están ubicados para la realización satisfactoria de las funciones. Las relaciones funcionales dan en primera instancia como quedaría la geometría del producto físicamente.
- **Reglas de diseño (Simplicidad, claridad, seguridad):** Para llevar a cabo el diseño de las partes específicas del producto, se tienen en cuenta las reglas de diseño que están encaminadas a que el diseño sea simple pero resistente, que sea un diseño claro y que se tenga conocimiento total de las partes y funciones de cada una de ellas y por último diseño bajo las reglas de seguridad para evitar daños a los demás o en el mismo producto.
- **Lineamientos de diseño:** El lineamiento bajo el cual se trabaja para este caso es el de mantenimiento, bajo esta premisa se hacen los cálculos y diseños de formas que posteriormente se seleccionarán definitivamente.
- **Definición de formas y selección de materiales:** La definición de las formas se realiza mediante software CAD, ya que con esta herramienta se puede visualizar claramente la forma deseada de las partes, a su vez se seleccionan los materiales y medidas estándares para llegar uniformemente a la terminación de un boceto claro y estandarizado.

3. DISEÑO DE CONCEPTO

3.1. NECESIDADES Y MEDIDAS

Los aerogeneradores tipo Savonius poseen diferentes configuraciones que responden a las variaciones de la carga solicitada, al medio geográfico y a las condiciones meteorológicas. Dado que el aerogenerador Savonius cuenta además con un alto par de arranque, pero con una eficiencia reducida, se requiere definir con cuidado las necesidades del mismo para que su trabajo sea adecuado.

En la búsqueda de las características de un aerogenerador tipo Savonius, sus desventajas y cualidades, se ha llegado a una lista de 17 necesidades para que el diseño conceptual tenga todo aquello que un usuario potencial ubicado en la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia) sede Palmas requiere, sin dejar de lado la funcionalidad del sistema. Se le ha dado el nombre necesidad para señalar cualquier atributo del aerogenerador potencial que desea el cliente, pero no se establece una distinción entre el deseo y una necesidad real, es decir que no se hace referencia a las necesidades cuando son atributos y requisitos para el cliente. (Ulrich Et Al, 2005)

Dentro de la lista de necesidades se encuentra las características propias de un aerogenerador, como que el rotor de un aerogenerador tipo Savonius tiene un arranque a bajas velocidades de viento sin importar la dirección, además que posee la capacidad de rotar cuando hay vientos turbulentos y aun así poder generar energía.

Por otra parte se le atribuyeron cualidades necesarias al generador eólico para que fuera llamativo al usuario, tales como el fácil ensamble de todas sus partes, gracias a elementos comerciales, también como el diseño con materiales livianos que resisten a diferentes cargas y a condiciones ambientales difíciles, y además una interfaz de fácil manejo en la que se incluye el monitoreo de la operación.

Pensando en la seguridad tanto para el usuario como para el sistema se generaron necesidades tanto para protección eléctrica como mecánica. En el primer caso es necesario proteger el sistema eléctrico frente a sobre voltajes y rayos, en el segundo caso la estructura debe brindar resistencia mecánica en la intemperie. Para finalizar las necesidades esenciales para que el diseño cumpla las cualidades propias de un aerogenerador, tales como, generar energía y abastecer pequeñas instalaciones destinadas a la iluminación, el sistema debe poseer baterías recargables y reemplazables para un continuo suministro y tener una instalación eléctrica simple y una transmisión mecánica adecuada para un correcto funcionamiento del sistema. El correcto desarrollo de todas las necesidades converge en un sistema funcional que cumpla los deseos del cliente y los requerimientos de un aerogenerador.

En la tabla 3 se muestran las necesidades definidas luego del proceso de definición del problema. La acotación del problema se basa en la información ofrecida por proveedores comerciales, en artículos técnicos y en los datos suministrados por miembros del grupo MAPA que han participado en proyectos relacionados con la generación de energía eólica en la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia) sede Palmas a través de entrevistas

personales y de los informes elaborados por ellos como constancia de su actividad de investigación.

Tabla 3. Lista de necesidades

| | NECESIDADES |
|-----------|---|
| 1 | Aspas que empiecen a rotar a baja velocidad de viento, sin importar la dirección de este. |
| 2 | Poca fricción de rotación. |
| 3 | Piezas de fácil fabricación por medio de procesos de manufactura convencional y debidamente referenciada. |
| 4 | Sistema mecánico seguro y resistente. |
| 5 | Fácil mantenimiento en piezas mecánicas y sistemas eléctricos. |
| 6 | Diseño para operación a la intemperie. |
| 7 | Generar energía. |
| 8 | Capacidad de almacenamiento de energía por medio de baterías recargables y reemplazables. |
| 9 | Instalación eléctrica simple con sistema de control eléctrico. |
| 10 | HMI fácil de manejar que incluya monitoreo de operación. |
| 11 | Circuito de protección a sobre voltaje y protección anti truenos que incluya apagado de emergencia. |
| 12 | Abastecimiento de energía a pequeñas instalaciones destinadas a iluminación. |
| 13 | Materiales livianos y resistentes a las diferentes cargas y a la corrosión. |
| 14 | Materiales y Lubricantes Comerciales. |
| 15 | Capacidad de funcionar con bajas velocidades y vientos turbulentos. |
| 16 | Fácil instalación, ensamble y traslado. |

Como medio para establecer las especificaciones de diseño, se construyeron estrategias o medidas para enfrentar las necesidades. El resultado es visible en la tabla 4 que enfrenta estos dos elementos (necesidades y medidas), con el fin de limitar la necesidad a valores medibles.

Tabla 4. Lista de necesidades y medidas

| Necesidad | Medidas | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------------------|---------------------|-------------------|-----|------------------|---------------------|------------|-----------------|------|-----|------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------|---------|-----------|
| | Torque en el eje | Velocidad el viento | Angulo del viento | rpm | Energía generada | Momentos de flexión | Numeración | Diseño mecánico | Peso | A/h | Diseño eléctrico | Vida útil del circuito eléctrico | Aislamiento de circuitos | Indices de seguridad | watts/h | Corrosión |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | |

3.2. ESPECIFICACIONES

A continuación se presentaran las especificaciones del aerogenerador tipo Savonius, las cuales se obtienen luego de enfrentar las necesidades y medidas antes definidas. Una vez delimitadas las especificaciones, se procede a su revisión y simplificación comparando una vez más con la información recolectada para delimitar el problema. A continuación se presentan las especificaciones

- El aerogenerador usa una configuración de aspas paralelas al eje de rotación.
- El aerogenerador recibirá un torque en su eje entre 70Nm-90Nm.
- La velocidad del viento promedio con la que opera el aerogenerador es de 3.88 m/s que corresponde a valores medidos en la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia) sede Palmas.
- El ángulo con el que el aire golpea el rotor es de un máximo de 90°.
- El dispositivo gira a una velocidad no mayor a 300 rpm.
- El aerogenerador genera una energía promedio de 110V
- El equipo tiene un peso no mayor a 300 Kg.
- El sistema de almacenamiento tiene la capacidad de entregar de entre 100 y 150 A/h.
- La potencia generada por el aerogenerador tipo Savonius es de 7 Watts promedio.
- La estructura mecánica soporta las condiciones ambientales del campus de la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia) sede Palmas.
- El equipo se construye usando al menos un 75% de partes comerciales o de origen comercial con pocos cambios por conformación.

3.3. DEFINICIÓN DE FUNCIONES

En esta etapa del diseño de concepto se desglosa el sistema con el fin de encontrar funciones específicas necesarias para el cometido general del proyecto. Estas funciones son producto del análisis de las necesidades y las especificaciones antes definidas. A continuación se listan las funciones definidas para el proyecto:

1. **Recibir energía mecánica del viento:** Esta función consiste en la selección de un adecuado perfil de aspas para que el golpe con el viento sea lo más perpendicular posible, generando una mayor fuerza de empuje.
2. **Transmitir movimiento rotacional:** Consiste en el mejor montaje para que el eje este sujeto a la base con la menor fricción posible.
3. **Transmitir energía mecánica:** La función se enfoca en tener un adecuado sistema de transmisión mecánica que permita el buen funcionamiento del generador.
4. **Transformar energía mecánica a eléctrica:** Es la función encargada de transformar la energía de movimiento del eje a energía eléctrica para su posterior uso.
5. **Controlar modo:** La función radica en el sistema de relevo de la energía proveniente de las baterías o directamente de la función de transformar energía mecánica a eléctrica de manera segura. Esta función también contempla la implementación de un circuito de control encargado de tener un abastecimiento de energía consistente.
6. **Almacenar energía:** Esta función tiene la bondad de almacenar la energía eléctrica generada para su posterior uso.
7. **Transformar energía eléctrica:** Esta función consiste en un sistema de transformación de energía AC a DC.
8. **Visualizar datos:** Es la función que se encarga de recolectar los datos generados por los sensores para una posterior visualización de estos por parte de los usuarios.

3.4. DIAGRAMA DE FUNCIONES

El diagrama mostrado en la ilustración 17 muestra cómo se distribuyen las funciones en un orden lógico y consecuente con la función principal del aerogenerador tipo Savonius que es generar energía, usando para ello los flujos de material, flujos de señal y energía.

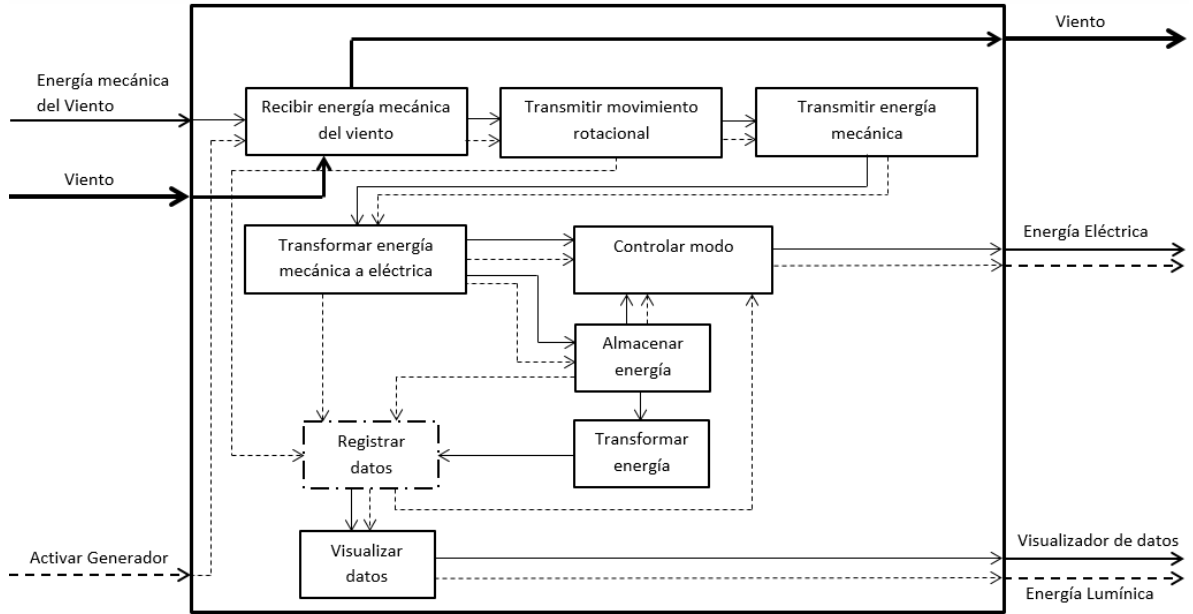





Ilustración 18. Diagrama de funciones del aerogenerador Savonius.

3.5. SOLUCIÓN DE FUNCIONES

A las funciones del dispositivo, se le dieron diferentes tipos de soluciones buscando el funcionamiento correcto del sistema en su totalidad atendiendo a las especificaciones de diseño establecidas anteriormente.

F1: Recibir energía mecánica del viento:

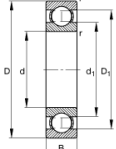
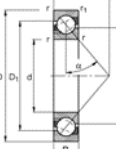
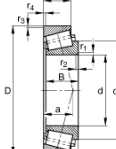
Tabla 5. Función F1, Recibir energía mecánica del viento (ref imágenes anexo1).

| | |
|--|--|
|  <p>[1]</p> | <p>A: Perfil en C: Es la configuración menos efectiva de las tres ya que esta presenta restricciones de auto frenado debido a los vientos en contra que no son desplazados a favor del movimiento. (DiPrátula H, 2009).</p> |
|  <p>[2]</p> | <p>B: Perfil en forma de Cs: Esta configuración presenta ventajas a la hora del diseño y la construcción con respecto a la última, además el espacio presente en entre las aspas presenta una gran disminución a las fuerzas de frenado por los vientos en contra. (DiPrátula H, 2009).</p> |
|  <p>[3]</p> | <p>C: Perfil mejorado en Cs: Es la configuración que mejor disminución a las fuerzas resistivas, pero por su diseño de aspas se hace complicada su construcción, debido a que la simetría tiene que ser adecuada. (DiPrátula H, 2009).</p> |

F2: Transmitir movimiento rotacional

Para la transmisión del movimiento rotacional se desea una unión de poca fricción conformada por rodamientos fijados a la base y al eje rotatorio. Las opciones presentadas son:

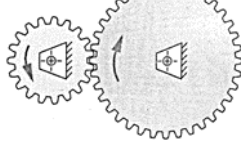

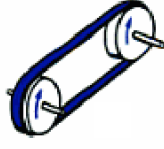
Tabla 6. Función F2, Transmitir movimiento rotacional (ref imágenes anexo1).

| | |
|--|---|
|  <p>[4]</p> | <p>A: Sistema de sujeción del eje con rodamiento radial a bolas: Son rodamientos que tienen la capacidad de soportar tanto cargas radiales como axiales, pero teniendo en cuenta que soportan más la carga radial que cualquier otro tipo. (Catálogo FAG).</p> |
|  <p>[5]</p> | <p>B: Sistema de sujeción del eje con rodamiento de contacto angular a bolas: Son rodamientos que están diseñados con la capacidad a las cargas radial y además a cargar axiales (Catálogo FAG)</p> |
|  <p>[6]</p> | <p>C: Sistema de sujeción del eje con rodamiento cónico: Son rodamientos con alta capacidad de cargas axiales y radiales, pero solo soporta la carga axial en un sentido, además estos vienen con las pistas separadas. (Catálogo FAG)</p> |

F3: Transmitir energía mecánica:

Los sistemas seleccionados para transmitir la energía mecánica.



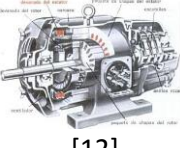
Tabla 7. Función F3, Transmitir energía mecánica (ref imágenes anexo1).

| | |
|--|---|
|  <p>[7]</p> | <p>A: Sistema de engranajes: Consiste en una unión estratégica de engranes que son ruedas dentadas que transmiten el movimiento rotacional a otros engranes para así aumentar la velocidad rotacional entregada por el eje que está conectado al engrane principal del sistema (Vanegas, 2012).</p> |
|  <p>[8]</p> | <p>B: Sistema de fricción: Mecanismo que consiste en hacer rozar dos ruedas o más para así transmitir el movimiento rotacional ya sea para aumentarlo o disminuirlo. (Vanegas, 2012).</p> |
|  <p>[9]</p> | <p>C: Sistema de correas: Sistema formado con poleas las cuales transmiten el movimiento a las otras poleas por medio de bandas que están conectadas a dichas poleas. El movimiento rotacional transmitido puede ser aumentado o disminuido de acuerdo al diámetro de las poleas. (Vanegas, 2012).</p> |

F4: Transformar energía mecánica a eléctrica:

A través de un dispositivo generalmente conocido como generador este tiene la función de convertir la energía rotacional en energía eléctrica. (Cuesta M. Et Al, 2008)

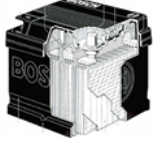


Tabla 8. Función F4, Transformar energía mecánica a eléctrica (ref imágenes anexo1).

| | |
|---|---|
|  <p>[10]</p> | <p>A: Alternador: Este tipo de generadores entregan las corrientes en frecuencias variables. (Cuesta M. Et Al, 2008).</p> |
|  <p>[11]</p> | <p>B: Generador: Este tipo de generadores son capaces de generar corrientes para bajas velocidades de giro del rotor, estos necesitan un mantenimiento periódico y son más pesados. (Cuesta M. Et Al, 2008).</p> |
|  <p>[12]</p> | <p>C: Generador asíncrono: son generadores que necesitan un campo magnético para su arranque. (Cuesta M. Et Al, 2008).</p> |

F5: Almacenar energía:

El sistema de almacenamiento usado para los aerogeneradores es el de las baterías, que son dispositivos que almacenan energía según su capacidad, estas pueden ser de:


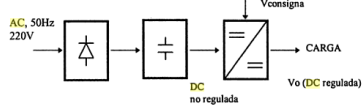
Tabla 9. Función F5, Almacenar energía (ref imágenes anexo1).

| | |
|--|---|
|  <p>[13]</p> | <p>A: Batería de plomo: Son más comunes y tienen la capacidad de múltiples descargas y cargas, además poseen una alta relación desempeño costo, ya que son baratas en comparación con las otras propuestas. (Electrónica, 2013).</p> |
|  <p>[14]</p> | <p>B: Batería de litio: Son baterías de nueva tecnología, más pequeñas y con la capacidad de almacenar más en menos espacio, pero por dicha razón son altamente costosas. (Electrónica, 2013).</p> |
|  <p>[15]</p> | <p>C: Batería de Níquel-Cadmio: Son baterías capaces de trabajar a altas temperatura en comparación con las otras y tiene una tasa de auto descarga muy baja, pero estas poseen un efecto memoria. (Electrónica, 2013).</p> |

F6: Transformar energía eléctrica:

La energía entregada debe ser transformada para que pueda ser almacenada en las baterías y debe ser nuevamente transformada para su posterior uso.

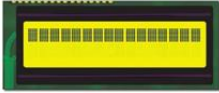


Tabla 10. Función F6, Transformar energía eléctrica (ref imágenes anexo1).

| | |
|---|---|
|  <p>[16]</p> | <p>A: Inversor DC a AC: Sistema que se encarga de transformar la energía en forma directa a forma alterna. (Cuesta M. Et Al, 2008).</p> |
|  <p>[17]</p> | <p>B: Transformador AC a DC: Dispositivo que transforma la energía alterna a energía directa para ser almacenada. (Cuesta M. Et Al, 2008).</p> |

F7: Visualizar datos:

Es un sistema en el cual se pueden ver las diferentes variables tomadas por los sensores.




Tabla 11. Función F7, Visualizar datos (ref imágenes anexo1).

| | |
|---|--|
|  [18] | A: LCD: Es una pantalla de pequeños pixeles que pueden ser configurados para mostrar letras, números y diferentes formas por medio de un controlador. |
|  [19] | B: HMI: Es un dispositivo que permite la interacción entre la máquina y el hombre. Es un panel compuesto por un conjunto de indicadores digitales o análogos y diferentes comandos como pulsadores y selectores. (Cobo, 2013) |
|  [20] | C: Computador: Es un dispositivo con altas capacidades que procesa datos mostrándolos de forma gráfica y útil. |

F8: Controlar modo:




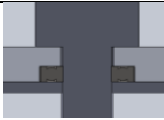
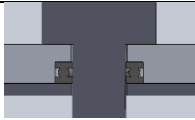
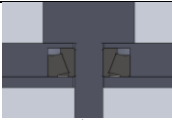
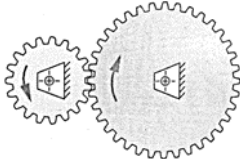

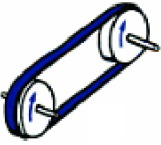
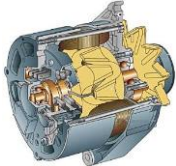
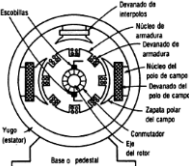
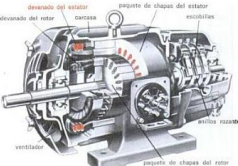
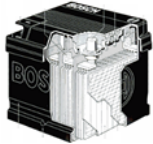


Controlar el modo consiste en la selección automática del modo a dónde va la energía, ya que puede ir al sistema de almacenamiento o ir directamente a la red de energía, debido a que cuando las baterías están completamente cargadas, para no gastar la energía almacenada y no desperdiciar la energía que se está generando en el momento se conecta el sistema directamente a la red. Además de un monitoreo constante para que la energía llegue en rangos consistentes evitando daños y un sistema de seguridad programado para evitar daños en el aerogenerador.


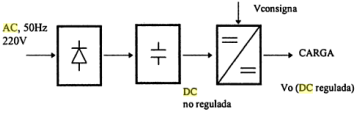
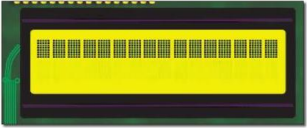





Tabla 12. Función F8, Controlar modo (ref imágenes anexo1).

| | |
|---|--|
|  [21] | A: PLC: Es un dispositivo controlador lógico programable el cual tiene bornes de entrada y salida, los cuales sirven para mandar señales a los actuadores y recibir señales de retroalimentación respectivamente, son comúnmente usados en las industrias. (Hyde, 1997) |
|  [22] | B: FPGA: Es un dispositivo programable con señales de salida y entrada, tiene una capacidad de procesamiento de datos mayor al anterior, pero este requiere de tarjetas de potencia para para recibir y sacar dichas señales. (Donald G, 2011). |
|  [20] | C: Computador: Este tiene la velocidad más rápida de procesamiento, capaz de almacenar información y tener integrada una visualización de datos. |

3.6. MATRIZ DE FUNCIONES Y SOLUCIONES

Tabla 13. Matriz de funciones y soluciones para un aerogenerador Savonius (referencias en el Anexo 1).

| Funciones y soluciones | | | |
|------------------------|---|--|---|
| # | A | B | C |
| F1 | Perfil en S | Perfil en Cs | Perfil en Cs mejorado |
| |  [1] |  [2] |  [3] |
| F2 | Rodamiento radial a bolas | Rodamiento de contacto angular a bolas | Rodamiento cónico |
| |  [4] |  [5] |  [6] |
| F3 | Sistema de engranes | Sistema de fricción | Sistema de correas |
| |  [7] |  [8] |  [9] |
| F4 | Alternador | Dinamo | Generador asíncrono |
| |  [10] |  [11] |  [12] |
| F5 | Batería de plomo | Batería de Litio | Batería de Níquel-Cadmio |
| |  [13] |  [14] |  [15] |

| | | | |
|----|---|--|---|
| F6 | Convertor(AC a DC) | Inversor (DC a AC) | |
| |  [16] |  [17] | |
| F7 | LCD | HMI | Computador |
| |  [18] |  [19] |  [20] |
| F8 | PLC | FPGA | Computador |
| |  [21] |  [22] |  [23] |

La selección de las soluciones de cada función se realizó a partir de bibliografía y usos comerciales de dispositivos para la implementación de un aerogenerador tipo Savonius.

Para darle solución a la función 1(**Recibir energía mecánica del viento**) se han seleccionado los perfiles de rotores más comerciales tipo Savonius.

Respecto a la solución de la función 2 (**Transmitir movimiento rotacional**), se consideran las formas de sujeción convencionales para cualquier tipo de eje con reducción de fricción, con el fin de dar mejor libertad de rotación. Las soluciones más viables son el rodamiento radial a bolas, contacto angular a bolas y cónico, puesto que son los más utilizados en el medio para reducir fricción en los ejes, sin embargo estos tipos de rodamientos poseen diferentes características entre sí, siendo la principal, las diferentes cargas y direcciones a las que estos pueden ser sometidos.

La solución a la función 3 (**Transmitir energía mecánica**) consiste en la implementación de sistemas de transmisión para alcanzar más revoluciones y así hacer que el aerogenerador entregue más energía eléctrica por medio del generador, los sistemas de transmisión más utilizados en los aerogeneradores son los juegos de engranes, transmisión por fricción y sistema de poleas y correas (Fernández D, Energía Eólica, p. 56).

La solución a la función 4 (**Transformar energía mecánica a eléctrica**) es el acople de un sistema eléctrico que posea la capacidad de transformar el movimiento mecánico en energía eléctrica, el cual idealmente iría conectado al eje con mayor velocidad de la transmisión no necesariamente los ejes están alineados, esto depende de la configuración de la transmisión. Los generadores utilizados para este tipo de aplicación son el alternador (AC), el generador asíncrono (AC) y el dinamo (DC) (Fernández D, Energía Eólica, p. 44).

La solución a la función 5 (**Almacenar energía**) indica el modo en que se almacena la energía luego de ser generada, para ello se seleccionan baterías que en el mercado están

muy posicionadas gracias a sus buenas características eléctricas y a su relativo bajo costo respecto a otras opciones, como lo son la batería de plomo, litio y níquel-cadmio (Salas Et Al, 2013)

La solución a la función 6 (**Transformar energía eléctrica**) habla de instalar dispositivos que permitan convertir la energía que entrega el generador eléctrico. Dado que las baterías sólo pueden almacenar energía directa entonces debe usarse un conversor AC- DC, (bajo la suposición que la energía generada es AC), pero si el generador eléctrico es en DC no se necesita conversor.

Para la extracción de la energía de las baterías también se debe tener en cuenta que la mayoría de los dispositivos eléctricos y electrónicos de uso doméstico funcionan con corriente alterna y es allí donde se debe utilizar un inversor para pasar de DC a AC.






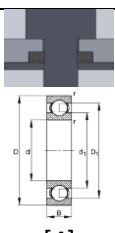
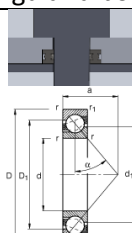
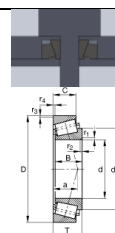
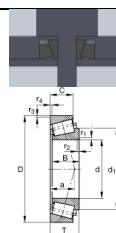
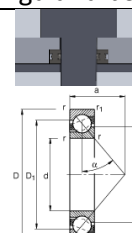

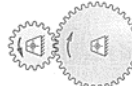
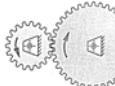




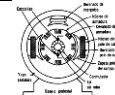
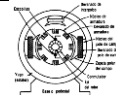

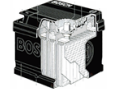




La solución a la función 7 (**Visualizar datos**) trata de buscar un dispositivo que permita la visualización de variables importantes, los dispositivos seleccionados para este fin son de amplio uso en la industria: pantallas del computador, HDMI o Display simple.




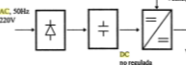
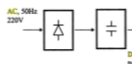
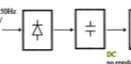


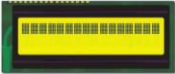









La solución a la función 8 (**Controlar modo**) consiste en un dispositivo que pueda realizar las operaciones de control pertinentes para el aerogenerador, tomando decisiones previamente programadas, para el correcto funcionamiento del aerogenerador. Los dispositivos que mejor se acoplan son el PLC, la FPGA y el computador, todos tres son controladores que con su debida programación son muy efectivos.

3.7. MATRIZ MORFOLÓGICA DE SOLUCIONES

La tabla a continuación, muestra los conceptos seleccionados, a partir de la tabla morfológica, donde se seleccionan y combinan funciones para así obtener cada concepto. Se evita en lo posible dejar soluciones aisladas y difíciles de integrar con las demás soluciones de las funciones. Se consideran cinco conceptos, para el desarrollo del aerogenerador tipo Savonius.

Tabla 14. Matriz morfológica de soluciones para el generador eólico (referencias Anexo 1)

| # | Concepto 1 | Concepto 2 | Concepto 3 | Concepto 4 | Concepto 5 |
|-----|---|---|---|---|---|
| F 1 | Perfil en S | Perfil en Cs | Perfil en Cs mejorado | Perfil en Cs | Perfil en S |
| |  [1] |  [2] |  [3] |  [2] |  [1] |
| F 2 | Rodamiento radial a bolas | Rodamiento de contacto angular a bolas | Rodamiento cónico | Rodamiento cónico | Rodamiento de contacto angular a bolas |
| |  [4] |  [5] |  [6] |  [6] |  [5] |
| F 3 | Sistema de correas | Sistema de engranes | Sistema de engranes | Sistema de correas | Sistema de fricción |
| |  [9] |  [7] |  [7] |  [9] |  [8] |
| F 4 | Alternador | Alternador | Dinamo | Dinamo | Generador asíncrono |
| |  [10] |  [10] |  [11] |  [11] |  [12] |
| F 5 | Batería de plomo | Batería de plomo | Batería de Litio | Batería de Litio | Batería de Níquel-Cadmio |
| |  [13] |  [13] |  [14] |  [14] |  [15] |

| | | | | | |
|--------|--|--|---|---|--|
| F 6 | Convertor(AC a DC) e Inversor (DC a AC) | Convertor(AC a DC) e Inversor (DC a AC) | Inversor (DC a AC) | Inversor (DC a AC) | Convertor(AC a DC) e Inversor (DC a AC) |
| |  [16]  [17] |  [16]  [17] |  [17] |  [17] |  [16]  [17] |
| F 7 | LCD | Computador | HMI | HMI | Computador |
| |  [18] |  [20] |  [19] |  [19] |  [20] |
| F 8 | PLC | Computador | FPGA | PLC | Computador |
| |  [21] |  [20] |  [22] |  [21] |  [20] |

3.8. CALIFICACIÓN Y SELECCIÓN

La siguiente tabla muestra los criterios de calificación contra cada concepto solución anteriormente constituida, dichos criterios permiten calificar a los conceptos lo más objetivamente posible para así descartar los conceptos menos convenientes.

Los criterios de selección usados son:

- Velocidad de rotación: Hace referencia a la capacidad que el rotor posee para alcanzar una alta velocidad rotacional.
- Fricción en el eje: Este criterio se enfoca en que la fricción que haya entre el eje y los apoyos sea mínima.
- Capacidad de transmisión mecánica: Consiste en que la capacidad de la transmisión mecánica para entregar la energía rotacional.
- Durabilidad: La capacidad de funcionamiento en óptimas condiciones en el tiempo, es decir cuánto tiempo puede durar sin tener ningún tipo de averías.
- Flexibilidad de transformación: La flexibilidad que posee el sistema para rectificar o convertir las señales eléctricas del dispositivo.
- Fácil de operar o manejar: Consiste en cuan fácil y simple es el manejo del sistema.
- Velocidad de procesamiento: La velocidad de procesamiento que posee el controlador del sistema para responder a señales rápidas.

- Fácil mantenimiento: El dispositivo debe ser accesible para realizar el mantenimiento, reparación de partes y prevención del mantenimiento.
- Fácil manufactura: El sistema debe ser simple y estándar en cuanto a la forma de construcción.

Puntaje de calificación para la tabla 15:

No cumple: -1

Indiferente: 0

Cumple: 1

Tabla 15. Criterios de selección

| Criterios de Selección | Concepto 1 | Concepto 2 | Concepto 3 | Concepto 4 | Concepto 5 |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Velocidad de rotación | -1 | 0 | 1 | 0 | -1 |
| Fricción en el eje | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Capacidad de transmisión mecánica | 0 | 1 | 1 | 0 | -1 |
| Durabilidad | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| Flexibilidad de transformación | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fácil operar o manejar | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Velocidad de procesamiento | 0 | 1 | -1 | 0 | 1 |
| Fácil mantenimiento | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fácil Manufactura | 1 | 0 | -1 | 0 | 1 |

Tabla 16. Suma de los criterios de selección, para la selección del concepto

| | Concepto 1 | Concepto 2 | Concepto 3 | Concepto 4 | Concepto 5 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Suma + | 1 | 4 | 3 | 1 | 4 |
| Suma 0 | 5 | 5 | 4 | 8 | 3 |
| Suma - | 3 | 0 | 2 | 0 | 2 |
| Total | -2 | 4 | 1 | 1 | 2 |
| ¿Continua? | NO | SI | Combinar | Combinar | Si |

Al combinar los conceptos 3 y 4 se eligen las funciones F1,F3, del concepto número 3, además se eligen las funciones F8 del concepto número 4 y las demás se eligen independientemente de alguno de los dos conceptos ya que ambas presentan la misma solución para los conceptos 3 y 4, así se ha obtenido un resultado más favorable en la combinación de ambos conceptos.

La siguiente tabla muestra la selección del concepto a desarrollar, el cual se escoge dando un porcentaje a los criterios de selección, a los que por su prioridad para el funcionamiento se le asignaron mayores pesos y calificando los conceptos contra los criterios en una escala de 1 a 5.

Tabla 17. Puntaje de los criterios de selección.

| Criterios de selección | Peso % | Concepto 2 | | Concepto 3 y 4 | | Concepto 5 | |
|-----------------------------------|---------|--------------|-----------|----------------|-----------|--------------|-----------|
| | | Calificación | Ponderado | Calificación | Ponderado | Calificación | Ponderado |
| Velocidad de rotación | 25.00 % | 3 | 0.75 | 4 | 1 | 1 | 0.25 |
| Fricción en el eje | 20.00 % | 5 | 1 | 3 | 0.6 | 2 | 0.4 |
| Capacidad de transmisión mecánica | 15.00 % | 5 | 0.75 | 5 | 0.75 | 3 | 0.45 |
| Durabilidad | 5.00% | 4 | 0.2 | 5 | 0.25 | 3 | 0.15 |
| Flexibilidad de transformación | 8.00% | 3 | 0.24 | 3 | 0.24 | 3 | 0.24 |
| Fácil operar o manejar | 5.00% | 5 | 0.25 | 3 | 0.15 | 5 | 0.25 |
| Velocidad de procesamiento | 8.00% | 5 | 0.4 | 4 | 0.32 | 5 | 0.4 |
| Fácil mantenimiento | 5.00% | 4 | 0.2 | 4 | 0.2 | 4 | 0.2 |
| Fácil Manufactura | 9.00% | 4 | 0.36 | 3 | 0.27 | 5 | 0.45 |
| Total Ponderado | 100% | | 4.15 | | 3.78 | | 2.79 |
| ¿Continúa? | | Continúa | | No Continúa | | No Continúa | |

El concepto elegido es el concepto 2, ya que tiene la mejor puntuación con 4.15 de 5 que era la máxima calificación.


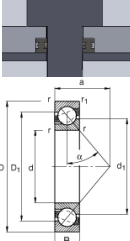
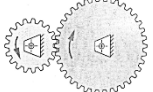
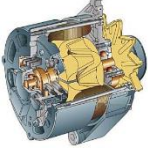
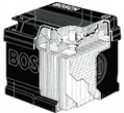



Este consta de un rotor en forma de Cs, su eje está en rodamientos de contacto angular a bolas adecuados para soportar fuerzas que van en la misma dirección del eje de rotación a la vez que soportan carga radial, el sistema de transmisión elegido es sistema de engranes debido a que este sistema es el que posee mayor eficiencia con un valor entre en 95 y 98%.(Vanegas, 2012).

Por otra parte en el sistema de generación de energía eléctrica, se selecciona un alternador (generador síncrono de imanes permanentes) para la transformación de energía mecánica a eléctrica, sin embargo la energía transformada debe ser transformada nuevamente, con un convertor AC-DC, para que la energía pueda ser almacenada en baterías de plomo las cuales son las más utilizadas en el tema de generadores eólicos.

Por otro lado para extracción de la energía de las baterías, el aerogenerador cuenta con un inversor DC-AC que recibe bajos voltajes y los convierte a altos voltajes de corriente alterna para ser utilizado en el consumo de cargas como lámparas de LED en la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia) sede Palmas.

El sistema de control y de proyección de variables claves es todo bajo un computador, el cual no solo muestra variables sino que se encarga también de proteger el sistema eléctrico.

Tabla 18. Concepto solución ganador (Referencia imagines en el anexo 1).

| Concepto solución | |
|---|--|
| Perfil en Cs (F1) | Rodamiento de contacto angular a bolas (F2) |
|  [2] |  [5] |
| Sistema de engranes (F3) | Alternador (F4) |
|  [7] |  [10] |
| Batería de plomo (F5) | Convertor(AC a DC) e Inversor (DC a AC) (F6) |
|  [13] |  [16] |
| Computador (F7) | Computador (F8) |
|  [20] |  [20] |

3.9. RELACIONES FUNCIONALES

Para establecer la distribución morfológica del concepto seleccionado se crean relaciones entre las diferentes funciones. Para facilitar esta labor resulta útil agregar las soluciones seleccionadas dentro del diagrama de funciones como medio de aclarar las uniones físicas entre ellas. Esto se aprecia en la ilustración 18.

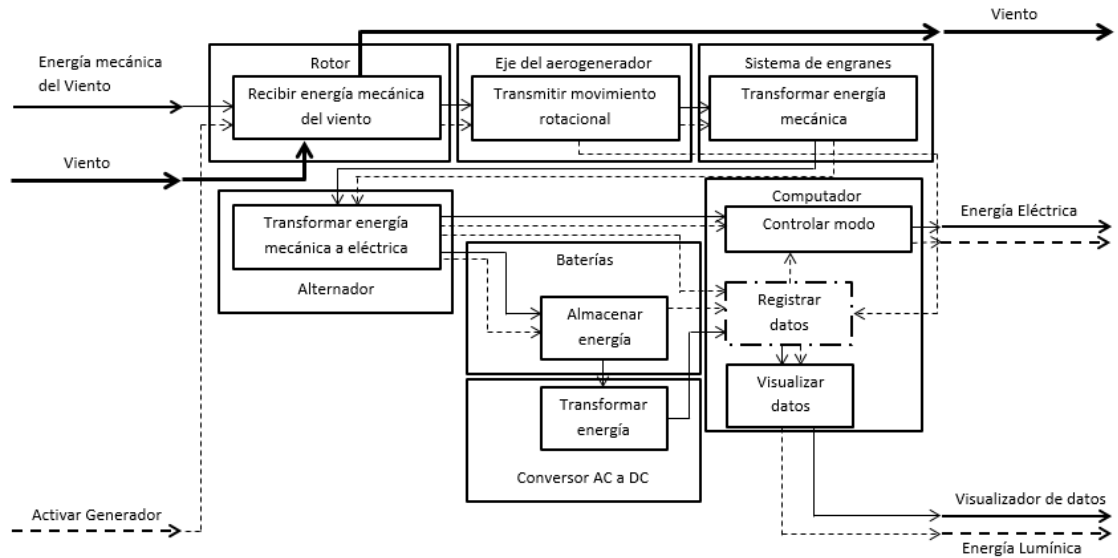


Ilustración 19. Esquema de elementos funcionales del diagrama de caja transparente

A partir de la ilustración 20 es posible plantear una posible distribución espacial del concepto solución, aproximando la arquitectura final del generador. Para ello se usan las recomendaciones del proceso de diseño y desarrollo de producto. (Ulrich Et Al, 2005)

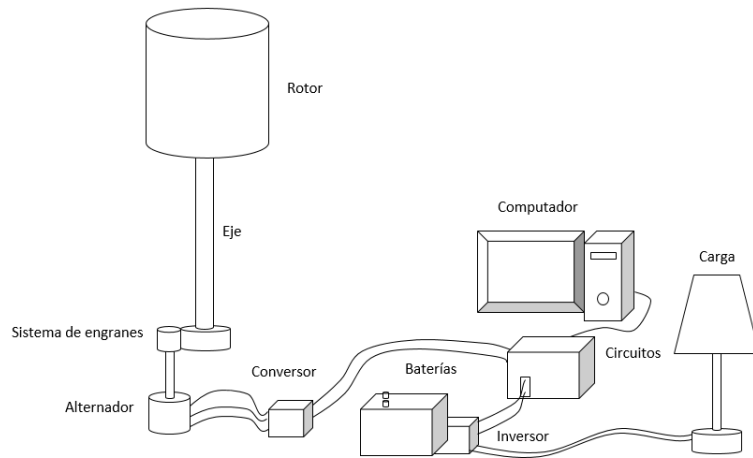


Ilustración 20. Descripción geométrica del concepto solución para el aerogenerador de eje vertical tipo Savonius.

4. DISEÑO DE DETALLE

4.1. REGLAS DE SIMPLICIDAD, CLARIDAD Y SEGURIDAD

En la fase de diseño, se logra encontrar una unión idónea de las funciones, soluciones y componentes de la etapa anterior de concepto de diseño, logrando un prototipo aproximado y factible para cumplir con las especificaciones propuestas al inicio del proyecto. El diseño de detalle desarrollado a partir del concepto conseguido se realiza siguiendo las reglas y los principios usados para dar cuerpo al diseño (Pahl Et Al, 2007).

Todos los componentes se conciben y/o seleccionan para un fácil ensamble/desensamble, ya que para mantener al aerogenerador operativo se debe tener acceso sencillo a ciertas partes para realizar labores de lubricación, verificación de funcionamiento, reparaciones y sustitución de piezas si acaso fuese necesario. Con este propósito se estandarizan las medidas de los elementos comerciales usados (calibres, diámetros, espesores, etc.) consiguiendo además un diseño más simple y sencillo (regla de la simplicidad).

En cuanto a la seguridad del aerogenerador, debido a que se desea proteger lo máximo posible el mecanismo transmisor de potencia, en este caso el eje, se utilizan dos rodamientos de contacto angular y un buje lo suficientemente largo para darle alineación a este crítico subsistema. Además se ha redundado el aseguramiento de las aspas respecto a las platinas con puntos unidos por pines y ángulos de fijación a 90°. De este modo, si se presenta alguna falla en un conector particular, se requiere que la falla sea repetitiva en varios puntos simultáneos o consecutivos para que se genere una falla generalizada que inhabilite el aerogenerador. (Regla de seguridad, nivel directo con redundancia).

Así mismo se busca implementar elementos que protejan otros dispositivos en caso de falla. Anillos retenedores y soportes se usan para aislar y posicionar los rodamientos del ambiente exterior manteniéndolo fuera del alcance de agua o polvo. (Regla de seguridad nivel indirecto)

Por último, la regla de la seguridad en nivel de alerta se implementa a nivel eléctrico, ya que todas las alarmas y desconexiones eléctricas de seguridad se hacen por sobrepaso de las lecturas de corriente mediante programación

4.2. PRINCIPIO DE DISEÑO APLICADO

El principio de diseño que se utiliza para llevar a cabo el desarrollo del aerogenerador tipo Savonius, fue el principio de estabilidad y bi-estabilidad (Pahl Et Al, 2007).

La estabilidad indica que se debe tratar de mantener sistemas mecánicos balanceados por medio de elementos debidamente seleccionados y calculados que mantengan el sistema estable. Por otro lado la bi-estabilidad, trata de tener elementos redundantes para garantizar una seguridad estable frente a extremas condiciones.

Para el diseño propuesto, se ha utilizado un par de rodamientos de contacto angular, para estabilizar totalmente el sistema, puesto que el uso de un solo rodamiento no garantiza alineamiento de este. Además estos rodamientos se ubican a la máxima distancia posible

en el diseño que fue a 1 metro de distancia, un tercio de la distancia total del dispositivo, para asegurar que la deflexión sufrida por el eje sea lo menor (Pahl Et Al, 2007).

4.3. LINEAMIENTOS DE DISEÑO

De los posibles lineamientos reportados por la bibliografía se le ha dado mayor importancia al de mantenimiento, debido a que es de suma importancia poder inspeccionar el dispositivo, ya que el dispositivo opera en exteriores sometido a las inclemencias atmosféricas por lapsos prolongados y a que se espera un buen desempeño que requiera poca inversión, incluyendo reparaciones con pocas herramientas. Por ello, el diseño, lleva consigo temas de ensamble y seguridad. (Pahl Et Al, 2007)

En el diseño de todo el sistema, se tiene en cuenta las tres premisas importantes de mantenimiento que son: servicio, inspección y reparación. El servicio hace referencia al mantenimiento preventivo que se le debe dar al dispositivo, inspección habla del constante monitoreo para conocer la condición actual tanto mecánica como eléctrica y reparación consiste en la sustitución o arreglo de piezas mecánicas o circuitos eléctricos y/o electrónicos.

Para ello el diseño de la pieza más crítica, el eje con un sistema autoajutable, es decir que por su propio peso se ajusta sobre el primer rodamiento y se alinea con el segundo. Por otro lado, se piensa en el uso de piezas simples de fácil ensamble/desensamble incluso para partes de difícil acceso, como es el caso del rodamiento de alineamiento, el generador y la transmisión. Para ello se agrega una compuerta en la parte inferior del generador. El uso de medidas comerciales similares para agujeros, roscas, espesores y diámetros minimiza el número de herramientas requeridas para manipular el aerogenerador, facilitando las labores de mantenimiento.

4.4. DIMENSIONADO DE FORMAS Y SELECCIÓN DE MATERIALES

Referenciarse al anexo 5 para tener claridad sobre la morfología del aerogenerador.

4.4.1. DIMENSIONES DEL ROTOR

- **Potencia del viento:**

Para dimensionar las partes del rotor se comienza por definir la potencia disponible del viento (Arbeloa, 2012).

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad [1]$$

Dónde:

ρ = Densidad del aire

A = Área incidencia del viento

v = Velocidad del viento

- **Potencia mecánica del aerogenerador**

La potencia del viento no es igual a la del aerogenerador según la ley de Betz, por ello se corrige con el factor C_p : (Arbeloa, 2012).

$$P_{aerogenerador} = C_p P_{viento} \quad [2]$$

Dónde:

$C_p =$ Coeficiente aerodinámico

Reemplazando la potencia del viento (ecuación [1]) en la potencia del aerogenerador (ecuación [2]) se tiene (Arbeloa, 2012):

$$P_{aerogenerador} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad [3]$$

Dónde:

$\rho =$ Densidad del aire

$A =$ Área incidencia del viento

$C_p =$ Coeficiente aerodinámico

$v =$ Velocidad del viento

- **Potencia eléctrica**

La potencia eléctrica es (Arbeloa, 2012):

$$P_{electrica} = N_e N_t P_{aerogenerador} \quad [4]$$

Dónde:

$N_e =$ Eficiencia eléctrica

$N_t =$ Eficiencia mecánica

Se obtiene de reemplazar la potencia del aerogenerador (ecuación [3]) en la potencia eléctrica (ecuación [4]) (Arbeloa, 2012):

$$P_{electrica} = \frac{\rho * A * C_p * N_e * N_t * v^3}{2} \quad [5]$$

Dónde:

$\rho =$ Densidad del aire

$A =$ Área incidencia del viento

$C_p =$ Coeficiente aerodinámico

$N_e =$ Eficiencia eléctrica

$N_p =$ Eficiencia mecánica

$v =$ Velocidad del viento

- **Relación Altura-Diámetro**

El área de incidencia del viento está dada por (Arbeloa, 2012):

$$A = HD \quad [6]$$

Dónde:

$H:$ Altura del rotor

$D:$ Diámetro del Rotor

$A:$ Área de incidencia del viento

Tomando por experiencias empíricas en otros desarrollos la relación idónea entre la altura y diámetro es (Arbeloa, 2012):

$$H = 2D \quad [7]$$

Dónde:

$H:$ Altura del rotor

$D:$ Diámetro del Rotor

$A:$ Área de incidencia del viento

- **Torque del aerogenerador**

Torque generado por el eje del generador (Cruz, 2009):

$$\tau = \frac{C_p \rho A v^2 R}{2\lambda} \quad [8]$$

Dónde:

C_p : Coeficiente de potencia de la turbina

ρ : Densidad del aire

A : Área de incidencia del viento

v : Velocidad del viento

R : Radio del generador

- **Velocidad Angular**

La velocidad angular del rotor está dada por (Cruz, 2009):

$$w = \frac{\lambda v}{R} \quad [9]$$

Dónde:

w : Velocidad angular del rotor

λ : Relación de la velocidad

v : Velocidad del viento

R : Radio del aerogenerador

Expresada en radianes por minuto se tiene que a partir de la ecuación [9]

$$RPM = \frac{60w}{2\pi} \quad [10]$$

Se usaron los siguientes parámetros en la solución de las distintas ecuaciones:

| | | |
|-----------------------------|-------------|-------------------|
| Velocidad del viento | 3.88 | m/s |
| Cp | 0.15 | |
| Ne | 0.85 | |
| Nt | 0.92 | |
| Densidad del aire | 1.181921411 | kg/m ³ |
| Lambda | 1 | |

Tabla 19. Constantes usadas en los cálculos

La velocidad del viento se toma de la velocidad promedio que arroja la distribución de Weibull descrita con anterioridad, el coeficiente de potencia (C_p) y la relación de velocidad de punta (λ) son tomados de la ilustración 18 para un aerogenerador tipo Savonius, la

eficiencia eléctrica (N_e) y mecánica (N_t) (Vanegas. 2012) y la densidad del aire es obtenida del promedio de la muestra que se toma de la base meteorológica ubicada en la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia) sede Palmas.

Por medio de la ecuaciones [5][8] y [10] se realiza la siguiente tabla con el fin de obtener un diámetro y una altura que cumpliera con las condiciones ambientales de la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia) sede Palmas.

Tabla 20. Evaluación de la potencia, el torque, y las RPM a partir de las variaciones de diámetro en las aspas.

| | Área (m ²) | Diámetro (m) | Diámetro de la pala (m) | Espaciado de palas (m) | Altura (m) | Potencia (W) | Torque (Nm) | RPM (n) |
|----|------------------------|--------------|-------------------------|------------------------|------------|--------------|-------------|----------|
| 1 | 0.32 | 0.4 | 0.35 | 0.3 | 0.8 | 1.2957 | 32.1438 | 185.2564 |
| 2 | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 1 | 2.0245 | 40.1797 | 148.2051 |
| 3 | 0.72 | 0.6 | 0.45 | 0.3 | 1.2 | 2.9153 | 48.2156 | 123.5042 |
| 4 | 0.98 | 0.7 | 0.5 | 0.3 | 1.4 | 3.9681 | 56.2516 | 105.8608 |
| 5 | 1.28 | 0.8 | 0.55 | 0.3 | 1.6 | 5.1828 | 64.2875 | 92.6282 |
| 6 | 1.62 | 0.9 | 0.6 | 0.3 | 1.8 | 6.5594 | 72.3235 | 82.3362 |
| 7 | 2 | 1 | 0.65 | 0.3 | 2 | 8.0981 | 80.3594 | 74.1025 |
| 8 | 2.42 | 1.1 | 0.7 | 0.3 | 2.2 | 9.7987 | 88.3954 | 67.3659 |
| 9 | 2.88 | 1.2 | 0.75 | 0.3 | 2.4 | 11.6612 | 96.4313 | 61.7521 |
| 10 | 3.38 | 1.3 | 0.8 | 0.3 | 2.6 | 13.6857 | 104.4672 | 57.0020 |
| 11 | 3.92 | 1.4 | 0.85 | 0.3 | 2.8 | 15.8722 | 112.5032 | 52.9304 |
| 12 | 4.5 | 1.5 | 0.9 | 0.3 | 3 | 18.2207 | 120.5391 | 49.4017 |
| 13 | 5.12 | 1.6 | 0.95 | 0.3 | 3.2 | 20.7311 | 128.5751 | 46.3141 |
| 14 | 5.78 | 1.7 | 1 | 0.3 | 3.4 | 23.4034 | 136.6110 | 43.5897 |
| 15 | 6.48 | 1.8 | 1.05 | 0.3 | 3.6 | 26.2378 | 144.6469 | 41.1681 |
| 16 | 7.22 | 1.9 | 1.1 | 0.3 | 3.8 | 29.2341 | 152.6829 | 39.0013 |

Así mismo se grafican los resultados del área vs. Potencia, torque y RPM para determinar cuál es la combinación adecuada que responda a las especificaciones de diseño. Las curvas se observan en la ilustración 21.

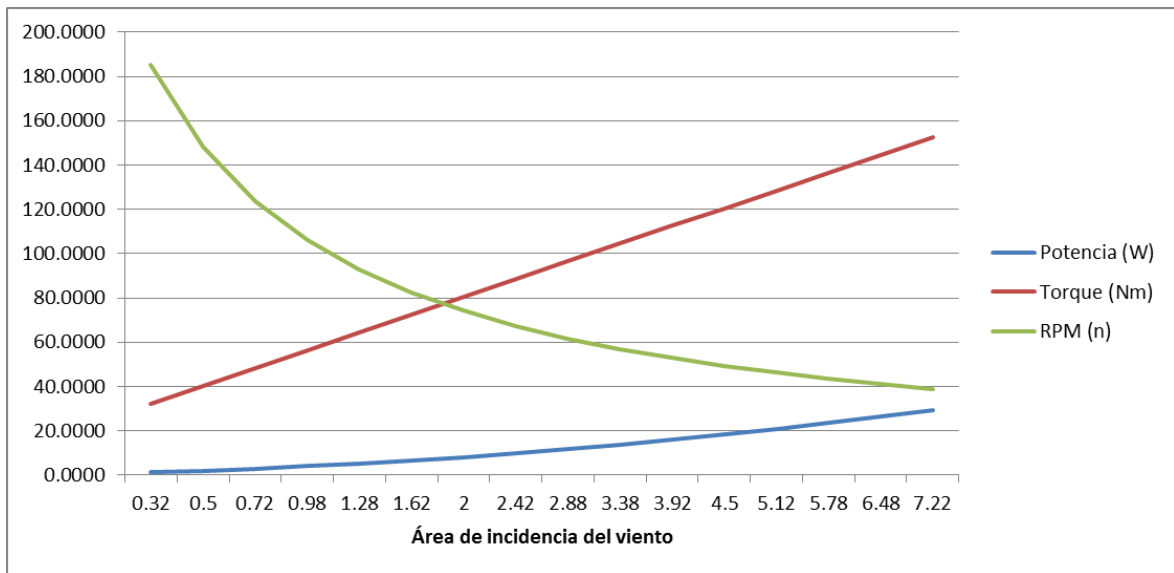


Ilustración 21. Curvas de relación entre la potencia, el toque, y las RPM con respecto al área.

Con base a la ilustración 19 se ha determinado usar un área de 2 m², ya que se observa una buena relación entre el torque generado y las RPM, no siendo los puntos máximos del torque y las RPM, pero si el punto de intersección de las curvas donde se aprovecha el máximo de ambas, teniendo así los siguientes resultados.

Tabla 21. Área del rotor seleccionada con los resultados de potencia, torque, RPM.

| | Área (m ²) | Diámetro (m) | Diámetro de la pala (m) | Espaciado de palas (m) | Altura (m) | Potencia (W) | Torque (Nm) | RPM (n) |
|---|------------------------|--------------|-------------------------|------------------------|------------|--------------|-------------|---------|
| 7 | 2 | 1 | 0.65 | 0.3 | 2 | 8.0981 | 80.3594 | 74.1025 |

De la ecuación [6] y [7] se tiene que:

$$A = 2m^2$$

$$H = 2m$$

$$D = 1m$$

Así mismo se define un espacio entre palas de 30cm.

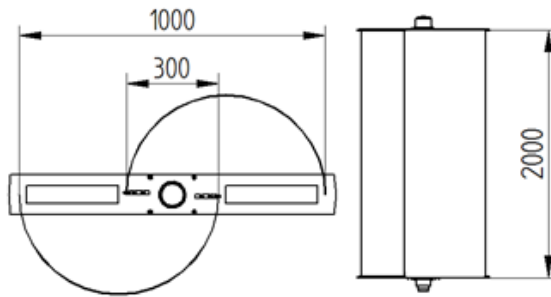


Ilustración 22. Dimensiones del rotor Savonius, con medidas en milímetros.

4.4.2. DIMENSIONES DEL EJE DEL ROTOR

- **Fuerza de impacto del viento**

La fuerza de impacto del viento se obtiene por (ABB, 2013):

$$F = \frac{\# \rho v^2 A}{2} \quad [11]$$

Dónde:

F: Fuerza de impacto sobre el aerogenerador (Montoya, 2013)

#: Factor de seguridad = 4.25

ρ: Densidad del aire = $1.1819 \frac{kg}{m^3}$

v: Velocidad del viento = $3.88 \frac{m}{s}$

A: Área de incidencia del viento = $2 m^2$

Entonces, la fuerza que impacta sobre el área del aerogenerador es:

$$F = 75.6 \text{ N}$$

- **Deflexión**

Dado que el eje se encuentra sólo apoyado en el extremo inferior, la posibilidad de deflexiones elevadas son críticas para el buen funcionamiento del generador. Por ello se hace necesario su cálculo para delimitar el diámetro del eje. (Hibbeler, 2006)

$$\delta = \frac{FL^3}{24EI}$$

Despejando la inercia de la ecuación anterior:

$$I = \frac{FL^3}{24E\delta} \quad [12]$$

Dónde:

I: Inercia de un corte transversal del eje

δ: Deformación máxima permitida de diseño = 5mm

L: Longitud total = 3m

E: Módulo de young del material (acero) = $210000 \frac{N}{mm^2}$

$$I = 405230.198mm^4$$

- **Inercia**

Se selecciona la fórmula de inercia para un tubo, toda vez que se define por facilidades de montaje, conformación, costos y disminución de peso su uso en detrimento de un redondo macizo (Hibbeler, 2006).

$$I = \left(\frac{\pi}{4}\right) (R^4 - r^4) \quad [13]$$

Dónde:

R: Radio exterior del tubo

r: Radio interior del tubo

El espesor del tubo se calcula como

$$E = R - r \quad [14]$$

Dónde:

E: Espesor de la pared del tubo = 2mm

Este espesor fue seleccionado por efectos prácticos del cálculo.

Despajando de la ecuación [13] el radio interior se tiene que

$$\frac{4I}{\pi} = (E + r)^4 - r^4 \quad [15]$$

Dónde:

I : Inercia de un corte transversal del eje = 405230.198mm^4

Resolviendo las raíces de la ecuación [15] se tiene:

$$r = 39.1\text{mm}$$

$$R = 41.1\text{mm}$$

Utilizando tubería comercial se tiene que

$$d = 80.98\text{mm}$$

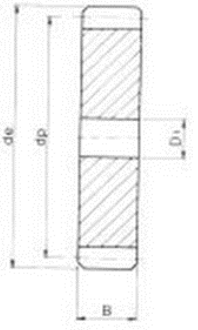
$$D = 88.9\text{mm}$$

$$E = 3.96\text{mm}$$

4.5. SELECCIÓN DE SISTEMA DE TRANSMISIÓN

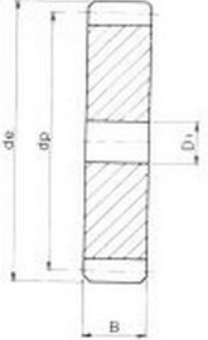
Se selecciona un engrane que esta interconectado con el sistema del rotor, con las siguientes características (Gaessa, 2013):

Tabla 22. Características del engrane con un ángulo de depresión de 20 grados comercial.

|  | Engrane | | | | |
|---|-------------------|-------|-------|----|----|
| | Número de dientes | d_e | d_p | D1 | B |
| | 120 | 183.0 | 180 | 16 | 17 |

Por otra parte se selecciona un piñón que esta acoplado al generador con las siguientes características (Gaessa, 2013):

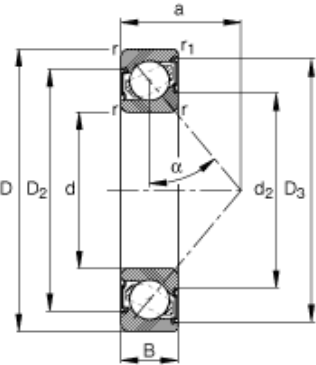
Tabla 23. Características del piñón con un ángulo de depresión de 20 grados comercial.

|  | Piñón | | | | |
|---|-------------------|-------|-------|----|----|
| | Número de dientes | d_e | d_p | D1 | B |
| | 15 | 25.5 | 22.5 | 8 | 17 |

4.6. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Se selecciona un rodamiento a bolas de contacto angular debido a que el sistema en el apoyo del rodamiento está sometido tanto a cargas axiales y radiales, con las siguientes características:

Tabla 24. Características del rodamiento 7217-B-TVP.

| Rodamiento 7217-B-TVP | d | 85mm | Diámetro interior |
|---|----------|---------|-------------------|
|  | D | 150mm | Diámetro exterior |
| | B | 28mm | Grosor |
| | m | 1.82 kg | Peso |
| | C_r | 97000N | Carga dinámica |
| | C_{0r} | 87000N | Carga estática |

Se utilizan dos rodamientos de este tipo en el eje principal del rotor para asegurar la capacidad de carga y la alineación, evitando así deflexiones indeseadas en el sistema (FAG, 2000).

Por otra parte se utiliza un par de rodamiento a bolas de contacto angular para el generador eléctrico, con el fin de tener una buena alineación que pueda soportar las cargas radiales y axiales que soporta el sistema del generador. Las características de los mismos son:

Tabla 25. Características del rodamiento 7208-B-TVP.

| | | | |
|-----------------------|----------|---------|-------------------|
| Rodamiento 7208-B-TVP | d | 40mm | Diámetro interior |
| | D | 80mm | Diámetro exterior |
| | B | 18mm | Grosor |
| | m | 0.367kg | Peso |
| | C_r | 34000N | Carga dinámica |
| | C_{0r} | 23500N | Carga estática |

Se decide el uso de rodamientos de bolas para minimizar la fricción producida con otros tipos de rodamientos más apropiados para soportar cargas axiales (rodamientos cónicos o de barriletes) puesto que la zona de contacto efectiva tiende a ser puntual y no lineal. Además, los rodamientos de contacto angular a bolas tienen bajo costo frente a otras opciones, haciéndolos más atractivos para el diseño.

4.7. CALIBRES Y ESPESORES

4.7.1. EL ROTOR Y EJE

- **Aspas**

Para las aspas del rotor se seleccionan dos láminas de acero inoxidable 304 con un calibre 20 y unas dimensiones de 1021mm x 2000mm que luego deben ser roladas para obtener los semicírculos destinados a recibir la carga del aire. Se hacen dos perforaciones a nivel superior e inferior en uno de los bordes con el fin de sujetar las aspas a la platina inferior y superior.

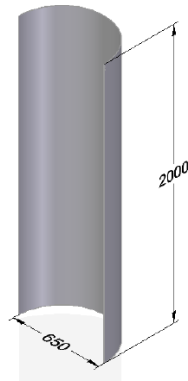


Ilustración 23. Aspa del Savonius.

- **Platina inferior y superior**

Se utilizan un par de platinas de 1100mm x 130mm con un espesor de ½ pulgada para soportar las aspas, las que ensamblan a su vez en unas pequeñas ranuras practicadas sobre las la platinas, estas cuentan con diferentes perforaciones tanto para alivianar el peso como para la unión de las aspas. Además cuenta con perforaciones roscadas M8 para la unión del soporte inferior y soporte superior del eje como también para las platinas a 90 grados para la sujeción de las aspas.

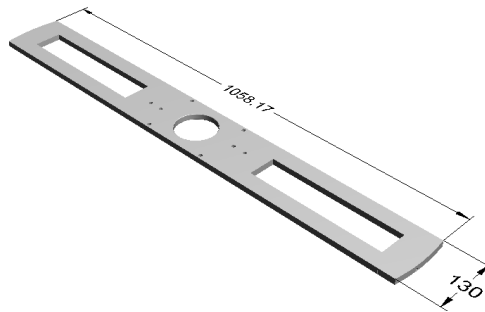


Ilustración 24. Platina inferior y superior

- **Soporte en L para aspas**

Se dobla una platina de ½ pulgada de ancho con un espesor de 1.9mm con el fin de conseguir un ángulo de 90 grados, teniendo en cuenta que para un lado de la pieza queda con 70mm de largo mientras el otro lado debe ser de 41.9mm. Además se hacen perforaciones de 8mm a lo largo de la longitud de 70mm para la sujeción a las platinas superiores e inferiores y perforaciones roscadas M5 en la longitud más corta de la L para la sujeción de las aspas.

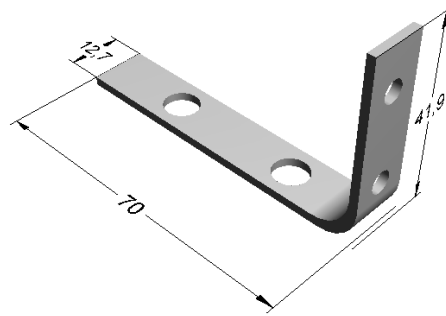


Ilustración 25. Soporte en L para aspas

- **Soporte superior del eje**

Se utiliza una platina de 130mm x 160mm con un espesor de ½ pulgada y un tubo de diámetro exterior de 101.6mm y diámetro interior de 88.9mm el cual esta soldado a la platina por la parte exterior, la platina posee 4 perforaciones para tornillo M8 con el fin de unirla al soporte de las aspas. Además el tubo en su parte superior posee 4 perforaciones roscadas para prisionero M4 con el fin de unirlo al eje y en su pared externa esta roscada con el objetivo de ponerle una tapa que proteja todo el sistema interior frente al ambiente.

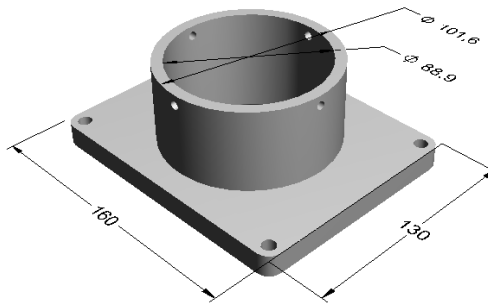


Ilustración 26. Soporte superior del eje

- **Tapa superior para prisioneros**

Se diseña una tapa para la parte superior con el fin que el tornillo prisionero que se sujeta sobre el eje tuviera una pared final de contacto para evitar que alguna vibración dejara al prisionero alguna posible salida, esta tapa ajusta sobre el soporte superior del eje.

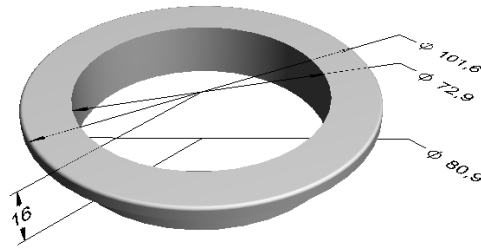


Ilustración 27. Tapa superior para prisioneros

- **Tubo número 1**

Para conformar el eje central del sistema se utiliza un tubo de diámetro exterior de 88.9mm y diámetro interior de 80.98, con un espesor equivalente a 3.96mm, el cual posee cuatro perforaciones roscadas M5 en uno de sus extremos para la unión con el soporte superior del eje por medio de los prisioneros, este tubo posee una longitud total de 2110.mm.

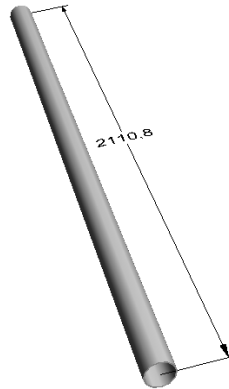


Ilustración 28. Tubo número 1, eje principal

- **Soporte inferior del eje**

Se utiliza una platina de 130mm x 160mm con un espesor de ½ pulgada y un tubo de diámetro exterior de 101.6mm y diámetro interior de 88.9mm el cual esta soldado a la platina por la parte exterior, la platina posee 4 perforaciones para tornillo M8 con el fin de unirla al soporte de las aspas.

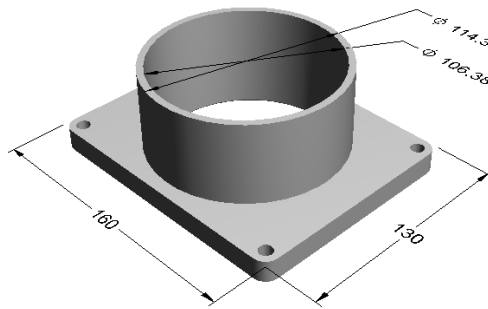


Ilustración 29. Soporte inferior del eje

- **Eje Macizo número 1**

Se parte de un eje macizo de diámetro 106.38mm un maquinado en torno con el fin de tener un eje con diámetros variables que se ensambla por un extremo en el tubo número 1 y por el otro lado se apoya sobre la pista interna del rodamiento superior.

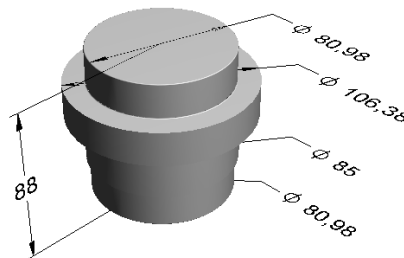


Ilustración 30. Eje macizo número 1

- **Soporte rodamiento principal**

Se maquina un soporte para el rodamiento principal donde el diámetro interior de 150mm con el fin de alojar el rodamiento, y una pared externa de diámetro 158mm, además en la parte de abajo también cuenta con un cambio de sección que sirve para que este descansa sobre el buje mesa.

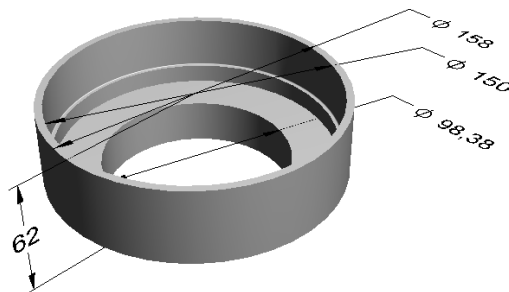


Ilustración 31. Soporte rodamiento principal

- **Tapa de rodamiento**

Se maquina una pieza circular roscada por debajo, de diámetro 158 mm el cual es el que se atornilla al soporte del rodamiento número 1, además cuenta con una cavidad en la parte superior de diámetro 140 mm con el fin de alojar en este sitio el retenedor.

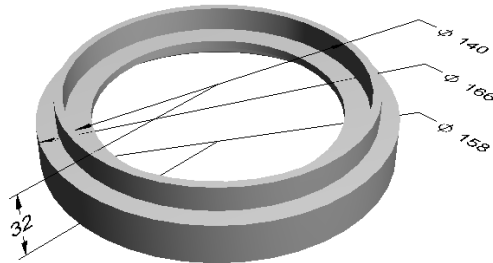


Ilustración 32. Tapa de rodamiento

- **Tubo número 2**

Se utiliza un tubo de longitud 800mm con un diámetro exterior 88.9mm e interior de 80.98 mm, resultando un espesor de 3.96mm. Este tubo es la unión entre los soportes respectivos del primer y segundo rodamiento, este transmite las revoluciones entregadas por el rotor.

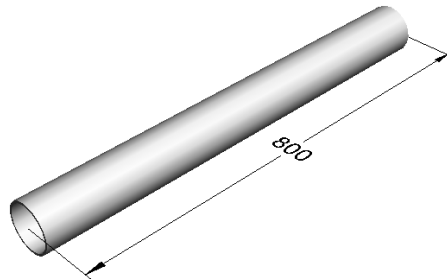


Ilustración 33. Tubo número 2

- **Eje macizo número 2**

Se maquina un eje en el torno a los diámetros mostrados en la siguiente figura con el fin que el tubo número 2 encaje en la parte superior y en el diámetro de 85 se encaje el rodamiento número 2.

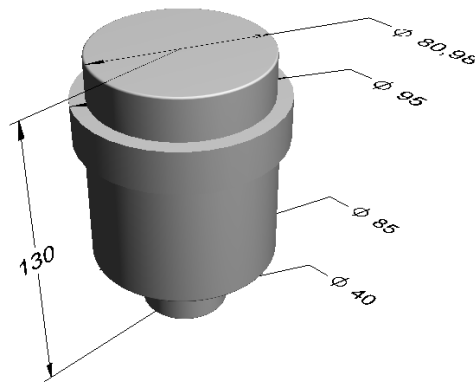


Ilustración 34. Eje macizo número 2

- **Soporte rodamiento número 2**

Se maquina un soporte para el rodamiento número dos con un diámetro de 150mm para la cavidad del rodamiento, además se hacen perforaciones roscadas para poder sostener este soporte contra la base principal.

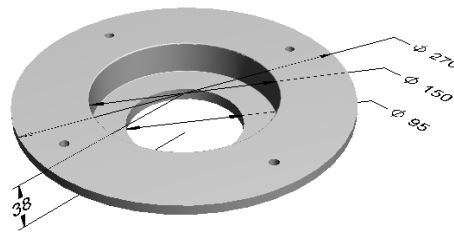


Ilustración 35. Soporte rodamiento número 2

- **Base, refuerzos y mesa**

Para esta pieza se conforma por tres procesos principales, el primero es la unión de un tubo de diámetro exterior de 114.3mm y diámetro interior de 106.38mm a los soportes laterales de refuerzo del sistema ya que este tubo es el destinado a soportar al rodamiento número 1, la segunda parte está compuesta por una platina redonda de diámetro 800mm y de espesor de ½ pulgada, en la cual se sueldan la base de los refuerzos. La tercera parte la conforman cuatro tubos soldados por la parte inferior de la mesa, los cuales poseen en la parte inferior una brida con perforaciones roscadas M8 que sirven para la unión con la base de la mesa principal.

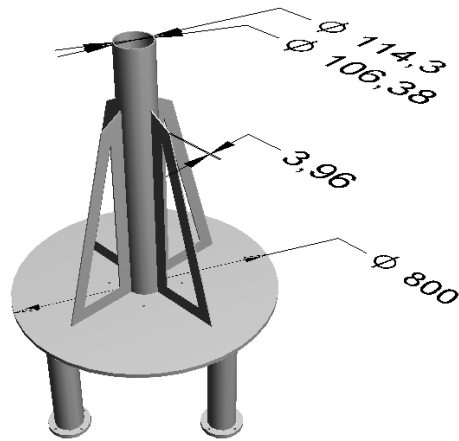


Ilustración 36. Base, pie amigo, mesa

4.7.2. LA BASE

- **Base de la mesa**

Para la base de la mesa se utiliza una platina circular de diámetro 800mm y un espesor de ½ pulgada, a esta base se le hacen distintas perforaciones para la unión del generador y para la unión de la Base, refuerzo, mesa, todas estas perforaciones se hacen roscadas M8.

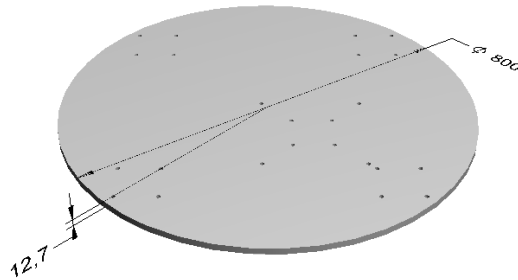


Ilustración 37. Base de la mesa

- **Cubierta protectora**

Para la cubierta se usa una lámina rolada con una perforación cuadrada que es la que permite la entrada al sistema interior del aerogenerador, esta lámina después de ser rolada se encuentra soldada para lograr una circunferencia, además en esta perforación se cuenta con dos perfiles pequeños en L soldados para la fijación de la puerta.

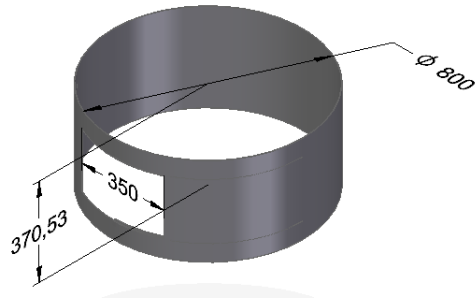


Ilustración 38. Cubierta protectora

- **Puerta**

La puerta protectora se realiza con una lámina calibre 20 rolada con el fin de obtener su forma semicircular y gracias a esta forma encaje en la cubierta protectora.

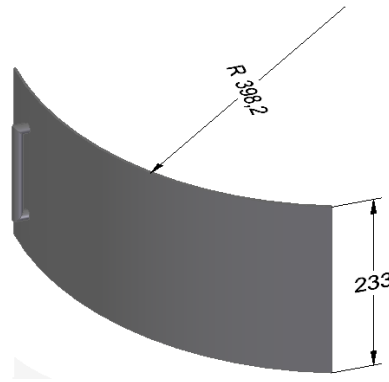


Ilustración 39. Puerta.

4.8. SISTEMA ELÉCTRICO

El sistema eléctrico del aerogenerador, consta de varias fases las cuales juegan un papel importante para lograr el objetivo principal del sistema. El sistema eléctrico posee un control de contactores, estos son activados y desactivados de acuerdo con las variables que el sistema registra, cómo la velocidad angular, voltaje de las baterías, corriente en el circuito, etc.

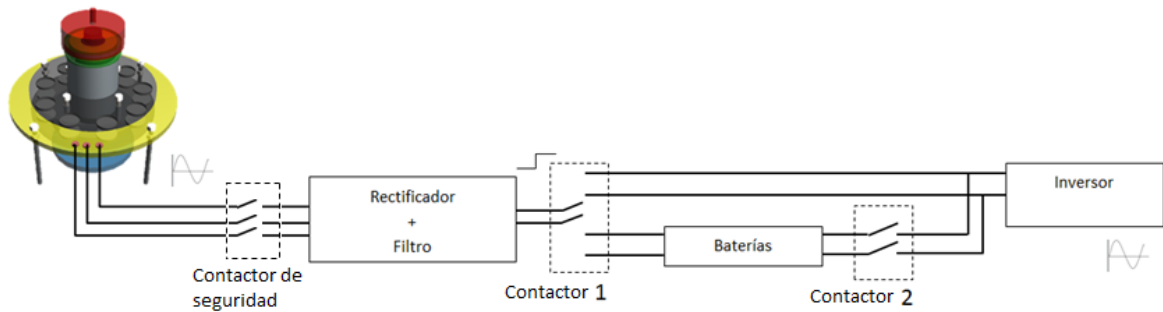


Ilustración 40. Esquema del sistema eléctrico y de control.

El esquema anterior muestra el sistema eléctrico en su totalidad con las cuatro fases de funcionamiento principales: generación, rectificación y filtro, sistema de almacenamiento (baterías) e inversor (Berenguer, 2011).

Los contactores utilizados en el sistema eléctrico sirven para realizar conexiones y desconexiones según las condiciones del sistema en el momento con la siguiente lógica:

- El contactor 1 se releva hacia las baterías cuando estas se encuentran descargadas y es necesario comenzar la carga.
- El contactor 1 se releva hacia el inversor cuando la velocidad angular es suficientemente buena y constante para poder conectar la señal generada y rectificada al inversor directamente, haciendo que las baterías no se carguen pero la carga al final del sistema pueda recibir energía.
- El contactor 2 se releva cuando la carga está requiriendo energía y el contactor 1 no está relevado hacia el inversor, significando esto que la energía que la carga absorbe es energía almacenada en las baterías.

Toda la lógica anteriormente mencionada, es programada en un computador, el cual envía señales de activación y desactivación a los contactores, para el correcto funcionamiento del sistema eléctrico.

En cuanto a la seguridad del dispositivo, el programa posee una lógica teniendo en cuenta las lecturas de velocidad del viento, para hacer una desconexión inmediata del contactor de seguridad, cuando los vientos poseen una velocidad de más de 20m/s ya que se pueden generar sobre voltajes indeseados en el generador eléctrico causando posibles daños permanentes sobre la batería y circuito rectificador e inversor.

Además otra protección de seguridad para evitar las sobre temperaturas en los cables, es acoplar un contactor térmico por cada contactor instalado en el sistema, para evitar incendios y quema de los circuitos.

4.8.1. FASE DE FUNCIONAMIENTO 1 (GENERACIÓN ELÉCTRICA)

- **Exploración con cálculo del Generador síncrono de imanes permanentes de flujo axial**

Un generador síncrono de imanes permanentes de flujo axial en este caso consiste en que el estator posee las bobinas y el rotor consiste en dos platos separados los cuales poseen los imanes. La forma de operación de un generador síncrono está basado en la ley de Faraday (Castaño, 2008), ya que al girar unos imanes permanentes frente a unas bobinas que se encuentran estacionarias, por el interior de estas pasa el flujo magnético que es variable en el tiempo, generando un voltaje inducido alterno en las bobinas (Abarzúa, 2012).

El generador síncrono de flujo axial no necesita corriente de excitación por lo que le da una eficiencia superior a este, además que tiene la capacidad de que las bobinas en el estator son en parte refrigeradas debido a la rotación de los imanes permanentes sobre estas (Abarzúa, 2012).

Se decide realizar el cálculo del generador eléctrico y no contar con uno comercial debido a que los torques de arranque de los comerciales, en general son difíciles de superar por el rotor diseñado, mientras que con un generador síncrono de imanes permanentes de flujo axial lo único que se debe vencer para iniciar el arranque es la inercia sobre los rodamientos.

Durante el cálculo del generador eléctrico, se utilizan cierto tipo de expresiones que corresponden a la naturaleza de un generador de imanes permanentes.

La siguiente expresión hace referencia al circuito equivalente del aerogenerador, y es con esta expresión que se logran deducir y expresar ciertos datos necesarios para el diseño del generador (Arbeloa, 2012):

$$V = E - I(R + X_j) \quad [16]$$

V: Voltaje en bornes de las baterías

I: Intensidad de corriente que pasa por el conductor

R: Resistencia de conductor

X: Reactancia del bobinado

El diseño del generador eléctrico se diseña bajo las siguientes premisas:

- La frecuencia deseada es de 60Hz
- El generador debe generar como mínimo 12V, asegurando que el voltaje de salida siempre sea mayor a 12V
- Para efectos prácticos de diseño la fem inducida en total debe ser de 20V
- Los imanes utilizados poseen un campo magnético 1.35 T.

- **Número de polos**(Arbeloa, 2012):

$$f = \frac{p \cdot n}{120} \quad [17]$$

p: Número de polos

n: *Vevoluciones por minuto* = 74.1025 rpm

f: *Frecuencia* = 60Hz

Hallando el número de polos:

$$p = 97.16265939$$

Este número de polos es muy poco práctico, por eso se utiliza una relación mecánica 1/8 lo cual produce un velocidad angular de 592.8 rpm.

Con esta relación nuevamente se calcula el número de polos.

$$p = \frac{60 \cdot 120}{592.8} = 12.14$$

Como se desea generar una señal trifásica, se necesita un número de polos que sea par y múltiplo de tres es por esto que se escogen 12 polos una vez realizada la reducción, teniendo en cuenta la configuración del generador síncrono de imanes permanentes, se colocan 12 imanes por plato enfrentados simétricamente, teniendo en cuenta que los polos del primer plato deben quedar enfrentados a los polos contrarios en el segundo plato

La concepción de implementar dos platos de 12 polos simplemente es para unificar el campo y las bobinas puedan estar sometidas a un campo más constante.

La siguiente tabla confirma que con la relación 1/8 se puede conseguir frecuencias de 60 Hz, ya que mientras mayor sea la frecuencia es mejor para evitar que los voltajes de rizado sean muy grandes.

Tabla 26. Frecuencias cambiando la velocidad del viento.

| RPM | RPM aumentadas | Velocidad del viento m/s | Frecuencia Hz |
|-----------|----------------|--------------------------|---------------|
| 68.754935 | 550.0394834 | 3.6 | 55.00394834 |
| 74.102542 | 592.820332 | 3.88 | 59.2820332 |
| 76.394373 | 611.1549814 | 4 | 61.11549814 |
| 85.943669 | 687.5493542 | 4.5 | 68.75493542 |
| 93.583107 | 748.6648523 | 4.9 | 74.86648523 |

- **Número de bobinas**

El número de bobinas será 6 por fase, entonces se tiene que el estator debe contener 18 bobinas en su interior (Baillarie, 2007):

$$Nb = \frac{3 \cdot p}{k} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad [18]$$

Se toma $k=2$ y se tienen 18 bobinas que se conectan en serie, consiguiendo por fase una fem de $E=20V$, entonces cada bobina debe generar $20/3V$.

Es importante destacar que la relación que debe haber entre bobinas e imanes debe ser de 3:2, ya que esta configuración entrega un voltaje trifásico equilibrado (Abarzúa, 2012).

- **Geometría de generador**

Como se está trabajando con 12 polos por disco, estos deben estar separados a un ángulo de 30° desde el centro de cada imán como se muestra en la siguiente ilustración.

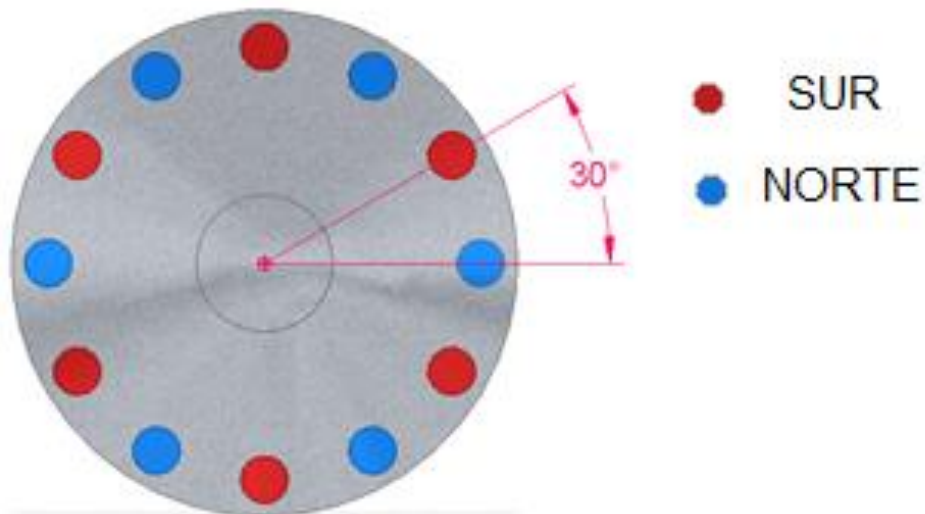


Ilustración 41. Separación en grados entre los centros de los imanes, con sus polos intercalados.

El número de bobinas con el que se trabaja es de 18 la separación entre centros de las bobinas, debe ser de 20° , como se muestra en la siguiente figura.

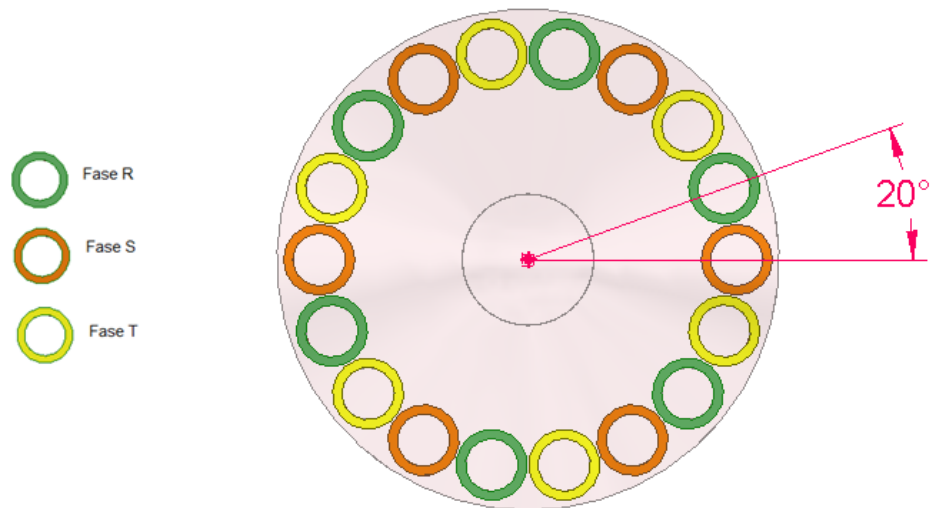


Ilustración 42. Separación desde el centro de las bobinas.

Para tener una señal trifásica balanceada se deben tener 120 grados eléctricos entre fase y fase, esto se logra cuando se configuran los imanes y las bobinas como se indica con anterioridad.

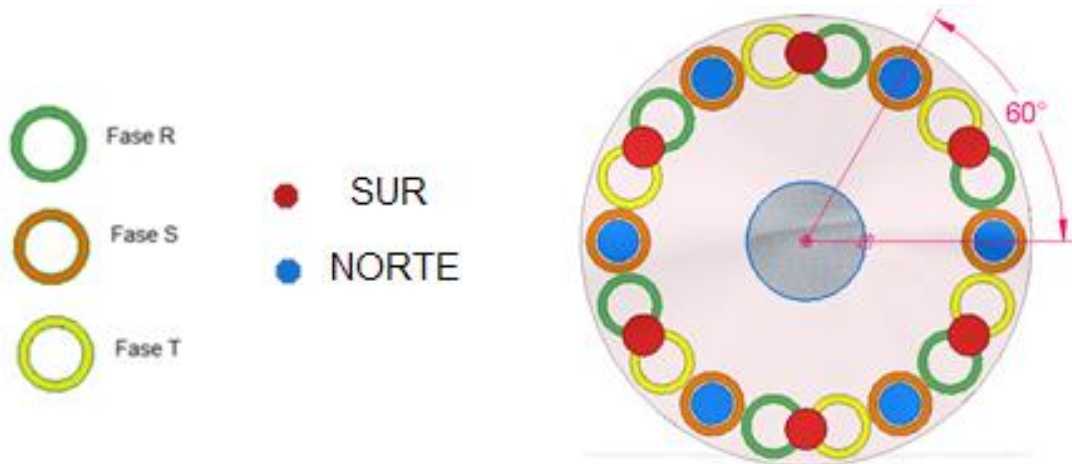


Ilustración 43. Configuración 3:2 de bobinas y polos.

El ángulo que debe haber para cumplir los 120 grados eléctricos es de 60 grados entre las bobinas por fase, cumpliéndose que en cada instante solo hayan seis bobinas de una dentro de imanes.

- **Conexión entre bobinas**

La conexión entre bobinas es en serie, para así lograr un mayor voltaje; la conexión en serie de estas consiste en conectar las 6 bobinas por cada fase cada una separada 60 grados como se muestra en la ilustración 51.

Por otro lado después de tener todas las tres fases se obtiene 6 cables, a los cuales tres de ellos, lo que se encuentran en la salida de cada fase forman la estructura en estrella de conexión y los otros tres restantes son las fases que van a la etapa de rectificado (Sánchez, 2013).

- **Selección de imanes**

Los imanes seleccionados son de neodimio-hierro-boro (Nd-Fe-B) de forma circular cuyo diámetro es de 35mm y altura de 5mm, con un campo magnético de 1.35T.

La disposición de los imanes en el rotor es uno con polaridad sur y otra con norte y así sucesivamente, además enfrentándose en polo contrario en el segundo rotor.

- **Selección del cable conductor de las bobinas**

Para conocer el calibre del conductor, se tiene en cuenta el voltaje de salida deseado y la potencia máxima desea.

En este caso la potencia máxima es de 530 y el voltaje deseado de 18V para tener la seguridad que si saldrán 12V (Arbeloa, 2012):

$$I = \frac{P}{V} \quad [19]$$

I: Corriente máxima

P: Potencia máxima = 530W

V: Voltaje de diseño = 18V

$$I = 29.44A \approx 30A$$

La densidad de corriente que máxima admisible será $J = 12 \frac{A}{mm^2}$, lo que significa la cantidad de corriente máxima que puede pasar por 1 mm² (Arbeloa, 2012):

$$J = \frac{I}{A} \quad [20]$$

$$J: \text{Densidad de corriente} = 12 \frac{A}{mm^2}$$

I: Corriente máxima = 30A

A: Área transversal del cable

$$A = 2.5\text{mm}^2$$

Se selecciona el cable comercial bajo norma AWG # 13 (Norma American Wire Gage) dado que posee el área más cercana a la requerida que es de 2.62mm^2 .

- **Número de espiras**

Expresión para determinar la fuerza electromotriz (Arbeloa, 2012):

$$E = 4.44NfAB \quad [21]$$

$$E = \text{fem inducida en cada bobina} = 20/3$$

$$f = \text{Frecuencia} = 60\text{Hz}$$

$$N = \text{Número de espiras por bobina}$$

$$B = \text{Campo magnético creado por los imanes} = 1.35\text{T}$$

$$A = \text{Área magnetica de los imanes} = 0.000962113\text{m}^2$$

Despejando el número de espiras por bobina se tiene que:

$$N = \frac{\frac{20}{3}}{4.44 * 60 * 1.35 * 0.000962113} = 19.26 \text{ espiras/bobina}$$

Por seguridad se decide que el número de espiras sea de 25 espiras/ bobina.

- **Longitud del bobinado**

Las bobinas tienen la forma circular de los imanes con 40mm de diámetro inicialmente.

Cada bobina debe tener 25 espiras, entonces se diseña la bobina con 5 vueltas y 5 capas.

Tabla 27. Cálculo de la longitud total de la bobina.

| Número de capa | Diámetro nominal(mm) | Perímetro (mm) | Largo del cable de cada capa con 5 vueltas(mm) |
|------------------------------|----------------------|----------------|--|
| 1 | 40 | 125.6637061 | 628.3185307 |
| 2 | 43.66 | 137.1619353 | 685.8096763 |
| 3 | 47.32 | 148.6601644 | 743.3008218 |
| 4 | 50.98 | 160.1583935 | 800.7919674 |
| 5 | 54.64 | 171.6566226 | 858.283113 |
| Total de cable de una bobina | 3716.504109mm | | |

El largo total del cable de una bobina es aproximadamente 3.8m, multiplicándolo por 9 bobinas existentes, el cable total utilizado es 33.5m.

El siguiente desarrollo se realiza para comprobar si verdaderamente pueden salir 12V a la salida del generador. La siguiente expresión se tomó como base para hacer la comprobación, teniendo en cuenta que los cálculos realizados fueron en base a una bobina y no toda la fase.

$$V = E - I(R + X_j)$$

V: Voltaje en bornes de las baterías

I: Intensidad de corriente que pasa por el conductor

R: Resistencia de conductor

X: Reactancia del bobinado

Partiendo de las siguientes premisas se realiza la comprobación.

- La fem inducida es $E=20/3$.
- La corriente que circula por el cable es de 30A.

Encontrando todos los términos de la ecuación se tiene que:

La resistencia es igual a la resistencia del cable seleccionado en metros y el largo del cable es de 3.8m por bobina.

$$R = 6.57 \frac{\Omega}{km} * \frac{1 km}{1000m} * 3.8m = 0.0249\Omega$$

La reactancia X de la bobina es igual (Arbeloa, 2012):

$$X = 2\pi fL \quad [22]$$

X: Reactancia de la bobina

f: Frecuencia

L: Inductancia magnética

Donde la inductancia magnética es igual (Arbeloa, 2012):

$$L = 1.257 \mu \frac{N^2 S}{10^8 L_\alpha} \quad [23]$$

N: Número de espiras por bobinas = 25

μ: Permeabilidad relativa del vacío = 1

S: Área de sección del nucleo

L_α: Longitud de la bobina en cm

Primero se encuentra la sección S (Arbeloa, 2012):

$$S = \pi r^2 \quad [24]$$

r = el radio de una de las capas intermedias = 2.183cm

$$S = 14.9712 \text{ cm}^2$$

Para encontrar el valor de *L_α* largo de la bobina:

$$L_\alpha = 5 * 1.83 = 9.15mm = 0.915cm$$

Entonces la inductancia magnética es igual:

$$L = 1.257 * 1 * \frac{25^2 * 14.9712}{10^8 * 0.915} = 0.0001285 = 1.285 * 10^{-4}H$$

Por lo que la reactancia es:

$$X = 2\pi fL = 2\pi * 60 * 1.285 * 10^{-4} = 0.048459917$$

Entonces el voltaje es:

$$V = \frac{20}{3} - 20(0.0249 + 0.048459917j)$$

$$V = 5.03874 > \frac{12}{3}$$

En conclusión la disposición de las bobinas y los polos es idónea para que el generador entregue 12V a la salida.

- **Comportamiento dinámico del generador**

El torque necesario para hacer girar el generador está dado por:

$$\tau = Fr + I \frac{dw}{dt} \quad [25]$$

Donde

F: Fuerza del campo magnético

r: Distancia desde el centro hacia el centro de las bobinas

I: Inercia del sistema mecánico del generador

w: Velocidad angular del generador

Para calcular la fuerza del campo magnético se procede de:

$$F = ILB \quad [26]$$

Donde

I: Corriente a traves de las bobinas

L: Inductancia de la bobina

B: El campo magnético de los imanes de neodimio

Para calcular la corriente en las bobinas se sabe que:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} \quad [27]$$

Donde

ε : fem

R: Resistencia del conductor

Ahora se sabe que la fem generada en el momento en que el sistema no se encuentra en movimiento esta de terminada por la ecuación (UdeA, 2013):

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad [28]$$

Debido a que el sistema no se encuentra en movimiento no hay un cambio en el tiempo produciendo una fem generada nula, proporcionando una corriente de cero, haciendo que la fuerza electromagnética no proporcione un torque en contra del movimiento.

4.8.2. FASE DE FUNCIONAMIENTO 2 (RECTIFICACIÓN Y FILTRO)

- **Circuito rectificador**

El circuito rectificador, es un elemento de suma importancia en el aerogenerador, ya que el generador síncrono de imanes permanentes, genera una corriente alterna, mientras que el sistema de almacenamiento, admite corriente directa por ello el circuito rectificador juega un papel muy importante rectificando la señal alterna a una señal directa.

El circuito rectificador es trifásico, no controlado, rectifica la señal completa, es decir que no sólo es capaz de evitar los valores negativos de la señal, sino de rectificar y volver continua la señal. Sin embargo este circuito necesita un filtro ya que la señal de salida posee mucho rizado.

- **Calculo del rectificador**

Se sabe que la tensión media de salida ($V_{OUT'}$) del rectificador sin contemplar la caída de tensión en los diodos está dada por (Berenguer, 2011):

$$V_{out'} = \frac{3}{\pi} V_{Inpico} = 0.95 * 18V = 17.18V \quad [29]$$

El voltaje que cae en los diodos es de 1.4V debido a que la rectificación va en parejas

$$\Delta V_D = 1.4V$$

El voltaje de salida teniendo en cuenta la caída de los diodos

$$V_{out} = V_{out'} - \Delta V_D = 17.18V - 1.4V = 15.78V$$

El factor de rizado se le fijó un 0.25% entonces se obtiene un voltaje de (Berenguer, 2011):

$$Fr = \frac{V_r}{V_{outmax}} = 0.0025 \quad [30]$$

Así el voltaje de rizado está definido por (Berenguer, 2011):

$$V_r = V_{outmax} - V_{outmin} \quad [31]$$

Entonces:

$$V_r = 0.0025 * 18V = 0.045V$$

Para seleccionar los diodos se calcula la corriente RMS en los diodos (Berenguer, 2011):

$$I_{Drms} = \frac{1}{\sqrt{3}} * I_{outrms} = 14.91A \quad [32]$$

Donde la corriente de salida RMS, es la corriente eficaz de salida o de la carga del rectificador (Berenguer, 2011):

$$I_{outrms} \approx I_{out} = \frac{V_{out}}{R} = \frac{15.78V}{0.611\Omega} = 25.82A \quad [33]$$

R es la carga existente a la salida del rectificador (Berenguer, 2011):

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{18^2}{530} = 0.611\Omega \quad [34]$$

La potencia que los diodos disipan es (Berenguer, 2011):

$$P_D = \Delta V_D I_{outrms} = 1.4V * 25.82A = 36.148W \quad [35]$$

Asegurando el funcionamiento del rectificador, se deben asegurar 12V V_{out}' ya que las baterías se cargan a 12V y además se debe considerar la caída en los diodos de 1.4V.

$$V_{out}' = 12V + 1.4V = 13.4V$$

Por lo tanto la el voltaje requerido de entrada es:

$$V_{IN\ pico-min} = \frac{V_{out}'}{\frac{3}{\pi}} = \frac{13.5}{0.95} = 14.1V$$

- **Circuito de filtrado LC**

El circuito de filtrado se diseña para minimizar el rizado de la señal del rectificador, se fija el valor de la amplitud del sexto armónico de la señal de salida antes de pasar por el rectificador, tratando de eliminarlo (Berenguer, 2011).

$$V_{out}(t) = \frac{3}{\pi} V_{IN\ pico} (1 + \cos 6\omega t + \dots) = \frac{13.5}{0.95} = 14.1V \quad [36]$$

$$V_{n\ rms\ atenuado} = \left| \frac{-1}{(n\omega)^2 LC - 1} \right| V_{nrms} = \frac{13.5}{0.95} = 14.1V \quad [37]$$

$$V_{n\ rms\ atenuado} = \left| \frac{-1}{(n2\pi 60)^2 LC - 1} \right| V_{nrms} = \frac{13.5}{0.95} = 14.1V$$

$$V_{n\ rms} = \frac{\frac{3}{\pi} V_{IN\ pico} \frac{2}{35}}{\sqrt{2}} = 0.69V$$

$$V_r = 0.0025 * 18V = 0.045V = V_{n\ rms\ atenuado}$$

$$0.045V = \left| \frac{-1}{(n2\pi60)^2 LC - 1} \right| 0.69V = \frac{13.5}{0.95} = 14.1V$$

$$LC = 3.1923 \times 10^{-6}$$

Se obtienen valores comerciales:

$$C = 330\mu F \quad L = 10mH$$

En la ilustración 52 se muestra el circuito esquemático de rectificación con su respectivo circuito de filtro, las señales de entrada son tres senoidales que poseen un voltaje pico-pico de 18V. Se utilizan 6 diodos para lograr la rectificación completa de la onda:

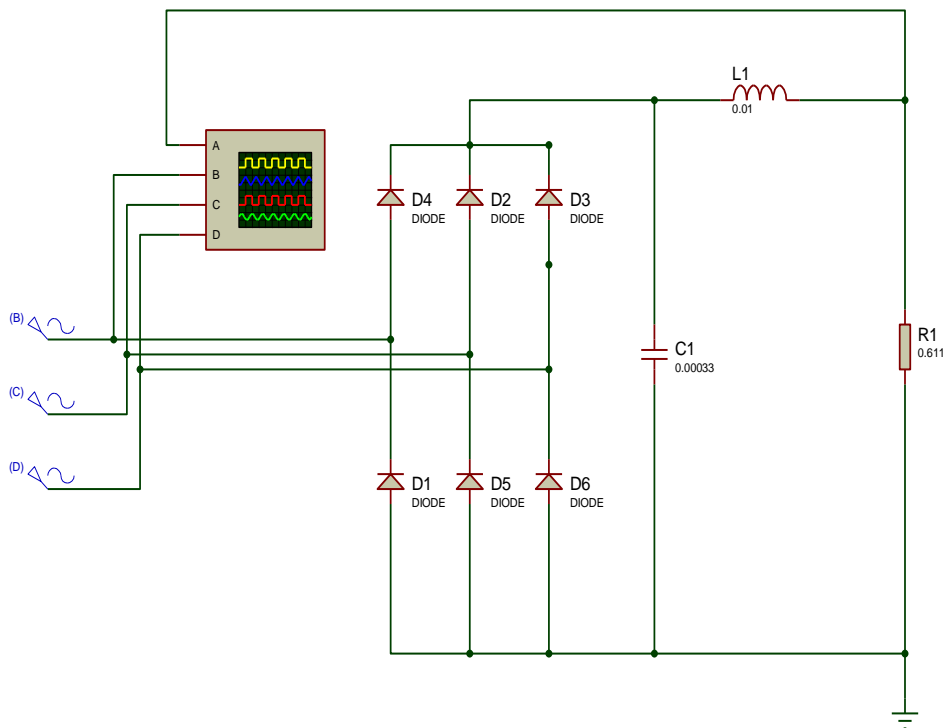


Ilustración 44. Circuito rectificador trifásico de onda completa.

La ilustración 53 muestra la simulación de un osciloscopio, que grafica las 3 señales senoidales de 18V pico-pico (azul, rojo, verde); la señal de color amarillo, muestra la señal de salida del rectificador, una señal un poco rizada, pero en corriente directa.

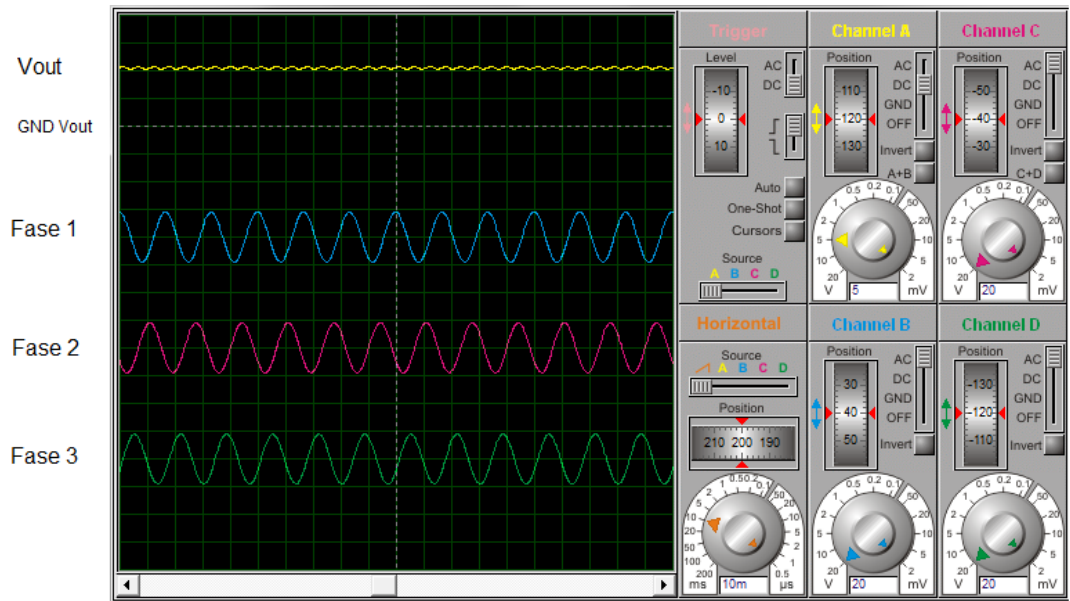


Ilustración 45. Forma de onda de salida y de entrada.

4.8.3. FASE DE FUNCIONAMIENTO 3 (ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA)

El sistema de almacenamiento de un aerogenerador juega un papel fundamental en el correcto funcionamiento de todo el sistema como tal, ya que al poder almacenar la energía generada en baterías, se garantiza al menos que en tiempos de poco viento, la batería estará para suplir la ausencia de la energía eléctrica que provee el aerogenerador y entregar la toda la energía que puede almacenar en ella.

La gran ventaja de un sistema de almacenamiento es la capacidad de volver a cargar las baterías y tener de nuevo una provisión en los momentos donde la carga este pidiendo energía y el mismo aerogenerador no pueda entregarle debido a la ausencia del viento.

- **Selección comercial de la batería de plomo-ácido**

Se selecciona una batería de 150Ah, de ciclo profundo de plomo-ácido sellada donde el electrolito no es un líquido sino un gel, la cual es el tipo de batería más idónea para un sistema eólico ya que las baterías permiten ser recargadas por medio de generadores eléctricos.

Se consideran las baterías de gel evitando tener que echarles agua, además son más seguras, son menos susceptibles a daños con las descargas profundas y aguantan vibraciones (Regenbat, 2013).

- **Ventajas de las baterías plomo-ácido selladas:**
 - Resisten a descargas muy profundas

- Producen menos gas de hidrogeno al ser cargadas
- No necesitan mantenimiento
- Requieren menos energía para ser recargadas completamente
- Mantienen el voltaje más alto mientras se descargan.

- **Batería comercial**

Marca: Ultracell

Referencia: UCG 150-12

Ah: 150Ah

Voltaje nominal: 12voltios



Ilustración 46. Batería Ultracell de 12 voltios

4.8.4. FASE DE FUNCIONAMIENTO 4 (INVERSOR)

El inversor es un dispositivo de origen eléctrico que permite convertir de corriente directa a corriente alterna, estos dispositivos permiten seleccionar la frecuencia de salida y el voltaje. La aplicación que se le dio al inversor en el sistema aerogenerador, es tomar la energía de las baterías, transformarla en corriente continua y entregarla a la carga o red de abastecimiento.

El inversor seleccionado, convierte una señal de 12 voltios ya sea de la batería o de la conexión directa del rectificador a una señal de 110v con una frecuencia de 60Hz, para el uso doméstico.

- **Inversor comercial**

Marca: Power Bright

Referencia: PW200-12

Potencia: 200 Watts

Voltaje nominal: 12voltios

Frecuencia de salida: 60hz



Ilustración 47. Inversor comercial, Power Bright.

4.8.5. CONCEPTO DEL GENERADOR ELÉCTRICO

- **Base del generador**

La base del generador se concibe como una platina redonda de diámetro 160 mm dotada de una manzana de diámetro 56 mm externo y 40mm interno. Además se agregan cuatro perforaciones para la sujeción de esta a la base principal.

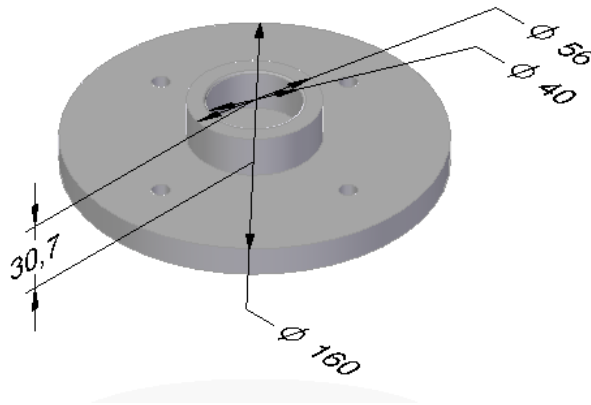


Ilustración 48. Base del generador.

- **Eje del generador**

El eje se concibe a partir de una barra sólida de 234mm de largo, sometido a maquinado en torno con el fin de conseguir un eje de diámetros variables en los cuales se acoplan en los diámetros de 40mm los rodamientos.

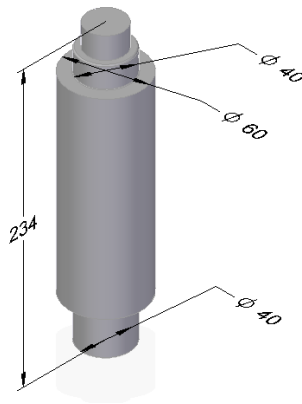


Ilustración 49. Eje del generador.

- **Soportes rodamientos del generador**

El soporte es una pieza maquinada con el fin de obtener una cavidad de alojamiento para la pista externa del rodamiento de diámetro 80 mm y por la parte inferior un diámetro de 80.98 mm, con el fin de acoplarse al tubo con brida acoplada.

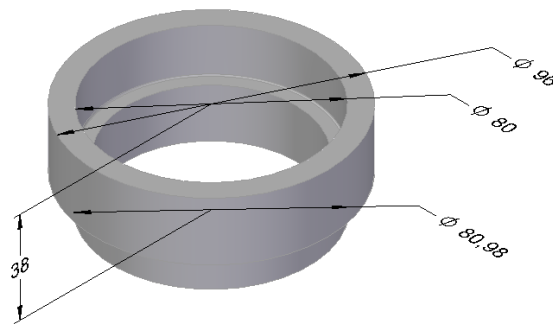


Ilustración 50. Soportes rodamientos del generador.

- **Tubo con brida soldada**

Se utiliza un tubo comercial de diámetro exterior de 88.9 mm y diámetro interior de 80,98, con un espesor de 3.96 mm, al cual se suelda una brida de diámetro exterior de 160 mm que posee cuatro perforaciones para la unión de las diferentes partes.

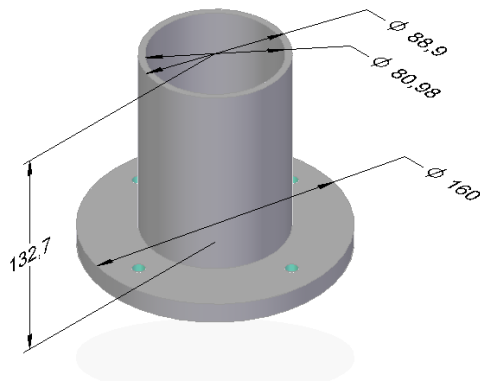


Ilustración 51. Tubo con brida soldada.

- **Platina circular para imanes**

Se utiliza una platina circular de ½ pulgada de espesor, con un diámetro exterior de diámetro de 371 mm y una perforación en el centro de un diámetro de 97 mm, además se hacen perforaciones de 8 mm para la sujeción de esta al tubo con brida. En su superficie se acoplan los imanes destinados a la generación.

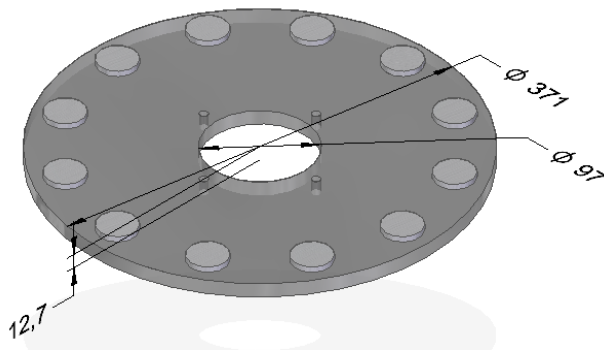


Ilustración 52. Platina circular para imanes.

- **Separador**

Para el separador se usa un tubo con diámetro interno de 8mm y una longitud de 30mm, este se encarga de separar las dos platinas de imanes e impedir que estas se unan por la fuerza del campo producido por estos.

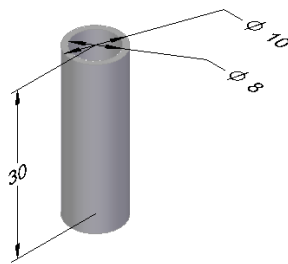


Ilustración 53. Separador

- **Tapa para engrane del generador**

Se maquina en torno una tapa especialmente diseñada para ser sujeta por debajo con una rosca de diámetro 96 mm en sentido contrario al movimiento que se transmite en la parte superior donde esta acoplado el piñón con un agujero de diámetro de 10 mm.

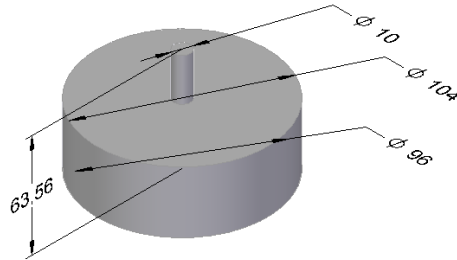


Ilustración 54. Tapa para engrane del generador

- **Estator**

El estator es hecho por medio de un molde donde se colocan las bobinas y dispuestas en la configuración deseada, luego se hace un vaciado de resina de poliéster (Resina 809) con una mezcla de catalizador (MEK, metiletilcetona) de una gota de un gramo por cada 100 gramos de resina sobre estas y se le agrega una capa de fibra de vidrio con el fin de conseguir un material duro y resistente, se deja un tiempo de curado por más de 12 minutos por cada 100 gramos utilizados en la mezcla, al final se obtiene un espesor de 14 mm que contenga las bobinas en su interior y las fija, además se hacen perforaciones de 8 mm de diámetro que permiten la sujeción del estator (Gil, 2012).

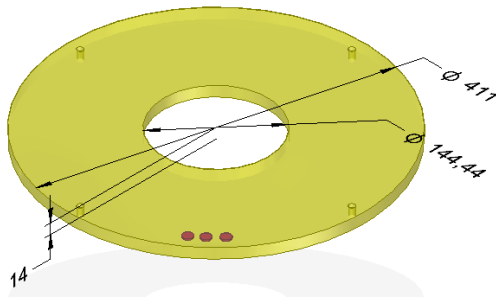


Ilustración 55. Estator

4.9. DESCRIPCIÓN DE DETALLE DEL MONTAJE DEL AEROGENERADOR

Subsistemas del ensamble general:

- **Eje**

El eje del aerogenerador, es un elemento crucial en el funcionamiento del sistema, debido a que es el conjunto de tubos y ejes macizos quienes soportan la mayor cantidad de fuerzas generadas. Se diseña un sistema pensando en la deflexión que este eje pudiera tener, debido a la fuerza del viento que pega en el rotor y que se ve reflejada en una deformación en el eje. La deformación máxima admisible es de 5mm lo que lleva que el diámetro mínimo externo del eje fuera de 82.2 mm y diámetro mínimo interno de 78.2 mm, anteriormente calculado.

Para disminuir peso en el eje se utilizan piezas huecas en su mayoría, como tubos, sin embargo en las uniones para realizar el cambio de sección se han utilizado piezas macizas pero de menor tamaño con la finalidad de garantizar rigidez. Todas medidas dadas a los tubos se toman con diámetros preferidos por encima de los resultados obtenidos con los cálculos de resistencia de materiales y deflexión. Por ejemplo, el tubo de menor diámetro que compone el eje es de 88.9 mm tiene un espesor de 3.96mm.

Los rodamientos son elementos indispensables para un buen comportamiento del eje, puesto que son mecanismos que reducen la fricción en el momento en el que el eje está girando. Para el ensamble se utilizan dos rodamientos de contacto angular, que son aptos para soportar cargas en ambos sentidos, axial y radial. El dispositivo de seguridad adicionado consiste en un retenedor el cual funciona como un anillo que por medio de presión se adhiere al eje evitando que el ingreso de contaminantes desde el exterior (agua, partículas de polvo y mugre). El subsistema eje, está conformado por un tubo inicial que es en el que va empotrado el rotor, este tubo está protegido en la parte superior por una tapa que evita que entre el agua y el polvo.

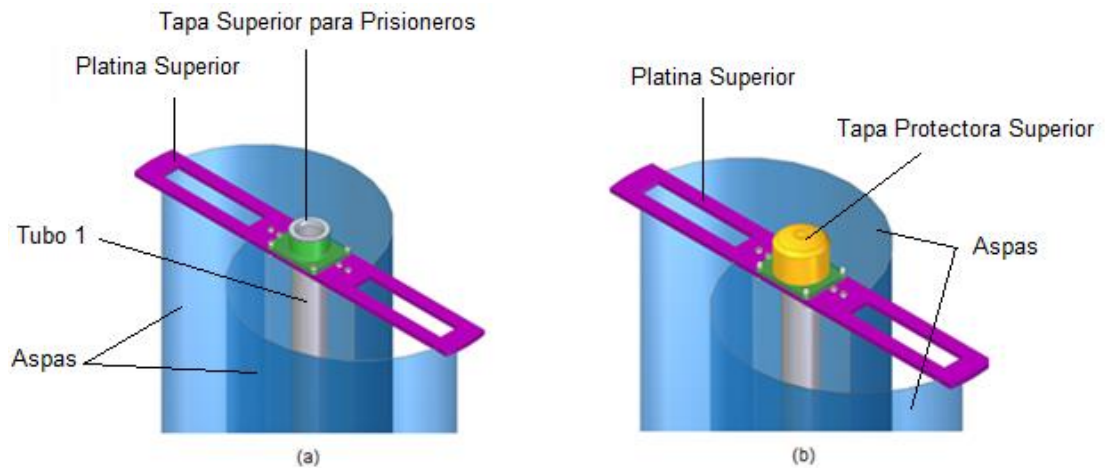


Ilustración 56. Sistema de empotramiento y protección contra el polvo. (a) Configuración de la unión del tubo número 1. (b) Sistema de tapa en la punta del eje para la protección interna del tubo número 1.

En la parte intermedia de este se encuentra soldado un eje sólido interno que permite el cambio de sección para el acople del primer rodamiento. Concéntrico a este eje sólido se encuentra roscado internamente un soporte en sentido contrario al movimiento de los ejes (Pieza de color verde en la ilustración 57), para evitar desacople entre el eje macizo número 1 con el soporte anterior mencionado, este soporte es con el fin de sujetar el eje al rotor.

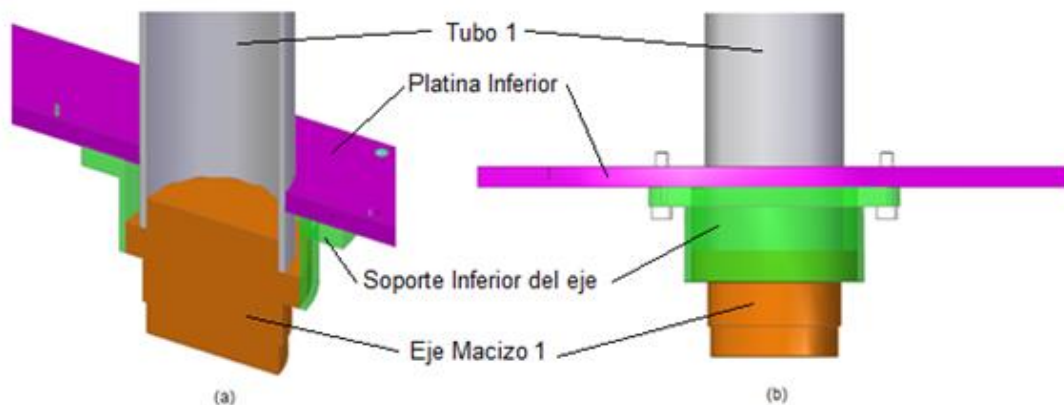


Ilustración 57. Unión entre Tubo número 1 (Pieza de color gris) y eje macizo número 1 (Pieza de color marrón), (a) vista en corte isométrica, unión por soldadura del Tubo 1 con el eje macizo 1. (b) Vista frontal del ensamble del Tubo con el eje macizo.

Seguido de este soporte se encuentra el retenedor que evita la entrada de agentes externos, este retenedor va apoyado en una tapa que posee una rosca contraria interna para luego ser acoplada con el soporte del rodamiento y este ser roscado con el refuerzo.

El rodamiento entra concéntrico al eje sólido y ajusta contra la tapa del retenedor, mientras que el apoyo en la parte inferior del rodamiento es el soporte de este.

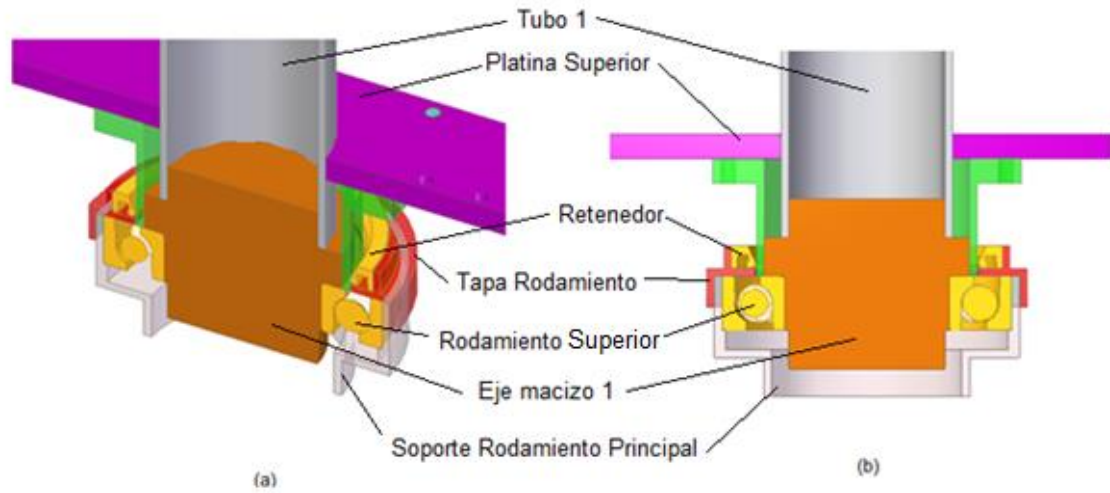


Ilustración 58. Ubicación del rodamiento, soporte para el rodamiento y retenedor con su respectiva tapa. (a) vista en corte isométrica. (b) Vista en corte frontal.

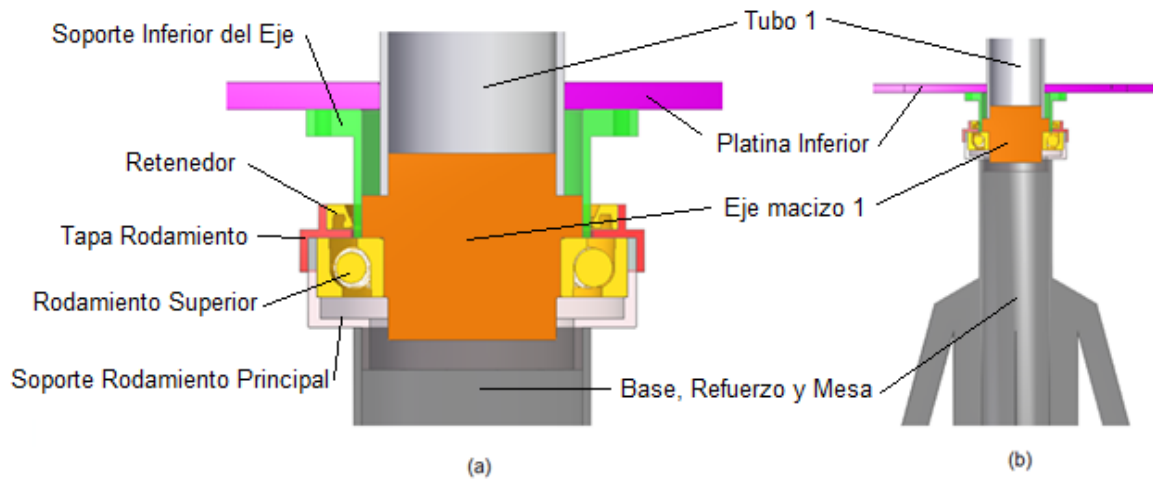


Ilustración 59. Acople del soporte del rodamiento con el refuerzo. (a) Vista frontal en corte con el acople del soporte del rodamiento con el refuerzo (b) Vista frontal en corte con la mayoría del refuerzo.

En la parte inferior el eje macizo se encuentra roscado en forma contraria, para que el segundo tubo del sistema se pueda acoplar. Este tubo es el encargado de la transmisión de la energía. El segundo tubo pasa dentro del refuerzo que hace las veces de buje y sirve para darle soporte a todo el eje, garantizando el alineamiento de las piezas.

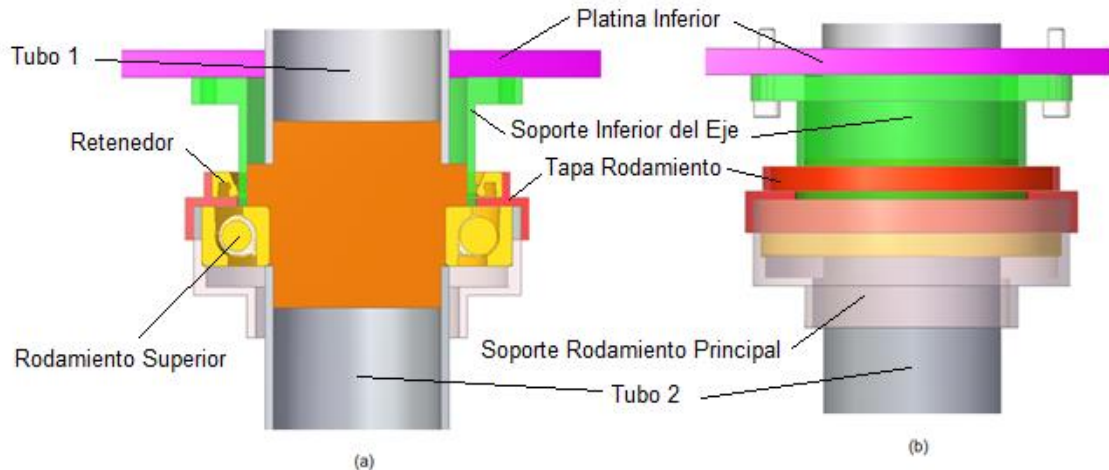


Ilustración 60. Acople del eje macizo con el segundo tubo. (a) vista frontal en corte. (b) vista frontal.

El tubo dos en su parte inferior posee soldado otro eje macizo que le permite el cambio de sección con el segundo rodamiento ya que este finalmente es el que asegure completamente la alineación de las piezas que componen el eje. El rodamiento está apoyado en la parte inferior con un soporte que esta atornillado a la base de todo el aerogenerador.

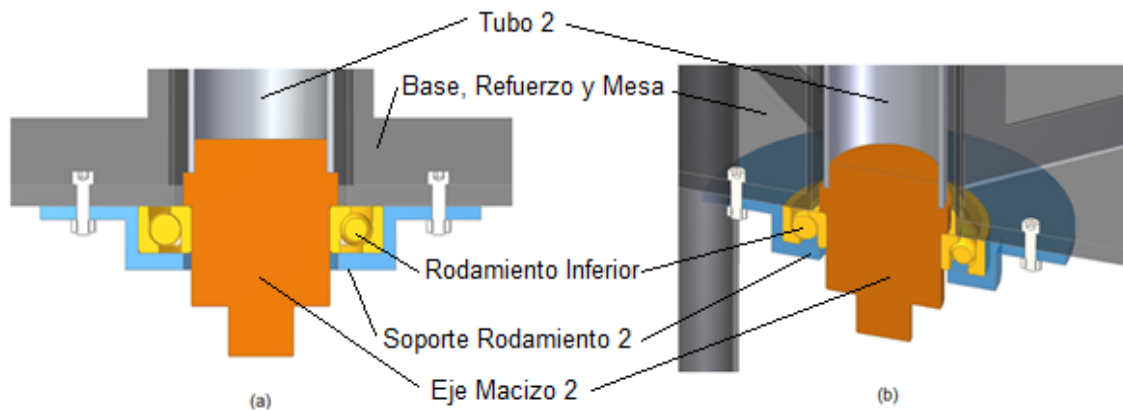


Ilustración 61. Acople para el segundo rodamiento de alineación del subsistema eje con soporte anclado por tornillos al refuerzo. (a) Vista en corte frontal. (b) Vista en corte isométrica.

Terminando el subsistema eje, se proyecta una parte del eje macizo dos que es donde esta acoplado el engrane.

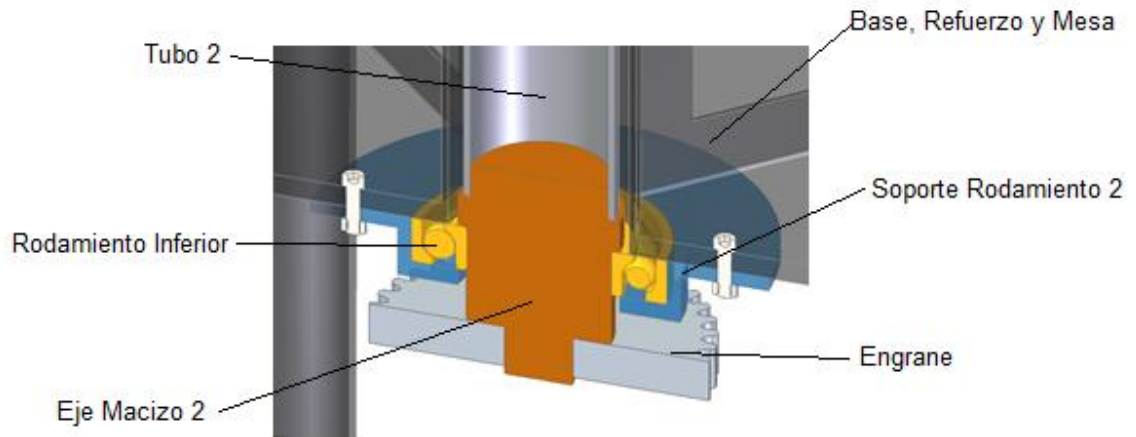


Ilustración 62. Acople entre el engrane y el eje macizo.

Los tubos uno y dos son tubos de acero con igual diámetro de 88.9mm, lo cual ayuda a unificar y estandarizar las piezas del modelo. Los ejes macizos de acero 1020, son piezas especiales que deben pasar por un proceso de mecanizado.

- **Rotor**

El rotor juega el papel más importante en el funcionamiento del aerogenerador ya que el diseño de su geometría hace que este pueda transmitir y transformar toda la energía del viento en movimiento rotacional.

El subsistema rotor, consta de dos aspas en forma semicircular de acero inoxidable calibre 20, que están traslapadas una con otra, para dejar que el viento fluya dentro del rotor y haya más empuje. Las aspas están sujetas al eje por medio de dos platinas que se encuentran separadas con distancia de 2m de altura.

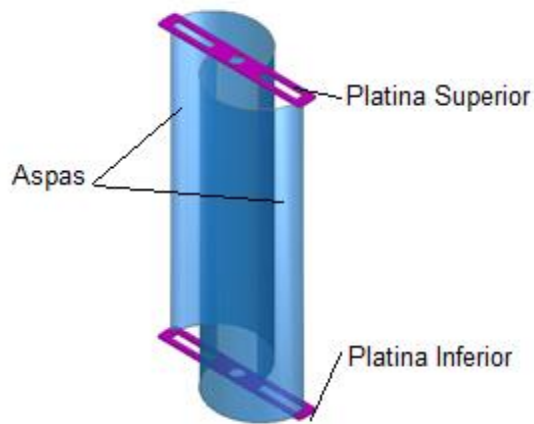


Ilustración 63. Rotor tipo Savonius

La altura del rotor está dada por los cálculos de potencia anteriormente expuestos, donde luego de hacer relaciones tamaño potencia, se obtiene que la mejor configuración era que el rotor tuviera de base 1m y de altura 2m. Las platinas al igual que los ejes son piezas diseñadas evitando reducir el mayor peso posible de todo el aerogenerador, por lo tanto que deben ser mecanizadas. La platina superior se encuentra sujeta al eje, por medio de un soporte que esta atornillado a ella, este soporte a la vez posee cuatro prisioneros para sujetar el tubo uno del eje, asegurando así que el movimiento del rotor, se transmita al eje principal.

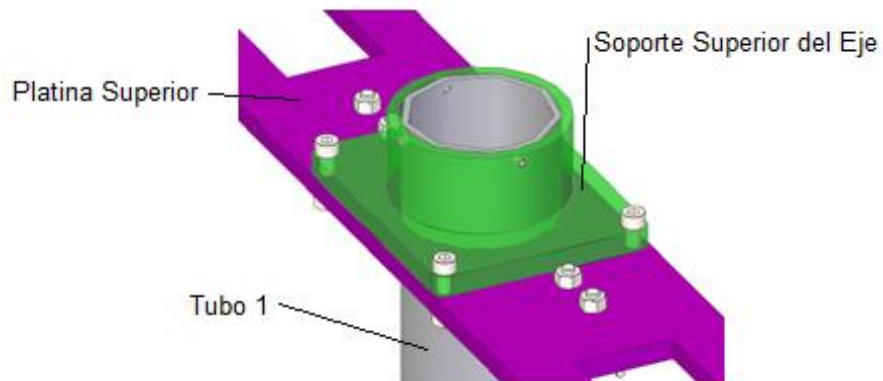


Ilustración 64. Unión entre el soporte principal que une el eje y la platina

La platina inferior se encuentra atornillada con el soporte del medio, este soporte ya antes descrito esta atornillado al eje macizo en forma contraria al movimiento evitando que se desatornille.

Ambas platinas poseen cuatro ranuras, que coinciden con la forma de las aspas en su correcta posición. Asegurando el posicionamiento de las aspas, se aseguran con pines en el extremo exterior, mientras que en el extremo interior se cuenta con un ángulo a 90 grados que se sujeta a las platinas y a las aspas por medio de dos tornillos, garantizando que no exista desplazamiento alguno de dichas aspas dentro de las platinas.

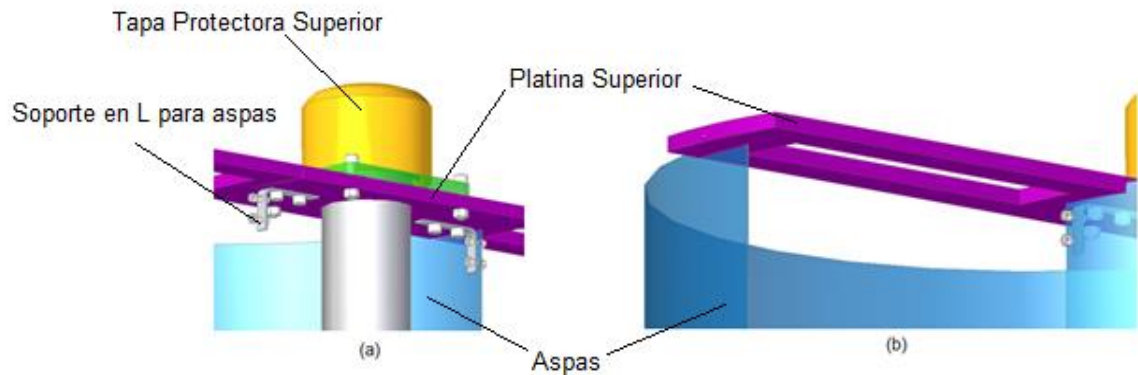


Ilustración 65. Acople de las aspas con las platinas. (a) Unión interna con ángulo a 90 grados. (b) Unión externa por medio de un prisionero.

- **Mesa-refuerzo**

Este subsistema posee dos funciones las cuales son el aseguramiento de alineación, soporte radial del eje y sistema de agarre ya sea al piso, un techo o plancha. Este subsistema está conformado por un refuerzo que se encuentra soldado a la mesa del sistema, consta de un buje y cuatro paralelas cada uno a 90°, lo que le da estabilidad y seguridad. Dentro del buje va el segundo tubo del eje principal dándole apoyo y alineación al eje.

Además el subsistema está conformado de una mesa que posee cuatro tubos soldados que hacen las veces de patas, estas patas a su vez se encuentran soldadas a una base de la misma geometría de la mesa. En esta base se encuentran cuatro agujeros para tener la posibilidad de colocar pernos y sujetarlos a una superficie fija.

La mesa y la base poseen una geometría circular, rodeándolas una pared de lámina de calibre 20, allí dentro se encuentra el sistema de transmisión y el sistema de generación de energía eléctrica, es por esto que el aerogenerador en su base debe estar cubierto para proteger los mecanismos descritos.

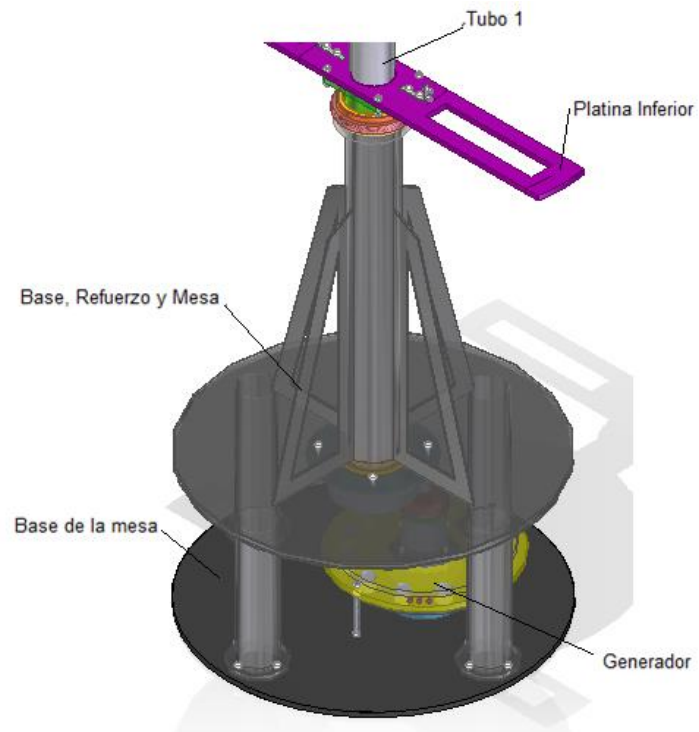


Ilustración 66. Vista isométrica del refuerzo

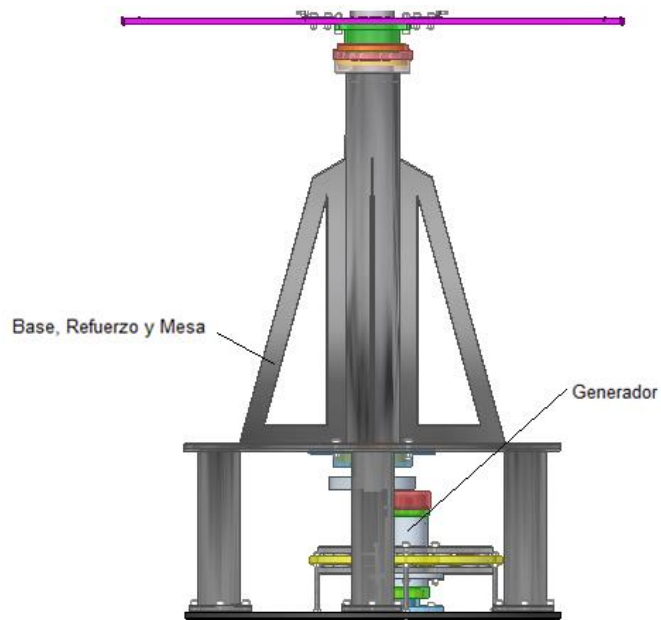


Ilustración 67. Vista frontal del refuerzo.

La cubierta protectora del sistema consta de una lámina rolada, formando una circunferencia, esta cuenta con un agujero en el cual se instala una puerta corrediza para el fácil acceso al generador y el sistema de transmisión. Dicha lámina circular está sujeta a la base por medio de una ranura que se realiza en la base para que encaje con precisión.

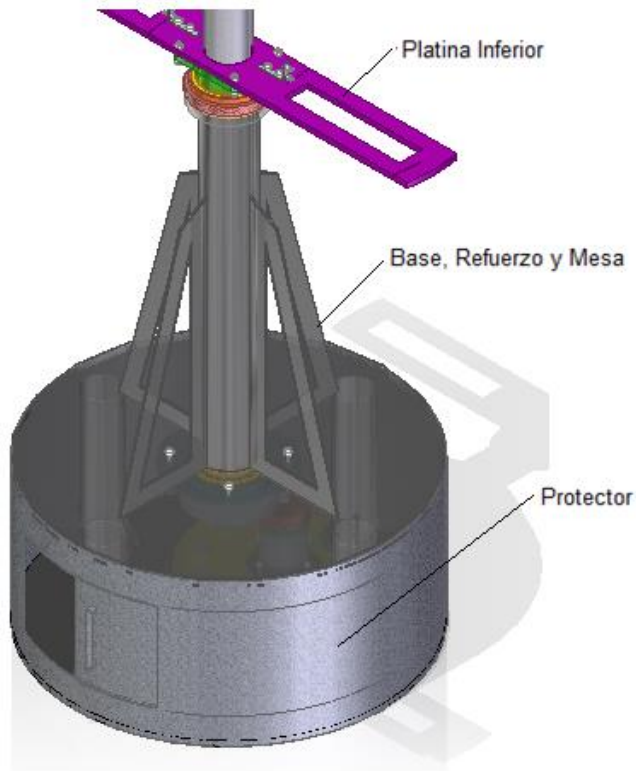


Ilustración 68. Sistema de protección de la base.

- **Generador eléctrico**

La base del generador está unida a la base principal por cuatro tornillos que fijan los que se encargan de sostener todo el sistema, a su vez la base del generador cuenta con una perforación en la parte superior para el eje que no rota y es el soporte principal del generador y entre estos dos sistemas se acopló un rodamiento angular a bolas para que la pista interna pueda dar rotación a los imanes.

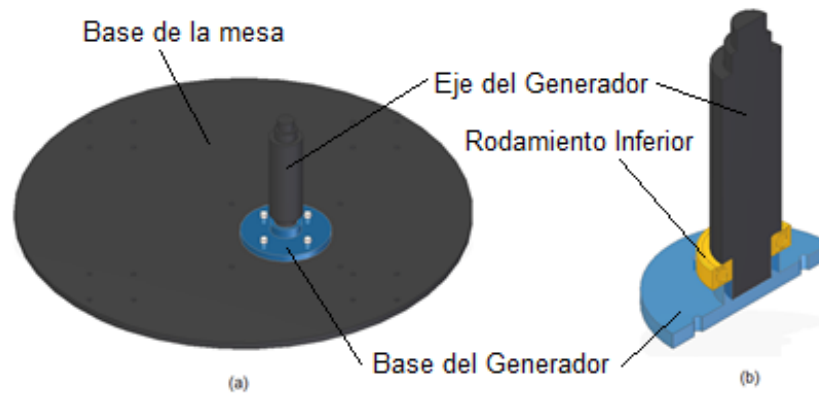


Ilustración 69. Soporte del generador. (a) soporte del generador a la base principal del generador. (b) Vista en corte isométrica con el rodamiento acoplado entre el eje y el soporte del generador.

En la parte superior e inferior del eje se encuentra un soporte maquinado especial para tener un encaje en la pista exterior del rodamiento y también encajar en el diámetro interior del tubo, el cual cuenta con un brida soldada que luego es soporte para los imanes, dichos soportes se encuentran soldados al tubo con el fin de conseguir una mayor rigidez.

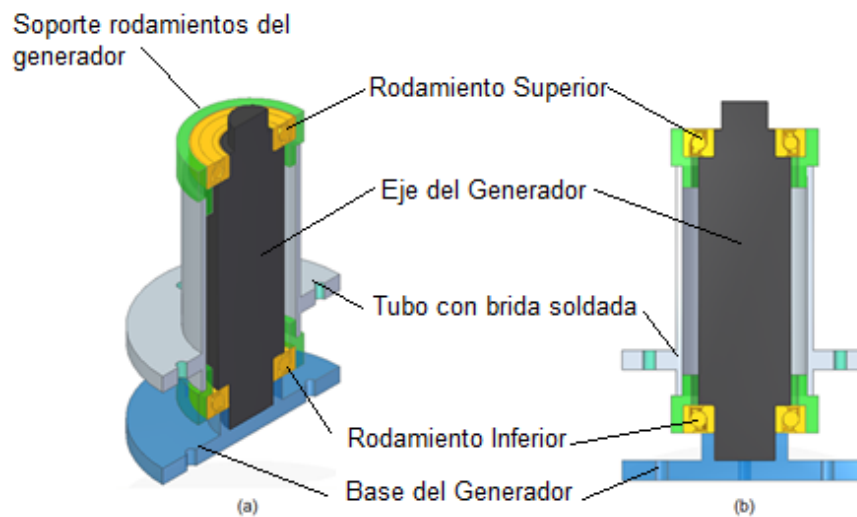


Ilustración 70. Configuración de los soportes para los rodamientos y el tubo con brida que une los soportes. (a) Vista en corte isométrica. (b) Vista frontal unión de los soportes con los respectivos rodamientos y su configuración.

La platina de imanes cuenta con los imanes pegados a esta, esta entra libremente por la parte superior y esta sujeta por cuatro perforaciones que se alinean con la brida que esta soldada al tubo, además por estas mismas perforaciones se cuenta con unos pequeños tubos que sirven como separadores entre las dos platinas con los imanes ya que por la

fuerza de atracción de los imanes estas dos placas tienen a juntarse por esto los separadores impiden cualquier movimiento no deseado.

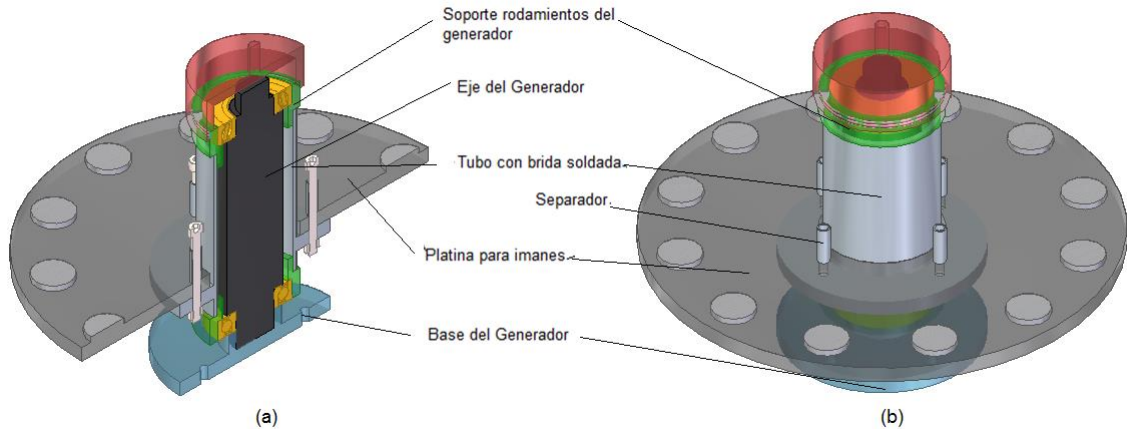


Ilustración 71. Unión de la platina inferior de imanes. (a) Vista en corte isométrica. (b) Vista isométrica del subsistema.

En la otra platina de imanes igualmente configurada que la primera platina se sujeta todo el sistema por medio de cuatro tornillos que pasa por las perforaciones pertinentes, los pasadores, la platina inferior de imanes y por último la brida soldada al tubo, contando con una tuerca en este último extremo.

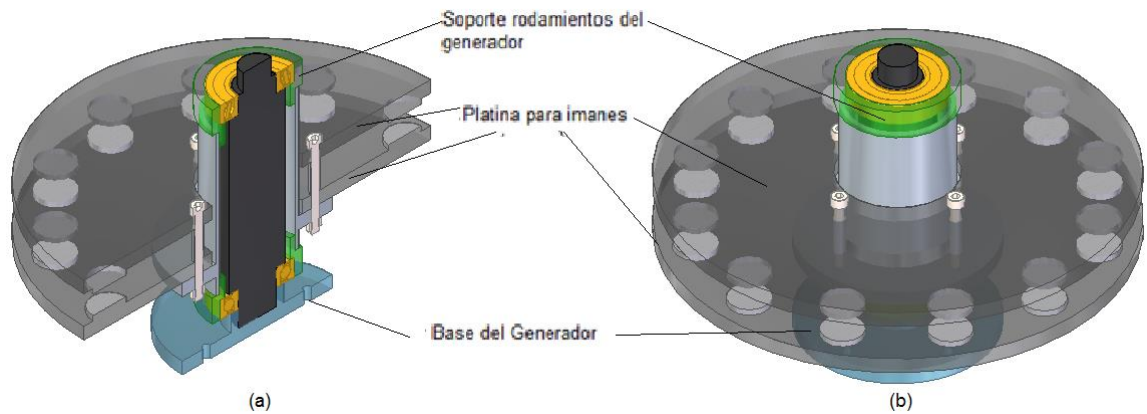


Ilustración 72. Sistema de sujeción de las dos platinas de imanes. (a) Vista isométrica del subsistema con las dos platinas de imanes. (b) Vista en corte del mismo subsistema.

En la parte superior se cuenta con una tapa especialmente maquinada con una rosca contraria en al sentido del movimiento para impedir que esta se afloje cuando el sistema comienza a rotar, en la otra parte se tiene el sistema de acople con el piñón que se encargara de transmitir todo el movimiento proveniente del engrane.

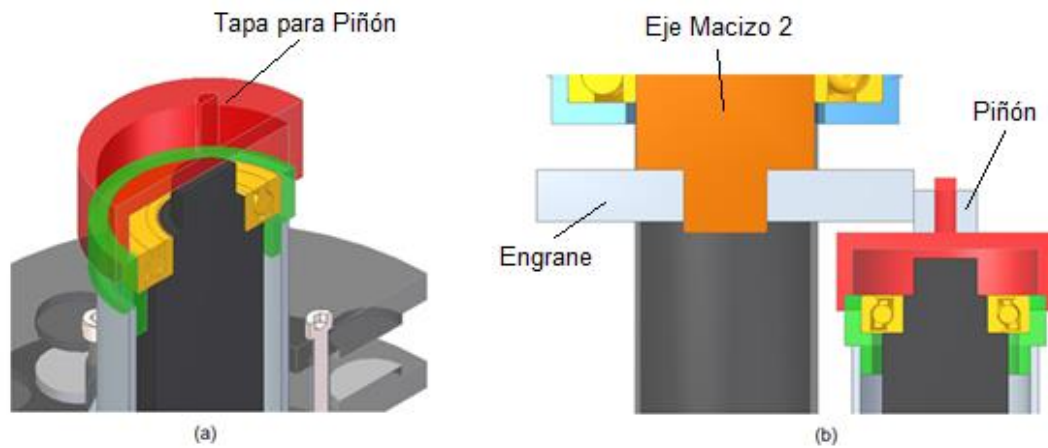


Ilustración 73. Tapa del generador maquinada. (a) Vista en corte isométrica de la unión de la tapa. (b) Sistema de engranes unidos y acoplados a la tapa del generador.

El estator se encuentra en la mitad de las dos platinas de imanes, separado a la misma distancia de cada platina de imanes por medio de un tornillo sin cabeza que se acoplan por las perforaciones más externas del estator, las cuales se hacen más alejadas del diámetro exterior de las platinas de los imanes, esto debido a que el estator no tiene ningún movimiento rotacional, por medio de tuercas en estos tornillos se acopla la altura precisa del estator.

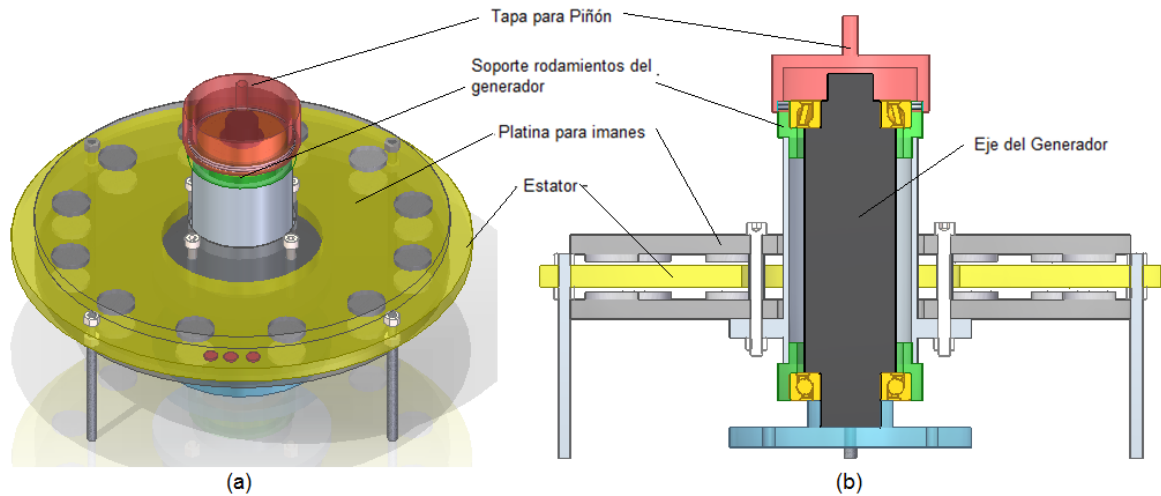


Ilustración 74. Posición del estator en el generador. (a) Vista isométrica de la configuración del estator. (b) Vista frontal en corte, con forma de acople de los tornillos sin cabeza que sujetan el estator.

- Aerogenerador Savonius

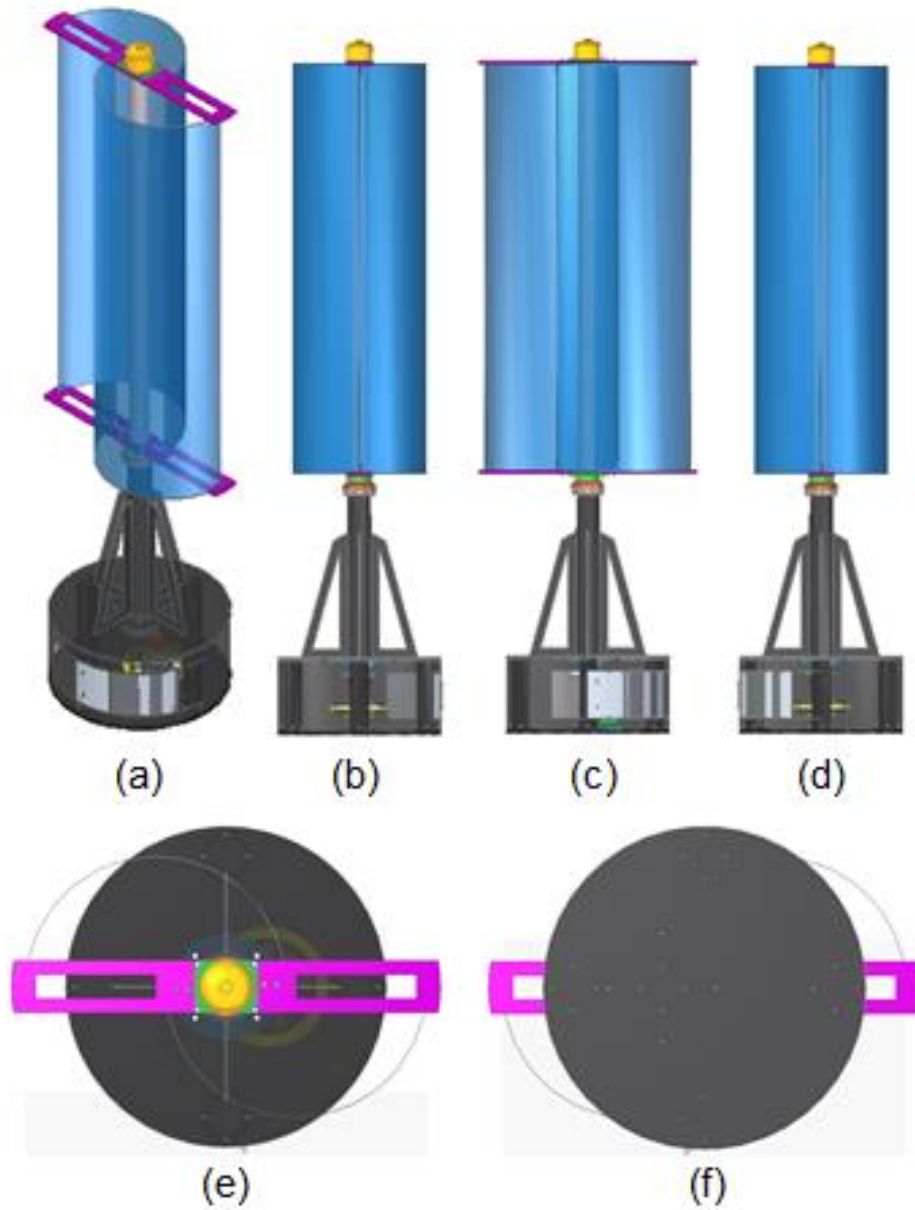


Ilustración 75. Vistas del diseño del aerogenerador. (a) Vista isométrica. (b) Vista lateral izquierda. (c) Vista frontal. (d) Vista lateral izquierda. (e) Vista superior. (f) Vista inferior

4.10. DESCRIPCIÓN DEL ENSAMBLE

4.10.1. ROTOR

Para armar el rotor se ponen las aspas sobre las platinas inferiores y superiores en las ranuras que estas poseen, luego se procede a poner los ángulos y a atornillarlos sobre las platinas para fijar internamente las aspas por medio de otros dos tornillos.

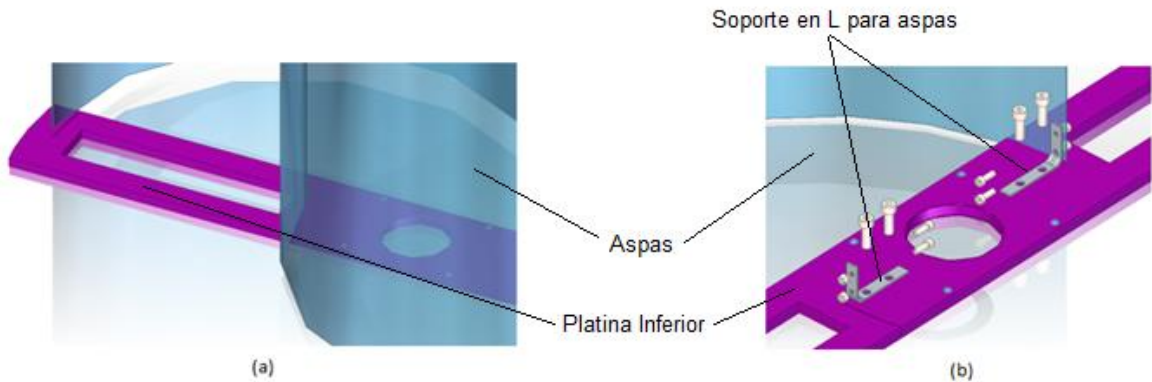


Ilustración 76. Unión entre las aspas y las platinas. (a) sujeción de la parte externa de una de las aspas. (b) Forma de fijación de la parte interna de las aspas.

En la platina superior se hace un acople de un soporte y un sistema de prisioneros para la fijación del rotor hacia el eje, mientras que en la parte inferior además de ser un acople con el eje este también funciona como un acople para el rodamiento y una tapa para el retenedor.

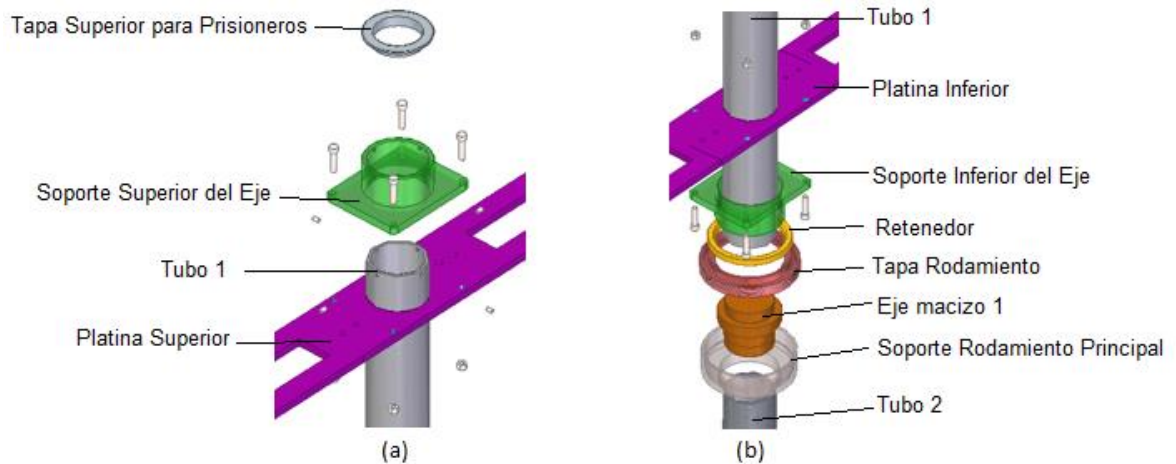


Ilustración 77. Desensamble del sistema que une el rotor con el eje. (a) Sujeción superior. (b) Sujeción inferior.

EJE

La unión del eje que transmite toda la potencia entregada por el generador esta acoplada por medio del sistema del eje anteriormente visto y se refuerza con la estructura base que alinea todo el sistema y lo soporta, el cual en la parte inferior cuenta con un rodamiento fijo a este para la alineación.

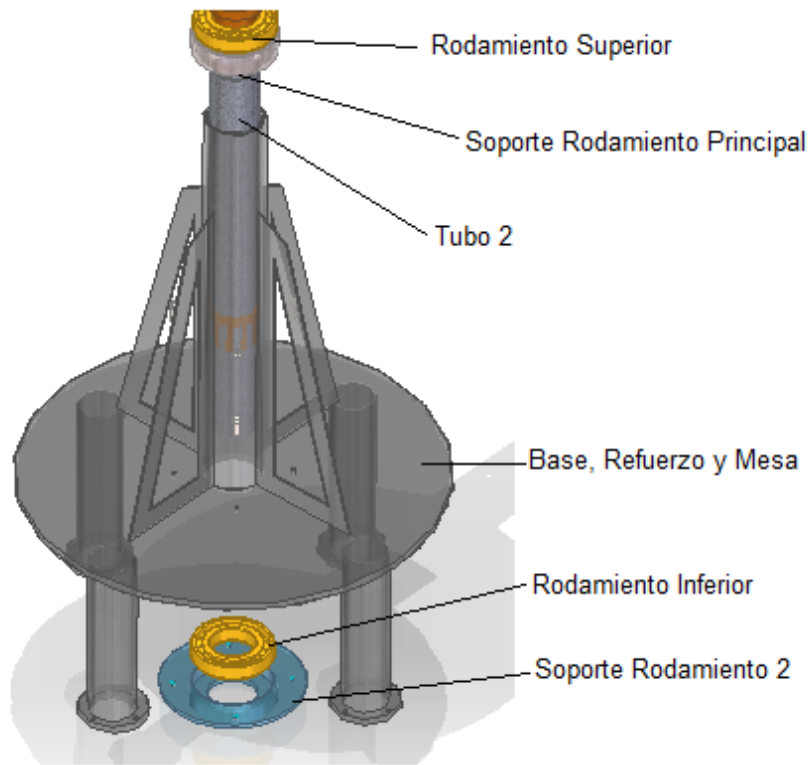


Ilustración 78. Vista de la base que acopla los dos rodamientos y alinea el sistema.

4.10.2. GENERADOR

Para empezar se toma el soporte principal del generador y en la cavidad central acoplamos el eje del generador con el rodamiento inferior ya acoplado a este, por el lado en el cual solo hay un cambio de sección.

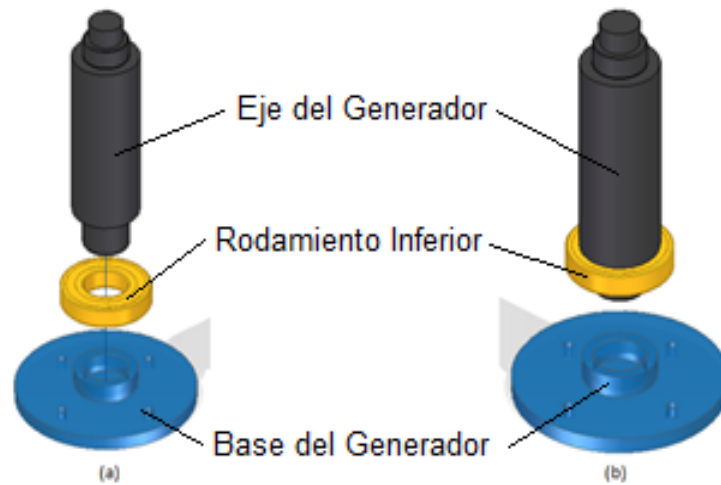


Ilustración 79. Base del generador con acoplamiento del eje y rodamiento inferior. (a) Desacople de las tres partes. (b) Forma de ensamble del eje con rodamiento al soporte del generador

Luego se procede insertando el soporte para el rodamiento del generador que ya viene soldado con el tubo con brida, de forma tal que la cavidad que este tiene de 80mm de diámetro se acopla con la pista externa del rodamiento ya instalado.

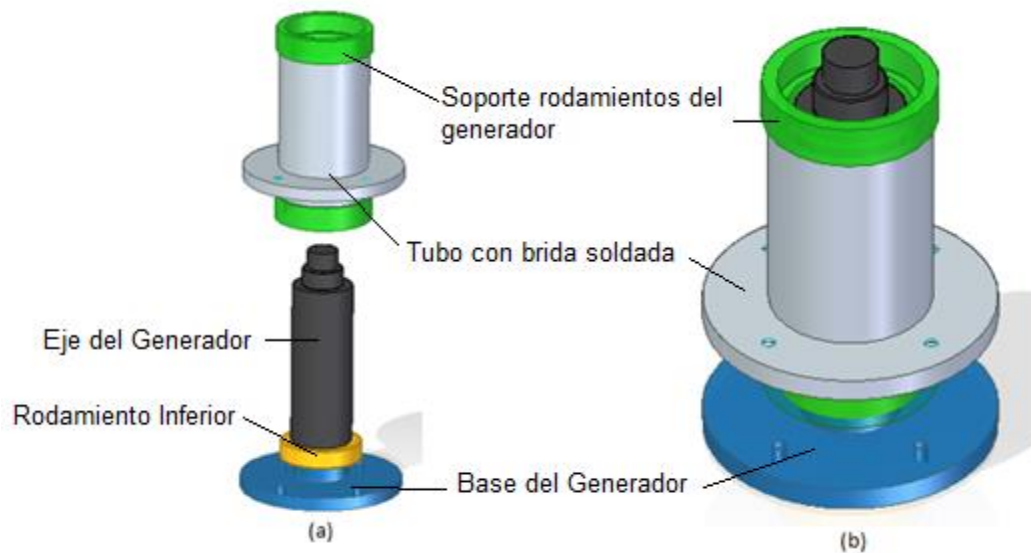


Ilustración 80. Acople del tubo con brida al sistema anterior ensamblado. (a) Forma de ensamble del tubo con brida y sus respectivos soportes soldados a este. (b) Visualización una vez ensamblado en el soporte y encajada la pista exterior del rodamiento.

Una vez ensamblado el tubo con brida se procede a poner el rodamiento superior el cual le da alineación al sistema.

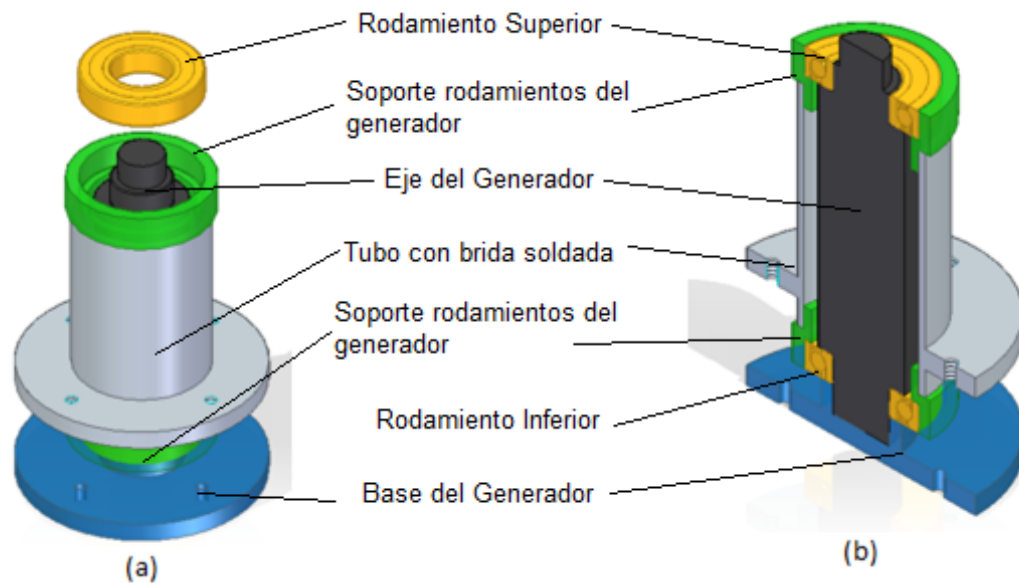


Ilustración 81. Acople del rodamiento superior de alineación. (a) Forma de ensamble del rodamiento superior. (b) Vista en corte isométrica del ensamble que se ha realizado.

Una vez se tiene el ensamble configurado como se muestra en la figura anterior (b) se procede a insertar el primer plato de imanes, colocándolo concéntricamente sobre la brida y casando los agujeros que esta posee para la instalación luego poner los separadores, y sin tocar estos se coloca el estator concéntricamente.

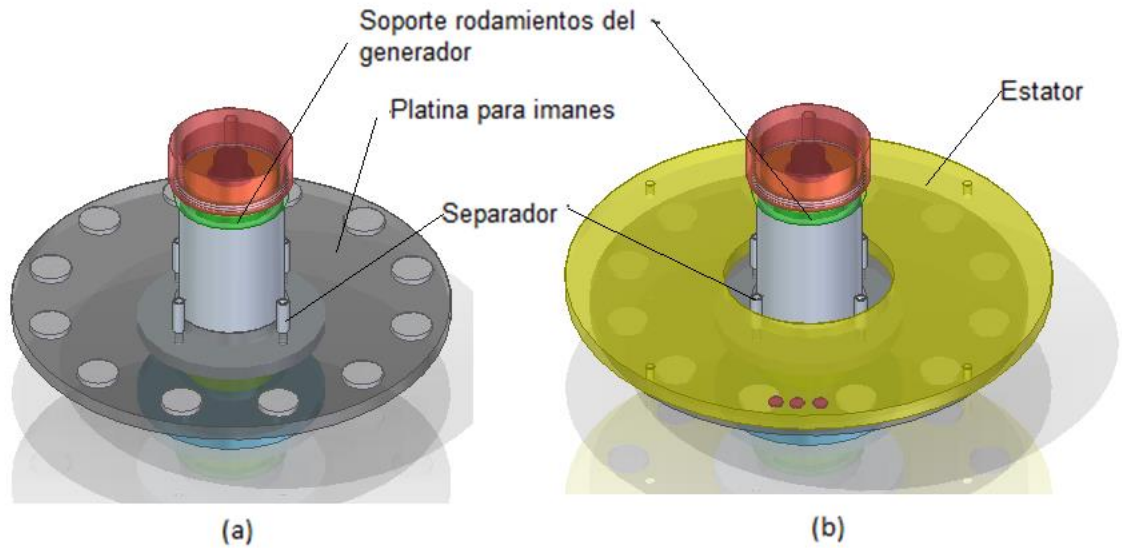


Ilustración 82. Unión de la platina inferior de imanes, los separadores y el estator. (a) Platina de imanes y separadores colocados en su sitio. (b) Posicionamiento del estator.

Se procede a colocar la segunda platina con imanes y a la fijación de estos por medio de los cuatro tornillos que pasaran por medio de los separadores, la platina de imanes inferiores y por la brida que se encuentra en la parte inferior, sujetándose por medio de una tuerca para cada tornillo en la parte inferior.

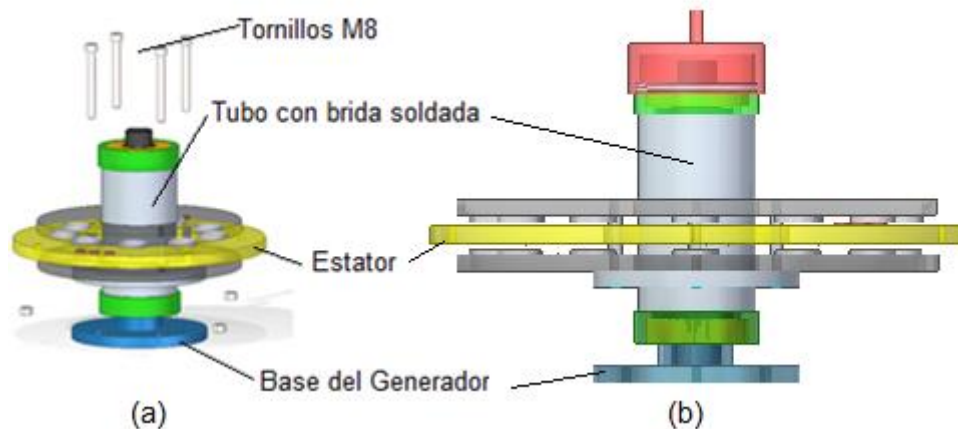


Ilustración 83. Ensamble de la platina superior de imanes y fijación por medio de tornillos y tuercas. (a) Forma de fijación de los tornillos. (b) vista lateral del sistema con tornillería fijada en su sitio.

Por último se atornilla la tapa superior que tiene rosca contraria al movimiento, y se fija el engrane superior sobre esta tapa.

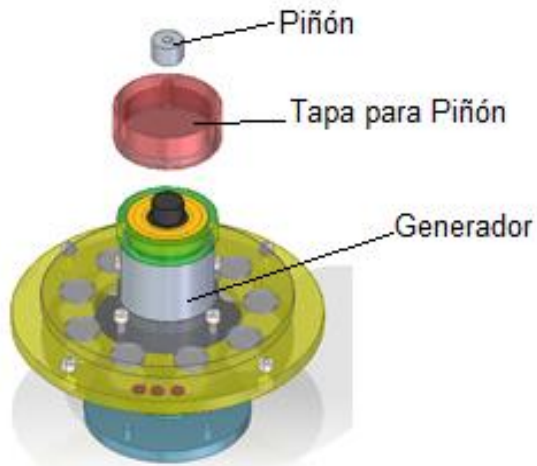


Ilustración 84. Ensamble entre la tapa hacia el subsistema del aerogenerador y ensamble del piñón sobre la tapa.

4.10.3. BASE

En la base se cuenta con una mesa perforada en la cual se ensamblan los diferentes subsistemas como se muestra a continuación, para ensamblar el generador se procede de la siguiente manera:

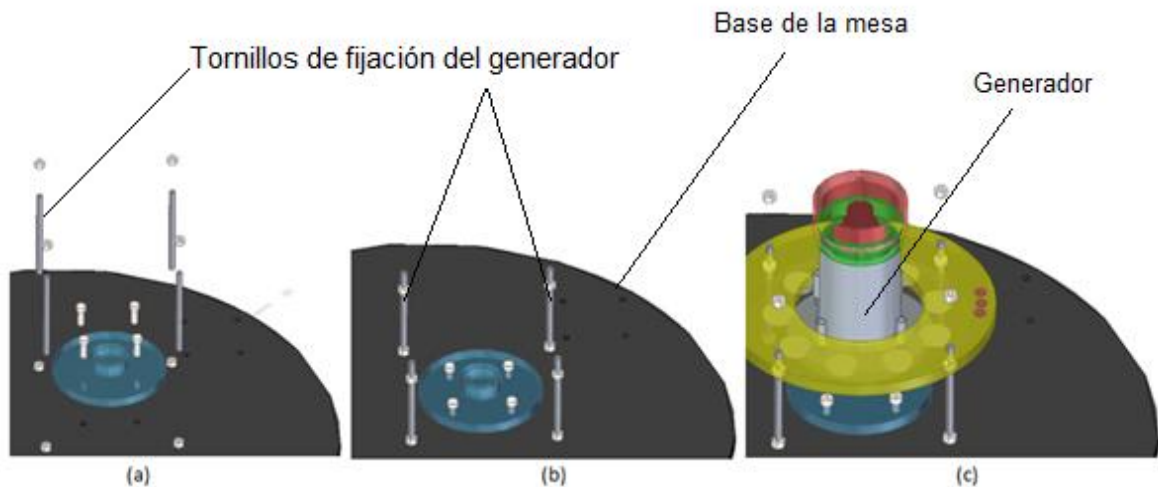


Ilustración 85. Ensamble del generador a la base. (a) despiece de los tornillos para el ensamble del generador. (b) Ensamble de los tornillos para el generador. (c) Generador en posición con tuercas superiores para apoyo final de este.

En la imagen anterior se observa la forma de ensamble del generador sobre la base, en la cual se anclan unos tornillos sin cabeza en los cuales el estator se apoya y es por medio de tuercas en estos tornillos que se le da la altura deseada al estator.

Una vez el generador se encuentra en la posición correcta se procede a colocar la barrera protectora que impide cualquier flujo de contaminación externa no deseada dentro del sistema. Esta es ensamblada por medio de una muesca circular que está sobre el borde de la base principal, y con esta barrera también viene una puerta corrediza que permite el acceso al sistema interno.

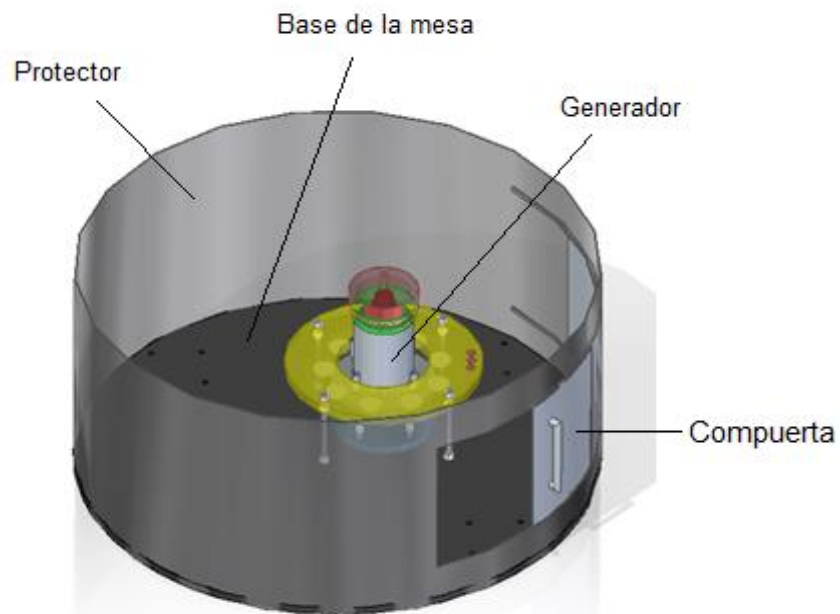


Ilustración 86. Unión del protector con puerta corrediza

Por ultimo sobre esta base se procede a instalar la base de refuerzo que soporta todo el rotor y sus componentes, esto por medio de bridas colocadas en cuatro tubos que están soldados a estos.

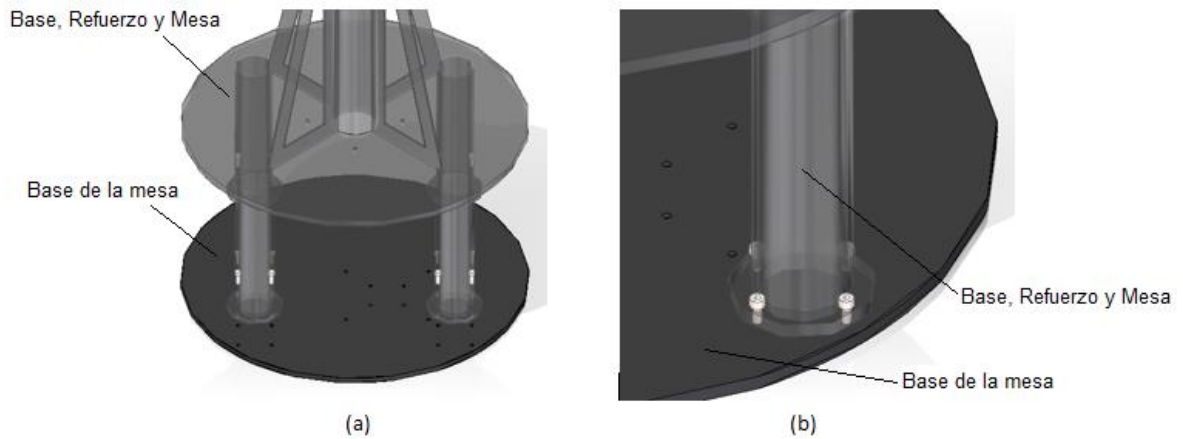


Ilustración 87. Acople de la base del rotor a la base. (a) Ensamble del sistema sobre la base. (b) Una de las cuatro bridas sujetada por tornillos sobre la base.

4.11. CÁLCULOS DEL SISTEMA POR MEDIO DE HERRAMIENTAS CAD

- Rotor

Asignando los materiales de los componentes en la herramienta CAD (Solid Edge ST5) con acero para aquellos materiales no especificados y el material correcto para aquellos anteriormente designados se llega a los siguientes resultados:

| Global Principales | | |
|---|---|---------------------------------|
| Masa: | Volumen: | |
| 77.675881 kg | 9826143.799119 mm ³ | |
| Masa de cantidad del usuario: | 77.675881 kg | |
| Centro de masa | Centro de volumen | |
| <input checked="" type="checkbox"/> Mostrar símbolo cm | <input checked="" type="checkbox"/> Mostrar símbolo cv | |
| X: 0.103833 mm | X: 0.104788 mm | |
| Y: 0.004284 mm | Y: 0.004324 mm | |
| Z: -15.084155 mm | Z: -15.130731 mm | |
| Momentos de inercia de la masa | | |
| bx: 50.012108 kg·m ² | by: 52.688036 kg·m ² | lz: 5.907784 kg·m ² |
| by: -1.060598 kg·m ² | bz: -0.010447 kg·m ² | ly: -0.000431 kg·m ² |
| Global Principales | | |
| Orientación de los ejes principales | | |
| <input type="checkbox"/> Mostrar símbolo | | |
| 1: 0.328898 | 0.944366 | 0.000081 |
| 2: 0.944366 | -0.328898 | 0.000220 |
| 3: 0.000234 | 0.000004 | -1.000000 |
| Momentos principales de inercia | | |
| I1: 53.039740 kg·m ² | I2: 49.625058 kg·m ² | I3: 5.907781 kg·m ² |
| Radios de giro | | |
| K1: 826.337761 mm | K2: 799.295599 mm | K3: 275.784027 mm |

Ilustración 88. Sistema rotor con resultados obtenidos por medio de las herramientas CAD, a la izquierda se encuentran los cálculos generales de peso, momentos de inercia, volumen. A la derecha se muestra a detalle la orientación de los ejes, las inercias y los radios de giro.

De las cuales se observa que la masa del sistema que se muestra en la siguiente ilustración es de 77.67 kg con una inercia en el eje z de 5.9 kg/m^2 , la cual es la inercia que debe vencer el viento para que el sistema comienza a rotar, venciendo la fricción estática en los rodamientos y el engrane que conecta con el generador, además se muestra un punto rojo en la siguiente ilustración que indica el centro de volumen del sistema.

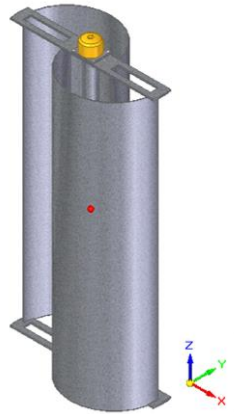


Ilustración 89. Sistema rotor con eje ensamblado con muestra del sentido del eje coordinado y centro de volumen.

- **Generador eléctrico parte móvil**

De igual manera se asignaron los materiales a la parte del generador que presenta una rotación, y se concluyeron los siguientes resultados:

| Global Principales | | |
|--|--|---------------------------------|
| Masa: | Volumen: | |
| 26.636519 kg | 3420682.513573 mm ³ | |
| Masa de cantidad del usuario: | 26.636519 kg | |
| Centro de masa | Centro de volumen | |
| <input type="checkbox"/> Mostrar símbolo cm | <input type="checkbox"/> Mostrar símbolo cv | |
| X: 0.000000 mm | X: 0.000000 mm | |
| Y: 0.000000 mm | Y: 0.000000 mm | |
| Z: 105.354001 mm | Z: 105.261875 mm | |
| Momentos de inercia de la masa | | |
| Ixx: 0.545015 kg·m ² | Iyy: 0.545015 kg·m ² | Izz: 0.403901 kg·m ² |
| Ixy: 0.000000 kg·m ² | Iyz: 0.000000 kg·m ² | Ixz: 0.000000 kg·m ² |

| Global Principales | | |
|--|--------------------------------|--------------------------------|
| Orientación de los ejes principales | | |
| <input type="checkbox"/> Mostrar símbolo | | |
| 1: 0.000000 | 0.000000 | 1.000000 |
| 2: 1.000000 | 0.000000 | 0.000000 |
| 3: 0.000000 | 1.000000 | 0.000000 |
| Momentos principales de inercia | | |
| I1: 0.403901 kg·m ² | I2: 0.249364 kg·m ² | I3: 0.249364 kg·m ² |
| Radios de giro | | |
| K1: 123.139930 mm | K2: 96.756091 mm | K3: 96.756091 mm |

Ilustración 90. Sistema del generador eléctrico con resultados obtenidos por medio de las herramientas CAD, a la derecha se encuentran los cálculos generales de peso, momentos de inercia, volumen. A la izquierda se muestran a detalle la orientación de los ejes, las inercias y los radios de giro

Se observa que la parte móvil del generador pesa 26.3 kg y presenta una inercia en el eje z de 0.066 Kg/m², la cual será la inercia que tiene que vencer el sistema para comenzar a generar, además en la ilustración siguiente se muestra el centro de volumen del sistema.

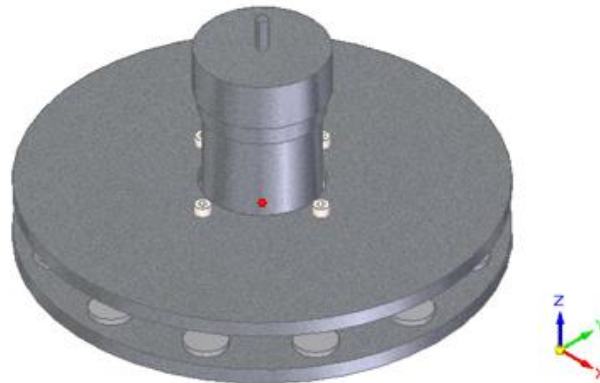


Ilustración 91. Sistema rotatorio del generador con muestra del sentido del eje coordenado y centro de volumen.


| Global | | | Principales | | | |
|--|------------------------------|------|---|---------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Masa: | 256.182150 kg | | Volumen: | 33107094.345998 mm ³ | | |
| Masa de cantidad del usuario: | 256.182150 kg | | | | | |
| Centro de masa | | CM | Centro de volumen | | CV | |
| <input type="checkbox"/> Mostrar símbolo | | | <input type="checkbox"/> Mostrar símbolo | | | |
| X: | 10.911037 mm | | X: | 12.512261 mm | | |
| Y: | -1.503292 mm | | Y: | -1.485057 mm | | |
| Z: | 865.406129 mm | | Z: | 850.378840 mm | | |
| Momentos de inercia de la masa | | | Orientación de los ejes principales | | | |
| Ixx: | 476.384221 kg·m ² | Iyy: | 479.315565 kg·m ² | Izz: | 17.300041 kg·m ² | |
| Ixy: | -1.168416 kg·m ² | Ixz: | 0.337665 kg·m ² | Iyz: | -0.065002 kg·m ² | |
| | | | <input type="checkbox"/> Mostrar símbolo  | | | |
| | | | 1: | 0.332573 | 0.943076 | |
| | | | 2: | 0.943045 | -0.332575 | |
| | | | 3: | 0.007792 | -0.001027 | |
| | | | Momentos principales de inercia | | | |
| | | | I1: | 287.833235 kg·m ² | I2: | 284.128115 kg·m ² |
| | | | I3: | | | 17.252471 kg·m ² |
| | | | Radios de giro | | | |
| | | | K1: | 1059.976011 mm | K2: | 1053.131667 mm |
| | | | K3: | | | 259.508279 mm |

Ilustración 92. Sistema completo con resultados obtenidos por medio de las herramientas CAD, a la derecha se encuentran los cálculos generales de peso, momentos de inercia, volumen. A la izquierda se muestran a detalle la orientación de los ejes, las inercias y los radios de giro.

Se observa que el sistema completo tiene un peso de 256.18 Kg incluyendo el rotor, el generador eléctrico y la base fija que sostiene todo el sistema, en la ilustración siguiente se muestra el centro de volumen del sistema.



Ilustración 93. Sistema completo del aerogenerador, con muestra del sentido del eje coordinado y centro de volumen.

4.12. SIMULACIÓN FEA POR MEDIO DE AUTODESK SIMULATION MULTIPHYSICS

Para la simulación se utiliza una maya de 11072 elementos, 9 segundos de simulación, teniendo en cuenta la turbulencia y como material el aire con las propiedades por defecto del programa. Para los parámetros de entrada de viento se selecciona la cara izquierda con una velocidad de 3.88m/s que es la velocidad promedio de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, y en la cara derecha una salida del viento.

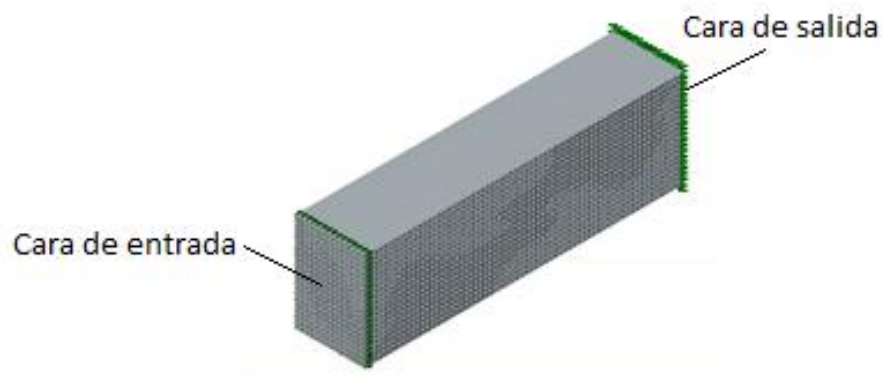


Ilustración 94. Modelo con maya y velocidad del viento aplicada y salida del mismo.

Resultado de presiones sobre una vista superior del generador Savonius.

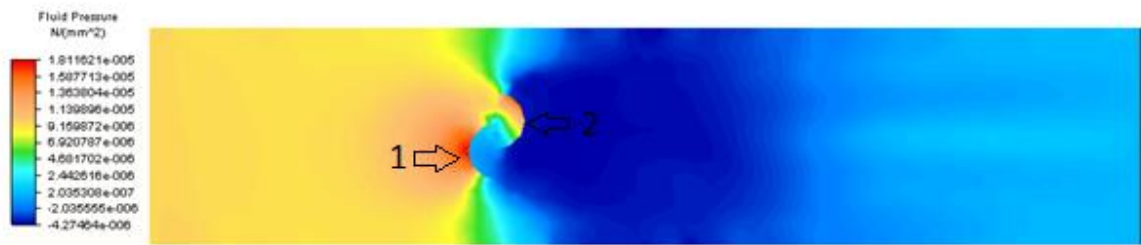


Ilustración 95. Presiones del viento aplicadas en el rotor y su distribución a través de este, con escala.

Se observa en la ilustración 95 que en la parte convexa del generador se producen presiones del orden de los 18N/m^2 (Flecha 1), en la parte posterior de la parte convexa se producen presiones del orden de 2.44N/m^2 (Flecha 1 parte interna) y en la parte cóncava se observan presiones del orden de 15N/m^2 (Flecha 2 parte interna) y en su parte posterior de la parte cóncava se dan presiones negativas del orden de 4.27N/m^2 (Flecha 2) que aportan al movimiento en sentido de las agujas del reloj del rotor.

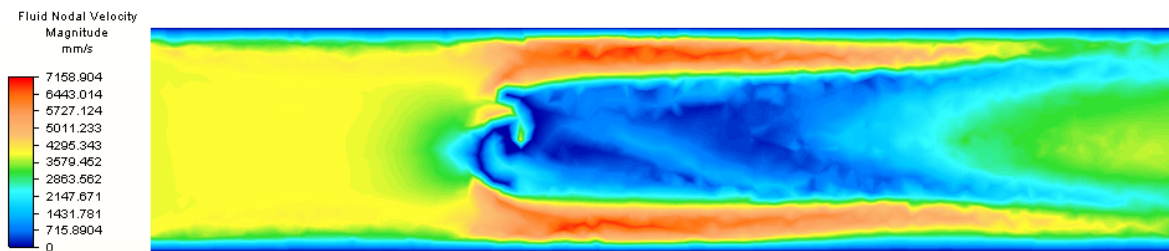


Ilustración 96. Velocidades del viento aplicadas en el rotor y su distribución a través de este, con escala.

Se observan vientos en la ilustración 96 que impactan contra el rotor de una magnitud aproximada de 3.5m/s y una vez que impactan estos entran entre las dos aspas y se disminuyen a su entrada, pero se observa un pequeño aumento a la salida de 1.4m/s que es positivo debido a que indica que el flujo del viento está atravesando el sistema del rotor.

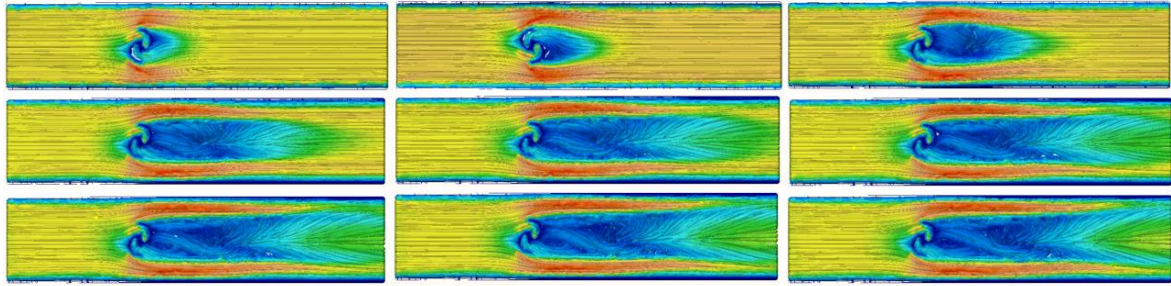


Ilustración 97. Distribución de la velocidad del viento cada segundo de simulación, con distribución de las turbulencias (leer de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo).

Se diagrama el sistema de línea con las velocidades del viento en la ilustración 97, en donde se observan con más claridad la circulación del viento desde el inicio de la simulación hasta el final de la misma y como las turbulencias generadas por el paso del viento a través del rotor generan una cola de viento no lineales.

Deflexión del eje

Para este modelo se hizo dos simulaciones para comprobar la similitud entre la presión ejercida por el viento y la fuerza de deflexión calculada en el capítulo 4, para ambas simulaciones se utiliza una maya con 8713 elementos, en ambas las caras inferiores se restringen para no tener ningún tipo de movimiento y para las fuerzas a la primera simulación se le coloca la fuerza de presión obtenida en la simulación del viento sobre media cara del eje y para la segunda simulación se distribuye una fuerza de 75.6N sobre el área de la semicircunferencia.

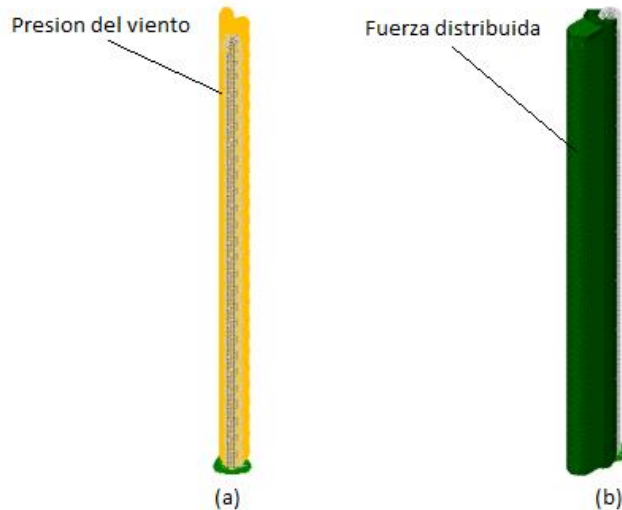


Ilustración 98. Eje de simulación para deflexión. (a) Aplicando presión del viento. (b) Aplicando la fuerza teórica.

- **Simulación con fuerza de presión del viento**

Con la presión del viento se obtienen desplazamientos máximos de 0.21mm presentes en la parte superior del eje, con unos esfuerzo de Von Mises 17N/m² posicionados en la parte inferior.

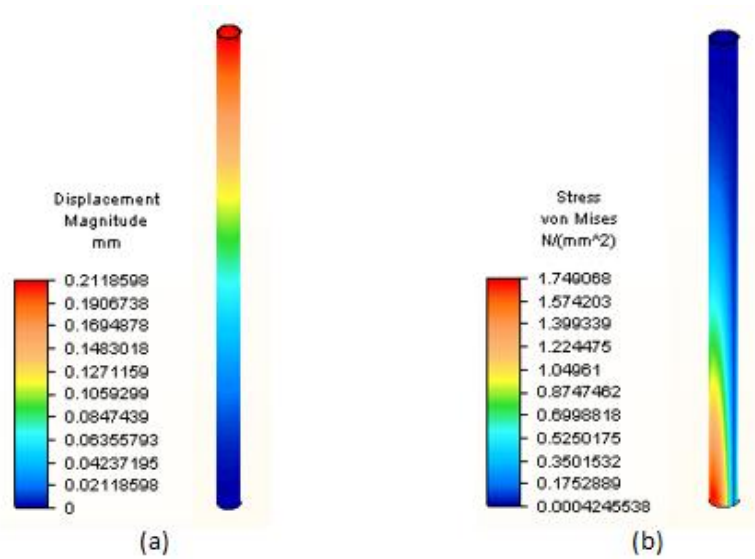


Ilustración 99. Simulación con la presión del viento ejercida sobre el eje. (a) Desplazamiento del eje. (b) Esfuerzos de Von Mises.

Con esto se llega a una fuerza de reacción de 71.46 N sobre la base del tubo.

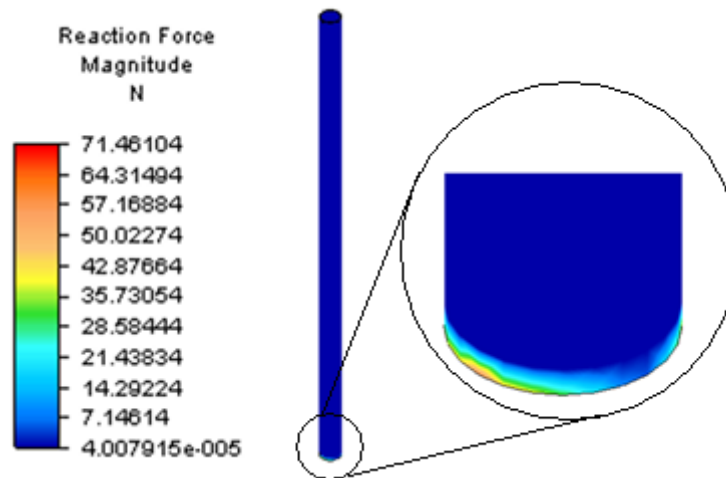


Ilustración 100. Fuerza de reacción resultante.

Por otra parte se hace una simulación de la frecuencia natural del tubo para verificar que este no entre en resonancia cuando el aerogenerador tenga una velocidad aproximada de 74 RPM, por dicha razón se obtiene las frecuencias naturales del sistema y sus respectivos desplazamientos se obtiene:

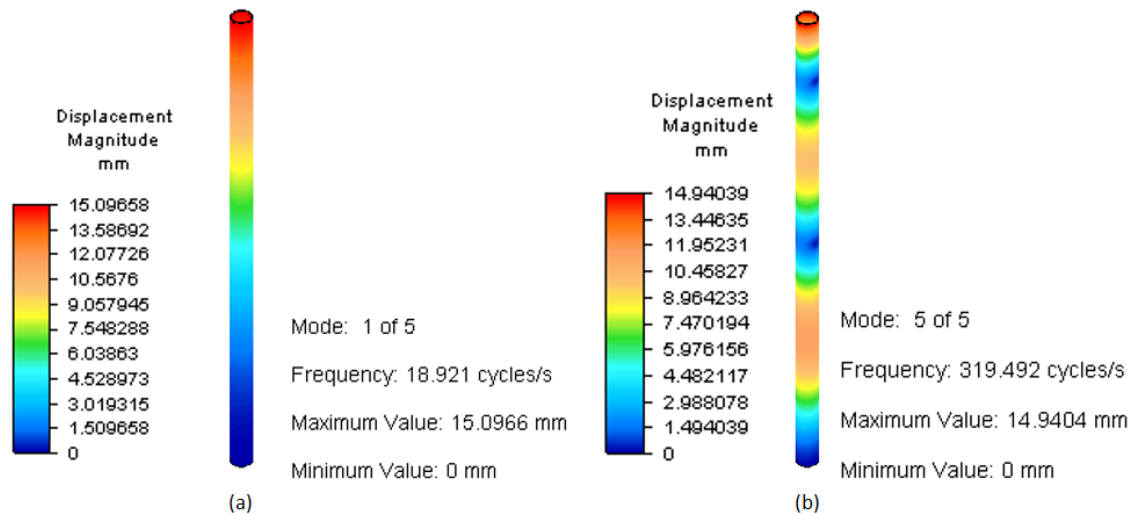


Ilustración 101. Resonancia del sistema con su frecuencia natural. (a) Frecuencia mínima en el sistema de 18.9 ciclos/s. (b) Frecuencia máxima en el sistema de 319.5 ciclos/s.

Ahora con estas frecuencias se obtiene un desplazamiento aproximado de 15mm, pero como el sistema está sometido a una velocidad determinada, se procede a calcular una amplitud de oscilación cuando el sistema está sometido a 74 RPM, con la siguiente ecuación (Peralta Et Al, 2009):

$$x = \frac{F/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{\omega}{m}\right)^2}} \quad [38]$$

Donde

x : Desplazamiento (mm)

F : Fuerza (N)

m : Masa (kg)

ω_0 : Frecuencia natural

ω : Frecuencia de funcionamiento

Se obtuvo los siguientes resultados con las frecuencias naturales encontradas en la simulación:

Tabla 28. Resultados de desplazamiento de la resonancia en el modelo de los cálculos encontrados en la simulación.

| Resonancia del eje con modelo de presiones | | | | |
|--|-------------------------------------|-----------|------------|---------------------|
| Frecuencia de resonancia(Hz) | Frecuencia de giro del sistema (Hz) | Peso (Kg) | Fuerza (N) | Desplazamiento (mm) |
| 18.92 | 1.2333 | 17.5 | 71.46 | 0.011475 |
| 19.0232 | 1.2333 | 17.5 | 71.46 | 0.011352 |
| 116.77 | 1.2333 | 17.5 | 71.46 | 0.000300 |
| 117.37 | 1.2333 | 17.5 | 71.46 | 0.000297 |
| 319.49 | 1.2333 | 17.5 | 71.46 | 0.000040 |

- **Simulación con fuerza teórica del viento**

Con la fuerza teórica se obtienen desplazamientos máximos de 0.23mm presentes en la parte superior del eje, con unos esfuerzo de Von Mises 19.2N/m² posicionados en la parte inferior.

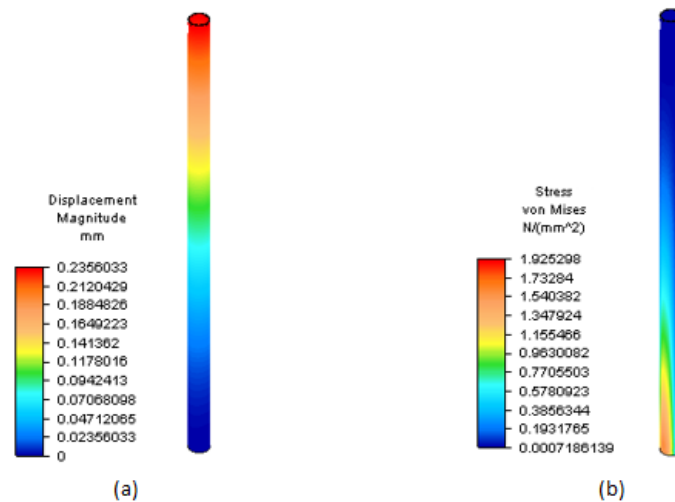


Ilustración 102. Simulación con la fuerza teórica del viento ejercida sobre el eje. (a) Desplazamiento del eje. (b) Esfuerzos de Von Mises.

Se hace una simulación de la frecuencia natural del tubo para verificar que este no entre en resonancia cuando el aerogenerador tenga una velocidad aproximada de 74 RPM, por dicha razón se obtiene las frecuencias naturales del sistema y sus respectivos desplazamientos se obtiene:

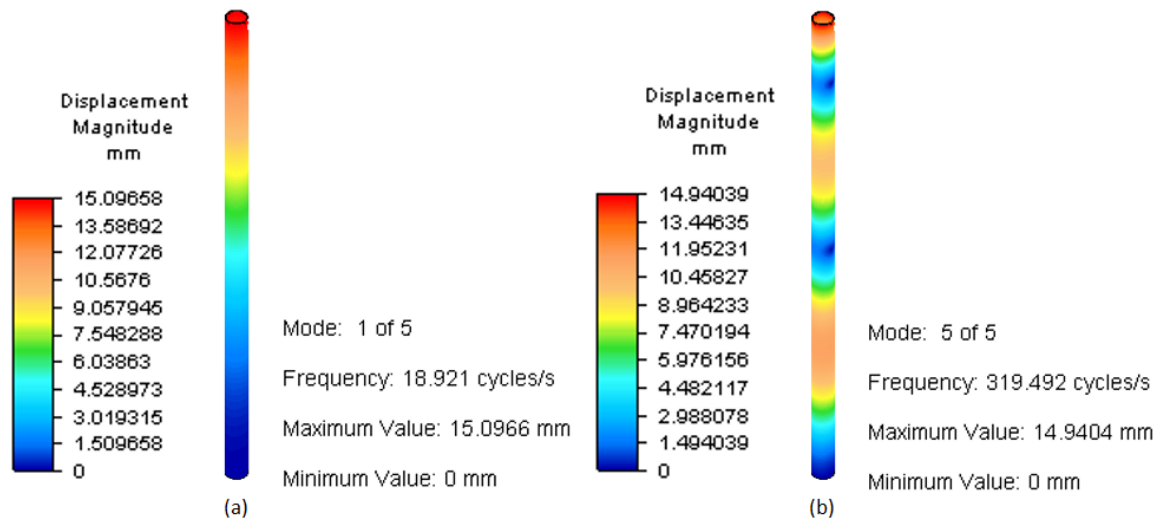


Ilustración 103. Resonancia del sistema con su frecuencia natural. (a) Frecuencia mínima en el sistema de 18.9 ciclos/s. (b) Frecuencia máxima en el sistema de 319.5 ciclos/s.

Se observa que los resultados son semejantes a los anteriores obtenidos, utilizando los resultados de frecuencia natural que salen de la simulación y con la ecuación [38] obtener la siguiente tabla:

Tabla 29. Resultados de desplazamiento de la resonancia en el modelo de los cálculos encontrados en la simulación.

| Resonancia del eje la fuerza teórica | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------|------------|---------------------|
| Frecuencia de resonancia(Hz) | Frecuencia de giro del sistema (Hz) | Peso (Kg) | Fuerza (N) | Desplazamiento (mm) |
| 18.92 | 1.2333 | 17.47 | 75.6 | 0.012140 |
| 19.0323 | 1.2333 | 17.47 | 75.6 | 0.011998 |
| 116.77 | 1.2333 | 17.47 | 75.6 | 0.000317 |
| 117.37 | 1.2333 | 17.47 | 75.6 | 0.000314 |
| 319.49 | 1.2333 | 17.47 | 75.6 | 0.000042 |

Eje macizo 1

Se hace una simulación sobre la unión que se acopla al tubo y a su vez se acopla contra el rodamiento para verificar cual es el desplazamiento lateral de este con el fin de verificar que este movimiento no afecte la pista de los rodamientos, se hace una simulación con 4762 elementos, se aplicó una fuerza en la parte inferior equivalente a la fuerza de reacción y se apoyó en la parte superior donde esta acoplada con el tubo.

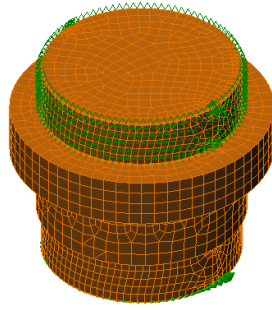


Ilustración 104. Eje macizo con maya y aplicación de la fuerza de reacción.

Se obtiene un esfuerzo de Von Mises máximo sobre el elemento de 8.8 N/m^2 sobre el borde inferior con un desplazamiento máximo de 0.000054 mm .

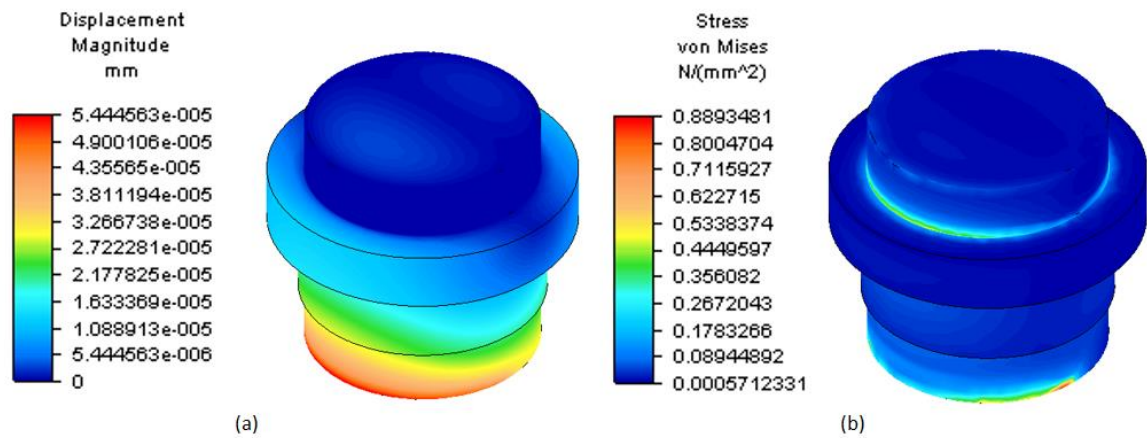


Ilustración 105. Simulación obtenida de la fuerza resultante. (a) desplazamiento generado. (b) esfuerzo de Von Mises aplicado en el eje.

Ahora se comprueba la resonancia del eje con el fin de corroborar que su desplazamiento no supere la tolerancia del rodamiento, a partir de la simulación se obtiene los desplazamientos en la resonancia mínima y máxima cuando el sistema está en su frecuencia natural.

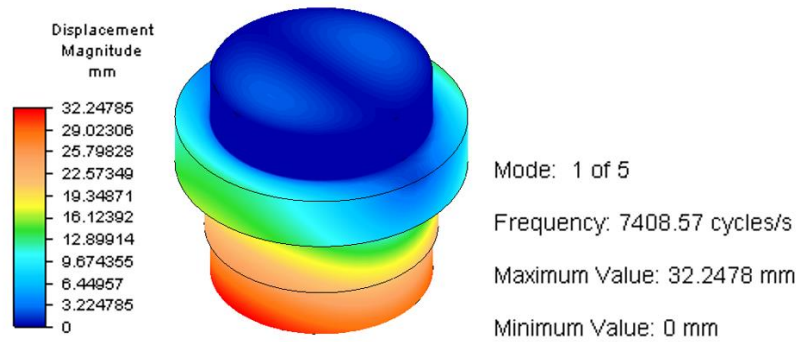


Ilustración 106. Desplazamiento máximo a la frecuencia mínima natural

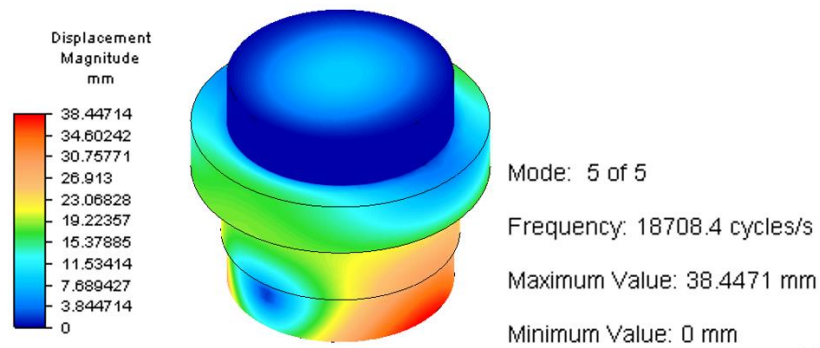


Ilustración 107. Desplazamiento máximo a la frecuencia máxima natural

A partir de la ecuación [38] se calculan los desplazamientos cuando el sistema rota a 74 RPM.

| Resonancia del eje macizo | | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|-----------|------------|---------------------|
| Frecuencia de resonancia(Hz) | Frecuencia de giro del sistema (Hz) | Peso (Kg) | Fuerza (N) | Desplazamiento (mm) |
| 7408.57 | 1.2333 | 4.25 | 75.6 | 0.00000032 |
| 7473.63 | 1.2333 | 4.25 | 75.6 | 0.00000032 |
| 11729.7 | 1.2333 | 4.25 | 75.6 | 0.00000013 |
| 14445.4 | 1.2333 | 4.25 | 75.6 | 0.00000009 |
| 18708.4 | 1.2333 | 4.25 | 75.6 | 0.00000005 |

Tabla 30. Desplazamientos del eje macizo cuando se encuentra girando a 74 RPM.

Base, refuerzos y mesa

Para la simulación se utiliza una maya de 11966 elementos, se tiene en cuenta el peso del componente como una fuerza descendente en z, sus apoyos está en las cuatro bridas superiores y no permiten ningún tipo de movimiento, además se aplicaron dos fuerzas una en la superficie superior del tubo central en dirección de menos z con una magnitud de 776.5 N (ilustración 108, peso del rotor) que representa el peso del rotor y todas sus partes y por otro lado se aplicó una fuerza en el borde superior de la circunferencia de 75.6 N que representa la fuerza de deflexión transmitida por el eje.

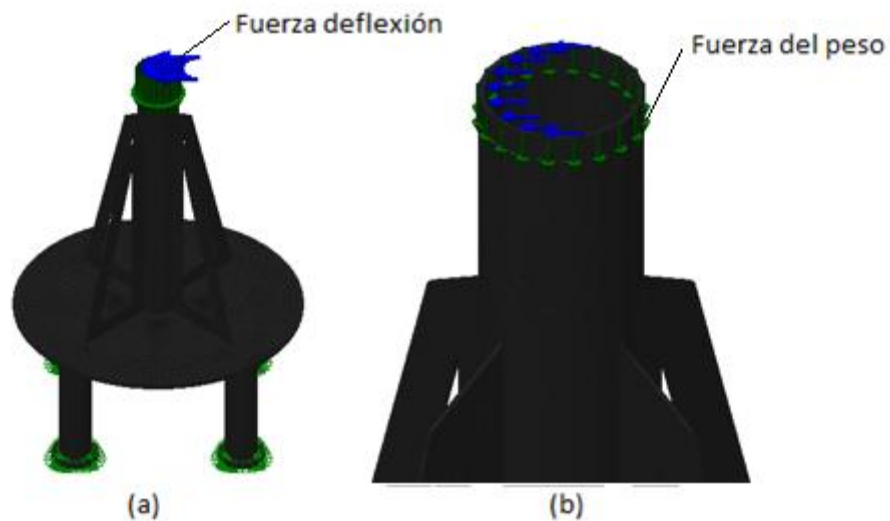


Ilustración 108. Distribución de las fuerzas y los apoyos sobre la pieza con maya. (a) isométrico. (b) Detalle de la parte superior.

Se obtiene el esfuerzo de 86.4 N/m^2 Von Mises máximo (ilustración 109, (b)) que es sometido a los paralelos de refuerzo que están soldados al tubo y a la base, además se consigue un desplazamiento máximo de 0.076 mm como magnitud total.

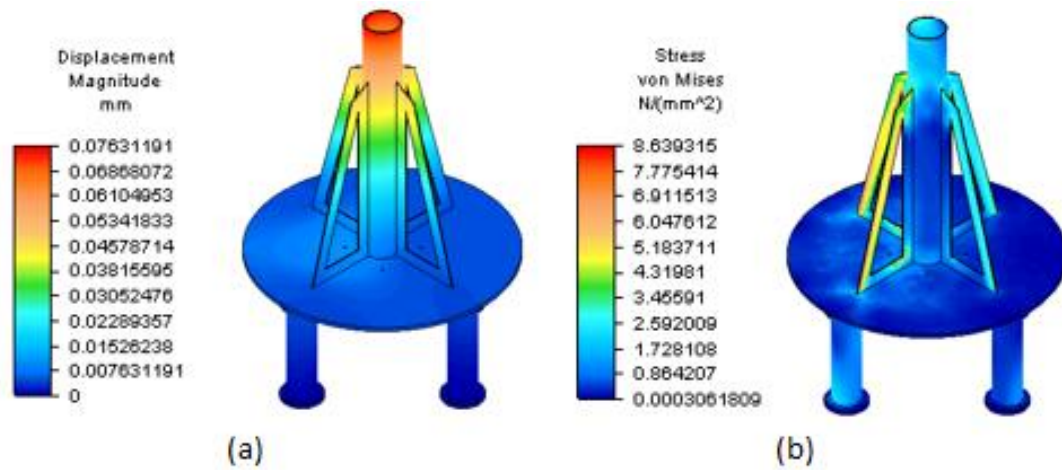


Ilustración 109. Simulación de la base sometida a las diferentes fuerzas. (a) Desplazamientos de la parte superior. (b) esfuerzos de Von Mises sobre la pieza.

Se encuentra los desplazamientos que tienen la pieza cuando es sometido a su resonancia natural.

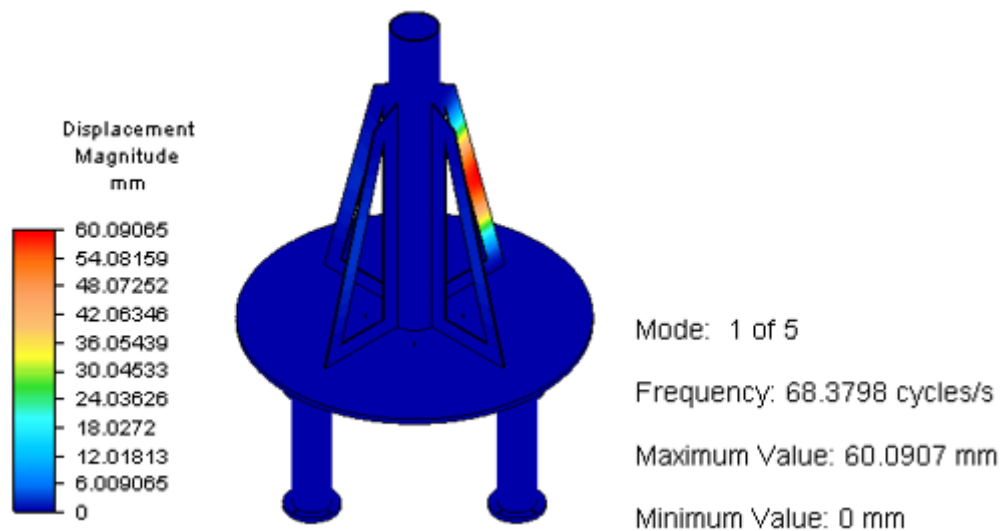


Ilustración 110. Desplazamiento con la frecuencia natural mínima.

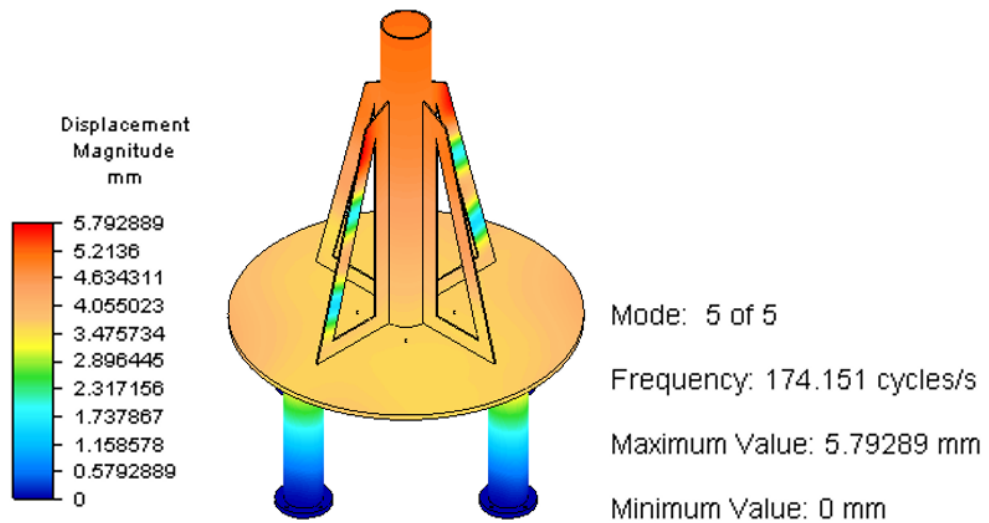


Ilustración 111. Desplazamiento con la frecuencia natural máxima.

Se corrobora mediante la ecuación [38] cuanto es el desplazamiento del elemento cuando es sometido a 74 RPM.

Tabla 31. Desplazamientos con las frecuencias naturales del sistema cuando es sometido a 74 RPM.

| Resonancia del Base | | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|-----------|------------|---------------------|
| Frecuencia de resonancia(Hz) | Frecuencia de giro del sistema (Hz) | Peso (Kg) | Fuerza (N) | Desplazamiento (mm) |
| 68.37 | 1.2333 | 78 | 75.6 | 0.000207 |
| 69.2744 | 1.2333 | 78 | 75.6 | 0.000202 |
| 69.3405 | 1.2333 | 78 | 75.6 | 0.000202 |
| 69.4467 | 1.2333 | 78 | 75.6 | 0.000201 |
| 174.15 | 1.2333 | 78 | 75.6 | 0.000032 |

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos durante el diseño conceptual y de detalle se llega a las siguientes conclusiones:

- A partir de las necesidades y medidas obtenidas en la etapa inicial del proyecto se definen 11 especificaciones de diseño, de las cuales la más importante es la velocidad de operación medida en la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia) sede Palmas o velocidad del viento promedio (3.88m/s), puesto que con este valor se realizan todos los cálculos que permiten dimensionar el aerogenerador vertical tipo Savonius.
- Al diseñar una estructura funcional que representa las interacciones entre energía, material y señal, se aclara notablemente el papel que cada una de las funciones posee en el sistema y como cada una de ellas aporta para conseguir su principal objetivo, que es el de generar energía eléctrica. En este concepto resulta determinante la función transmitir movimiento rotacional, ya que es responsable de convertir todo el flujo de materia y convertirlo para que se puedan dar decisivamente otras funciones así como sus interacciones. En la etapa posterior de diseño de detalle se comprueba su relevancia al determinar la morfología del generador y las medidas de otras soluciones dadas a diferentes funciones.
- El concepto de diseño seleccionado consta de un rotor en forma de Cs de longitud 2m y diámetro 1m que brinda una buena relación aerodinámica / facilidad de construcción, que esta acoplado a un eje apoyado en rodamientos de contacto angular a bolas que aportan poca fricción y soporta tanto fuerzas axiales como radiales. Un sistema de transmisión de engranes con una relación 1/8 permite mayor velocidad angular sobre el generador, el cual se construye a su vez como un generador síncrono de imanes permanentes. Además los voltajes generados pasan por un convertidor AC-DC, para ser almacenado en la batería de Pb-acido, luego el voltaje de la batería va a un inversor DC-AC que se conecta a la carga. Por otra parte un computador se encarga del sistema de control y proyección de variables claves.
- Para acotar el problema y enfocarlo hacia la solución, el diseño conceptual juega un gran papel, debido a que se enfoca hacia la solución de las necesidades, en el desarrollo surgen 5 conceptos los cuales se orientan al principal objetivo de la generación eléctrica, estos son elegidos ya que bibliográficamente las soluciones presentadas son las más utilizadas; se elige el concepto 2 debido a que presenta una menor oposición a las fuerzas de fricción en el eje para su rotación, gracias a sus rodamientos de contacto angular y además que la forma del rotor presenta ventajas tanto en la construcción como en su forma aerodinámica del tipo Cs que proporciona menor resistencia a los flujos de vientos que pueden frenar el sistema.
- El diseño de detalle se enfoca en primera instancia en calcular la potencia del viento que se puede obtener en las condiciones promedio de la Escuela de Ingeniería de Antioquia para luego delimitar un área efectiva del rotor. Con estos datos se

encuentra la potencia del generador eólico que resulta muy baja para las condiciones descritas en las especificaciones. Por ello se comparan los resultados obtenidos para la potencia, las revoluciones por minuto y torque con respecto al área de incidencia en el rotor entre ellos mismos, consiguiendo un área que aprovecha las tres características de la mejor manera posible. Con ello se deja de lado la especificación inicial de potencia para obtener un área que mejore la potencia generada. No obstante las dimensiones finales se limitan en un rango de fácil construcción, por consiguiente se elige un área de 2m^2 que se encuentra distribuida en 2m de altura y 1m de diámetro.

- Durante el diseño de detalle por medio de herramientas CAD se considera el mayor uso de piezas comerciales como tubos, tornillería, calibres de láminas, platinas; de las cuales se modifican algunas mediante uso de maquinarias como tornos y fresadoras, que permiten dar la forma diseñada a las piezas utilizadas. Esto se determina debido a que se desea eliminar mayores trabajos de maquinado, así como también se eligen para la facilidad de adquisición de materiales y mantenimiento de las partes averiadas.
- La construcción y cálculo del generador eléctrico se realizó debido a los problemas habituales que se encuentran en el medio relacionados con el bajo torque que pueden generar los rotores Savonius, bajo las condiciones de la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia) sede Palmas. Es por esto que se implementa y calcula un generador eléctrico síncrono de imanes permanentes, el cual posee la gran característica que su torque de arranque es muy bajo ya que solamente en el momento inicial de arranque se debe vencer la inercia del sistema generador eléctrico, haciendo que el aerogenerador tenga la posibilidad de producir más energía eléctrica con menos velocidades del viento.
- La utilización de herramientas CAD ayuda al dimensionamiento tridimensional de todo el aerogenerador, permitiendo llegar a un detalle en las partes más complejas como lo es el acople de las aspas. Además el uso de esta herramienta es un apoyo esencial a la hora de realizar cálculos como centros de masa, inercias y peso de las partes que componen el dispositivo, cálculos que aportan a la validación de los modelos matemáticos y para la simulación en la herramienta FEA.
- Según la simulación que se realiza en la herramienta CFD, que usa una velocidad del viento de 3.88 m/s sobre el rotor, se observan líneas de flujo entrando entre las aspas, además se genera una presión de 15Pa que aporta el torque para el movimiento del rotor. Por otra parte la deflexión máxima es aproximadamente 0.2mm, tanto para fuerza de impacto calculada como la resultante de la simulación del viento. Cabe resaltar que los resultados obtenidos mediante la simulación por elementos finitos no difieren en más de un 10% con respecto a los cálculos analíticos del mismo, ello permite inferir dos cosas. Primero la verificación del desempeño del simulador y por otro, el rigor del análisis estático que se llevó a cabo.

6. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos durante el diseño conceptual y de detalle se llega a las siguientes recomendaciones:

- Queda abierta la posibilidad de la implementación física del dispositivo, gracias a toda la información entregada en este documento como bocetos en 3D, espesores, diámetros, parámetros importantes que están estandarizados comercialmente y demás planos del ensamble principal y de todas las piezas del dispositivo.
- Evaluar con más detalle la frecuencia y duración de los vientos de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, lo que incluye buscar una toma de datos certificada, ya que los datos con los que se realizó el trabajo son datos tomados por la misma universidad mas no son certificados y no se conoce si realmente los dispositivos de medida están bien calibrados.
- Se recomienda hacer una revisión más profunda del comportamiento y naturaleza del generador eléctrico de imanes permanentes, ya que en este documento solamente se muestran los principios básicos de funcionamiento.
- Se recomienda hacer una evaluación sobre la eficiencia de un rotor que posea 2 etapas sobre las condiciones meteorológicas presentes es la EIA (Escuela de Ingeniería de Antioquia), con el fin de corroborar o mejorar el diseño presentado en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Industrial Mining y Compañía.* (s.f.). Obtenido de <http://www.lbaindustrial.com.mx/products/aerogeneradores-de-eje-vertical/>
- Salas Coronel , H., & Berg, H. (1996). *Delta Volt*. Recuperado el 14 de Septiembre de 2013, de Delta Volt: <http://deltavolt.pe/baterias>
- Abarzúa Martínez, A. A. (2012). *ASPECTOS DE DISEÑO DE GENERADORES SINCRÓNICOS DE FLUJO AXIAL PARA LA APLICACIÓN EN AEROGENERADORES*. SANTIAGO DE CHILE .
- ABB. (s.f.). *Cuaderno de aplicaciones técnicas n12. Plantas eólicas*.
- adrformacion.* (2013). Obtenido de <http://www.adrformacion.com/cursos/eolica/leccion1/tutorial2.html>
- Arbeloa Sola, L., & Zurita Gabasa, J. (2012). *DISEÑO DE UN AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA ELECTRIFICACIÓN RURAL*. Universidad pública de Navarra, Pamplona.
- Baillarie Rosenmann, P. (2007). *DISEÑO DE AEROGENERADORES CON IMANES PERMANENTES PARA APLICACIONES EN ELECTRIFICACIÓN RURAL*. Universidad de Chile, Ingeniería eléctrica, Santiago de Chile.
- Barbero García, A. J. (2012). *Universidad de Castill La Mancha*. Obtenido de http://www.uclm.es/profesorado/ajbarbero/FAA/EEOLICA_Febrero2012_G9.pdf
- Berenguer Soler, J. (2011). *Diseño de un sistema de control de potencia aplicado a energías renovables*. Tesis, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Departamento de Electricidad (DEE), Barcelona.
- Betz, A. (1926). *Wind-Energie*.
- Boronat, R., & García, M. (2011). *El vehículo eléctrico* (Primera ed.). Barcelona: Libbooks barcelona S.L.L.
- Bosch. (2000). *Sistemas eléctricos y electrónicos para automóviles* (Primera ed.). (R. B. GmbH, Ed.) Alemania.
- Castaño, A. R. (2008). *UNIDAD V: INDUCCION ELECTROMAGNETICA*. UNNE, Facultad de Ingeniería.
- CHANDRA BALINENI, S., RAMA KRISHNA.R, S., KUMAR, B., & KUMAR, G. (2007-2011). *DESIGN AND FABRICATION OF SAVONIUS VERTICAL AXIS WIND TURBINE*. Trabajo de grado, GOKARAJU RANGARAJU INSTITUTE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY.

- Clausen, P. (2000). Recent Advances in Small Wind Turbine Technology. *Wind Engineering*, 24(3), 189-201.
- Cobo, R. (2013). *El ABC de la automatización*.
- Cruz Escalona, M., Guzman Arguis, V. M., Giménez, M. I., Fernández, H., & Restrepo, J. (2009). Emulador Eólico para aerogeneradores de baja potencia. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 13, 329-338.
- Cuesta Santianes, M. J., Pérez Martínez, M., & Cabrera Jiménez, J. A. (2008). *AEROGENERADORES DE POTENCIA INFERIOR A 100kW*. Centro de investigaciones energéticas medio ambientales y tecnológicos.
- DiPrátula, H. R. (2009). *Centro de estudiantes de ingeniería y agrimensura*. Obtenido de <http://www.ceia.uns.edu.ar/cursos/Eolica09/4atecnologia%20aerog%20primer%20parte.pdf>
- Donald G, B. (2011). *Desing for Embedded image processing on FPGAs*. Noida: John Wiley & Sons.
- EcoSource. (2008). *EcoSource*. Recuperado el 16 de 08 de 2013, de http://www.ecosources.info/dossiers/Eolienne_verticale_Darrieus
- e-educativa. (2013). *e-educativa*. Obtenido de http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2556/html/5_circulacion_general_de_la_atmosfera.html
- Electrónica, D. (2013). *Universidad técnica Federico Santamaría*. Recuperado el 24 de 08 de 2013, de <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/PresentacionBaterias.pdf>
- Elswick, S. R. (2005). Bridging the Gap ... Between Conventional ... and ExtraOrdinary! *ExtraOrdinary Technology*, 3(1).
- Escuelas, O. (21 de 09 de 2013). *Olimpiadas Nacionales de Contenidos Educativos en Internet*. Obtenido de http://www.oni.escuelas.edu.ar/http://www.oni.escuelas.edu.ar/2004/SAN_JUAN/676/eolica_y_molinos/capitulo_1/cap_1_2.htm
- FAG. (2000). *Rodamientos FAG*. Barcelona: FAG Sales Europe GmbH.
- Fernández Díez, P. (s.f.). *Energía Eólica*. Universidad de Cantabria, Ingeniería eléctrica y energética.
- Fernández Muerza, A. (21 de Julio de 2011). *Consumer*. Obtenido de http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2011/05/09/200475.php
- Fink, D. G., Beaty, H. W., & Carroll, J. M. (1984). *Manual Práctico de electricidad para ingenieros* (Onceava ed.). España: Reverté.

- Funes Ruiz, J. (2009). *Análisis simplificado de la respuesta estructural de una pala de aerogenerador*. Tesis, Universidad Carlos III de Madrid, Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras, Madrid.
- Gaessa. (2013). Gaessa. Obtenido de http://www.gaessa.com/GAES/Castellano/Productos/Transmisiones/Engranajes/MODULOS_1_A_2,5.shtml
- garcerá Sanfelín, G., Figueres Amorós, E., & Abellán García, A. (1998). *Convertidores conmutados: Circuitos de potencia y control*. Servicio de publicaciones.
- García Villas, M. (1999). *Energía solar fotovoltaica y cooperación al desarrollo* (Sexta ed.). Madrid: IEPALA.
- Gerling, H. (1984). *Alrededor de las máquinas-herramientas* (Tercera ed.). Reverté.
- gienuevasenergias*. (s.f.). Obtenido de http://gienuevasenergias.wikispaces.com/file/view/eolien_vertical_darrieus.png/335047292/eolien_vertical_darrieus.png
- Gil, A. (2012). *Resinas de poliéster*. Eafit.
- González Santaló, J. M. (Octubre-Diciembre-09). La generación eléctrica a partir de combustibles fósiles. *Boletín*, 143-151.
- Gray, N. C., Lewis, J. H., MacLean, A., Naskali, P. H., & Newall, A. P. (18 de mayo de 2008). *EEUU Patente nº US7344353 B2*.
- Guerreo, V., Martínez, L., & Yuste, R. L. (2009). *Comunicaciones industriales*. España: Marcombo.
- Hernández Albadalejo, M. (1997). *Introducción al diseño asistido por computadora*. Servicio de Publicaciones.
- Hibbeler, R. (2006). *Mecánica de materiales* (Sexta ed.). Pearson prentice hall.
- HidroAir. (15 de 09 de 2013). <http://www.hidroair.com/news.php>. Obtenido de http://www.hidroair.com/e107_files/downloads/Humedad.pdf
- Hyde, J., Cuspinera, A., & Regué. (1997). *Control Electroneumático y electrónico*. Norgren.
- J.Sargolzaei. (2007). Prediction of the power ratio in wind turbine Savonius rotors using artificial neural networks. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT*, 51-53.
- Juntadeandalucia. (2013). Juntadeandalucia. Obtenido de http://agrega.juntadeandalucia.es/repositorio/28072010/ea/es-an_2010072811_9130111/ODE-a3165554-259e-3c06-b5c2-e07699c4b688/15_fenmenos_meteorolgicos.html

- Kosow, I. L. (1991). *Máquinas eléctricas y transformadores* (Segunda ed.). Mexico: Prentice-Hall Hispanoamericana s.a.
- Mandado Pérez, E., & Mandado Rodríguez, Y. (2012). *Sistemas electrónicos digitales*. Barcelona: Marcombo, AlfaOmega grupo editor S.S.
- melecsa. (s.f.). Obtenido de https://www.melecsa.com/index.php?option=com_content&view=article&id=39&Itemid=80&lang=es
- Montoya, Y. (4 de 10 de 2013). Factores de seguridad. (N. Arbeláez Jaramillo, & D. Ochoa Palacio, Entrevistadores)
- Moragues, J., & Rapallini, A. (2003). ENERGIA EOLICA. 22.
- Moreno Figueredo, C. (2013). *La veleta en los molinos de viento*. Obtenido de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia58/HTML/articulo02.htm>
- Norton, R. (2000). *Diseño de maquinaria*. McGraw-Hill.
- Ohio, G. E. (s.f.). *Green Energy Ohio*. Recuperado el 2013 de 07 de 26, de <http://www.greenenergyohio.org/page.cfm?pagelid=341>
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. (2007). *Engineering Design A Systematic Approach* (Tercera ed.). Springer.
- Pasionporvolar. (20 de Enero de 2013). *Pasionporvolar*. Obtenido de <http://www.pasionporvolar.com/concepto-de-altitud-de-densidad/>
- Peralta, J. A., Reyes López, P., & Godínez Muñoz, A. (2009). *El fenómeno de la resonancia*. Instituto Politécnico, Departamento de Física, Escuela Superior de Física y Matemáticas, México D.F.
- PhoenixContact. (2013). *Phoenix Contact*. Obtenido de http://www.phoenixcontact.com.mx/industries/27707_28352.htm
- Regenbat. (10 de octubre de 2013). *Regenbat*. Obtenido de <http://www.regenbat.com/>
- Sánchez Salazar, Ó. (2013). *Generador Sincrónica*.
- SEaB Energy. (2009). Obtenido de <http://seabenergy.com/windbuster-products/#sthash.DCJpxxqn.WPg6D17w.dpbs>
- Seguro, J., & Lambert, T. (2000). Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 75-84.
- Senner, A. (1994). *Principios de electronica*. España: Reverté s.a.

- Sheldahl, R., & Klimas, P. (1981). *Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*. Albuquerque: Sandia National Laboratories.
- Solutions, A. K. (2007). *Robotics*. Infinity Science Press LLC.
- Song, Q. (2012). *Design, Fabrication, and Testing of a New Small Wind Turbine Blade*. Tesis, The University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada.
- Suárez Álvarez, N. (2011). *Farola Híbrida: Diseño estructural y materiales*.
- UdeA. (2013). [www.docencia.udea.edu.co](http://docencia.udea.edu.co/regionalizacion/irs-404/contenido/capitulo10.html). Obtenido de <http://docencia.udea.edu.co/regionalizacion/irs-404/contenido/capitulo10.html>
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2005). *Diseño y desarrollo de productos* (Tercera edición ed.). Mc Graw Hill.
- UNAD. (22 de 09 de 2013). *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*. Obtenido de http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358026/358026/leccin_11_clasificacin_de_los_vientos.html
- Vanegas Useche, L. (2012). *Introducción a los accionamientos de máquinas*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, Pereira.
- Vicente Akwa, J., Antonio Vielmo, H., & Prisco Petry, A. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Wind-data*. (s.f.). Recuperado el 2013 de 11 de 9, de <http://www.wind-data.ch/tools/weibull.php>
- Yaakob, O., Ahmed, Y. M., & Ismail, M. (3-4 de Septiembre de 2012). Validation Study for Savonius Vertical Axis Marine Current Turbine Using CFD Simulation. *The 6th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics-APHydro2012*.

ANEXO 1

- [1] J.Sargolzaei. (2007). Prediction of the power ratio in wind turbine Savonius rotors using artificial neural networks. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT*, 51-53.
- [2] J.Sargolzaei. (2007). Prediction of the power ratio in wind turbine Savonius rotors using artificial neural networks. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT*, 51-53.
- [3] Benesh, A. H. (27 de Febrero de 1996). Patente nº 5494407. United States.
- [4] FAG. (2000). Rodamientos FAG. Barcelona: FAG Sales EuropeGmbH.
- [5] FAG. (2000). Rodamientos FAG. Barcelona: FAG Sales EuropeGmbH.
- [6] FAG. (2000). Rodamientos FAG. Barcelona: FAG Sales EuropeGmbH.
- [7] Norton, R. (2000). *Diseño de maquinaria*. McGraw-Hill.
- [8] WestermannVerlag, G. (2003). *Alrededor del Torno*. España: Reverté S.A.
- [9] Gerling, H. (1984). *Alrededor de las máquinas-herramientas (Tercera ed.)*. Reverté.
- [10] Kosow, I. L. (1991). *Máquinas eléctricas y transformadores (Segunda ed.)*. Mexico: Prentice-Hall Hispanoamericana s.a.
- [11] Kosow, I. L. (1991). *Máquinas eléctricas y transformadores (Segunda ed.)*. Mexico: Prentice-Hall Hispanoamericana s.a.
- [12] Senner, A. (1994). *Principios de electronica*. España: Reverté s.a.
- [13] Bosch. (2000). *Sistemas eléctricos y electrónicos para automóviles (Primera ed.)*. (R. B. GmbH, Ed.) Alemania.
- [14] Boronat, R., & García, M. (2011). *El vehículo eléctrico (Primera ed.)*. Barcelona: Libbooksbarcelona S.L.L.
- [15] Fink, D. G., Beaty, H. W., & Carroll, J. M. (1984). *Manual Práctico de electricidad para ingenieros (Onceava ed.)*. España: Reverté.
- [16] Garcerá Sanfelín, G., Figueres Amorós, E., & Abellán García, A. (1998). *Convertidores conmutados: Circuitos de potencia y control*. Servicio de publicaciones.
- [17] García Villas, M. (1999). *Energía solar fotovoltaica y cooperación al desarrollo (Sexta ed.)*. Madrid: IEPALA.
- [18] Solutions, A. K. (2007). *Robotics*. Infinity Science Press LLC.

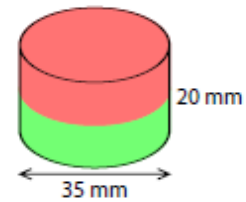
- [19] Mandado Pérez, E., & Mandado Rodríguez, Y. (2012). Sistemas electrónicos digitales. Barcelona: Marcombo, AlfaOmega grupo editor S.S.
- [20] Hernández Albadalejo, M. (1997). Introducción al diseño asistido por computadora. Servicio de Publicaciones.
- [21] Guerreo, V., Martínez, L., & Yuste, R. L. (2009). Comunicaciones industriales. España: Marcombo.
- [22] Donald G, B. (2011). Desing for Embedded image processing on FPGAs. Noida: John Wiley&Sons.
- [23] Hernández Albadalejo, M. (1997). Introducción al diseño asistido por computadora. Servicio de Publicaciones.

ANEXO 2

A continuación se muestran las características de los imanes.

1. Datos técnicos

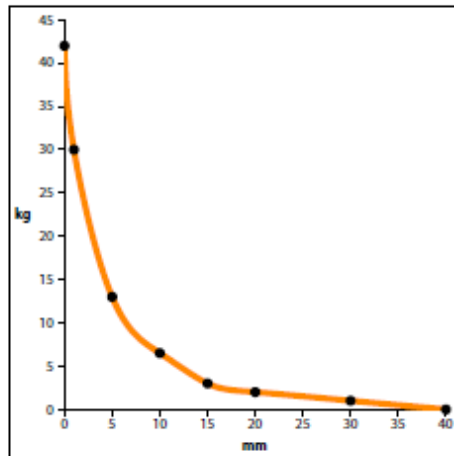
| | | |
|------------------------------|------------------------------|---------------|
| Artículo | S-35-20-N | |
| Forma | Disco | |
| Diámetro | 35 mm | |
| Altura | 20 mm | |
| Tolerancia de la longitud | +/- 0,1 mm | |
| Sentido de magnetización | axial (paralelo a la altura) | |
| Material | NdFeB (Neodimio-hierro-boro) | |
| Tipo de recubrimiento | Níquel (Ni-Cu-Ni) | |
| Fza. sujec. | aprox. 38 kg | aprox. 377 N |
| Peso | 146,241 g | |
| Tipo de fabricación | sinterizado | |
| Magnetización (Calidad) | N45 | |
| Temperatura de servicio máx. | 80 °C | |
| Temperatura de Curie | 310 °C | |
| Remanencia Br | 13200-13700 G | 1.32-1.37 T |
| Coercitividad bHc | 10.8-12.5 kOe | 860-995 kA/m |
| Coercitividad iHc | ≥12 kOe | ≥955 kA/m |
| Producto energético (BxH)max | 43-45 MGOe | 342-358 kJ/m³ |



Sin sustancias nocivas conforme a la directiva RoHS 2002/95/CE.
No sujeto a la obligatoriedad de registro conforme a REACH.


2. Diagrama de fuerza de sujeción

Fuerza de sujeción en función del hueco entre el imán y la placa de acero.



ANEXO 3

Se presenta una descripción de las baterías seleccionadas.

| UCG150-12 | | Physical Specification | |
|---|--|--|------|
|  | | <p>Part Number: UCG150-12</p> <p>Length: 485 ± 2 mm (19.09 inches)</p> <p>Width: 170 ± 2 mm (6.69 inches)</p> <p>Container Height: 240 ± 2 mm (9.45 inches)</p> <p>Total Height (with terminal): 240 ± 2 mm (9.45 inches)</p> <p>Approx Weight: Approx 44 kg</p> | |
| Specifications | | | |
| | Nominal Voltage | 12V | |
| | Nominal Capacity (10HR) | 150AH | |
| Terminal Type | Standard Terminal | F10 | |
| | Optional Terminal | F11 | |
| Container Material | Standard Option | ABS | |
| | Flame Retardant Option (FR) | ABS (UL94:VO) | |
| Rated Capacity | 160.8 AH/8.04A | (20hr, 1.80V/cell, 25°C / 77°F) | |
| | 150.0 AH/15.0A | (10hr, 1.80V/cell, 25°C / 77°F) | |
| | 131.6 AH/26.3A | (5hr, 1.75V/cell, 25°C / 77°F) | |
| | 119.3 AH/39.8A | (3hr, 1.75V/cell, 25°C / 77°F) | |
| | 96.9 AH/96.9A | (1hr, 1.80V/cell, 25°C / 77°F) | |
| Max Discharge Current | 1500A (5s) | | |
| Internal Resistance | Approx 2.5mΩ | | |
| Discharge Characteristics | Operating Temp. Range | Discharge: -20 ~ 55°C (-4 ~ 131°F) | |
| | | Charge: 0 ~ 40°C (32 ~ 104°F) | |
| | | Storage: -20 ~ 50°C (-4 ~ 122°F) | |
| | Nominal Operating Temp. Range | 25 ± 3°C (77 ± 5°F) | |
| | Cycle Use | Initial Charging Current less than 45.0A. Voltage 14.4V ~ 15.0V at 25°C (77°F) Temp. Coefficient -30mV/°C | |
| | Standby Use | No limit on Initial Charging Current Voltage 13.5V ~ 13.8V at 25°C (77°F) Temp. Coefficient -20mV/°C | |
| | Capacity affected by Temperature | 40°C (104°F) | 103% |
| 25°C (77°F) | | 100% | |
| 0°C (32°F) | | 86% | |
| Design Floating Life at 20°C | 15 Years | | |
| Self Discharge | Ultracell batteries may be stored for up to 6 months at 25°C(77°F) and then a refresh charge is required. For higher temperatures the time interval will be shorter. | | |

ANEXO 4

A continuación se presenta las características del inversor.

| PW200-12 | |
|----------------------------|---------------|
| Continued Power | 200W |
| Peak Load Power Rate | < 400W |
| Input DC Voltage Range | 10-15.5V |
| No Load Current Draw | < 0.1A |
| Output Frequency Range | 60 +/- 3Hz |
| Output Voltage Range | 117 +/- 10% |
| Max Power Efficiency | > 90% |
| Max Outer Temperature | < 65 C |
| Low Voltage Alarm Level | 10.5 +/- 0.5V |
| High Voltage Cut Off Level | 15.5 +/- 1V |
| Short Protect | Yes |
| Low Voltage Cut Off Level | 10 +/- 0.5V |
| Dimension (LxWxH) in | 5.59 x 5 x 2 |
| Overload Protect | Yes |
| Input Voltage | DC 12V |
| Weight | 5 lbs |

ANEXO 5

Los planos de las piezas que conforman el aerogenerador tipo Savonius se encuentran adjuntos en la carpeta que contiene este archivo.



ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA

ACTA DE EVALUACIÓN FINAL DE TRABAJO DE GRADO

| | | | | | | | |
|---|---|-----------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| Fecha: (dd /mm / aa) | 18 /11/ 2013 | | | | | | |
| Nombre del Proyecto: | Diseño de una Bomba Micro-Infusora de Insulina mediante Tecnologías de Bajo Costo | | | | | | |
| Nombre del Director: | Pedro León Simanca | | | | | | |
| <table border="1"> <tr> <td>Nombre del estudiante</td> <td>Programa académico</td> </tr> <tr> <td>David Betancur Fernández</td> <td>Ingeniería Mecatrónica</td> </tr> <tr> <td>Laura Restrepo Vargas</td> <td>Ingeniería Mecatrónica</td> </tr> </table> | | Nombre del estudiante | Programa académico | David Betancur Fernández | Ingeniería Mecatrónica | Laura Restrepo Vargas | Ingeniería Mecatrónica |
| Nombre del estudiante | Programa académico | | | | | | |
| David Betancur Fernández | Ingeniería Mecatrónica | | | | | | |
| Laura Restrepo Vargas | Ingeniería Mecatrónica | | | | | | |
| Nombre del Jurado: | <i>Rigoberto Maldonado T.</i> | | | | | | |
| Evaluación del proyecto: Espacio exclusivo para jurado | | | | | | | |
| <input type="checkbox"/> No aprobado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado sin mención <input type="checkbox"/> con Mención Pública <input type="checkbox"/> con Mención honorífica <input type="checkbox"/> Trabajo laureado | | | | | | | |
| Justificación del reconocimiento: (Artículo 28 del Acuerdo 11: "El director del Programa presentará el acta final de evaluación al Consejo Académico, donde consta la solicitud de mención especial debidamente justificada y el Consejo determinará si se otorga o no") | | | | | | | |

[Signature]
 DIRECTOR DEL PROGRAMA

[Signature]
 DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

[Signature]
 JURADO (si lo hubo)