

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Fabricación de un prototipo de generador eólico para
replicación e implementación en comunidades**

Trabajo de graduación presentado por Jorge Antonio Fuentes
Valenzuela para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecánica Industrial

Guatemala,

2022

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Fabricación de un prototipo de generador eólico para
replicación e implementación en comunidades**

Trabajo de graduación presentado por Jorge Antonio Fuentes
Valenzuela para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecánica Industrial

Guatemala,

2022

Vo.Bo.:

(f) 

Ing. César Rosales

Tribunal Examinador:

(f) 

Rony Herrarte

(f) 

Andrés Vian

(f) 

César Rosales

Fecha de aprobación: Guatemala, 20 de Junio de 2022.

El acceso a la energía eléctrica es fundamental para el desarrollo de un país, pero lastimosamente en Guatemala existe una gran cantidad de personas que no cuentan con acceso a este recurso. Como futuro profesional considero que los conocimientos adquiridos en esta carrera no son únicamente para desarrollar una vida profesional, sino también para contribuir al desarrollo de Guatemala. Por lo que el objetivo de este trabajo de graduación es presentar una solución a esta problemática, por medio de un prototipo de turbina eólica que sea accesible y replicable para aquellos que no cuentan con acceso a energía eléctrica.

Primero que nada, quiero agradecer a Dios por todas las bendiciones que me ha dado, por acompañarme durante todo este proceso y por la oportunidad de alcanzar esta meta. Agradezco a mis padres y abuela, por darme el apoyo y oportunidad de estudiar en esta universidad y alcanzar una carrera profesional. Agradezco a mis hermanos, por el apoyo que me han entregado a lo largo de esta etapa. Agradezco a mi padre, por todos los conocimientos, formación y apoyo que han sido fundamentales para cumplir esta meta.

Agradezco a mi asesor, Ingeniero Cesar Rosales, por todo el apoyo que me ha dado para concluir este proyecto. Agradezco a la Universidad del Valle de Guatemala y al departamento de Ingeniería Mecánica, por los conocimientos adquiridos y la oportunidad de alcanzar una carrera profesional.

Prefacio	v
Lista de figuras	XIII
Lista de cuadros	XVI
Resumen	XVII
Abstract	XIX
1. Introducción	1
2. Justificación	3
3. Objetivos	5
3.1. Objetivo general	5
3.2. Objetivos específicos	5
4. Marco teórico	7
4.1. Cobertura de la red eléctrica nacional	7
4.2. Viento en Guatemala	8
4.3. Energía eólica	11
4.3.1. Potencia del viento	11
4.3.2. Coeficiente de potencia	12
4.3.3. Área de barrido	13
4.3.4. Relación de velocidad en la punta del aspa	13
4.4. Turbinas eólicas	14
4.4.1. Tipos de turbinas eólicas	14
4.4.2. Eficiencia práctica	14
4.4.3. Configuración básica de una pequeña turbina eólica	16
4.5. Velocidades de viento	16
4.6. Aspas	18
4.7. Generadores eléctricos	19

4.7.1.	Generadores de inducción	19
4.7.2.	Generadores para pequeñas turbinas eólicas	20
4.8.	Baterías	20
4.8.1.	Baterías LA	20
4.9.	Inversores	21
4.10.	Mantenimiento	21
5.	Metodología	23
5.1.	Requisitos	24
5.2.	Diseño y cálculos	25
5.2.1.	Diseño CAD	25
5.2.2.	Selección del tipo de turbina	28
5.2.3.	Selección del generador	28
5.2.4.	Selección de la batería	31
5.2.5.	Reguladores de voltaje	32
5.2.6.	Aspas	33
5.2.7.	Rotor	41
5.2.8.	Estructura	42
5.2.9.	Torre	53
5.2.10.	Selección de rodamiento	56
5.2.11.	Pernos	58
5.2.12.	Soldadura	69
5.3.	Fabricación del prototipo	73
5.3.1.	Obtención de los materiales y componentes	73
5.3.2.	Fabricación del rotor	74
5.3.3.	Fabricación de las aspas	75
5.3.4.	Fabricación de la estructura	75
5.3.5.	Fabricación de la aleta	76
5.3.6.	Fabricación de la torre	76
5.3.7.	Fabricación del circuito eléctrico para almacenar la energía generada	77
5.3.8.	Ensamble del prototipo	80
6.	Resultados	83
6.1.	Prototipo fabricado	83
6.2.	Pruebas de funcionamiento	84
6.2.1.	Protocolo de pruebas	84
6.2.2.	Resultados de las pruebas de funcionamiento	85
6.3.	Resultados del aprovechamiento de la energía generada	89
6.3.1.	Proyección del tiempo de carga completa de la batería	89
6.3.2.	Duración de un foco LED encendido	89
6.3.3.	Porcentaje de aumento de la carga de un teléfono celular	90
6.4.	Costos del prototipo	92
6.5.	Manual de fabricación del prototipo	93
6.6.	Planos para la fabricación del prototipo	93

7. Análisis de los resultados	95
7.1. Prototipo fabricado	95
7.2. Pruebas de funcionamiento	98
7.3. Aprovechamiento de la energía generada	100
7.4. Costos del prototipo	102
7.5. Manual de fabricación del prototipo	103
7.6. Funcionamiento del prototipo	104
8. Conclusiones	109
9. Recomendaciones	111
10. Bibliografía	113
11. Anexos	117
11.1. Diagramas de los circuitos eléctricos y especificaciones de los componentes electrónicos.	117
11.2. Obtención de los materiales	120
11.3. Fabricación del prototipo	121
11.4. Pruebas del prototipo	122
11.5. Manual de fabricación del prototipo	126
11.6. Planos de construcción	127

Lista de figuras

1.	Gráfica del índice de cobertura eléctrica por departamento.	7
2.	Mapa de cobertura eléctrica 2016.	8
3.	Mapa de velocidad de viento en Guatemala.	9
4.	Gráfica de promedios mensuales de velocidad de viento en m/s para ocho sitios medidos en el año 2010.	10
5.	Gráfica de promedios mensuales de velocidad en m/s para cuatro sitios medidos en el año 2014	10
6.	Gráfica de velocidad promedio anual en m/s por departamento del año 2018 .	11
7.	Coefficiente de potencia de generadores eólicos según su diseño	12
8.	Área de barrido de una turbina HAWT.	13
9.	Tipos de turbinas eólicas. (a) Turbinas de eje horizontal. (b) Turbinas de eje vertical	14
10.	Eficiencia práctica de diferentes diseños de turbinas eólicas.	15
11.	Configuración típica de una pequeña turbina de eje horizontal.	16
12.	Curva típica de potencia de una turbina eólica.	17
13.	Especificaciones del fabricante de algunas de las turbinas utilizadas en el estudio.	17
14.	Diseño del largo del aspa y de la cuerda.	18
15.	Perfiles de aspa estándares de NACA	18
16.	Aspas de PVC utilizadas en el prototipo de turbina eólica fabricado por Simon.	19
17.	Ensamble final del modelo 3D de la turbina (Vista isométrica, frontal y de lado).	25
18.	Modelo 3D de la turbina (Vista isométrica, frontal y de lado)	25
19.	Estructura de la turbina (Vista isométrica, de planta y frontal).	26
20.	Aspa de tubo PVC (Vista isométrica, de planta y frontal).	26
21.	Aleta de la cola (Vista frontal).	27
22.	Placas base de la chumacera y del motor (Vistas isométricas)	27
23.	Peso ponderado de los factores de selección.	30
24.	Matriz de ponderación del motor a utilizar.	30
25.	Batería marca <i>Steren</i> , sellada, de ácido-plomo de 12V y 7 Ah.	32
26.	Módulo regulador de voltaje MT3608.	32
27.	Módulo regulador de voltaje LM2596 de 5 V.	33
28.	Aspa de la turbina modelada como una columna en voladizo.	35

29.	DCL del aspa.	37
30.	Trazado del corte diagonal sobre las aspas de PVC.	40
31.	Las aspas de la turbina cortadas a su forma final. Este diseño incluye un corte en diagonal en el extremo inferior del aspa, con el fin de evitar el contacto entre estas al momento de instalarlas en el rotor.	41
32.	Diagrama de las dimensiones principales de la estructura.	43
33.	DCL de la estructura de la turbina.	44
34.	DCL de la estructura de la base del motor.	45
35.	DCL de la estructura de la cola en el plano x-y.	45
36.	DCL de la estructura de la cola en el plano z-x.	46
37.	DCL de la aleta de la cola.	50
38.	DCL placa de la base del motor.	51
39.	DCL de la placa de la base de la chumacera.	51
40.	Bases para torres estructurales.	53
41.	DCL de la torre.	54
42.	Selección de la chumacera a utilizar.	57
43.	Selección del rodamiento a utilizar.	58
44.	DCL del rotor y sus aspas unidas por los pernos.	59
45.	DCL del sistema de pernos de las aspas.	59
46.	DCL de los pernos de la base de la chumacera.	60
47.	DCL de los pernos de la aleta.	60
48.	Tabla 8-11, clases métricas de propiedad mecánicas de pernos, tornillos y birlos de acero*.	62
49.	DCL del sistema de pernos para la base del motor.	64
50.	DCL de los pernos de la base de la chumacera.	64
51.	DCL de la placa de la base de del motor soldada al tubo cuadrado estructural.	70
52.	DCL de la placa de la base de la chumacera soldada al tubo cuadrado estructural.	70
53.	Tabla 9-3, propiedades mínimas del metal de aporte.	71
54.	Tabla 9-4, esfuerzos permisibles del Código AISC para metal de aporte.	72
55.	Rotor con el primer juego de agujeros perforados.	74
56.	Aspas en su forma final y parte del equipo para marcar los cortes.	75
57.	Estructura del prototipo.	76
58.	Aleta del prototipo.	76
59.	Diagrama del circuito eléctrico de carga.	79
60.	Circuito eléctrico para almacenar la carga generada por el prototipo con sus elementos identificados.	79
61.	Subensamble del rotor, compuesto por las tres aspas PVC y el rotor.	80
62.	Subensamble de la estructura con el subensamble del rotor, compuesto por la estructura principal, el generador, la aleta y el rotor con sus aspas.	81
63.	Subensamble de la torre, compuesto por el rodamiento, la torre y el cableado para conectar el generador al circuito de carga. El subensamble de la turbina se acopla al de la torre por medio de 4 pernos.	81
64.	Subensamble del circuito eléctrico de carga.	82
65.	Ensamble final del prototipo.	82
66.	Prototipo de turbina eólica fabricado en funcionamiento.	83
67.	Gráfica de voltaje generado y velocidad de viento de la Prueba 1.	85
68.	Gráfica de voltaje generado y velocidad de viento de la Prueba 2.	86

69.	Gráfica de voltaje generado y velocidad de viento de la Prueba 3.	87
70.	Gráfica de voltaje generado y velocidad de viento de la Prueba 4.	88
71.	Foco LED y teléfono celular conectados al circuito eléctrico de almacenaje de la energía generada del prototipo.	91
72.	Comportamiento promedio de la velocidad de viento marzo.	106
73.	Velocidad de viento promedio en el aeropuerto internacional La Aurora.	106
74.	Diagrama del circuito del módulo MT3608.	117
75.	Diagrama del circuito del módulo RT9266.	118
76.	Diagrama del circuito del módulo LM2596.	118
77.	Hoja de especificaciones de la batería de ácido-plomo de 12 V - 7 Ah	119
78.	Motor de ventilador de radiador de Hyundai Santa Fe 2002 - 2009 utilizado en el prototipo	120
79.	Aspas originales del ventilador para radiador del motor seleccionado, del cual se fabricó el rotor del prototipo.	120
80.	Chumacera KML F208 utilizada en el prototipo.	120
81.	Selección de la chumacera en la recicladora “El Esfuerzo”. Se puede observar la gran cantidad de rodamientos de diferentes tamaños y tipos en las estanterías.	121
82.	Balance estático del rotor por medio de agregar roldanas en los pernos que unen las aspas al rotor.	121
83.	Anemómetro PYLE PMA 90 utilizado para las mediciones de velocidad del viento.	122
84.	Mediciones de velocidad de viento y voltaje generado utilizando el anemómetro y multímetro.	122
85.	Prueba de funcionamiento del prototipo en el Km 18.5 carretera a Fraijanes, Guatemala.	123
86.	Otra prueba del funcionamiento del prototipo en el Km 18.5 carretera a Fraijanes, Guatemala. Se puede observar que es un terreno sin obstrucciones por parte de construcciones cercanas.	123
87.	Plantilla de la hoja de Excel de para la toma de datos de las pruebas de funcionamiento.	124
88.	Parte de la hoja de Excel de para la toma de datos de la prueba de funcionamiento 2.	125

Lista de cuadros

1.	Requisitos del proyecto	24
2.	Ponderación por nivel de importancia	30
3.	Anchos de aspa y área superficial del aspa según el diámetro de tubo PVC.	36
4.	Fuerzas del viento sobre el aspa según el ancho del aspa.	37
5.	Momentos flectores máximos según el diámetro de tubo utilizado.	38
6.	Datos de las aspas según el diámetro de tubo PVC	38
7.	Momentos de inercia de las aspas según el diámetro de tubo PVC.	39
8.	Esfuerzo flector máximo de las aspas según el diámetro de tubo PVC.	39
9.	Factores de seguridad de las aspas según el diámetro de tubo PVC.	40
10.	Fuerzas de compresión que actúan sobre las placas y la aleta de la cola.	52
11.	Áreas superficiales de las placas base y de la aleta de la cola.	52
12.	Esfuerzos de compresión en las placas base y la aleta de la cola.	53
13.	Momento de torsión sobre los sistemas de pernos.	61
14.	Momentos polares de inercia de los pernos.	62
15.	Esfuerzo cortante por torsión de los sistemas de pernos.	62
16.	Factores de seguridad de los sistemas de pernos.	63
17.	Factores de seguridad contra el aplastamiento de los pernos de la base de la chumacera y la del motor.	66
18.	Factores de seguridad contra el aplastamiento de los pernos de la base de la chumacera y la del motor.	66
19.	Factores de seguridad del cortante de los pernos de la base de la chumacera y del motor.	67
20.	Factores de seguridad contra el cortante del borde de la base de la chumacera y de la del motor.	68
21.	Factores de seguridad de fluencia por tensión de los elementos a lo largo de los agujeros de los pernos de la base de la chumacera y de la del motor.	68
22.	Factores de seguridad de la capacidad de los elementos de la base de la chumacera y de la del motor.	69
23.	Esfuerzos cortantes en las placas soldadas del motor y de la chumacera.	72
24.	Factores de seguridad de las soldaduras a filete con esfuerzos cortantes de las soldaduras de la placa del motor y de la chumacera.	72
25.	Resultados de la Prueba 1.	85

26.	Resultados de la Prueba 2.	86
27.	Resultados de la Prueba 3.	87
28.	Resultados de la Prueba 4	88
29.	Tiempos proyectados para cargar completamente la batería del prototipo. . .	89
30.	Resultados de la prueba de tiempo de duración del foco LED encendido. . . .	90
31.	Resultados de la prueba de aumento del porcentaje de carga del teléfono celular.	90
32.	Costos del prototipo.	92

En Guatemala hay una gran cantidad de personas que no cuentan con acceso a energía eléctrica, esto se debe a la dificultad de llevar la red eléctrica a las comunidades en las que habitan. Por lo que el objetivo de este trabajo de graduación es diseñar y fabricar un prototipo de un generador eólico que puede ser replicado e implementado en diferentes regiones del país, especialmente en las que no cuentan con acceso a energía eléctrica.

El diseño final del prototipo de turbina eólica es del tipo de eje horizontal, con 3 aspas en el rotor y aleta para alinearse con la dirección del viento. El prototipo se fabricó a partir de materiales accesibles y de bajo costo dentro del mercado nacional, alcanzando un costo total de Q998.20. Las pruebas de funcionamiento determinaron que el prototipo requiere de flujos de viento constantes y velocidades mayores a los 4 m/s para generar. Con estas condiciones de viento, el prototipo logró aumentar en 0.3 V la carga de la batería del circuito de almacenamiento de la energía generada. Utilizando esta energía fue posible mantener un foco LED de 3 W encendido por 11.97 horas continuas y elevar en un 58 % la carga de un celular con batería de 3,020 mAh. Se realizó un manual para la fabricación del prototipo en el que se detallan los pasos, materiales y herramientas necesarias. Por último, se recomienda analizar las posibles mejoras al diseño del prototipo para que este genere a velocidades de viento más bajas, manteniendo los requisitos de accesibilidad económica y simpleza del diseño para su replicación e implementación.

In Guatemala there are many people who don't have access to electricity, this is due to the difficulty of bringing the electrical network to the communities in which they live. Therefore, the objective of this graduation project is to design and manufacture a prototype of a wind generator that can be replicated and implemented in different regions of the country, especially in those without access to electricity.

The final design of the wind turbine prototype is of the horizontal axis type, with 3 blades on the rotor and a fin to align it with the wind direction. The prototype was manufactured from accessible and low-cost materials within the national market, reaching a total cost of Q998.20 (USD\$ 129.17). Performance tests determined that the prototype requires constant wind flows and speeds greater than 4 m/s to generate. With these wind conditions, the prototype managed to increase by 0.3 V the charge of the battery of the generated energy storage circuit. Using this energy, it was possible to keep a 3 W LED bulb on for 11.97 continuous hours and raise by 58 % the charge of a cell phone with a 3,020 mAh battery. A manual was made for the manufacture of the prototype in which it details the steps, materials and tools required. Lastly, it is recommended to analyze the possible improvements of the prototype's design so that it generates at lower wind speeds, maintaining the requirements of economic accessibility and design simplicity for its replication and implementation.

Según el reporte del banco mundial para el año 2018, el índice de cobertura eléctrica para Guatemala era del 94.7%. Esto indica que más del 5% de las viviendas en Guatemala no cuentan con acceso a energía eléctrica. Esto se debe al alta dificultad y costo de llevar la red eléctrica nacional a ciertas regiones del país. Por lo que, el objetivo de este proyecto de graduación es presentar una solución para llevar energía eléctrica a los hogares guatemaltecos que no tienen acceso a la misma.

Entre los sistemas de generación eléctrica aislados de la red eléctrica se destacan los que utilizan fuentes de energía renovables, como lo son los paneles solares fotovoltaicos, turbinas hidráulicas y turbinas eólicas. Sin embargo, todas estas tecnologías dependen de las condiciones climáticas y ciertas estaciones del año. Los paneles solares están limitados por una cantidad de horas de irradiación solar diarias y los costos de los equipos e instalación son muy elevados. En el caso de las turbinas hidráulicas, se requiere estar cerca de una fuente hídrica con un caudal capaz de activar la turbina, por lo que se limita en los lugares donde pueden ser implementados y sus costos de igual manera son muy elevados. Esto nos deja con las turbinas eólicas, que pueden producir energía en cualquier momento en el que se tengan las condiciones de viento adecuadas.

Existen diferentes diseños de turbinas eólicas pequeñas que se pueden replicar usando componentes cotidianos, por lo que se pueden fabricar con costos significativamente menores. Entre estos diseños resalta las turbinas de eje horizontal de 3 o 5 aspas, ya que es de los diseños que presentan mayor eficiencia y coeficiente de potencia. Pero requieren de mayores velocidades de viento que las turbinas de eje vertical. Existen diferentes diseños de pequeñas turbinas eólicas que han sido implementados en diferentes partes del mundo, que sirvieron de referencia para este proyecto. Como lo es el proyecto de Simons en Honduras, el de Bossche en Bélgica, el de Kirsch en Australia o el de Ofordile en Nigeria, entre otros. En todos proyectos el diseño que más destaca es el de turbinas eólicas de eje horizontal. Sin embargo, la complejidad de los diseños, materiales y componentes utilizados y los costos de estos proyectos, así como las diferentes condiciones de cada país, hacen que no sean viables para replicarlos en Guatemala.

Por lo tanto, en este proyecto se diseña, fabrica y prueba una turbina eólica de eje horizontal, con tres aspas en su rotor y sistema de cola con aleta para alinear la turbina con la dirección del viento. Así como un sistema de almacenamiento y aprovechamiento de la energía generada por la turbina. Para la fabricación se utilizaron materiales y componentes accesibles dentro del mercado guatemalteco, así como herramientas comunes para asegurar que esta pueda ser accesible y replicable. Se realizaron pruebas del funcionamiento de la turbina midiendo la velocidad del viento y el voltaje que está entregando. También, se realizaron pruebas de cuanto tiempo dura un foco LED encendido y cuánto carga un teléfono celular con la energía generada por la turbina. Por último, se realizó un manual de fabricación del prototipo de la turbina eólica, para su replicación.

El Banco Mundial, una organización multinacional que en parte se dedica al apoyo de los países en vías de desarrollo, define el acceso de la energía eléctrica como uno de los elementos centrales para el desarrollo de estos países y esencial para poner fin a la pobreza. Ya que esta permite acceso a información, utilización de equipos eléctricos que mejoran la calidad de vida, permite mejorar la educación, acceso a mejor salud, impulsa la innovación, es un motor de creación de empleos, entre otros. Adicionalmente, define a la energía renovable como el hilo que une el crecimiento económico, equidad social y sostenibilidad ambiental. Por lo que el desarrollo e implementación de las tecnologías de generación de energía renovable son esenciales para lograr total accesibilidad a energía eléctrica y combatir el cambio climático.(Banco Mundial, s.f.)

El Ministerio de Energía y Minas (MEM) dio a conocer en su informe del año 2016 que el índice de cobertura eléctrica a nivel nacional era del 92.06 %. Este índice se refiere a la cantidad de usuarios que cuentan con energía eléctrica entre el total de viviendas a nivel nacional. El dato más actual que maneja el Banco Mundial es de del año 2018 e indica que el índice de cobertura eléctrica es de 94.7 %.(Ministerio de Energía y Minas (MEM), 2017a); (Mundial, 2018)

Aunque estos niveles de cobertura eléctrica sean bastante altos, existe todavía un porcentaje de la población que no cuenta con energía eléctrica. Según los índices presentados en el 2016 por el MEM, había aproximadamente 3.4 millones de hogares con acceso a energía eléctrica, pero aún faltaba llegar a 272 mil hogares, que equivalen a aproximadamente 1 millón de personas. De estas viviendas sin acceso a energía eléctrica se encuentran en su mayoría en los departamentos de Alta y Baja Verapaz, Quiché y Petén. Específicamente en los municipios de Purulhá, Tamahú, Turcurú, Panzós, Senahú, San Pedro Carchá, Cahabon, Fray Bartolomé de las Casas, La Tinta, Raxruhá, La Libertad, Chajul, entre otros. Al analizar las condiciones geográficas de dichos municipios, se puede observar que gran parte de las comunidades se encuentran en regiones montañosas aisladas, por lo que dificulta el ingreso de maquinaria y equipo para la instalación de la red eléctrica, por lo que su costo se vuelve muy alto y no se justifica por el nivel de consumo de dichas áreas. Estas son las

principales razones por las cuales no se ha logrado cubrir dichas áreas, según lo comentado por el presidente de la Comisión Nacional de Energía eléctrica (CNEE), Mario López, en el IV Seminario de acceso universal a la energía celebrado en Guatemala en el año 2019. Estas comunidades sufren de pobreza y pobreza extrema, por lo que es de alta relevancia implementar proyectos de bajo costo que sean accesibles para las mismas. (Ministerio de Energía y Minas (MEM), 2017a); (Bolaños, 2019)

Según la investigación realizada por la Internacional *Renewable Energy Agency* (IRENA) en el año 2019, la energía eólica en tierra tiene el menor costo promedio de kW/h producidos. Estos resultados permiten enfocar el proyecto en el diseño de pequeños generadores eólicos para lograr costos accesibles para las comunidades. Los pequeños generadores eléctricos a partir de fuentes renovables tienen la ventaja de poder ser implementadas en cualquier lugar en el que se tenga acceso a dicha fuente renovable. Lo que los hace adecuados para implementarlos en zonas rurales aisladas. (IRENA, 2019)

Como se demostró anteriormente, este proyecto tiene un impacto social y ambiental que cumple con ciertos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la Organización de Naciones Unidas (ONU) en el año 2015 para ser cumplidos para el año 2030. Debido a que Guatemala es un país miembro de la ONU, estamos comprometidos a velar por cumplir con los 17 ODS para el año 2030. Por la naturaleza de dicho proyecto se cumplen con los siguientes ODS: Número 7 Energía accesible y no contaminante, número 8 (Ciudades y comunidades sostenibles) y número 13 (acción por el clima). (PNUD, 2015)

3.1. Objetivo general

Diseñar una turbina eólica pequeña a partir de materiales accesibles para fabricación e implementación en comunidades de Guatemala.

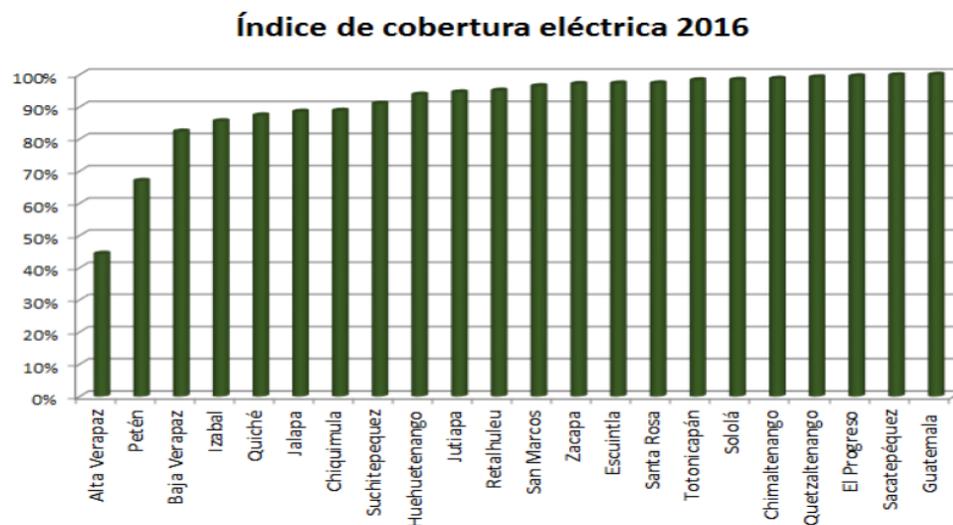
3.2. Objetivos específicos

- Determinar el diseño que se adapte con los requisitos de eficiencia, accesibilidad y potencia de las comunidades.
- Seleccionar un sistema de almacenamiento para la energía generada que sea seguro.
- Asegurar la integridad estructural y funcional del generador por medio de mecanismos y materiales resistentes.
- Realizar un manual de fabricación.

4.1. Cobertura de la red eléctrica nacional

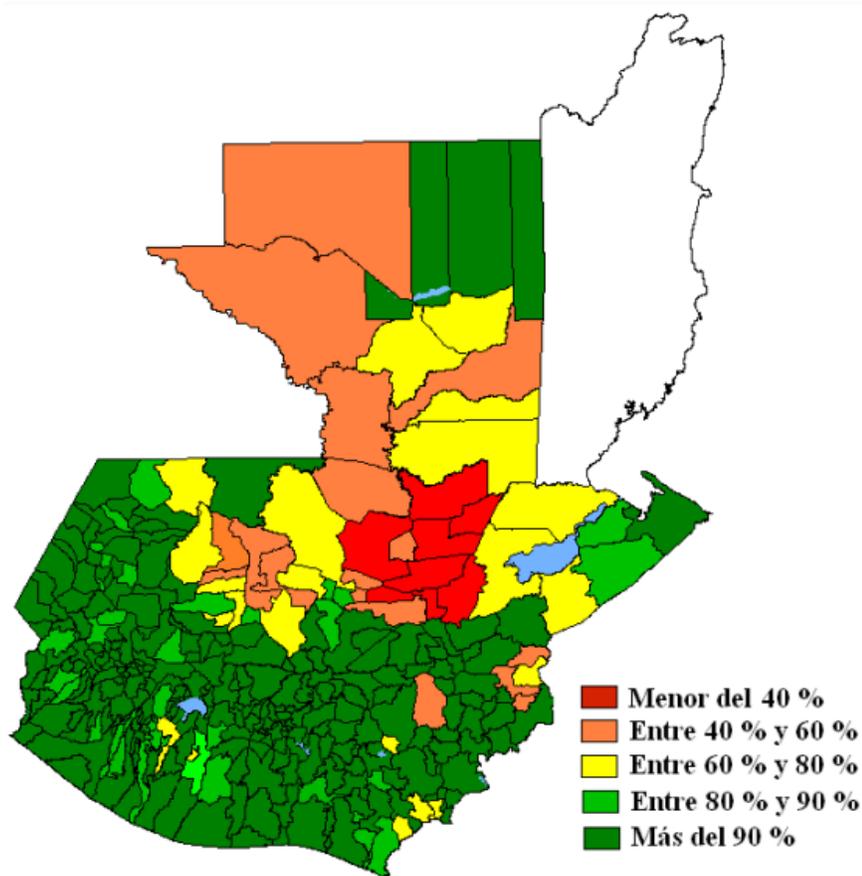
El índice de cobertura eléctrica demuestra el porcentaje de las viviendas (o usuarios) que cuentan con el servicio de energía eléctrica del total de viviendas en una región específica. En Guatemala, el Ministerio de Energía y Minas (MEM) es el encargado de presentar este índice con el apoyo del Instituto Nacional de Estadística (INE) para obtener el número de viviendas a nivel nacional y con las empresas distribuidoras del servicio para obtener el número de usuarios. (Ministerio de Energía y Minas (MEM), 2017a)

Figura 1: Gráfica del índice de cobertura eléctrica por departamento.



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MEM), 2017a

Figura 2: Mapa de cobertura eléctrica 2016.



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MEM), 2017a

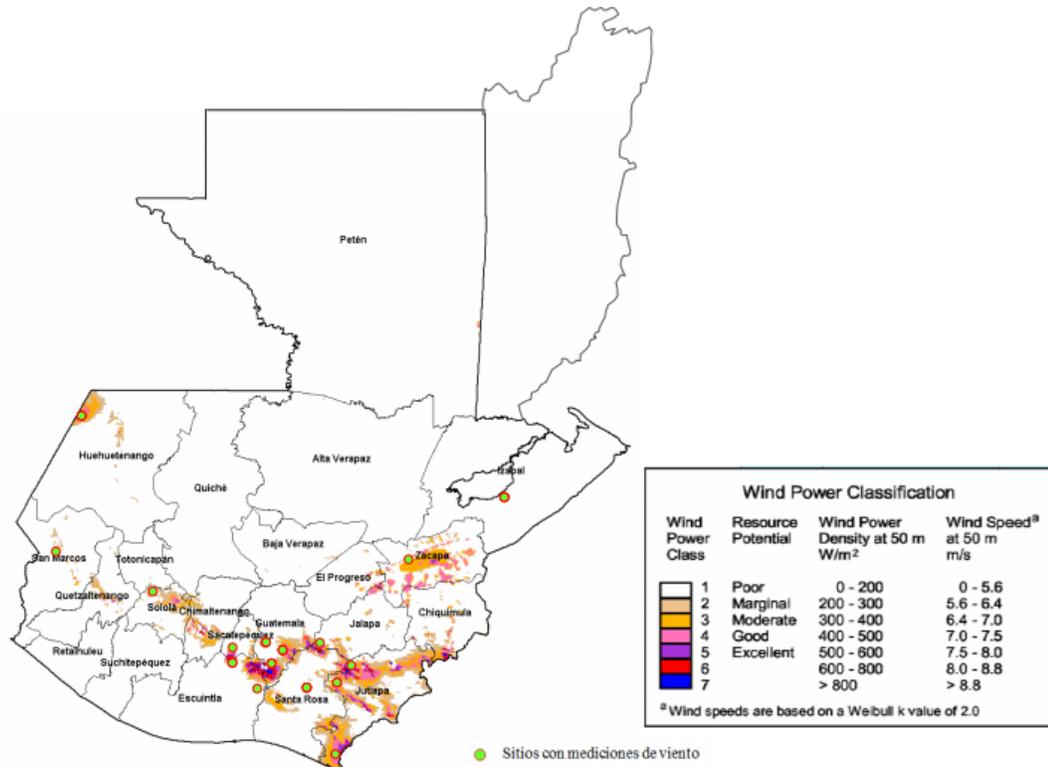
El último informe de este índice fue presentado por el MEM en el año 2016. Este informe indicó que el índice de cobertura eléctrica era de 92.06 % y el departamento con la menor cobertura es el de Alta Verapaz, con una cobertura del 44.36 %. (Ministerio de Energía y Minas (MEM), 2017a)

4.2. Viento en Guatemala

El Ministerio de Energía y Minas comenzó un proyecto para la medición de la velocidad del viento a nivel nacional en el año 2006. Se utilizaron más de 17 estaciones en diferentes puntos del país, en los cuales se estimaba un potencial de generación de energía eólica. Las mediciones en estas estaciones fueron realizadas por medio de diferentes torres de medición eólica, las cuales contaban con tres anemómetros y una altura de entre 20 y 30 metros. En el año 2017 presentaron los resultados de las mediciones de la velocidad de viento, las cuales se muestran en el siguiente mapa. Es importante resaltar que las zonas blancas no significan que no hay velocidad de viento, sino áreas donde no se obtuvieron datos. (Ministerio de Energía y Minas (MEM), 2017b)

En la Figura 3 se puede observar que, en el sureste del país en los departamentos de Guatemala, Escuintla y Jutiapa se logran alcanzar velocidades mayores a los 7.5 m/s. Es por esta razón que hay tres plantas eólicas en dicha región, una en cada uno de los departamentos listados anteriormente. Las mediciones fueron realizadas en estaciones meteorológicas del MEM con anemómetros colocados a una altura de 30 metros. Por lo que es posible asumir que estas velocidades serán significativamente menores a alturas más bajas de los 30 metros.

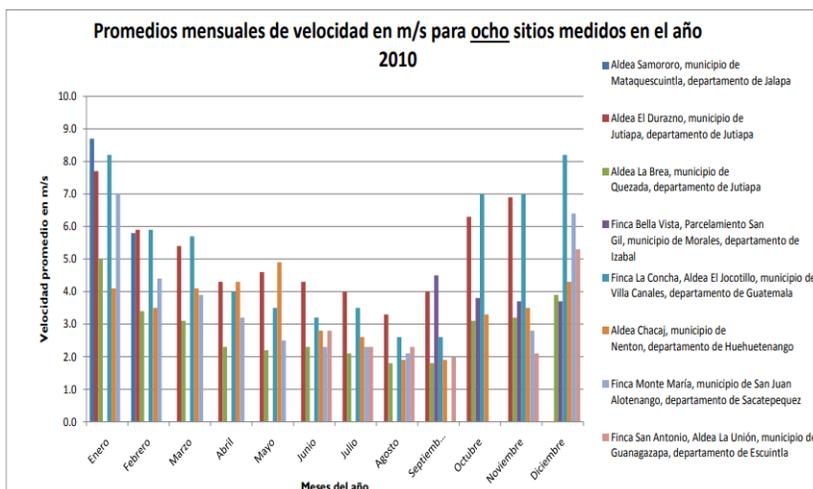
Figura 3: Mapa de velocidad de viento en Guatemala.



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MEM), 2017b

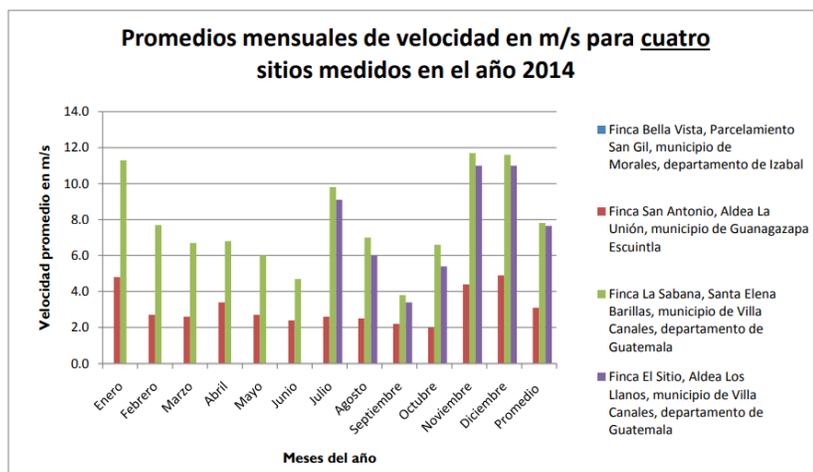
En otro reporte entregado por el MEM en el año 2014, se presentan gráficas de los resultados mensuales obtenidos por las estaciones de medición desde el año 2006 hasta el año 2014. Sin embargo, conforme se avanza los resultados anuales, se obtiene información de un menor número de estaciones. En las figuras 4 y 5 se presentan los promedios mensuales de cada punto de medición, donde se observa un comportamiento similar en ambos años. Esto se debe a que las condiciones de viento varían según las épocas del año. (Ministerio de Energía y Minas (MEM), 2014)

Figura 4: Gráfica de promedios mensuales de velocidad de viento en m/s para ocho sitios medidos en el año 2010.



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MEM), 2014

Figura 5: Gráfica de promedios mensuales de velocidad en m/s para cuatro sitios medidos en el año 2014



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MEM), 2014

Se compararon los resultados más recientes con el mayor número de estaciones contra los últimos resultados obtenidos. Como se puede observar en las figuras 4 y 5, los valores permanecieron similares en dicho intervalo de tiempo, lo que permite asumir que estos no variaron de gran manera en los últimos años. Además, se observa un mismo comportamiento de la velocidad del viento anual, en el que es mayor a finales y principio de año (meses de septiembre a febrero) y disminuye significativamente a mediados de año (marzo a agosto). Es importante resaltar que entre este periodo de tiempo se obtuvieron velocidades mayores a los 2 m/s hasta llegar a velocidades mayores a los 10 m/s.

El Instituto Nacional de Estadística (INE) presenta periódicamente los resultados de su recolección de datos y estadísticas de atmósfera y clima. La publicación más reciente la realizó el año 2018, en la cual en la sección de clima presenta los datos del viento obtenidos de dicho año en los diferentes departamentos del país. Estos datos fueron recolectados y presentados por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), el cual cuenta con 45 estaciones a nivel nacional para la medición de dichos datos. El INSIVUMEH utiliza un anemómetro de recorrido de viento, anemógrafo, veleta registradora, termómetros, hidrógrafos y barógrafo a una altura de 10 metros para realizar las mediciones. Por lo que los resultados que se obtienen son la velocidad, humedad y temperatura del viento y la presión atmosférica; estos datos son fundamentales para los posteriores cálculos. En este informe el INSIVUMEH reporto una velocidad máxima del viento en año 2018 de 24 m/s. Esta velocidad será empleada para comprobar que los componentes de la turbina soportan esta velocidad máxima. (Instituto Nacional de Estadística (INE), 2018)

En la Figura 6 se observa que para las mediciones efectuadas por el INSIVUMEH a una altura de 10 metros, las velocidades de viento promedio son significativamente menores al compararlas con las mediciones a 30 metros del MEM.

Figura 6: Gráfica de velocidad promedio anual en m/s por departamento del año 2018



Fuente: elaboración propia, utilizando los datos del Compendio Estadístico Ambiental 2018 presentado por el INE.

4.3. Energía eólica

4.3.1. Potencia del viento

La potencia del viento se obtiene de del cambio de la energía cinética del flujo del aire en un periodo de tiempo y de la derivada de esta, la cual depende del flujo másico. Por lo

que la potencia del viento está definida como la siguiente ecuación:

$$P_w = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (1)$$

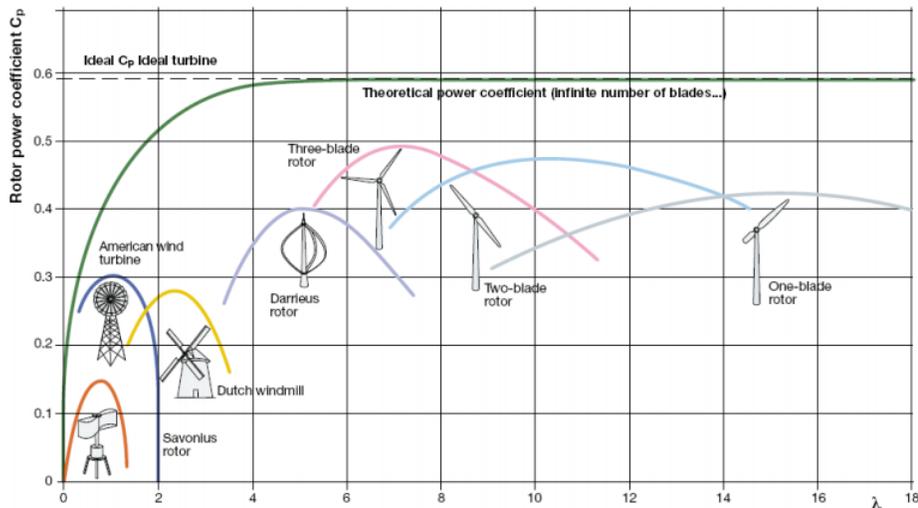
Donde ρ [$\frac{kg}{m^3}$] es la densidad del aire, A [m^2] es el área perpendicular del flujo de viento y v [$\frac{m}{s}$] es la velocidad del viento.

Como se puede observar de la ecuación 4, la potencia obtenida del viento depende principalmente de la velocidad del viento, ya que esta está elevada al cubo. También depende del área de barrido de las aspas, las cual se puede aumentar con aspas más largas. Por último, la densidad del viento la cual, dependerá de la altura de donde este la turbina. (Alex & Katherine, 2011)

4.3.2. Coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia es el porcentaje de la potencia que extrae la turbina eólica del total de potencia del viento disponible. El físico Albert Betz demostró que ninguna turbina puede extraer más del 59.3% de la potencia del viento, esto se conoce como el límite de Betz. Sin embargo, las turbinas no pueden operar en este límite, por lo que el coeficiente de potencia depende del diseño de cada turbina. Específicamente de la relación de velocidad en la punta del aspa (λ), que para turbinas horizontales de aspas para aplicaciones de baja velocidad, se utiliza un valor de 1 ($\lambda = 1$). (O. A. Ajayi, 2012)

Figura 7: Coeficiente de potencia de generadores eólicos según su diseño



Fuente: O. A. Ajayi, 2012

Como se puede observar en la Figura 7, para un generador eólico pequeño con una relación de velocidad $\lambda = 1$, el coeficiente de potencia es de 0.3 ($C_p = 0.3$). Por lo que la potencia de la turbina eólica se define como:

$$P_T = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * C_p \quad (2)$$

Donde ρ [$\frac{kg}{m^3}$] es la densidad del aire, A [m^2] es el área de barrido de la turbina, v [$\frac{m}{s}$] es la velocidad del viento y C_p es el coeficiente de potencia.

4.3.3. Área de barrido

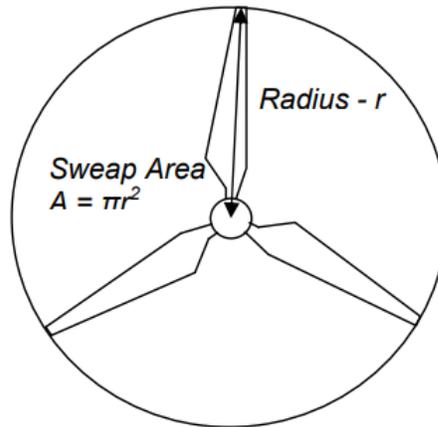
En las turbinas de eje horizontal, el área de barrido es la sección perpendicular del flujo de viento que entra en contacto con las aspas de la turbina haciéndolas girar. Este diseño de turbina cuenta con aspas rectas que se conectan en el centro del rotor, por lo que al girar forman un círculo. Por lo que el área de barrido para este tipo de turbinas se puede modelar como el área de un círculo, donde el radio es el largo de las aspas. (Blackwood, 2016).

El área de barrido de la turbina se define como:

$$A = \pi * r^2 \quad (3)$$

Donde π es constante y r [m] es el largo del aspa.

Figura 8: Área de barrido de una turbina HAWT.



Fuente: RWE npower renewables

4.3.4. Relación de velocidad en la punta del aspa

La relación de velocidad en la punta del aspa o como se conoce en inglés *Tip Speed Ratio (TSR)*, es la relación entre la velocidad tangencial de la punta del aspa con la velocidad del viento. (Rathod, 2014). La relación de velocidad en la punta del aspa se define como:

$$\lambda = \frac{rw}{v} \quad (4)$$

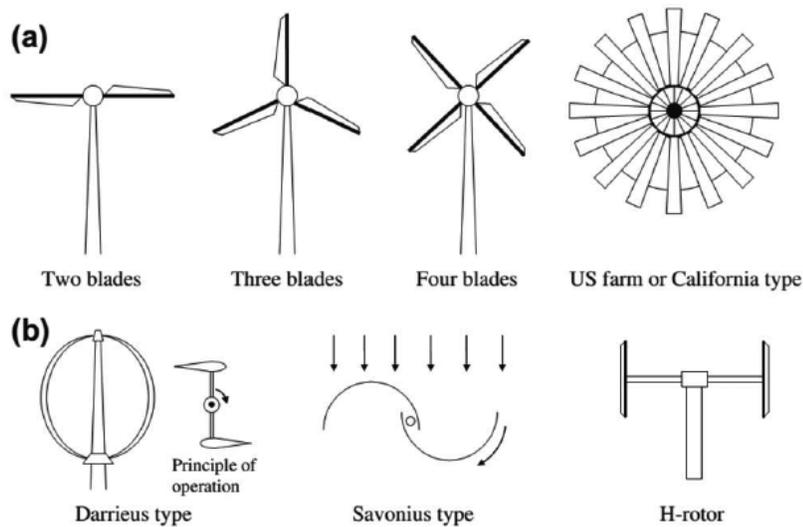
Donde r [m] es el largo del aspa, w [$\frac{rad}{s}$] es la velocidad angular del rotor y v [$\frac{m}{s}$] es la velocidad del viento.

4.4. Turbinas eólicas

4.4.1. Tipos de turbinas eólicas

Existen diferentes formas de clasificar las turbinas eólicas, pero la más importante es en la relación del rotor con el flujo de viento. Basado en este parámetro, las turbinas eólicas se dividen en dos, turbinas de eje horizontal (HAWT, por las siglas en inglés *Horizontal Axis Wind Turbine*) y turbinas de eje vertical (VAWT, por sus siglas en inglés *Vertical Axis Wind Turbine*). (Tong, 2010).

Figura 9: Tipos de turbinas eólicas. (a) Turbinas de eje horizontal. (b) Turbinas de eje vertical



Fuente: (Soteris, 2014)

Actualmente, las más utilizadas son las turbinas de eje horizontal, esto se debe a que tienen una mayor eficiencia en la turbina, mayor densidad de potencia, puede trabajar a velocidades de viento más bajas y un costo más bajo por unidad de potencia entregada. (Tong, 2010).

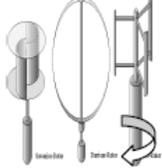
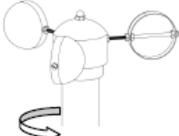
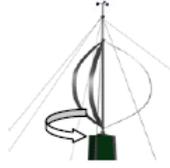
4.4.2. Eficiencia práctica

En la práctica, las turbinas eólicas sufren pérdidas en su eficiencia debido a la acumulación de pequeñas pérdidas en la misma. Algunas de estas pequeñas pérdidas son: (Schubel & Crossley, 2012)

- Estela de rotación
- Arrastre por el perfil
- Pérdidas en la punta

- Turbulencia
- Pérdidas mecánicas
- Pérdidas eléctricas
- Consumo eléctrico de la turbina

Figura 10: Eficiencia práctica de diferentes diseños de turbinas eólicas.

Ref No.	Design	Orientation	Use	Propulsion	* Peak Efficiency	Diagram								
1	Savonius rotor	VAWT	Historic Persian windmill to modern day ventilation	Drag	16%									
2	Cup	VAWT	Modern day cup anemometer	Drag	8%									
3	American farm windmill	HAWT	18th century to present day, farm use for Pumping water, grinding wheat, generating electricity	Lift	31%									
4	Dutch Windmill	HAWT	16th Century, used for grinding wheat.	Lift	27%									
5	Darrieus Rotor (egg beater)	VAWT	20th century, electricity generation	Lift	40%									
6	Modern Wind Turbine	HAWT	20th century, electricity generation	Lift	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blade Qty</th> <th>efficiency</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>43%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>47%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>50%</td> </tr> </tbody> </table>	Blade Qty	efficiency	1	43%	2	47%	3	50%	
Blade Qty	efficiency													
1	43%													
2	47%													
3	50%													

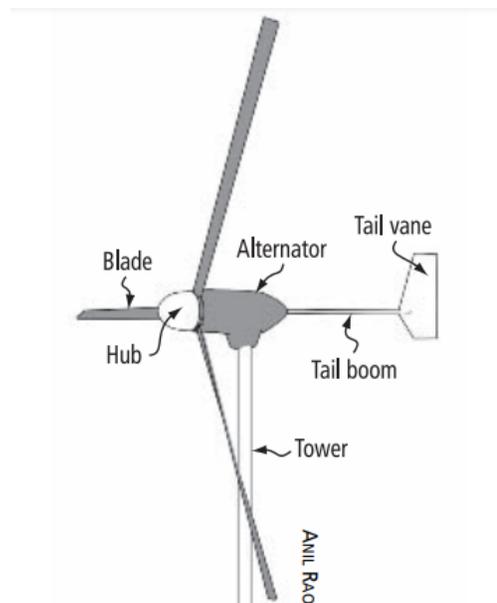
Fuente: (Schubel & Crossley, 2012)

Esta eficiencia depende del diseño y configuración de cada turbina, pero como se observa en la Figura 10, las turbinas de eje horizontal tienen una mayor eficiencia práctica que las de eje vertical.

4.4.3. Configuración básica de una pequeña turbina eólica

Las pequeñas turbinas eólicas de eje horizontal están compuestas principalmente por: (1) Rotor, (2) Generador, (3) Cola y (4) Torre. El rotor está compuesto por las aspas y se conecta por un eje al generador, haciéndolo girar y, por lo tanto, genera la electricidad. La cola permite dirigir la turbina en la dirección del viento y asegura que esta genere energía sin importar los cambios de la dirección del viento. La torre es el elemento estructural que soporta la turbina y le da la altura para aprovechar la velocidad del viento. (Chiras y col., 2010)

Figura 11: Configuración típica de una pequeña turbina de eje horizontal.

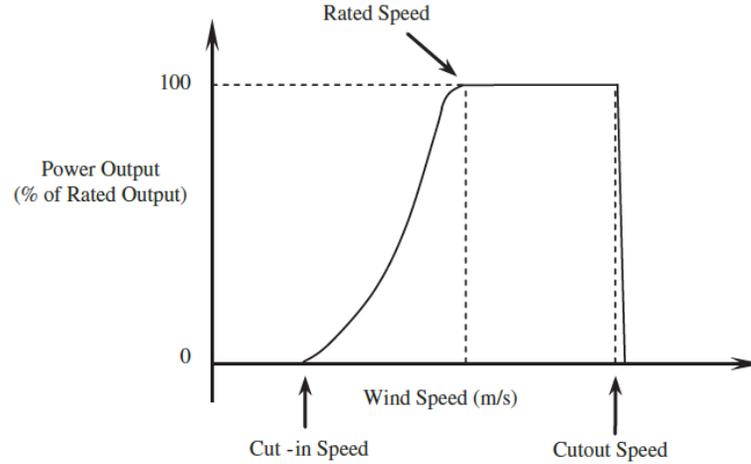


Fuente: Chiras y col., 2010

4.5. Velocidades de viento

Las turbinas eólicas de eje horizontal de aspas tiene una curva típica de potencia en relación de velocidad del viento. En esta curva se observa la velocidad en la que comienza a generar la turbina y es conocida como la velocidad de corte de entrada (*Cut-in speed*). Después, está la velocidad óptima del viento en el que se alcanza la eficiencia óptima y, por lo tanto, la potencia máxima que puede generar la turbina (*Rated speed*). Por último, la velocidad de corte de salida, que es la velocidad máxima a la que trabaja la turbina (*Cutout speed*). (Tong, 2010)

Figura 12: Curva típica de potencia de una turbina eólica.



Fuente: Tong, 2010

En el año 2008, *The National Renewable Energy Laboratory (NREL)* instaló 12 pequeñas turbinas eólicas comerciales en el mismo lugar para compararlas bajo las mismas condiciones de viento. Estas turbinas se instalaron en el *Technopark test facility* en Schoondijke, Holanda. Estas se colocaron a la misma altura de 10 metros y se realizaron los pruebas por un año (1 de abril del 2008 al 31 de marzo del 2009), en el que se obtuvo una velocidad de viento promedio de 3.8 m/s. A continuación se presentan las características de 6 de estas pequeñas turbinas eólicas comerciales. (Ofordile, 2013)

Figura 13: Especificaciones del fabricante de algunas de las turbinas utilizadas en el estudio.

	Fortis Mont.	Fortis Passat	Airdolphin	Ampair	Swift	Turby
Turbine type	HAWT	HAWT	HAWT	HAWT	HAWT	VAWT
Number of blades	3	3	3	3	5	3
Speed control	Furl	Furl	Furl/stall	Pitch	Furl	Brake/shutdown
Rotor diameter [m]	5	3.12	1.8	1.7	2.08	2
Swept area [m ²]	19.64	7.65	2.54	2.27	3.40	5.3
Rated power [kW]	5.8	1.4	1	0.6	1.5	2.5
Rated wind speed [m/s]	17	16	12.5	12.6	12	14
Cut-in wind speed [m/s]	2.5	3	2.5	3.6	3.4	4.0
Cut-out wind speed [m/s]	n/a	n/a	50	n/a	n/a	14
Output power [kW] [*]	4	1	1	0.6	1.5	1.6
Calculated Cp [%] [*]	18.9	12.1	36.4	24.5	40.9	28.5

^{*}At wind speed of 12m/s

Fuente: Ofordile, 2013

Como se puede observar en la figura 13, las turbinas con aspas más grandes son las que generan más potencia, sin embargo, tienen una menor eficiencia. Se puede observar que las velocidades mínimas para comenzar a generar son de 2.5 m/s y sus velocidades óptimas las alcanzan alrededor de los 12 m/s.

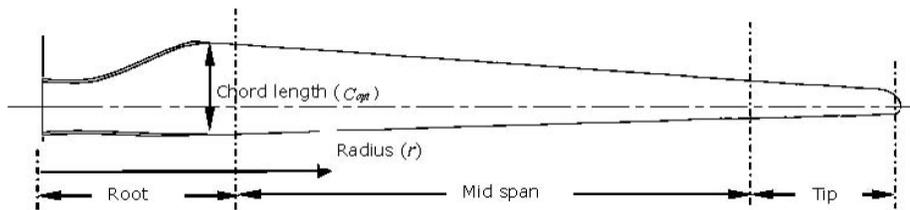
Las pequeñas turbinas eólicas de eje horizontal fabricadas manualmente trabajan a velocidades de 2 m/s hasta 8 m/s. (Alex & Katherine, 2011)

Ofrídale diseño una turbina de eje horizontal de 3 aspas para una comunidad de Nigeria con una velocidad de corte de entrada de 2 m/s, una velocidad promedio de 3.7 m/s y una velocidad óptima de 10 m/s. Piggot utiliza una velocidad de corte de entrada de 3 m/s y una velocidad óptima de 10 m/s en su manual para construir una turbina eólica casera. Por último, Van des Bossche diseñó su pequeña HAWT de 4 aspas con una velocidad de entrada de corte de 2.5 m/s.

4.6. Aspas

El diseño óptimo de las aspas se basa en un método iterativo, en el que se utiliza el límite de Betz para obtener el valor óptimo del largo y la cuerda del aspa. Este se basa en las condiciones de viento y el coeficiente de arrastre o levantamiento del aspa. Se varía el largo y el número de aspas, la velocidad en la punta del aspa y el coeficiente de levante o arrastre hasta lograr el largo de cuerda óptimo. (Schubel & Crossley, 2012)

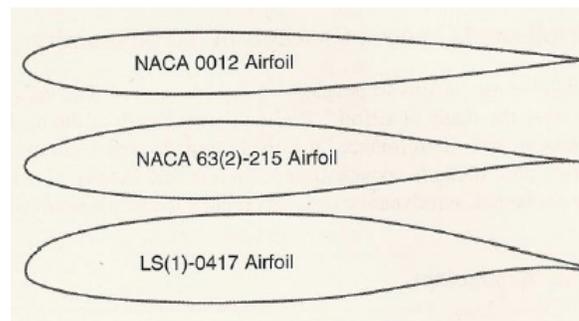
Figura 14: Diseño del largo del aspa y de la cuerda.



Fuente: Schubel y Crossley, 2012

Para el diseño del perfil del aspa se utilizan perfiles estándares normados por NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*). (Kirsch, 2009)

Figura 15: Perfiles de aspa estándares de NACA



Fuente: Kirsch, 2009

Sin embargo, para diseñar aspas por este método se requiere una manufactura con un alto costo. Esto se debe a que estas aspas se fabrican con materiales especiales como fibras reforzadas y por medio de procesos de moldeo de alto costo. (Van den Bossche, 2013)

Por lo que, para pequeñas turbinas fabricadas manualmente se utiliza tubos de PVC con cortes diagonales para obtener secciones cónicas continuas y el corte en diagonal aporta el factor aerodinámico del aspa. (Van den Bossche, 2013) (Rathod, 2014) (Simon, 2011)

Figura 16: Aspas de PVC utilizadas en el prototipo de turbina eólica fabricado por Simon.



Fuente: Simon, 2011

4.7. Generadores eléctricos

Los generadores eléctricos son máquinas que transforman energía mecánica en eléctrica. Existen generadores síncronos y de inducción. Los síncronos requieren de una fuente de corriente externa para generar los campos magnéticos en sus bobinas, mientras que los de inducción la corriente en sus bobinas es generada por medio de inducción magnética. (Chapman, 2012). Debido a que los generadores de inducción no requieren una fuente de poder externa para funcionar, estos son utilizados en las turbinas eólicas. (Kirsch, 2009).

4.7.1. Generadores de inducción

Los generadores de inducción utilizan la ley de inducción electromagnética de Faraday. Esta póstula que habrá un diferencial de potencia debido al movimiento relativo entre campos magnéticos, la cual provoca una fuerza magnética inducida en un circuito cerrado. La fuerza magnética inducida provoca una corriente eléctrica en el circuito cerrado. Para lograr este principio, los generadores rotativos cuentan un estator, que como su nombre lo indica, es la parte estática y un rotor, que es la parte que gira. (Chapman, 2012)

Los generadores de inducción se clasifican según el tipo de corriente que generan. Si generan energía alterna (CA) se conocen como alternadores y los que generan corriente continua (CC) como dinamos. La diferencia de la corriente que generan se debe a la configuración del elemento entre inductor (rotor) y el elemento inducido (estator). (Chapman, 2012)

En los alternadores, el estator está compuesto por embobinados que crean un campo magnético giratorio, mientras que el rotor tiene un campo magnético fijo. Al girar el rotor en el estator, este induce una corriente en el embobinado del estator. Esta corriente se induce en ambas direcciones, por lo que es corriente alterna. En los dinamos, el estator es el que cuenta con un campo magnético fijo y el rotor es el que cuenta con el embobinado. Por lo que, cuando el rotor gira dentro del estator, este induce una corriente en las bobinas del rotor. El conmutador únicamente permite el flujo de corriente en una dirección y, por lo tanto, esta es continua. (Chapman, 2012) (Portela y col., 2008)

4.7.2. Generadores para pequeñas turbinas eólicas

En las pequeñas turbinas eólicas generalmente depende de la aplicación que se le va a dar a la misma. Ya que, si se va a conectar a la red eléctrica, es conveniente un alternador, debido a que este genera corriente alterna. Pero en el caso de utilizarlo para cargar un banco de baterías, se emplean dinamos que generan corrientes continuas. Sin embargo, se puede usar cualquiera de los dos y conectar un convertidor que transforma la corriente de CA a CC o vice versa; pero el costo sería más elevado. (Tong, 2010) (Kirsch, 2009)

Para las pequeñas turbinas eólicas se utiliza generalmente dinamos. Esto se debe a que estos generan corriente continua, la cual es necesaria para cargar los bancos de baterías. Además, estos requieren menor velocidad angular del rotor para generar la energía, lo cual es una ventaja importante cuando se está trabajando con velocidades bajas de viento. (Tong, 2010) (Kirsch, 2009) (Rathod, 2014)

4.8. Baterías

Existen diferentes sistemas para almacenar la energía producida por una turbina eólica; conectada directamente a la red eléctrica, conectada a la red con baterías y desconectada de la red. Debido a que se busca diseñar la turbina para regiones a las que no llega la red eléctrica, por lo que el enfoque está en el sistema desconectado de la red. Para almacenar la energía eléctrica generada por la turbina eólica en un sistema desconectado de la red se utilizan bancos de baterías. (Chiras y col., 2010) (Chiras y col., 2010)

Existen tres principales formas de almacenamiento de energía en baterías. Estas son: las baterías de plomo y ácido que en inglés se conocen como *lead-acid (LA)*; de níquel y cadmio (NiCd); de sodio y azufre (NaS). Las baterías NiCd y NaS, tienen mayor tiempo de vida útil, mayores ciclos de carga y descarga, menores costos de mantenimiento, pero tiene un alto costo inicial. Debido a tener un menor costo y mayor accesibilidad, el enfoque está en las baterías LA. (Leahy y col., 2010)

4.8.1. Baterías LA

Estas baterías son el dispositivo más común de almacenamiento de energía actualmente. Esto se debe a que es una de las tecnologías más antiguas, por lo que ha tenido un gran

periodo de desarrollo. Estas baterías tienen un costo relativamente bajo, un tiempo de vida largo y una tasa de auto descarga baja. Esto le permite poder ser utilizada para aplicaciones de almacenamiento a corto y largo plazo. Las baterías LA son de dos tipos; *flooded lead-acid (FLA)* y *valve-regulated lead-acid (VRLA)*. Ambas baterías trabajan bajo el mismo principio, con la diferencia que las VRLA evita la entrada de aire a las celdas. Esto hace que las VRLA tengan un menor costo de mantenimiento y tienen un tamaño más reducido, pero para lograr esto tiene un costo inicial más alto y una vida útil menor. Las baterías LA tienen un rango de vida de 250 a 1000 ciclos de carga y descarga dependiendo del modelo. Las principales aplicaciones de estas baterías son para el arranque de motores de vehículos, es por esto que son tan accesibles y de costo relativamente bajo. La otra principal aplicación son para baterías *deep cycle*, estas están diseñadas para ser cargadas y descargadas con regularidad sufriendo poco daño a la vida de la batería. (Leahy y col., 2010)

La batería recomendada para almacenar la energía de pequeñas turbinas eólicas son las *deep cycle* del tipo LA. Este se debe a su ventaja de cargar y descargar la batería con regularidad. Las de 12 V permiten encender focos fluorescentes que son más eficientes que los de filamento. (Simon, 2011)

4.9. Inversores

Las baterías tipo LA se deben cargar con corriente continua y entregan la energía eléctrica de la misma manera, la cual puede ser utilizada para encender focos o calentadores de resistencia. Sin embargo, otros dispositivos necesitan corriente alterna para funcionar, por lo que para poder aprovechar la energía almacenada en la batería es necesario un inversor. Este dispositivo transforma corriente continua a corriente alterna y puede ser conectado a la batería LA. Es necesario determinar el uso que se le dará a la energía almacenada en la batería para determinar si es justificable el aumento del costo del sistema para implementar un inversor de corriente. (Rathod, 2014) (Rathod, 2014)

4.10. Mantenimiento

El principal mantenimiento que se le debe dar a las pequeñas turbinas eólicas es en los rodamientos, el generador, sistema de transmisión de la potencia o el acople entre el rotor y el generador y/o las aspas del rotor. Estos componentes están expuestos a las condiciones de la intemperie y, por lo tanto, sufren de desgaste y oxidación en caso de ser metales. Los rodamientos sufren de las cargas constantes de la rotación del rotor y al estar en la intemperie se pueden llenar de suciedad u oxidar. En el caso de utilizar cadenas con *sprockets* para transmitir la potencia, estos se deben engrasar con regularidad. Las aspas pueden sufrir de daños por velocidades altas que las hagan contactar contra la torre o por objetos que colisionen con las mismas, por lo que se deben cambiar o reparar de ser necesario. (Simon, 2011) (Rathod, 2014) (Kirsch, 2009) (Ofordile, 2013)

El prototipo de generador eólico debe poder ser replicado e implementado en comunidades que están restringidas de acceso a energía eléctrica en el país. Para lograr este proyecto se realizó la siguiente metodología:

En la fase investigativa y de recolección de datos, se determinaron las características del viento y climáticas de la región. Además, se determinó la potencia que debe generar el prototipo. De igual manera se determinaron los materiales y recursos accesibles en dichas regiones del país. Además, se investigaron proyectos similares exitosamente implementados.

La siguiente fase fue la de diseño. En esta fase se basó en la información recolectada de las condiciones y requisitos de las comunidades y se escogió el tipo de turbina eólica a diseñar. Se determinaron los siguientes subsistemas a diseñar:

- Aspas y rotor
- Generador
- Acople del rotor al generador
- Sistema de soporte y estructural
- Sistema de la energía generada

Una vez concluido el diseño preliminar, este se evaluó para verificar que cumplía con los requisitos y fuese, tanto, accesible como factible su fabricación. Se realizaron las mejoras necesarias para cumplir con dichos requisitos. Una vez definido el diseño final, se procedió a hacer el proceso de cotización y adquisición de los materiales y componentes necesarios para fabricar el prototipo. Estos materiales fueron obtenidos en el mercado nacional.

Con el diseño definido y con todos los materiales y componentes necesarios, se procedió con el proceso de fabricación del prototipo. Se verificó que el prototipo funcionaba correctamente y cumplía con los requisitos establecidos. Con base en los resultados obtenidos en la evaluación del prototipo, se realizaron las mejoras necesarias para que este cumpliera los requisitos y de esta manera obtener mejores resultados. Se evaluaron los resultados obtenidos del prototipo para determinar el cumplimiento de los requisitos y dar conclusiones de estos.

Una vez fabricado y analizado el prototipo se desarrolló el manual de replicación para su implementación en otras comunidades del país. Se incluyeron las listas de materiales y equipos necesarios para la fabricación, así como todos los pasos de fabricación de manera detallada.

5.1. Requisitos

Cuadro 1: Requisitos del proyecto

Código	Requisito
T-1	La turbina debe generar potencia suficiente para alimentar un foco led de 1.5 watts por 5 horas continuas y cargar un celular con batería de 600 mAh en un día.
T-2	La energía generada por la turbina debe almacenarse en una batería, la cual debe tener la capacidad de almacenar la potencia descrita en el requisito T-1.
T-3	La turbina debe tener un costo menor a los Q1,000.00.
T-4	La turbina debe utilizar materiales y equipo accesible en el mercado guatemalteco.
T-5	La turbina debe ser fabricada, utilizando herramientas comunes que no requieran capacitación para utilizarlas.
T-6	La turbina debe funcionar para una velocidad de viento mínima de 2.5 m/s.
T-7	La turbina y su estructura debe soportar vientos máximos de 24 m/s.
T-8	La turbina debe ser resistente a la lluvia.
T-9	La turbina no debe de requerir más de un mantenimiento al año.
T-10	La turbina debe ser desmontable y accesible para su mantenimiento y reparación de ser necesaria.
T-11	La conexión eléctrica de la turbina debe estar aislada para no poner en riesgo al usuario.
T-12	El manual de fabricación de la turbina debe tener instrucciones de todos los pasos detallados para su fabricación, incluyendo imágenes para aclararlos.
T-13	El manual de fabricación debe contar con un listado detallado de todos los materiales y equipo necesario para fabricar la turbina.

Fuente: elaboración propia

5.2. Diseño y cálculos

5.2.1. Diseño CAD

Se realizó un modelo 3D del prototipo de la turbina utilizando el software *Autodesk Inventor 2019*. El modelo se compone por la estructura realizada a partir de tubo cuadrado de acero estructural, el generador, tres aspas fabricadas a partir de tubo PVC, la cola para alineación de la turbina, el rotor, la base con rodamiento y la torre. A continuación, se muestran imágenes del modelo 3D y sus componentes

Figura 17: Ensamble final del modelo 3D de la turbina (Vista isométrica, frontal y de lado).



Fuente: *Autodesk Inventor 2019*

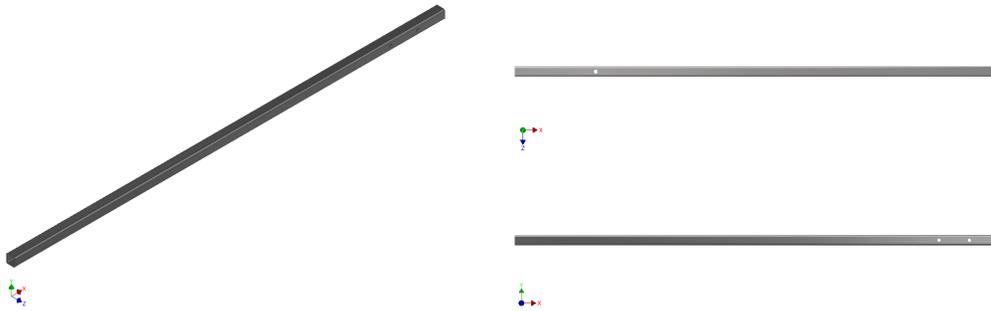
Figura 18: Modelo 3D de la turbina (Vista isométrica, frontal y de lado)



Fuente: *Autodesk Inventor 2019*

La estructura de la turbina está fabricada de tubo cuadrado de 1 pulgada. La pieza tiene un largo de 120 cm. El tubo cuenta con un agujero de 1 cm a 20 cm de un extremo, el cual atraviesa el centro del tubo de la torre. Esto con el fin de que los cables que salen del generador no se enreden cuando turbina gire para alinearse con el viento. En el otro extremo tiene dos agujeros para anclar la aleta, la cual se encarga de alinear la turbina con el viento.

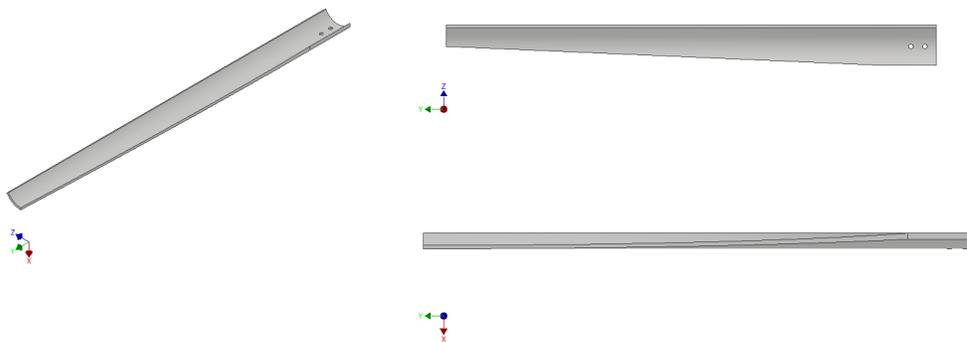
Figura 19: Estructura de la turbina (Vista isométrica, de planta y frontal).



Fuente: Autodesk Inventor 2019

Las aspas de la turbina esta diseñadas a partir de tubos PCV de 3 pulgadas de diámetro. El tubo de corta en tres partes iguales. Después se hace un corte en diagonal de una esquina de un extremo hasta el centro del otro extremo. Cuenta con dos agujeros de 8 mm de diámetro para unir las al rotor.

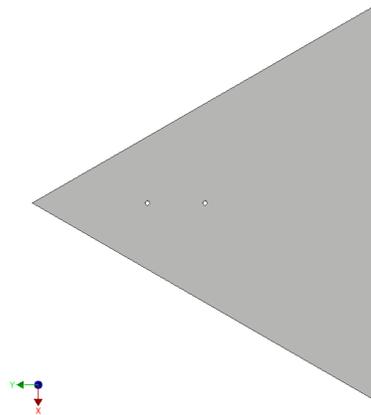
Figura 20: Aspa de tubo PVC (Vista isométrica, de planta y frontal).



Fuente: Autodesk Inventor 2019

La aleta está diseñada como un triángulo equilátero con una longitud de 52 cm de largo. Está fabricada a partir de lámina de acero estructural de 2 mm de espesor. Tiene dos agujeros de 8 mm de diámetro para anclarlas a la estructura.

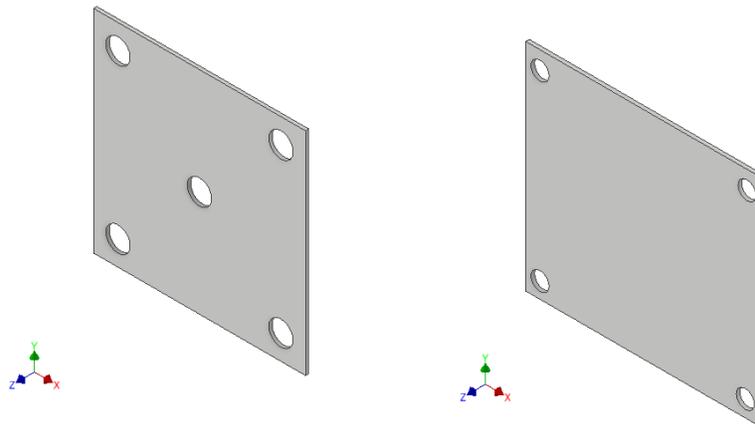
Figura 21: Aleta de la cola (Vista frontal).



Fuente: Autodesk Inventor 2019

Las placas base de la chumacera y del motor son de 13 cm x 13 cm. Ambas placas son de lámina de acero estructural de 2 mm de espesor. La placa de la chumacera cuenta con 5 agujeros de 14 mm de diámetro, mientras que la placa del motor cuenta con 4 agujeros de 10 mm de diámetro.

Figura 22: Placas base de la chumacera y del motor (Vistas isométricas)



Fuente: Autodesk Inventor 2019

Los demás componentes de la turbina se adquieren en el mercado nacional. Los componentes a adquirir son: los pernos, tuercas y roldanas para la sujeción de las piezas. El motor eléctrico que funcionara como generador. Cables, batería y módulos reguladores de voltaje para el circuito eléctrico. El tubo de acero galvanizado para la estructura de la torre. Y la chumacera para el sistema de alineación con el viento de la turbina.

5.2.2. Selección del tipo de turbina

Como se mencionó en el marco teórico, las turbinas eólicas se dividen principalmente en dos grandes grupos, las turbinas de eje vertical y las de eje horizontal. Actualmente, el tipo de turbina eólica más utilizada es la de eje horizontal, esto se debe a que tienen una mayor eficiencia, alcanzan potencias más altas y pueden trabajar a velocidades de viento bajas. (Tong, 2010).

Para seleccionar el tipo de turbina a diseñar se deben tomar en cuenta los requisitos de este trabajo. Entre los requisitos se destacan la velocidad de viento baja a la que debe operar la turbina de 2.5 m/s y que debe entregar la potencia necesaria para poder cargar un celular de 600 mAh y mantener encendido un foco led de 1.5 W por 5 horas. También se toma en cuenta la irregularidad del viento, por lo que la eficiencia es primordial para poder obtener la potencia requerida. Basado en estos aspectos, se seleccionó a diseñar una turbina eólica de eje horizontal de tres aspas, ya que es la que presenta mayor eficiencia en velocidades de viento bajas. (Schubel & Crossley, 2012).

5.2.3. Selección del generador

Debido a que se definió como requerimiento de este proyecto la viabilidad de que este sea replicado en diferentes comunidades, el diseño debe ser lo más simple posible. Por lo que, en lugar de fabricar directamente un generador de imanes permanentes, lo cual requiere un alto conocimiento e inversión, se decidió utilizar un motor eléctrico DC de imanes permanentes ya fabricado. Se eligió un motor DC, ya que las baterías se cargan con corriente DC y de lo contrario, se necesitaría usar un inversor, lo que aumenta el costo del prototipo. Se debe tomar en cuenta que el costo de este motor debe ser bajo y obtenible en el mercado nacional.

Para seleccionar que tipo de motor pueden ser utilizados se debe definir la potencia que debe entregar la turbina para suplir los requerimientos establecidos. Conocemos la potencia del foco LED que es de 1.5 W y que debe cargar un celular con una batería de 600 mAh.

La potencia según la Ley de Ohm se define como:

$$P = I * V \quad (5)$$

Donde $P[W]$ es la potencia, $I[A]$ es la corriente y $V[V]$ es el voltaje.

Se conoce la corriente de la batería que es de 600 mA y se carga por medio de un cargador de 5 V, por lo que calcula la potencia.

$$P_{celular} = \left(\frac{600}{1000} A \right) * (5 V)$$

$$P_{celular} = 3 W$$

Por lo que la potencia total que debe tener el motor a utilizar es la sumatoria de la potencia necesaria para el celular y el foco.

$$P_{motor} = P_{celular} + P_{foco}$$

$$P_{motor} = (3 W) + (1.5 W)$$

$$P_{motor} = 4.5 W$$

Se investigaron diferentes tipos de motores DC de imanes permanentes que pueden ser utilizados para la turbina eólica y se encontraron las siguientes posibilidades:

- Motor del ventilador del radiador de automóvil (modelos del 2005 o anteriores)
- Motor de *Scooter* eléctrico o *Hoverboard*
- Motor de impresora industrial

Los motores de ventiladores de radiador de vehículos son impulsados por la batería de 12 V DC que utiliza el vehículo. Según el modelo, pueden ser de 24 W hasta más de 500 W. Debido a que estos motores son de imanes permanentes, tienen una gran eficiencia eléctrica y al ser impulsados por baterías, utilizan corriente continua. En Guatemala pueden ser obtenidos directamente de vendedores de repuestos o en chatarrerías, por lo que son accesibles en el mercado guatemalteco.

Las *hoverboards* o *scooters* eléctricos usan motores eléctricos DC sin escobillas de 24 o 36 V y alcanzan una potencia de hasta 350 W. Son altamente eficientes por reducir fricción al no tener escobillas. Sin embargo, son difíciles de encontrar en el mercado guatemalteco y su precio es muy elevado.

Las impresoras industriales utilizan motores DC de imanes permanentes que pueden variar de 12 a 24 V y entregar una potencia de 100 W a 200 W dependiendo del modelo. Son altamente eficientes y de bajo costo, pero son difíciles de encontrar en el mercado nacional. Esto se debe a que no hay muchas empresas que vendan repuestos ni que den mantenimiento a este tipo de impresoras.

Para decidir qué tipo de motor a utilizar es necesario realizar una matriz de ponderación. Para matriz se utilizaron los siguientes factores de ponderación:

- Potencia que entrega el motor. Este debe ser mínimo de 4.5 W como se definió anteriormente.
- El voltaje de entrega del motor debe ser cercano al de la batería, que es de 12 V.
- El motor debe de obtenerse con facilidad en el mercado nacional.
- Debe tener un costo accesible.

Debido a que no todos estos factores tienen la misma importancia, se compara la prioridad de estos para obtener su respectivo peso según su importancia. El más importante es la potencia, debe ser mayor a la requerida de 4.5 W. Le sigue la accesibilidad, costo y de obtenerlo en el mercado nacional. Por último, es que el voltaje esté cercano a los 12 V de la batería, ya que esto se puede lograr con reguladores de voltaje.

En la matriz de ponderación se comparan estos factores directamente, donde se le asigna un valor al factor de comparación según su importancia y el recíproco de dicho valor se le

coloca al factor comparado. Se suman los valores designados para cada factor y se obtiene la ponderación de dicha suma para definir el peso del mismo.

Cuadro 2: Ponderación por nivel de importancia

Importancia	Valor	Recíproco
Alta	10	0.1
Media	5	0.2
Baja	1	1

Fuente: elaboración propia

Se realiza el proceso para obtener el peso ponderado de cada factor de comparación, el cual se muestra en el siguiente cuadro.

Figura 23: Peso ponderado de los factores de selección.

Factor	Potencia de entrega mayor a la requerida de 4.5 W	Voltaje de entrega cercano a los 12 V de la batería	Accesibilidad en el mercado nacional	Costo accesible	Puntos	Peso Ponderado
Potencia de entrega mayor a la requerida de 4.5 W		5	5	5	15	54%
Voltaje de entrega cercano a los 12 V de la batería	0.2		0.2	0.2	0.6	2%
Accesibilidad en el mercado nacional	0.2	5		1	6.2	22%
Costo accesible	0.2	5	1		6.2	22%
Total					28	100%

Fuente: elaboración propia

Una vez definidos los pesos ponderados de cada factor, se precede a realizar la matriz de ponderación, evaluando cada opción respecto a cómo cumple con cada factor. La opción que tenga más puntos es la que se elige.

Figura 24: Matriz de ponderación del motor a utilizar.

Factor	Potencia de entrega mayor a la requerida de 4.5 W			Voltaje de entrega cercano a los 12 V de la batería			Accesibilidad en el mercado nacional			Costo accesible			Puntos Totales
	Valor	Peso Ponderado	Puntos	Valor	Peso Ponderado	Puntos	Valor	Peso Ponderado	Puntos	Valor	Peso Ponderado	Puntos	
Motor ventilador de radiador de carro	5	54%	2.68	10	2%	0.21	10	22%	2.21	10	22%	2.21	7.32
Motor de Hoverboard	10	54%	5.36	1	2%	0.02	1	22%	0.22	1	22%	0.22	5.82
Motor de impresora	5	54%	2.68	5	2%	0.11	1	22%	0.22	1	22%	0.22	3.23

Fuente: elaboración propia

Como se observa en la matriz de ponderación de la Figura 24, la opción que mejor cumple con los factores de comparación, por lo que se elige el motor de ventilador de radiador de carro como el generador a utilizar en el prototipo de turbina eólica.

Se buscó en el mercado nacional motores de ventilador del radiador vehículos de modelos anteriores al año 2006, con el fin de asegurar que estos sean de imanes permanentes y no de electroimanes. Se seleccionó el motor del radiador de una *Hyundai* Santa Fe modelo 2002 al 2009, de 300 W de potencia y 12 V DC.

5.2.4. Selección de la batería

Para seleccionar la batería, primero se debe calcular el tamaño de esta. Se conoce que la batería del celular es de 600 mAh, por lo que únicamente se debe definir cuanto consume el foco LED de 1.5 W. Utilizando la ley de Ohm de la ecuación 5, se puede despejar para la corriente, obteniendo la siguiente ecuación.

$$I = \frac{P}{V} \quad (6)$$

El foco led consume 1.5 W de potencia y requiere un voltaje de 12 V para operar, por lo que la corriente total del foco es de:

$$I = \frac{1.5 W}{12 V}$$

$$I = 0.125 A$$

El foco debe estar encendido por un total de 5 horas continuas según el requisito establecido, por lo que los amperios horas necesarios para el foco es de:

$$Ah_{foco} = (0.125 A) * (5 horas)$$

$$Ah_{foco} = 0.625 Ah$$

Por lo que los amperios horas necesarios de la batería son la suma entre los amperios horas del celular y los del foco.

$$Ah_{bateria} = Ah_{foco} + Ah_{celular}$$

$$Ah_{bateria} = (0.625 Ah) + (0.6 Ah)$$

$$Ah_{bateria} = 1.225 Ah$$

Por lo que la batería a seleccionar debe ser de al menos 1.225 Ah y de 12 V para suplir con la carga necesaria y cumplir con los requisitos establecidos.

Se seleccionó la batería sellada de ácido-plomo de 12 V y 7 Ah de la marca *Steren*, debido a que cumple con las condiciones de voltaje y amperios horas necesarias, es accesible en el mercado nacional y tiene un costo accesible de Q200.00. Esta batería cuenta con voltaje de carga flotante, que permite mantenerla cargada por un tiempo indefinido sin dañarla.

Además, soporta 10,000 ciclos de carga-descarga y no presenta efecto de memoria, por lo que no es necesario cargarla en su totalidad para utilizarla, ideales para aplicaciones de generación de energía intermitente. Cuenta con un sellado de alta seguridad para evitar derrames, lo que la hace segura para tenerla en los hogares. Para cargarla se necesita un voltaje DC constante de 15 V y 2.8 A máximo si se está utilizando.

Figura 25: Batería marca *Steren*, sellada, de ácido-plomo de 12V y 7 Ah.

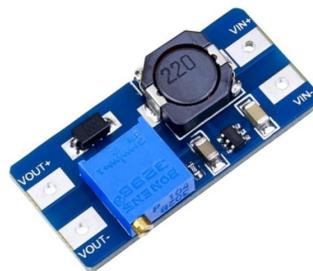


Fuente: Steren, s.f.

5.2.5. Reguladores de voltaje

Debido a que la batería se debe cargar a un voltaje constante de 15 V y la generación de la turbina es intermitente debido a que la velocidad del viento es variante, es necesario utilizar reguladores de voltaje. Se seleccionó el módulo elevador de voltaje MT3608, debido a su función es elevar el voltaje de entrada y entregar un voltaje de salida constante, superior al voltaje de entrada. El módulo MT3608 puede recibir voltajes DC desde 2 V hasta 24 V y entregar voltajes DC de 5 V hasta 28 V. El voltaje de salida puede ser modificado por medio de un potenciómetro que viene incluido en el módulo. El voltaje de salida es entregado con una corriente de 2 A. Cuenta con protección de sobre temperatura, es decir que apaga la salida del voltaje si se aumenta la temperatura de seguridad. Además, cuenta con protección de sobre corriente cuando se superan los 4 A. (La Electrónica, s.f.-a)

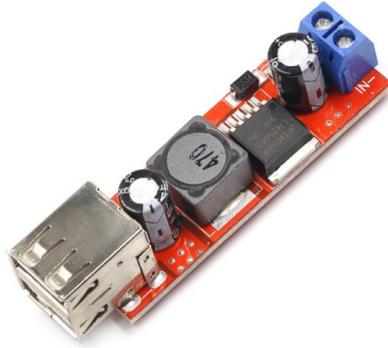
Figura 26: Módulo regulador de voltaje MT3608.



Fuente: La Electrónica, s.f.-a

La batería encargada de almacenar la energía generada por la turbina es de 12 V, por lo que entrega 12 V DC a las cargas que se conecten a la misma. Sin embargo, las baterías de los celulares se cargan con un voltaje de 5 V, por lo que no se puede conectar directamente a la batería de la turbina. Por lo que se seleccionó el módulo regulador de voltaje LM2596, el cual su función es reducir y entregar un voltaje constante en la salida menor al voltaje de entrada. Este módulo permite voltajes DC de entrada de 6 V a 40 V y entrega un voltaje DC de salida constante de 5 V. Cuenta con 2 puertos USB integrados con un amperaje máximo de 3A, que son ideales para cargar celulares. (La Electrónica, s.f.-b)

Figura 27: Módulo regulador de voltaje LM2596 de 5 V.



Fuente: La Electrónica, s.f.-b

5.2.6. Aspas

El dimensionamiento del largo de las aspas se realiza para la velocidad mínima de diseño de 2.5 m/s, despejando el área de barrido de la ecuación de la potencia del viento 2 anteriormente mencionada en el marco teórico. Esta ecuación depende también de la potencia obtenida por la turbina, que en este caso es la potencia necesaria anteriormente calculada de 4.5 W, a la cual se le agregara un factor de seguridad de 1.2 para asegurar cumplir con dicha potencia. También depende de la densidad del aire, la cual se toma como la estándar a presión atmosférica y a 15 °C de 1.255 kg/m³. El coeficiente de potencia para un generador eólico de eje horizontal pequeño, el cual se definió anteriormente con un valor de 0.3. Por último, la eficiencia eléctrica del motor eléctrico DC, el cual es generalmente de 80 %. Por lo que la potencia extraída por la turbina del viento se define como:

$$P_T = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * C_p * \eta_e * \frac{1}{f_s} \quad (7)$$

Donde ρ [$\frac{kg}{m^3}$] es la densidad del aire, A [m^2] es el área de barrido de la turbina, v [$\frac{m}{s}$] es la velocidad del viento, C_p [%] es el coeficiente de potencia, η_e [%] es la eficiencia eléctrica del generador y f_s es el factor de seguridad.

Se despeja para el área de barrido y se obtiene la siguiente ecuación:

$$A = \frac{2 * P_{Turbina} * f_s}{\eta_e * \rho * v^3 * C_p} \quad (8)$$

Se procede a calcular el área de barrido necesaria para generar 4.5 W con una velocidad de viento de 2.5 m/s.

$$A = \frac{2 * (4.5W) * (1.2)}{(0.8) * (1.225 \frac{kg}{m^3}) * (2.5 \frac{m}{s})^3 * (0.3)}$$

$$A = 2.351 m^2$$

El área de barrido de una turbina de eje horizontal se definió en la ecuación 3 como:

$$A = \pi * r^2$$

Se despeja y calcula el largo del aspa:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$r = \sqrt{\frac{2.351 m^2}{\pi}}$$

$$r = 0.865 m \approx 0.87 m$$

Se determinó que el largo óptimo para las aspas de la turbina para generar la potencia requerida de 4.5 W a la velocidad mínima de viento de 2.5 m/s es de 0.87 metros.

Material del aspa

Como se discutió anteriormente, el diseño óptimo del aspa de una turbina eólica se basa en un método iterativo, en el que se utiliza el límite de Betz para obtener el valor óptimo del largo y la cuerda del aspa. Además, requiere de un costo alto de manufactura y materiales especializados, como fibras reforzadas. (Schubel & Crossley, 2012) (Van den Bossche, 2013)

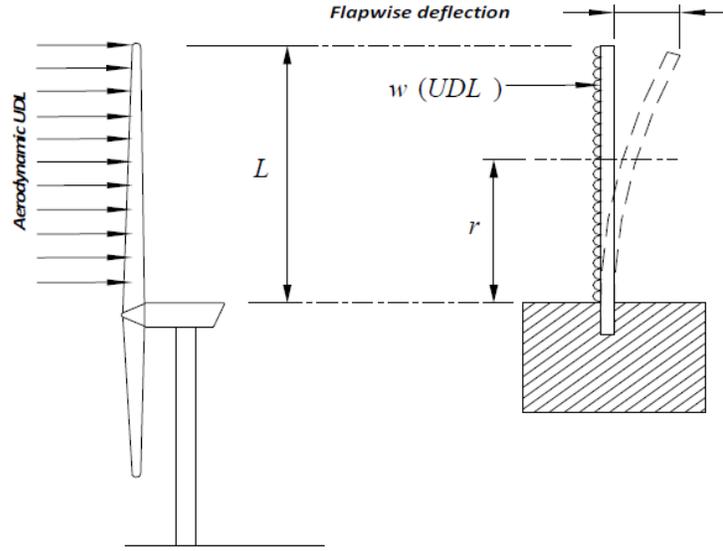
Por lo que, para turbinas eólicas pequeñas fabricadas manualmente, comúnmente se utilizan tubos de PVC para la fabricación de las aspas. Los tubos PVC brindan una sección curva que se asemeja a los perfiles aerodinámicos utilizados para el diseño de las aspas. Además, es resistente al agua y a la degradación por estar expuesto a la radiación solar. Van den Bossche, 2013

Análisis estático del aspa

Para determinar si un aspa fabricada a partir de tubos de PVC soportar las cargas axiales provocadas por el contacto normal del viento, se realiza un análisis estático del aspa.

Un aspa puede modelarse como una columna en voladizo, empotrada en un extremo y libre en el otro, donde la fuerza del viento normal a la superficie del aspa provoca un esfuerzo flexión sobre esta.

Figura 28: Aspa de la turbina modelada como una columna en voladizo.



Fuente: Schubel y Crossley, 2012

Debido a que el viento es un fluido, la presión que ejerce el aire sobre la turbina se puede modelar con el principio de Bernoulli como:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad (9)$$

Donde ρ [$\frac{kg}{m^3}$] es la densidad del aire y v [$\frac{m}{s}$] es la velocidad del viento.

Se utiliza la velocidad de viento máxima definida anteriormente de 24 m/s para evaluar que el aspa soporte dichas condiciones.

La fuerza que ejerce el viento sobre el aspa, por ser provocada por una presión en una superficie plana, se define como:

$$F_{viento} = P_{viento} * A_{sup,aspa} \quad (10)$$

Donde F_{viento} [N] es la fuerza del aire, P_{viento} [Pa] es la presión del aire y A [m^2] es el área superficial del aspa.

Debido a la forma que tiene el aspa diseñada a partir de PVC, esta se puede modelar como un tercio de un cilindro, donde el área es:

$$A_{sup,aspa} = \frac{1}{3} * 2 * \pi * L_{aspa} * a_{aspa} \quad (11)$$

Donde L_{aspa} [m] es el largo del aspa y a_{aspa} [m] es el ancho del aspa.

El ancho del aspa va a depender del diámetro de tubo PVC que se utilice, por lo que se varía según los diámetros de tubos a evaluar. El tubo PVC se corta en tres partes iguales para hacer las aspas, por lo que el ancho del aspa se define como un tercio del perímetro del tubo a utilizar.

$$a_{aspa} = \frac{1}{3} * 2\pi * r_{tubo} \quad (12)$$

Donde r_{tubo} [m] es el radio del tubo a utilizar.

Se evalúan tubos de 3", 4" y 6" de diámetro y se usa la ecuación 12 para calcular los anchos de aspa y la ecuación 11 para calcular el área superficial del aspa. Se muestra un ejemplo a continuación y los resultados se presentan en un cuadro.

Primero se calcula el ancho del aspa, que al ser un tercio de un tubo de PVC se calcula como un tercio del perímetro de un círculo.

$$a_{aspa,1} = \frac{1}{3} * 2\pi * r_{tubo,1}$$

$$a_{aspa,1} = \frac{1}{3} * 2\pi * (1.5 \text{ pulg}) * (0.0254 \frac{m}{\text{pulg}})$$

$$a_{aspa,1} = 0.0798 \text{ m}^2$$

Después se calcula el área superficial del aspa.

$$A_{sup,aspa,1} = \frac{1}{3} * 2 * \pi * L_{aspa,1} * a_{aspa,1}$$

$$A_{sup,aspa,1} = \frac{1}{3} * 2 * \pi * (0.87 \text{ m}) * (0.0798 \text{ m})$$

$$A_{sup,aspa,1} = 0.1454 \text{ m}^2$$

Cuadro 3: Anchos de aspa y área superficial del aspa según el diámetro de tubo PVC.

Diámetro de tubo PVC [pulg]	Ancho del aspa [m]	Área superficial del aspa [m ²]
3	0.0798	0.1454
4	0.1064	0.1939
6	0.1596	0.2908

Fuente: elaboración propia

Una vez calculadas las áreas superficiales se procede a calcular las fuerzas del viento según cada área del aspa utilizando la ecuación 10. Se muestra un ejemplo del cálculo usando el área superficial 1, que corresponde al diámetro de tubo de 3 pulgadas y los resultados se muestran en un cuadro.

$$F_{viento,1} = P_{viento} * A_{sup,aspa,1}$$

$$F_{viento,1} = (\frac{1}{2} * \rho * v_{max}^2) * A_{sup,aspa,1}$$

$$F_{viento1} = \left[\frac{1}{2} * (1.225 \frac{kg}{m^3}) * (24 \frac{m}{s})^2 \right] * (0.1454 m^2)$$

$$F_{viento1} = 51.297 N$$

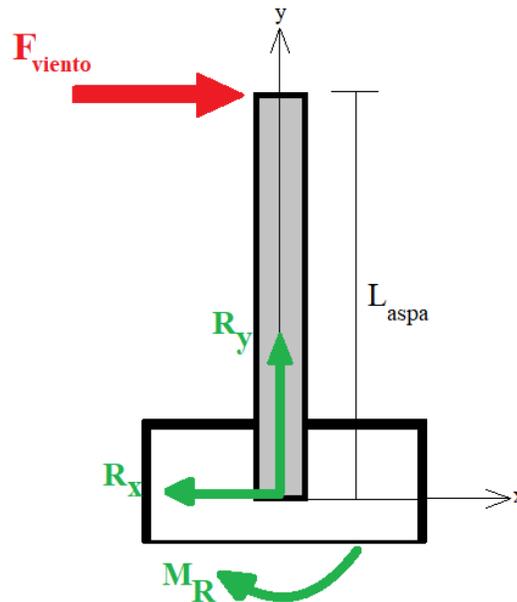
Cuadro 4: Fuerzas del viento sobre el aspa según el ancho del aspa.

Variable	Valor
$F_{viento,1}$	51.297 N
$F_{viento,2}$	68.396 N
$F_{viento,3}$	102.594 N

Fuente: elaboración propia

Como se mencionó anteriormente, el aspa puede ser modelada como una columna en voladizo de sección transversal rectangular, en la que la fuerza del viento actúa perpendicularmente sobre la superficie de esta, provocando un momento flector. Se asume el peor caso, en el que la fuerza del viento se aplica en la punta del aspa, provocando el momento flector máximo. El modelado del sistema se muestra en la siguiente figura.

Figura 29: DCL del aspa.



Fuente: elaboración propia

Debido a que la fuerza del viento sobre el aspa es perpendicular a esta, se genera un esfuerzo de flexión pura sobre el aspa. El esfuerzo de flexión pura se calcula como:

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \quad (13)$$

Donde σ [MPa] es el esfuerzo de flexión máximo, M [N*mm] es el momento flector máximo, I [mm⁴] es el momento de inercia y c [mm] es la distancia al eje neutro.

El momento flector máximo se calcula como se muestra a continuación. Se muestra un ejemplo del cálculo utilizando el $F_{viento1}$, que corresponde al diámetro de tubo de 3 pulgadas y los resultados se muestran en un cuadro.

$$M_{max,1} = L_{aspa} * F_{viento,1}$$

$$M_{max,1} = (0.87 m) * (51.297 N)$$

$$M_{max,1} = 44.628 N * m$$

Cuadro 5: Momentos flectores máximos según el diámetro de tubo utilizado.

Variable	Valor
$M_{max,1}$	44.628 N*m
$M_{max,2}$	59.504 N*m
$M_{max,3}$	89.256 N*m

Fuente: elaboración propia

El momento de inercia de un prisma rectangular con eje de rotación que pasa por el centro de la placa se define como:

$$I_{prisma,rectangular} = \frac{1}{12} * m(a^2 + b^2) \quad (14)$$

Donde I [m^4] es el momento de inercia, m [kg] es la masa del prisma rectangular, a [m] el ancho del prisma (espesor del aspa) y b [m] el largo del prisma (largo del aspa).

Sin embargo, el aspa está girando sobre un uno de sus extremos, por lo que se debe aplicar el teorema de ejes paralelos. Esto con el fin de mover el eje del centro de la placa a uno de sus extremos y así poder calcular el momento de inercia de esta. El teorema de ejes paralelos se define como:

$$I_{ejes,paralelos} = I_c + mh^2 \quad (15)$$

Donde I_c [m^4] es el momento de inercia sobre el eje original, m [kg] es la masa del prisma rectangular y h [m] es la distancia que se corre el eje (la mitad del largo del aspa en este caso).

La masa del aspa se calcula obteniendo volumen del aspa a partir del área superficial y el espesor del tubo. Por último, se calcula la masa utilizando la densidad del PVC (con valor de $1,450 \text{ kg}/m^3$). El volumen y la masa del aspa se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 6: Datos de las aspás según el diámetro de tubo PVC

Diámetro de tubo PVC [pulg]	Espesor de tubo PVC [mm]	Ancho del aspa [m]	Área superficial del aspa [m^2]	Volumen del aspa [m^3]	mása del aspa [kg]
3	5.5	0.0798	0.1454	0.0008	1.160
4	6.0	0.1064	0.1939	0.0012	1.687
6	7.1	0.1596	0.2908	0.0021	2.994

Fuente: elaboración propia

Por lo que la inercia del aspa se calcula como se muestra a continuación. Se muestra un ejemplo del cálculo utilizando los datos del aspa 1, que corresponde al diámetro de tubo de 3 pulgadas. Los resultados se muestran en el Cuadro 7.

$$I_{aspa,1} = \frac{1}{12} * m_{aspa,1} * (e_{aspa,1}^2 + b^2) + m_{aspa,1} * \left(\frac{b}{2}\right)^2$$

$$I_{aspa,1} = \frac{1}{12} * (1.160 \text{ kg}) * [(0.0055 \text{ m})^2 + (0.87 \text{ m})^2] + (1.160 \text{ kg}) * \left(\frac{0.87 \text{ m}}{2}\right)^2$$

$$I_{aspa,1} = 0.29256 \text{ m}^4$$

Cuadro 7: Momentos de inercia de las aspas según el diámetro de tubo PVC.

Variable	Valor
$I_{aspa,1}$	0.29256 m^4
$I_{aspa,2}$	0.42554 m^4
$I_{aspa,3}$	0.75533 m^4

Fuente: elaboración propia

El esfuerzo flector máximo se calcula utilizando la ecuación 10. Se muestra un ejemplo del cálculo usando los datos del aspa 1, que corresponde al diámetro de tubo de 3 pulgadas. Los resultados se muestran en el Cuadro 8.

$$\sigma_{aspa,1} = \frac{M_{max,1} * \left(\frac{e_{aspa,1}}{2}\right)}{I_{aspa,1}}$$

$$\sigma_{aspa,1} = \frac{(44.628 \text{ N} * \text{m}) * \left(\frac{0.0055 \text{ m}}{2}\right)}{0.29256 \text{ m}^4}$$

$$\sigma_{aspa,1} = 0.419496 \text{ MPa}$$

Cuadro 8: Esfuerzo flector máximo de las aspas según el diámetro de tubo PVC.

Variable	Valor
$\sigma_{aspa,1}$	0.419496 MPa
$\sigma_{aspa,2}$	0.419496 MPa
$\sigma_{aspa,3}$	0.419494 MPa

Fuente: elaboración propia

Por último, se define la teoría de falla. Debido a que es un material frágil con flexión pura y se busca un criterio conservador, se utiliza el teorema de Mohr-Coulomb frágil, el cual se calcula como:

$$\eta = \frac{S_{ult}}{\sigma} \quad (16)$$

Donde σ [MPa] es el esfuerzo flexor máximo y S_{ult} [MPa] es la resistencia ultima a la tensión del material.

El PVC tiene una resistencia última a la tensión (S_{ult}) de 53.7 MPa, obtenido de *MatWeb*.

El factor de seguridad se calcula utilizando la ecuación 16. Se muestra un ejemplo del cálculo utilizando los datos del aspa 1. Los resultados se muestran en el Cuadro 10.

$$\eta_{aspa,1} = \frac{S_{ult}}{\sigma_{aspam,1}}$$

$$\eta_{aspa,1} = \frac{53.7 MPa}{0.419496 MPa}$$

$$\eta_{aspa,1} = 128.0106$$

Cuadro 9: Factores de seguridad de las aspas según el diámetro de tubo PVC.

Variable	Valor
$\eta_{aspa,1}$	128.0106
$\eta_{aspa,2}$	128.0109
$\eta_{aspa,3}$	128.0115

Fuente: elaboración propia

Basado en el teorema de Mohr-Coulomb frágil, el cual establece que se debe obtener un factor de seguridad de 3 a 4, todas las aspas cuentan con un factor de seguridad mayor a 4 por lo que todos los tubos pueden ser usados para el diseño del aspa. Sin embargo, se escoge utilizar el tubo de 3" debido a que es más liviano y es accesible de obtener en el mercado nacional. Por lo que las dimensiones finales del aspa son un largo de 870 mm y un ancho de 79.8 mm.

Para darle el factor aerodinámico al aspa, se hace un corte diagonal a lo largo de la misma, comenzando en una esquina del extremo inferior hasta el centro del ancho del otro extremo. Este corte diagonal permite que el rotor gire en una dirección específica al entrar en contacto con el viento. Simon, 2011 Rathod, 2014

Figura 30: Trazado del corte diagonal sobre las aspas de PVC.



Fuente: Simon, 2011

Figura 31: Las aspas de la turbina cortadas a su forma final. Este diseño incluye un corte en diagonal en el extremo inferior del aspa, con el fin de evitar el contacto entre estas al momento de instalarlas en el rotor.



Fuente: Simon, 2011

Se definen las dimensiones finales del aspa con un largo de 870 mm y un ancho de 79.8 mm en el extremo inferior y un ancho de 39.9 mm en el extremo superior.

5.2.7. Rotor

Es posible calcular la velocidad del rotor utilizando la velocidad del viento y el largo de las aspas utilizando la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{v_{viento} * \lambda}{r} = \frac{v_{viento} * \lambda}{L_{aspa}} \quad (17)$$

Donde L_{aspa} [m] es el largo del aspa, v_{viento} [m/s] es la velocidad del viento, λ es la relación de velocidad de punta y π es constante.

Para la velocidad del viento se evalúan velocidad máxima de 24 m/s para determinar los rpm máximos a los que va a rotar el rotor. La relación de velocidad de la punta (λ) se definió en el marco teórico con un valor de uno para turbinas eólicas pequeñas. Por lo que la velocidad máxima del rotor se calcula como:

$$\omega_{max,rotor} = \frac{(24 \frac{m}{s}) * (1)}{0.87 m} * (\frac{60 s}{1 min}) * (\frac{1 rev}{2\pi rad})$$

$$\omega_{max,rotor} = 263.43 rpm \approx 264 rpm$$

Debido a que la velocidad máxima del rotor es significativamente baja en comparación de los rpm a los que el ventilador del radiador gira según las especificaciones del fabricante de 3,000 rpm, se decidió utilizar el rotor del ventilador de radiador del motor de Hyundai Santa Fe modelo 2002 a 2009. Este rotor está diseñado para altas velocidades y para soportar condiciones de ambiente externo como altas velocidades de viento, altas temperaturas del motor del vehículo y lluvia.

Para verificar que dicho rotor soporta las cargas de las aspas de la turbina se procede a comparar las fuerzas de inercia de las aspas originales del ventilador y las del aspa. La fuerza de inercia se define como:

$$F_{inercia} = r_g * \omega^2 * m \quad (18)$$

Donde $F_{inercia}$ [N] es la fuerza de inercia, r_g [m] es la distancia del eje de rotación al centro de gravedad del aspa y m [kg] es la masa de las aspas.

Para las aspas del ventilador original se utiliza su masa, la cual fue medida con balanza, con un peso total de 0.3 kg; se mide el largo del aspa original que es de 0.11 m y se asume que el centro de gravedad está en el centro geométrico del aspa por ser simétrica. Por último, se utilizan los 3,000 rpm a los que gira el ventilador. La fuerza de inercia de las aspas originales del ventilador se calcula como:

$$F_{inercia, aspas originales} = \left(\frac{0.11}{2} m\right) * \left(3,000 rpm * \frac{2\pi}{60}\right)^2 * (0.3 kg)$$

$$F_{inercia, aspas originales} = 1,628.48 N$$

Para la fuerza de inercia de las aspas de la turbina se utiliza su largo definido de 0.87 m, la masa calculada de 1.16 kg y la velocidad máxima de giro de 264 rpm. Por lo que la fuerza de inercia del aspa de la turbina se calcula como:

$$F_{inercia, aspas turbina} = \left(\frac{0.87}{2} m\right) * \left(264 rpm * \frac{2\pi}{60}\right)^2 * (1.16 kg)$$

$$F_{inercia, aspas turbina} = 385.67 N$$

Como se puede observar la fuerza de inercia provocada por las aspas de las turbinas es más de 4 veces menor a la fuerza de inercia provocada por las aspas originales, por lo que se concluye que el rotor del ventilador del radiador es capaz de soportar las cargas provocadas por las aspas de la turbina.

5.2.8. Estructura

La estructura debe brindar soporte al generador, así como alojar el rodamiento que permite que la turbina se alinee a la dirección del viento y brindar el soporte de la cola, la cual es la encargada de lograr dicho alineamiento. Para el soporte se utilizó tubo cuadrado de acero estructural de 1" x 1" pulgadas y 2 mm de espesor y tanto para las bases como para la aleta, lámina de acero estructural. Esto se debe a que el soporte debe ser resistente, pero a la vez liviano y el acero estructural es de los aceros más recomendados para realizar soldaduras.

La estructura está compuesta por las bases del generador, la cola y la aleta de la cola. La cola de la turbina es la encargada de alinear la turbina con la dirección en la que fluye el viento. Esto aumenta la eficiencia de la turbina al siempre estar en contacto perpendicular con el viento y evita daños a otros componentes. El largo de la cola y el área de la aleta

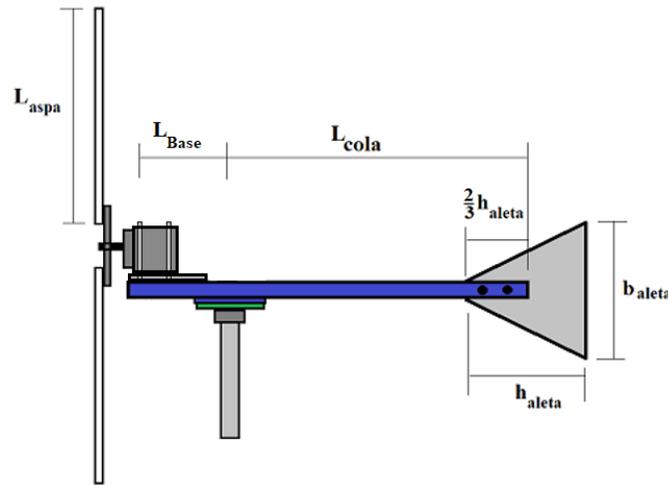
son los factores fundamentales para el diseño de estos elementos. Si la cola es muy larga puede presentar desbalance en la turbina y si la cola es muy corta va a tener dificultad en alinearse. Por otro lado, si el área superficial de contacto de la aleta no es suficiente, esta no va a lograr alinear la turbina con el flujo del viento. Por lo que para diseñar una cola para una turbina simple se deben cumplir dos principios. Que el largo de la cola es 1.2 veces el largo del aspa y que el área de la aleta debe ser entre el 5% y el 10% del área de barrido de la turbina. WiscWind, 2017

El largo de la cola se define como:

$$L_{cola} = 1.2 * L_{aspa} \quad (19)$$

Donde L_{cola} [m] es el largo de la cola que se define desde el punto de rotación de la turbina, hasta $1/3$ del largo de la aleta y L_{aspa} [m] es el largo del aspa.

Figura 32: Diagrama de las dimensiones principales de la estructura.



Fuente: elaboración propia

El largo de la cola puede ser calculado, ya que se conoce el largo del aspa que es de 0.87 metros. Por lo que el largo de la cola se calcula de la siguiente manera.

$$L_{cola} = 1.2 * (0.87 \text{ m})$$

$$L_{cola} = 1.04 \text{ m} \approx 1 \text{ m}$$

Para la aleta se recomienda que el área de la aleta debe estar entre el rango de 5% a 10%, pero entre mayor sea el área superficial de la aleta, mayor será la fuerza que ejerce el viento sobre la misma, como se planteó en la ecuación 10. La mejor forma para la aleta es un triángulo, debido a su simetría por arriba y por debajo de la cola. (WiscWind, 2017)

El área superficial de la aleta se calcula como:

$$A_{aleta} = 5\% * A_{barrido}$$

$$A_{aleta} = (0.05) * (2.351 \text{ m}^2)$$

$$A_{aleta} = 0.1176 \text{ m}^2$$

Para poder dimensionar la aleta, se asume que tiene forma de un triángulo equilátero, ya que sus 3 lados son iguales. El área de un triángulo equilátero se define como:

$$A_{triangulo, equilatero} = A_{aleta} = \frac{b^2 * \sqrt{3}}{4}$$

Se despeja y se calcula el lado del triángulo equilátero:

$$b = \sqrt{\frac{4 * A_{aleta}}{\sqrt{3}}}$$

$$b = \sqrt{\frac{4 * (0.1176 \text{ m}^2)}{\sqrt{3}}}$$

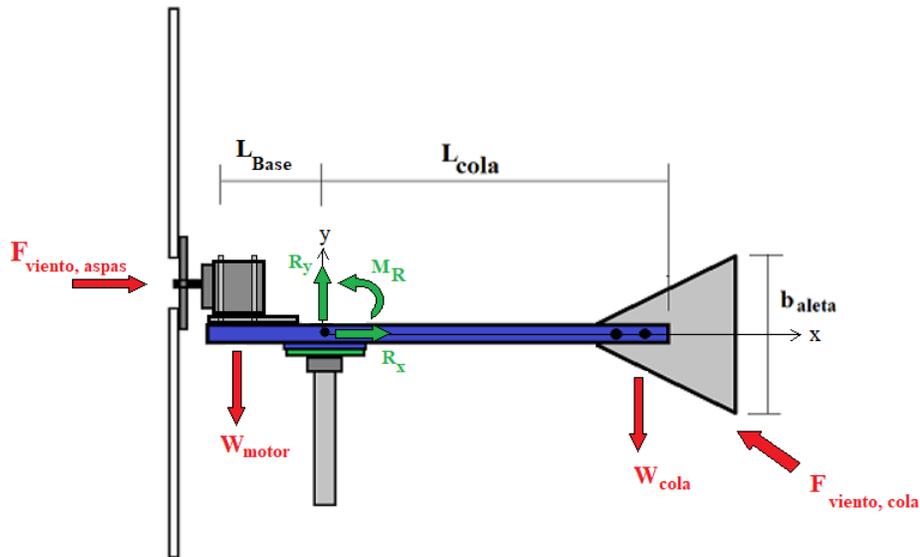
$$b = 0.52 \text{ m}$$

Por lo que la aleta es un triángulo equilátero con un largo de 0.52 m para los lados.

Análisis estático de la estructura

La estructura está compuesta por la cola, la aleta y las bases para el motor y la chumacera, por lo que esta debe soportar el peso de todos los componentes y la fuerza del viento que afecta las aspas del rotor y la cola.

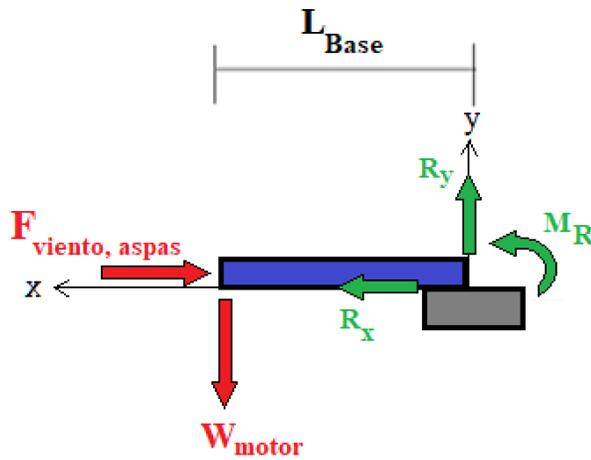
Figura 33: DCL de la estructura de la turbina.



Fuente: elaboración propia

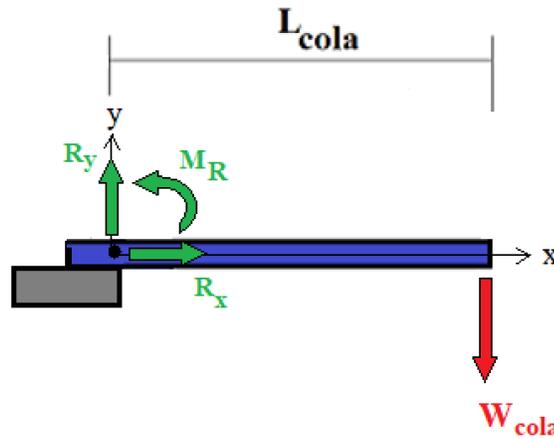
Debido a que la estructura esta pernaada al cojinete, este sistema se puede modelar como dos vigas en voladizo. La primera viga es la del largo de la base (L_{Base}) con la fuerza del viento sobre las aspas y el peso del motor. Debido a la dirección de estas fuerzas, esta viga está experimentando esfuerzos normales combinados. La fuerza del peso del motor al ser perpendicular a la viga genera un esfuerzo de flexión sobre esta. Mientras que, la fuerza del viento en las aspas es paralela a la viga, por lo que crea un esfuerzo de compresión puro. La segunda viga es la parte del largo de la cola (L_{cola}) con la fuerza del viento en la cola y el peso de la cola. Debido a que la fuerza del viento sobre la cola es perpendicular a la superficie de la cola, esta viga experimenta esfuerzos en dos planos. La fuerza del viento sobre la cola se encuentra sobre el plano z-x, mientras que la fuerza del peso de la cola actúa en el plano x-y.

Figura 34: DCL de la estructura de la base del motor.



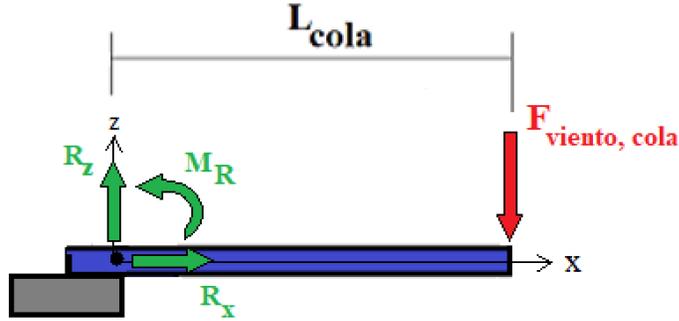
Fuente: elaboración propia

Figura 35: DCL de la estructura de la cola en el plano x-y.



Fuente: elaboración propia

Figura 36: DCL de la estructura de la cola en el plano z-x.



Fuente: elaboración propia

Como se observa en la Figura 34, la viga que modela la estructura de la base del motor experimenta esfuerzos normales combinados. La fuerza del motor crea una fuerza de flexión sobre la viga, se utiliza la ecuación 13 para calcular dicho esfuerzo.

El motor tiene una masa de 1.5 kg, por lo que su peso es de 14.72 N y el largo de la base del motor (L_{Base}) es de 0.1 metros. El momento flector provocado por el peso del motor se calcula como:

$$M_{max,base} = L_{Base} * W_{motor}$$

$$M_{max,base} = (200 \text{ mm}) * (14.72 \text{ N})$$

$$M_{max,base} = 2,944 \text{ N} * \text{mm}$$

La inercia de un tubo cuadrado se calcula de la siguiente manera:

$$I_{tubo \text{ cuadrado}} = \frac{1}{12}(H_{ext}^4 - H_{int}^4)$$

Las dimensiones del tubo cuadrado de 1" x 1" de acero estructural se midieron, obteniendo una altura exterior (H_{ext}) de 28 mm y una altura interior (H_{int}) de 25 mm. Por lo que la inercia del tubo cuadrado es de:

$$I_{tubo \text{ cuadrado}} = \frac{1}{12}[(28 \text{ mm})^4 - (25 \text{ mm})^4]$$

$$I_{tubo \text{ cuadrado}} = 18,669.25 \text{ mm}^4$$

La distancia del centroide del tubo cuadrado al ser simétrico es igual a la mitad de la altura exterior (H_{ext}) del mismo.

Por lo que el esfuerzo de flexión provocado por el peso del motor sobre la estructura de la base se calcula de la siguiente forma, utilizando la ecuación 13.

$$\sigma_{base, motor} = \frac{M_{max,base} * (\frac{H_{ext}}{2})}{I_{tubo \text{ cuadrado}}}$$

$$\sigma_{base, motor} = \frac{(2,944 N * mm) * (\frac{28 mm}{2})}{(18,669.25 mm^4)}$$

$$\sigma_{base, motor} = 2.21 MPa$$

Como se observa en la Figura 34, la fuerza del viento sobre las aspas provoca una fuerza de compresión normal sobre la estructura. El esfuerzo de compresión normal se calcula como:

$$\sigma_{compresion} = \frac{F}{A} \quad (20)$$

Donde F [N] es la fuerza y A [mm²] es el área superficial donde se aplica la fuerza.

La fuerza del viento sobre las tres aspas se calcula utilizando la ecuación 9 y 10 como se muestra a continuación:

$$F_{viento, aspas} = P_{aire} * 3 * A_{sup, aspa1}$$

$$F_{viento, aspas} = (\frac{1}{2} * \rho_a * v_{max}^2) * 3 * A_{sup, aspa1}$$

$$F_{viento, aspas} = \frac{1}{2} * (1.225 \frac{kg}{m^3}) * (24 \frac{m}{s})^2 * 3 * (0.1454 m^2)$$

$$F_{viento, aspas} = 153.89 N$$

El área superficial del tubo cuadrado se calcula como se muestra a continuación, utilizando una altura exterior (H_{ext}) de 28 mm y una altura interior (H_{int}) de 25 mm.

$$A_{sup, tubo cuadrado} = (H_{ext}^2 - H_{int}^2)$$

$$A_{sup, tubo cuadrado} = [(28 mm)^2 - (25 mm)^2]$$

$$A_{sup, tubo cuadrado} = 159 mm^2$$

Por lo que el esfuerzo de compresión puro provocado por la fuerza del viento en las aspas sobre la estructura de la base se calcula como:

$$\sigma_{base, viento} = \frac{(153.89 N)}{(159 mm^2)}$$

$$\sigma_{base, viento} = 0.97 MPa$$

El esfuerzo normal combinado máximo es la sumatoria del esfuerzo de flexión y el esfuerzo normal, que en este caso es de compresión. Por lo que el esfuerzo normal combinado sobre la estructura de la base se calcula como:

$$\sigma_{max, base} = \sigma_{base, motor} + \sigma_{base, viento}$$

$$\sigma_{max, base} = (2.21 MPa) + (0.97 MPa)$$

$$\sigma_{max, base} = 3.18 MPa$$

Por último, se define la teoría de falla, debido a que es un material dúctil sometido únicamente a esfuerzos normales, se utiliza la teoría de Energía de Distorsión (ED). El factor de seguridad se calcula como:

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma'}$$

Donde σ' [MPa] es el esfuerzo equivalente de Von Mises y S_y [MPa] es la resistencia a la fluencia del material.

El esfuerzo equivalente de Von Mises se calcula como:

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde σ_1, σ_2 y σ_3 [MPa] son los esfuerzos principales.

Sin embargo, para los casos en los que únicamente se experimentan esfuerzos normales, debido a que son uniaxiales, el esfuerzo de Von Mises será equivalente al esfuerzo normal máximo. Por lo que el factor de seguridad se calcula como:

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma} \quad (21)$$

Donde σ [MPa] es el esfuerzo normal máximo y S_y [MPa] es la resistencia a la fluencia del material.

El acero estructural tiene una resistencia a la fluencia (S_y) de 170 MPa, obtenido de *MatWeb*. Por lo que el factor de seguridad se calcula como:

$$\begin{aligned} \eta_{base} &= \frac{S_y}{\sigma_{max, base}} \\ \eta_{base} &= \frac{170 \text{ MPa}}{3.18 \text{ MPa}} \\ \eta_{base} &= 53.46 \end{aligned}$$

El factor de seguridad es muy alto, por lo que se puede concluir que la estructura de la base soportara las cargas del peso del motor y del viento sobre las aspas.

En el caso de la estructura de la cola, se tienen esfuerzos de flexión en dos planos distintos. Por lo que se debe calcular el esfuerzo máximo para cada plano y calcular el momento flector resultante. Con el momento flector resultante es posible calcular el esfuerzo de flexión con la ecuación 13.

En la Figura 35 se puede observar que en plano x-y la carga sobre la estructura de la cola es el peso de la aleta, la cual está conformada por un triángulo equilátero con lados de 0.52 m y un área superficial de 0.1176 m^2 . Esta aleta es de platina de acero estructural de 2 mm de espesor, por lo que el volumen de la aleta es de 0.000235 m^3 . El acero estructural tiene

una densidad de $7,870 \text{ kg/m}^3$, por lo que la aleta tiene una masa de 1.851 kg . Al multiplicar la masa de la aleta por la gravedad con un valor de 9.81 m/s^2 , obtenemos el peso de esta de 18.16 N . Por lo que el momento flector máximo para el plano x-y de la estructura de la cola se calcula como:

$$\begin{aligned} M_{cola, x-y} &= L_{cola} * W_{cola} \\ M_{cola, x-y} &= (1,000 \text{ mm}) * (18.16 \text{ N}) \\ M_{cola, x-y} &= 18,160 \text{ N} * \text{mm} \end{aligned}$$

En la Figura 36 se observa que el momento flector sobre la estructura de la cola en el plano x-z esta provocado por la fuerza del viento sobre la aleta de la cola. Esta fuerza del viento se puede calcular con las ecuaciones (9) y (10) como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} F_{viento, aleta} &= P_{aire} * A_{sup, aleta} \\ F_{viento, aleta} &= \left(\frac{1}{2} * \rho_a * v_{max}^2\right) * A_{sup, aleta} \\ F_{viento, aleta} &= \frac{1}{2} * \left(1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * \left(24 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 * (0.1176 \text{ m}^2) \\ F_{viento, aleta} &= 41.49 \text{ N} \end{aligned}$$

Por lo que el momento flector sobre la estructura de la cola en el plano x-z provocado por la fuerza del viento sobre la aleta de la cola se calcula como:

$$\begin{aligned} M_{cola, x-z} &= L_{cola} * F_{viento, aleta} \\ M_{cola, x-z} &= (1,000 \text{ mm}) * (41.49 \text{ N}) \\ M_{cola, x-z} &= 41,490 \text{ N} * \text{mm} \end{aligned}$$

El momento flector resultante se calcula como:

$$\begin{aligned} M_{cola} &= \sqrt{(M_{cola, x-y})^2 + (M_{cola, x-z})^2} \\ M_{cola} &= \sqrt{(18,160 \text{ N} * \text{mm})^2 + (41,490 \text{ N} * \text{mm})^2} \\ M_{cola} &= 45,290.24 \text{ N} * \text{mm} \end{aligned}$$

El esfuerzo de flexión provocado por el peso y la fuerza del viento de la aleta de la cola sobre la estructura de la cola se calcula de la siguiente forma, utilizando la ecuación 13.

$$\begin{aligned} \sigma_{cola} &= \frac{M_{cola} * \left(\frac{H_{ext}}{2}\right)}{I_{tubo\ cuadrado}} \\ \sigma_{cola} &= \frac{(45,290.24 \text{ N} * \text{mm}) * \left(\frac{28 \text{ mm}}{2}\right)}{(18,669.25 \text{ mm}^4)} \\ \sigma_{cola} &= 33.96 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Por último, se define la teoría de falla, debido a que es un material dúctil con flexión en dos planos, se utiliza la teoría de Energía de Distorsión (ED). El factor de seguridad se calcula utilizando la ecuación 21.

El acero estructural tiene una resistencia a la fluencia (S_y) de 170 MPa, obtenido de *MatWeb*. (*MatWeb*, s.f.)

$$\eta_{cola} = \frac{S_y}{\sigma_{max, cola}}$$

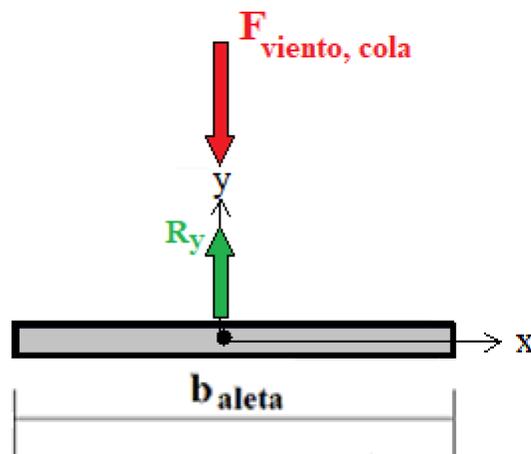
$$\eta_{cola} = \frac{170 \text{ MPa}}{33.94 \text{ MPa}}$$

$$\eta_{cola} = 5$$

El factor de seguridad para la estructura de la cola es de 5, por lo que se puede concluir que soportará las cargas del peso de la aleta y del viento sobre esta.

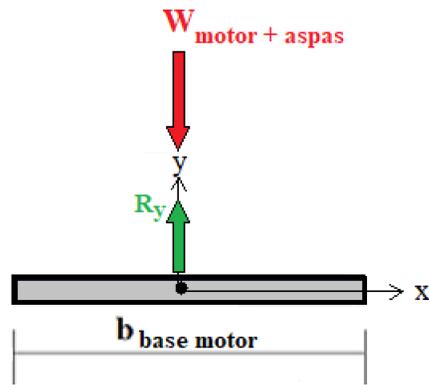
Tanto la aleta, como las placas de las bases del motor y de la chumacera serán fabricadas a partir de platinas de acero estructural de 2 mm de espesor. Se escogió este material debido a que es de los más recomendados para soldadura. Para las tres placas se tiene el mismo caso, en el que la fuerza aplicada a las mismas es perpendicular a su superficie y la dirección de dichas cargas son en dirección de las placas. Por lo que todas las placas están experimentando compresión pura.

Figura 37: DCL de la aleta de la cola.



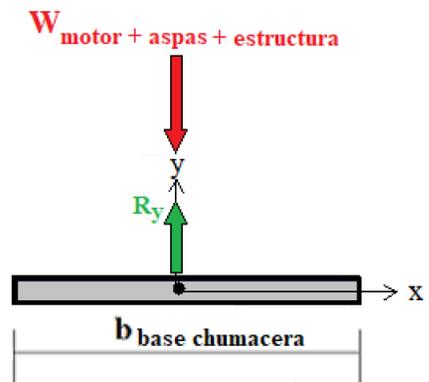
Fuente: elaboración propia

Figura 38: DCL placa de la base del motor.



Fuente: elaboración propia

Figura 39: DCL de la placa de la base de la chumacera.



Fuente: elaboración propia

El proceso es igual para las 2 placas base y la aleta, por lo que únicamente se demostrará el proceso para la placa de la base del motor y los resultados de las demás se muestran en cuadros.

El primer paso es determinar la magnitud de las fuerzas que actúan sobre estas placas, en el caso de la aleta de la cola ya se calculó anteriormente. Para la placa de la base del motor se tiene el peso del motor y de las aspas, por lo que las masas de estos componentes se suman y se multiplican por la gravedad.

$$W_{base, motor} = (m_{motor} + 3 * m_{aspas}) * g$$

$$W_{base, motor} = [(1.5 \text{ kg}) + 3 * (1.16 \text{ kg})] * (9.81 \frac{m}{s^2})$$

$$W_{base, motor} = 48.86 \text{ N}$$

Cuadro 10: Fuerzas de compresión que actúan sobre las placas y la aleta de la cola.

Variable	Valor
$F_{viento, cola}$	41.49 N
$W_{base, motor}$	48.85 N
$W_{base, chumacera}$	88.15 N

Fuente: elaboración propia

Se procede a calcular el área superficial de las placas. En el caso de la aleta de la cola, esta área superficial ya fue calculada anteriormente. Las placas base tiene una forma cuadrada, la placa del motor y la de la chumacera es de 13 cm x 13 cm. Ambas placas tienen agujeros para los tornillos, la placa de la base del motor tiene 4 agujeros de 1 cm de diámetro y la placa base de la chumacera tiene 5 agujeros de 1.5 cm de diámetro. Por lo que el área superficial de la placa base del motor se calcula a continuación como ejemplo.

$$A_{sup, placa\ motor} = (A_{placa\ motor}) - (A_{agujeros})$$

$$A_{sup, placa\ motor} = (a_{placa\ motor}^2) - [4 * \pi * (\frac{D}{4})]$$

$$A_{sup, placa\ motor} = (130\ mm)^2 - \{4 * \pi * [\frac{(10\ mm)^2}{4}]\}$$

$$A_{sup, placa\ motor} = 16,585.84\ mm^2$$

Cuadro 11: Áreas superficiales de las placas base y de la aleta de la cola.

Variable	Valor
$A_{sup, aleta}$	117,600.00 mm^2
$A_{sup, placa\ motor}$	16,858.84 mm^2
$A_{sup, placa\ chumacera}$	16,016.43 mm^2

Fuente: elaboración propia

El esfuerzo de compresión se utiliza la ecuación 20. A continuación, se muestra como calcularlo para la placa base del motor.

$$\sigma_{placa, motor} = \frac{W_{placa, base}}{A_{sup\ placa\ motor}}$$

$$\sigma_{placa, motor} = \frac{(48.85\ N)}{(16,858.84\ mm^2)}$$

$$\sigma_{placa, motor} = 0.0029\ MPa$$

Cuadro 12: Esfuerzos de compresión en las placas base y la aleta de la cola.

Variable	Valor
$\sigma_{aleta, cola}$	0.0003 MPa
$\sigma_{placa, motor}$	0.0029 MPa
$\sigma_{placa, chumacera}$	0.0055 MPa

Fuente: elaboración propia

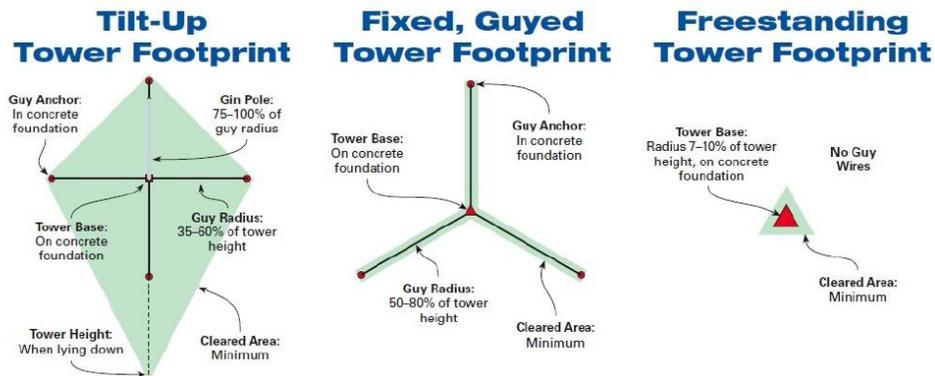
Por último, se define el teorema de falla. Sin embargo, el acero estructural tiene una resistencia a la fluencia (S_y) de 170 MPa y los esfuerzos en las placas son muy bajos en comparación a la resistencia del material. Por lo que no es necesario calcular los factores de seguridad para concluir que las placas base y la aleta de la cola soportan las cargas a las que son sometidas.

5.2.9. Torre

La torre es el soporte que permite elevar la altura de la turbina eólica y así aprovechar de mejor manera el flujo del viento. La velocidad del viento es más constante y de mayor intensidad conforme se va aumentando la altura. Sin embargo, entre más alta es la torre, de igual manera es el costo de esta.

Por lo que para asegurar un buen flujo de viento y evitar interferencia de casas o árboles, pero que a la misma vez cumpla con los requerimientos de ser económicamente accesible y de fácil acceso para su mantenimiento, se decide utilizar una altura de la torre de 4 metros. El diseño de esta torre es de poste libre, esto se debe a que la altura de la torre no es demasiada alta. Se funde el poste con concreto en un agujero de aproximadamente un metro y un diámetro del 10% de la altura, que es de 40 cm aproximadamente. Para el poste se utilizaría un tubo de acero galvanizado, es altamente resistente y puede trabajar en la intemperie sin sufrir desgaste ni corrosión.

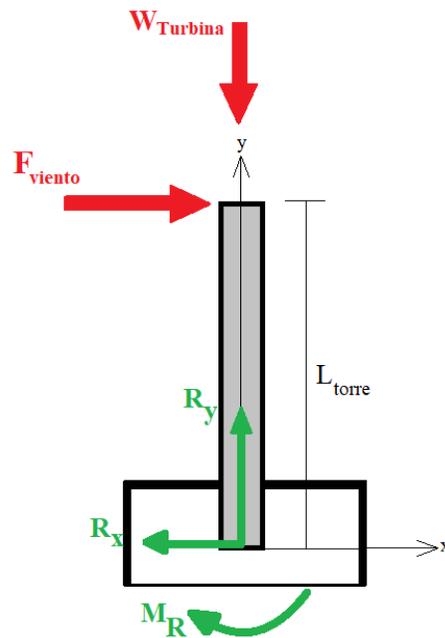
Figura 40: Bases para torres estructurales.



Fuente: Perry, 2010

Para analizar si la torre soporta la fuerza provocada por el viento y el peso de la turbina, se debe hacer un análisis estático de la misma. La torre se puede modelar como una viga empotrada en la base y libre en su extremo. Las cargas que experimenta son el peso de la turbina, la fuerza del viento sobre la torre y la fuerza del viento sobre las aspas. Donde la fuerza que ejerce el viento sobre la misma se toma como el caso más extremo, que es con una velocidad de viento máxima de 24 m/s. El viento entra en contacto de manera perpendicular con la torre y a las 3 aspas de la turbina, provocando un momento flector sobre esta. Se asume el peor caso, en el que la fuerza del viento se aplica en la punta de la torre, provocando el momento flector máximo. En el caso del peso de la turbina, este actúa paralela a la torre, por lo que provoca un esfuerzo de compresión sobre esta. El modelado del sistema se muestra en la siguiente figura.

Figura 41: DCL de la torre.



Fuente: elaboración propia

Utilizando las ecuaciones 9 y 10 se calcula la fuerza del viento sobre la torre. Sin embargo, en este caso, el área de contacto del viento con la torre es la cara del tubo circular. Por lo que el área de contacto del viento con la torre se define como la mitad de la superficie de un tubo, que se modela como un cilindro.

El área de contacto del viento con la torre se define como:

$$A_{sup, torre} = \frac{1}{2} * 2 * \pi * r_{torre} * L_{torre}$$

$$A_{sup, torre} = * \pi * (1 \text{ pulg}) * (0.0254 \frac{m}{\text{pulg}}) * (3 m)$$

$$A_{sup, torre} = 0.24 m^2$$

La fuerza del viento sobre la torre se calcula empleando las ecuaciones (9) y (10):

$$F_{viento, torre} = P_{aire} * (A_{sup, torre} + 3 * A_{sup, aspa, 1})$$

$$F_{viento, torre} = \left(\frac{1}{2} * \rho_a * v_{max}^2\right) * (A_{sup, torre} + 3 * A_{sup, aspa, 1})$$

$$F_{viento, torre} = \frac{1}{2} * \left(1.225 \frac{kg}{m^3}\right) * \left(24 \frac{m}{s}\right)^2 * [(0.24 m^2) + 3 * (0.145 m^2)]$$

$$F_{viento, torre} = 238.14 N$$

Debido a que la fuerza del viento sobre la torre es perpendicular a esta, se genera un esfuerzo de flexión pura sobre el aspa. El esfuerzo de flexión se calcula usando la ecuación 13. El momento flector máximo se calcula como se muestra a continuación.

$$M_{max, torre} = L_{torre} * F_{viento, torre}$$

$$M_{max, torre} = (3,000 mm) * (238.14 N)$$

$$M_{max, torre} = 714,420 N * mm$$

El momento de inercia de un cilindro hueco se calcula a continuación. Las propiedades del tubo galvanizado de 1" de diámetro se obtuvieron del catálogo de tubería galvanizada de SITASA.

$$I_{torre} = \frac{\pi}{64} (D_{ext}^4 - D_{int}^4)$$

$$I_{torre} = \frac{\pi}{64} [(33.7 mm)^4 - (31.05 mm)^4]$$

$$I_{torre} = 108,938.92 mm^4$$

El esfuerzo flector máximo se calcula utilizando la ecuación 13.

$$\sigma_{torre, viento} = \frac{M_{max, torre} * \left(\frac{r_{ext}}{2}\right)}{I_{torre}}$$

$$\sigma_{torre, viento} = \sigma_{torre} = \frac{(714,420 N * mm) * \left(\frac{33.7 mm}{2}\right)}{(108,938.92 mm^4)}$$

$$\sigma_{torre, viento} = 110.5 MPa$$

Como se observa en la Figura 41, el peso de la turbina provoca una fuerza de compresión normal sobre la estructura. Este esfuerzo se calcula usando la ecuación 20.

La turbina está compuesta por el motor, el rotor con sus aspas, la estructura y la aleta, que tienen en conjunto un peso aproximado de 8 kg por lo que, la fuerza provocada por el peso de la turbina se calcula como:

$$W_{turbina} = m_{turbina} * g$$

$$W_{turbina} = (8 kg) * \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)$$

$$W_{turbina} = 78.48 N$$

El área transversal del tubo galvanizado de 1" de diámetro se calcula como se muestra a continuación, utilizando un diámetro exterior (D_{ext}) de 33.7 mm y un diámetro interior (D_{int}) de 31.05 mm.

$$A_{trans, torre} = \left(\pi * \left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^2 - \pi * \left(\frac{D_{int}}{2}\right)^2\right)$$

$$A_{trans, torre} = \left(\pi * \left(\frac{33.7mm}{2}\right)^2 - \pi * \left(\frac{31.05}{2}\right)^2\right)$$

$$A_{trans, torre} = 134.76 mm^2$$

Por lo que el esfuerzo de compresión puro provocado por el peso de la turbina sobre la torre se calcula como:

$$\sigma_{torre, turbina} = \frac{(78.48 N)}{(134.76 mm^2)}$$

$$\sigma_{torre, turbina} = 0.58 MPa$$

El esfuerzo normal combinado máximo es la sumatoria del esfuerzo de flexión y el esfuerzo normal, que en este caso es de compresión. Por lo que el esfuerzo normal combinado sobre la torre se calcula como:

$$\sigma_{max, torre} = \sigma_{torre, viento} + \sigma_{torre, turbina}$$

$$\sigma_{max, torre} = (110.5 MPa) + (0.58 MPa)$$

$$\sigma_{max, torre} = 111.08 MPa$$

Por último, se define la teoría de falla, debido a que es un material dúctil con combinación de esfuerzos normales, se utiliza la teoría de Energía de Distorsión (ED). El factor de seguridad se calcula con la ecuación 21.

$$\eta_{torre} = \frac{S_y}{\sigma_{max, torre}}$$

$$\eta_{torre} = \frac{303 MPa}{111.08 MPa}$$

$$\eta_{torre} = 2.73$$

Basado en la teoría de Energía de Distorsión (ED), el factor de seguridad de la torre es mayor a 2, por lo que se puede concluir que el tubo galvanizado de 1 pulgada de diámetro y 4 metros de largo va a soportar las fuerzas provocadas por la velocidad máxima del viento.

5.2.10. Selección de rodamiento

El diseño cuenta únicamente con un rodamiento, el cual es el punto de giro de la turbina para alinearse con el viento, por lo que debe girar libremente sobre el eje de la torre. Para seleccionar dicho rodamiento únicamente se tomó en cuenta la carga que debe soportar y el diámetro interno para acoplarlo a la torre. Esto se debe a que el rodamiento no va a estar girando constantemente, únicamente cuando se da una dirección en el cambio del viento.

Se determinó un tubo de acero galvanizado de 1" de diámetro para la torre, por lo que el rodamiento debe tener un diámetro interno mínimo de 33.7 mm. La carga que debe soportar el rodamiento es el peso de los componentes y la fuerza del viento sobre las aspas. Tomando el peso del motor con las aspas, las placas base, la cola y el tubo cuadrado, esta carga llega a ser de 8 Kg, que equivalen a aproximadamente 80 N. La fuerza del viento sobre las tres aspas es de 153.89 N. Por lo que el rodamiento debe soportar aproximadamente 235 N. Con esta carga y diámetro mínimos necesarios, se seleccionó la chumacera.

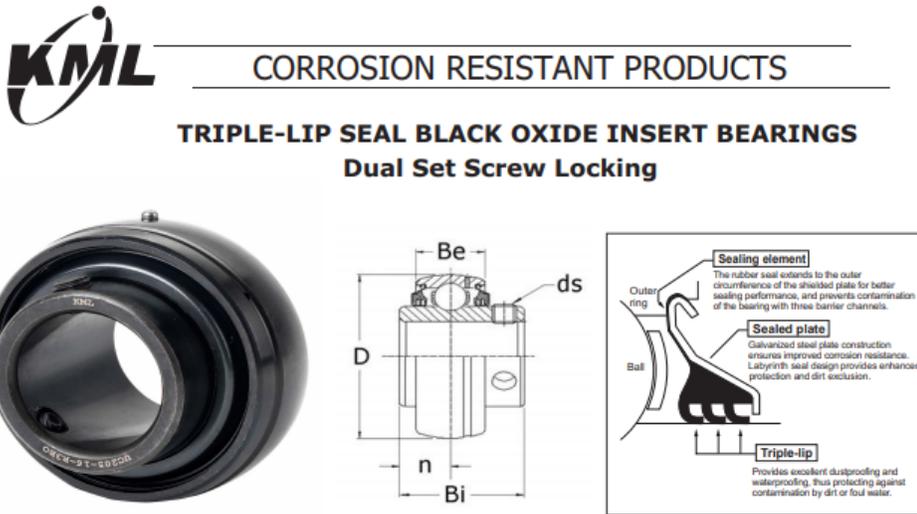
Para seleccionar la chumacera se usó el catálogo de rodamientos del fabricante KML, debido a que es una marca que se encuentra en el mercado nacional. Se selecciona la chumacera de brida cuadrada para poder adaptarla a la base de la turbina. Como criterios de selección se utiliza el diámetro interno necesario y los requerimientos de carga anteriormente definidos. Se seleccionó la chumacera UCF 206-19, debido a que cumple con el diámetro mínimo de 33.7 mm, cuenta con rodamiento insertado con camisa y dos castigaderas para sujetar el eje; lo cual es necesario para acoplarlo a la torre. Se verifica que el inserto de rodamiento cumpla con los requerimientos de carga. El rodamiento que emplea la chumacera es el UC 206 -19 que soporta cargas estáticas de hasta 2,510 N, por lo que se concluye que si cumple con los requerimientos y, por lo tanto, puede ser utilizado.

Figura 42: Selección de la chumacera a utilizar.

Unit No.	Shaft Dia.		Dimensions inch / mm								Bolt Size	Bearing No.	Housing No.	Weight Lbs kg		
	In.	mm	a	e	i	g	l	s	z	Bi					n	
UCF 205		25														
205-14	7/8		3-3/4	2-3/4	5/8	1/2	1-1/16	15/32	1-13/32	1.339	0.563	3/8	UC 205			1.76
205-15	15/16		95.3	69.9	15.9	12.7	27.0	11.9	35.7	34.0	14.3	M10	205-14	F205	0.80	
205-16	1												205-15			
													205-16			
UCF 206		30														
206-17	1-1/16		4-1/4	3-9/32	23/32	1/2	1-1/4	15/32	1-37/64	1.500	0.626	3/8	UC 206			2.20
206-18	1-1/8		108.0	83.3	18.3	12.7	31.8	11.9	40.1	38.1	15.9	M10	206-17	F206	1.00	
206-19	1-3/16												206-18			
206-20	1-1/45												206-19			
													206-20			
UCF 207		35														
207-20	1-1/4		4-19/32	3-5/8	3/4	19/32	1-11/32	9/16	1-3/4	1.689	0.689	7/16	UC 207			3.08
207-21	1-5/16		116.7	92.1	19.1	15.1	34.1	14.3	44.5	42.9	17.5	M12	207-20	F207	1.40	
207-22	1-3/8												207-21			
207-23	1-7/16												207-22			
													207-23			
UCF 208		40														
208-24	1-1/2		5-1/8	4-1/64	13/16	19/32	1-13/32	5/8	2-1/64	1.937	0.748	1/2	UC 208			3.96
208-25	1-9/16		130.2	102.0	20.6	15.1	35.7	15.9	51.2	49.2	19.0	M14	208-24	F208	1.80	
													208-25			

Fuente: KML Bearing USA, 2020

Figura 43: Selección del rodamiento a utilizar.



Insert Part No.	Shaft Diameter Inch	Dimensions inch / mm					Basic Load Ratings lbf / N		Weight Lbs kg
		D	Bi	Be	n	ds	dynamic C	static Co	
UC205-16R3BO	1	2.04724 52.0	1-11/32 34.1	21/32 16.7	9/16 16.7	1/4-28UNF M6x1.0	3150 14000	1700 7560	0.55 0.20
UC206-19R3BO	1-3/16	2.44094 62.0	1-1/2 38.1	3/4 19.1	5/8 15.9	1/4-28UNF M6x1.0	4390 19510	2510 11160	0.73 0.33
UC206-20R3BO	1-1/4S								0.65 0.30
UC207-20R3BO	1-1/4	2.83465 72.0	1-11/16 42.9	25/32 19.8	11/16 17.5	5/16-24UNF M8x1.0	5770 25640	3450 15330	1.15 0.52
UC207-22R3BO	1-3/8								1.05 0.48
UC207-23R3BO	1-7/16								0.65 0.43

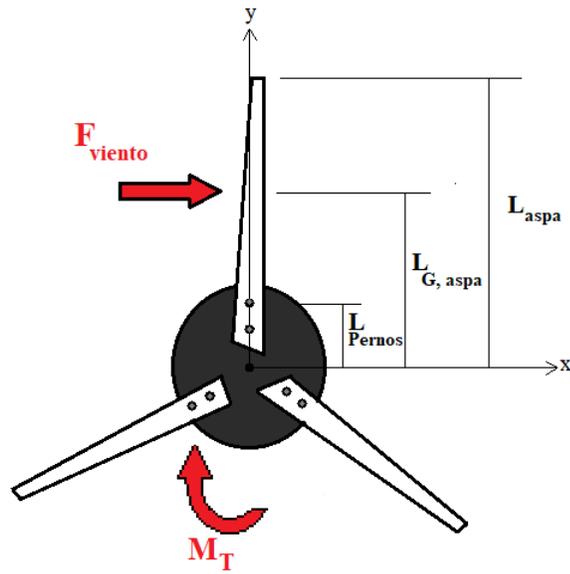
Fuente: KML Bearing USA, 2020

5.2.11. Pernos

En la turbina se utilizan pernos para unir las aspas al rotor, el motor a su respectiva base, la estructura a la chumacera y para unir la aleta de la cola a la estructura.

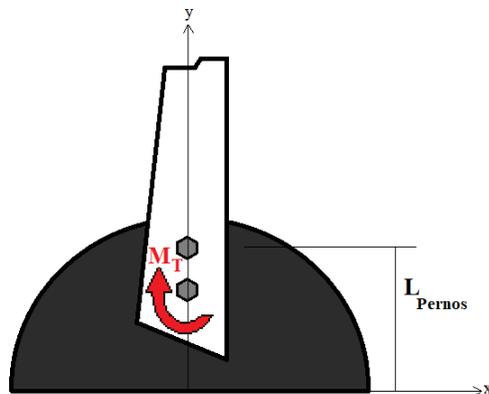
En el caso de los pernos de las aspas, se experimentan fuerzas de corte de torsión causadas por el momento que provoca la fuerza del viento sobre las aspas del rotor. Para los pernos que unen las aspas al rotor, se decidió usar dos pernos SAE 9.8 M8 de 6 mm de diámetro y 20 mm de largo, ya que son accesibles en el mercado nacional. Al incorporar dos pernos se evita que las aspas giren sobre el eje del perno y se distribuyen los esfuerzos. La fuerza cortante por torsión se calcula con el momento de torsión provocado por la velocidad del viento sobre las aspas.

Figura 44: DCL del rotor y sus aspas unidas por los pernos.



Fuente: elaboración propia

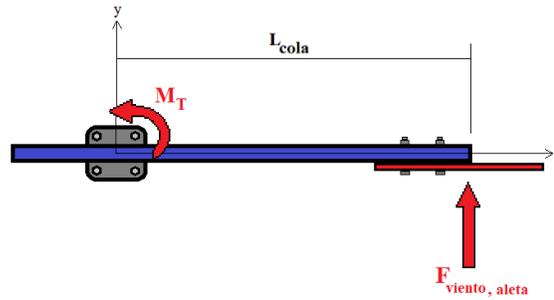
Figura 45: DCL del sistema de pernos de las aspas.



Fuente: elaboración propia

Para los pernos de la base de la chumacera se experimenta un caso similar al de los pernos del aspa. Donde la fuerza de torsión es provocada por el momento que hace girar la estructura sobre el eje de la chumacera. Este momento es provocado por la fuerza del viento sobre la aleta, la cual fue calculada anteriormente en la sección de estructura con una magnitud de 41.49 N. El largo de la aleta se determinó en la misma sección y tiene una magnitud de 1 m. Los pernos seleccionados para la base de la chumacera son de grado SAE 9.8 M14 de 14 mm de diámetro y 40 mm de largo. La fuerza cortante sobre estos pernos se calcula utilizando la fuerza del viento sobre el aspa y el largo de la cola.

Figura 46: DCL de los pernos de la base de la chumacera.

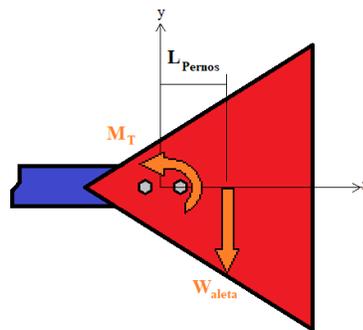


Fuente: elaboración propia

En el caso de los pernos que sujetan la aleta a al tubo cuadrado de la estructura, no se toma en cuenta la fuerza del viento sobre la aleta. Esto se debe a que el centroide de la aleta, que es donde se concentra la fuerza del viento, coincide con el extremo del tubo cuadrado. Por lo que no hay fuerza de flexión sobre los pernos debido a que, la fuerza se transmite directamente al tubo y a los pernos de la base de la chumacera. Además, esta fuerza al ser paralela a los pernos, está empujando la aleta contra la estructura, por lo que no hay separación entre los elementos de la unión.

Sin embargo, los pernos de la aleta si deben soportar la carga del peso de la misma aleta. El centroide de la aleta coincide con la línea de acción de los pernos, pero esta fuerza está alejada de los pernos, por lo que provoca una fuerza de torsión sobre estos. Esta fuerza de torsión se calcula con el peso de la aleta y la distancia de dicho peso a los pernos. El peso de la aleta fue calculado en la sección de la estructura y tiene una magnitud de 18.16 N. La distancia entre el centroide de la aleta y los pernos se define de 100 mm. Para los pernos de esta unión se decidió utilizar dos pernos de grado SAE 9.8 M8 de 8 milímetros de diámetro y 40 mm de largo. Como se mencionó anteriormente, se utilizan dos pernos en paralelo para evitar que la torsión haga girar la aleta sobre el eje del perno y ayuda a distribuir los esfuerzos.

Figura 47: DCL de los pernos de la aleta.



Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, para los tres sistemas de pernos se tiene el mismo caso de fuerzas cortantes por torsión, por lo que el proceso es el mismo. Por lo tanto, se demostrará únicamente el proceso de cálculo para los pernos del aspa y para los demás sistemas se presentarán los resultados en cuadros.

Para determinar los pernos soportan dicha torsión, se calcula el esfuerzo cortante por torsión, el cual se define como:

$$\tau = \frac{T * r}{J} \quad (22)$$

Donde τ [MPa] es el esfuerzo cortante por torsión, r [mm] es el radio del eje neutro del elemento a su superficie y J [mm^4] es el momento polar de inercia.

El momento de torsión sobre el perno se calcula con la fuerza del viento y la de donde se encuentran los pernos al punto de aplicación de dicha fuerza. La fuerza del viento para hacer girar el rotor se encuentra en el centroide del aspa, que es la mitad de su largo. Los pernos se encuentran a 12 cm del rotor, por lo que a la distancia del centro del aspa se le resta esta distancia.

$$T_{pernos, aspa} = F_{viento, aspa} * \left(\frac{L_{aspa}}{2} - L_{pernos} \right)$$

$$T_{pernos, aspa} = (51.297 N) * \left[\frac{(870 mm)}{2} - (120 mm) \right]$$

$$T_{pernos, aspa} = 16,158.56 N * mm$$

Cuadro 13: Momento de torsión sobre los sistemas de pernos.

Variable	Valor
$T_{pernos, aspa}$	116,158.56 N * mm
$T_{pernos, chumacera}$	41,490.00 N * mm
$T_{pernos, aleta}$	1,816.00 N * mm

Fuente: elaboración propia

El momento polar de inercia para el perno es igual al de un círculo, ya que el perno es un cilindro. Por lo que el momento de inercia para el perno de 6 mm de diámetro se calcula como:

$$J_{pernos, aspaa} = \frac{\pi * d_{perno}^4}{32}$$

$$J_{pernos, aspaa} = \frac{\pi * (6 mm)^4}{32}$$

$$J_{pernos, aspaa} = 127.23 mm^4$$

Cuadro 14: Momentos polares de inercia de los pernos.

Variable	Valor
$J_{pernos, aspa}$	127.23 mm^4
$J_{pernos, chumacera}$	$3,771.48 \text{ mm}^4$
$J_{pernos, aleta}$	402.13 mm^4

Fuente: elaboración propia

El aspa está unida por dos pernos al rotor, por lo que el esfuerzo de corte por torsión generado por el momento de giro del rotor se divide entre ambos pernos. Por lo tanto, el esfuerzo de corte por torsión máximo para el perno de 6 mm de diámetro del aspa es:

$$\tau_{pernos, aspaa} = \frac{T_{pernos, aspaa} * r_{perno}}{2 * J_{pernos, aspaa}}$$

$$\tau_{pernos, aspaa} = \frac{(16,158.56 \text{ N} * \text{mm}) * (3 \text{ mm})}{2 * (127.23 \text{ mm}^4)}$$

$$\tau_{pernos, aspaa} = 190.50 \text{ MPa}$$

Cuadro 15: Esfuerzo cortante por torsión de los sistemas de pernos.

Variable	Valor
$\tau_{pernos, aspaa}$	190.50 MPa
$\tau_{pernos, chumacera}$	19.25 MPa
$\tau_{pernos, aleta}$	9.03 MPa

Fuente: elaboración propia

La resistencia de prueba de los pernos (S_p) se obtienen de la Tabla 8-11 del libro de diseño mecánico de *Shigley*, que para los pernos de grado 9.8 M5 a M16 es de 650 MPa.

Figura 48: Tabla 8-11, clases métricas de propiedad mecánicas de pernos, tornillos y birlos de acero*.

Tabla 8-11
Clases métricas de propiedad mecánica de pernos, tornillos y birlos de acero*

Clase de propiedad	Intervalo de tamaños, inclusive	Resistencia de prueba mínima, [†] MPa	Resistencia mínima a la tensión, [†] MPa	Resistencia mínima a la fluencia, [†] MPa	Material	Marca en la cabeza
4.6	M5-M36	225	400	240	Acero de bajo o medio carbono	
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Acero de bajo o medio carbono	
5.8	M5-M24	380	520	420	Acero de bajo o medio carbono	
8.8	M16-M36	600	830	660	Acero de medio carbono, T y R	

Fuente: Budynas y col., 2012, pág 416, Tabla 8-11

Por último, se calcula el factor de seguridad para pernos en esfuerzo cortante, el cual se calcula como:

$$\eta_{d, corte} = \frac{0.557S_p}{\tau_{pernos}} \quad (23)$$

Donde $\eta_{d, corte}$ es el factor de seguridad cortante de un perno, S_p [MPa] es la resistencia última del perno y τ_{pernos} [MPa] es la carga cortante en los pernos.

El factor de seguridad para los pernos del aspa es:

$$\eta_{pernos, aspas} = \frac{0.577 * S_p}{\tau_{pernos, aspas}}$$

$$\eta_{pernos, aspas} = \frac{0.577 * (650 MPa)}{190.5 MPa}$$

$$\eta_{pernos, aspas} = 1.97$$

Cuadro 16: Factores de seguridad de los sistemas de pernos.

Variable	Valor
$\eta_{pernos, aspas}$	1.97
$\eta_{pernos, chumacera}$	19.48
$\eta_{pernos, aleta}$	41.53

Fuente: elaboración propia

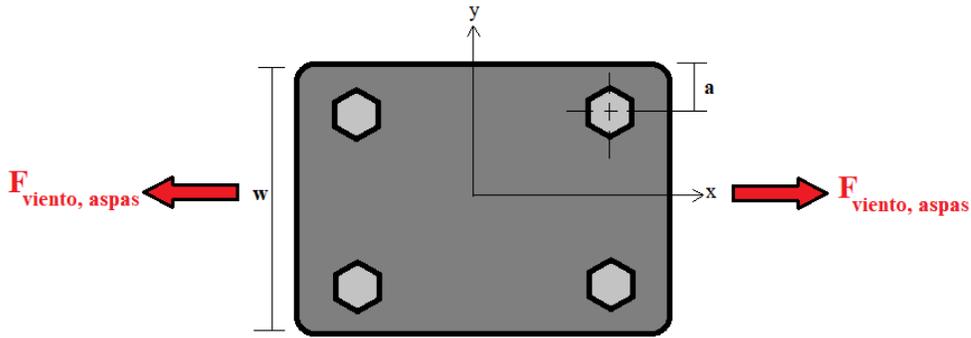
Como se observa en el Cuadro 16, todos los factores de seguridad son significativamente mayores a 1 para los pernos del aspa, la chumacera y de la aleta, se concluye que es correcta la selección de los pernos de grado SAE 9.8 M6 de 20 mm de largo, con arandela y tuerca para las uniones del aspa al rotor. Los pernos de grado SAE 9.8 M8 de 40 mm de largo, con arandela y tuerca para unión de la aleta a la cola. Y pernos de grado SAE 9.8 M14 de 40 mm de largo, con arandela y tuerca para unión de la chumacera a su base.

Debido a que los factores de seguridad para obtenidos estos sistemas de pernos son tan altos, se planteó la posibilidad de utilizar pernos de menor grado. En el caso de los pernos para el aspa, si se utilizan pernos de SAE 5.8 M6, el factor de seguridad que se obtiene es de 1.15, el cual es muy bajo, por lo que no es posible hacer este cambio. Para los pernos de la base de la chumacera, el diámetro de estos está restringido por el diámetro de los agujeros de la base de la chumacera que ya vienen realizados. Por lo que tampoco se puede realizar cambios en los pernos y se mantienen los ya previamente comprobados.

En el caso de los pernos de la base del motor y de la base de la chumacera, estos se encuentran bajo cargas cortantes, ya que la fuerza del viento actúa de manera perpendicular a los pernos. Ambos sistemas son muy parecidos, por el hecho de que son placas cuadradas del mismo material con 4 pernos y la fuerza que actúa sobre estos es la fuerza del viento de las aspas.

Para el sistema de pernos de la base del motor se cuenta con una placa cuadrada de acero estructural de 13 cm x 13 cm, un espesor de 2 mm y agujeros de 10 mm de diámetro que están a 5 mm del borde de la placa. Se utilizan pernos en U de grado 4.6 M10 de 120 mm de largo. La fuerza que actúa sobre esta placa es la fuerza del viento sobre las 3 aspas del rotor, la cual se calculó en el apartado de aspas y tiene una magnitud de 153.89 N.

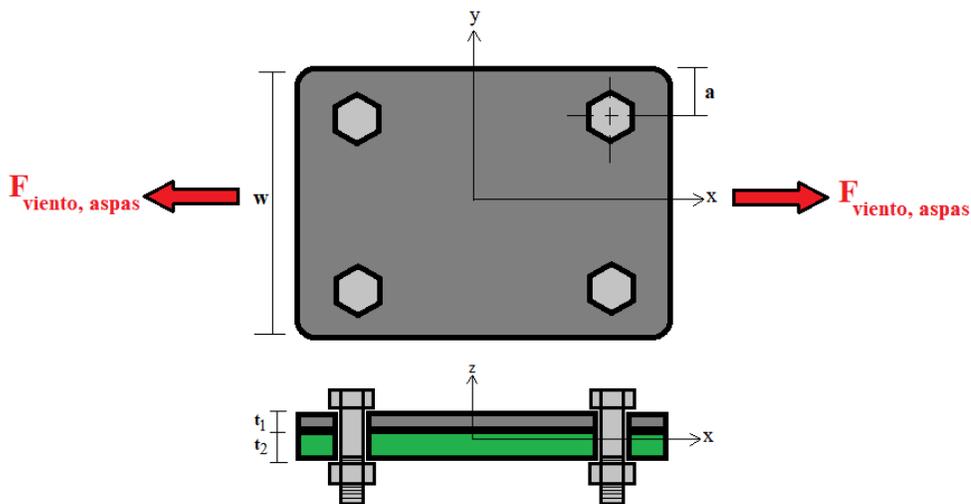
Figura 49: DCL del sistema de pernos para la base del motor.



Fuente: elaboración propia

Para el sistema de pernos de la base de la chumacera se cuenta con una placa cuadrada de acero estructural de 13 cm x 13 cm, un espesor de 2 mm y agujeros de 15 mm de diámetro que están a 5 mm del borde de la placa. Anteriormente, se definieron los pernos de grado 4.6 M14 de 40 mm de largo, por lo que se deberá comprobar que estos también soporten esta carga. La fuerza que actúa sobre esta placa es la fuerza del viento sobre las 3 aspas del rotor que tiene una magnitud de 153.89 N.

Figura 50: DCL de los pernos de la base de la chumacera.



Fuente: elaboración propia

Para calcular los pernos a corte se utiliza el análisis descrito en el libro de diseño mecánico de *Shigley*. Este análisis consta de siete aspectos a evaluar:

- Aplastamiento del perno (todos los pernos participan)
- Aplastamiento de los elementos (todos los agujeros participan)
- Cortante de un perno (a la larga, participan todos los pernos)
- Cortante del borde y desgarramiento de los elementos (participan los pernos del borde)
- Fluencia por tensión de los elementos a lo largo de los agujeros de los pernos
- Verificación de la capacidad de los pernos

Este análisis es igual para los pernos de la base del motor como para los pernos de la base de la chumacera, por lo que se mostrara únicamente el proceso para los pernos de la chumacera y los resultados de ambos sistemas se presentaran en cuadros.

El primer paso es determinar las condiciones del material de las placas, que en ambos casos son placas de acero estructural. Por lo que la resistencia a la fluencia (S_y) del acero estructural es de 170 MPa y una resistencia última (S_u) de 290 MPa. También se necesitan las resistencias de pruebas de los pernos (S_p), que utilizando la Tabla 8-11 del libro de *Shigley* que se muestra en la Figura 48, para pernos de grado 9.8 métricos de 1.6 mm a 36 mm de diámetro es de 650 MPa.

Primero se realiza el análisis de aplastamiento de los pernos, en la que se toma que todos los pernos están cargados. El factor de seguridad para el aplastamiento de los pernos se calcula como:

$$\eta_d = \frac{t * d * S_p}{F} \quad (24)$$

Donde η_d es el factor de seguridad de aplastamiento, S_p [MPa] es la resistencia última del perno, t [mm] es el espesor de la placa, d [mm] es el diámetro de los pernos y F [N] es la carga cortante en los pernos.

Para los pernos de la base de la chumacera se tiene un espesor de la placa de 2 mm, un diámetro de los pernos de 14 mm, una fuerza cortante de 153.89 N y una resistencia de prueba de los pernos de 225 MPa. Por lo que el factor de seguridad contra el aplastamiento de los pernos de la base de la chumacera se calcula como:

$$\eta_{d, chumacera} = \frac{t * d * S_p}{F_{viento, aspas}}$$

$$\eta_{d, chumacera} = \frac{(2 \text{ mm}) * (14 \text{ mm}) * (225 \text{ MPa})}{(153.89 \text{ N})}$$

$$\eta_{d, chumacera} = 40.9$$

Cuadro 17: Factores de seguridad contra el aplastamiento de los pernos de la base de la chumacera y la del motor.

Variable	Valor
$\eta_{d, chumacera}$	40.9
$\eta_{d, motor}$	29.2

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en el Cuadro 17, ambos factores de seguridad son muy altos, por lo que se puede concluir que los pernos de la base del motor y de la chumacera no van a fallar por aplastamiento de los pernos.

Para el análisis de aplastamiento de los elementos, se toma que todos los pernos están cargados y se considera las propiedades del material de las placas. El factor de seguridad para el aplastamiento de los elementos se calcula como:

$$\eta_{d, elem} = \frac{t * d * S_y}{F} \quad (25)$$

Por lo que el factor de seguridad contra el aplastamiento de los pernos de la base de la chumacera se calcula como:

$$\begin{aligned} \eta_{d, elem (chumacera)} &= \frac{t * d * S_y}{F_{viento, aspás}} \\ \eta_{d, elem (chumacera)} &= \frac{(2 \text{ mm}) * (14 \text{ mm}) * (170 \text{ MPa})}{(153.89 \text{ N})} \\ \eta_{d, elem (chumacera)} &= 30.93 \end{aligned}$$

Cuadro 18: Factores de seguridad contra el aplastamiento de los pernos de la base de la chumacera y la del motor.

Variable	Valor
$\eta_{d, elem (chumacera)}$	30.93
$\eta_{d, elem (motor)}$	22.10

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en el Cuadro 18, ambos factores de seguridad son muy altos, por lo que se puede concluir que los pernos de la base del motor y de la chumacera no van a fallar por aplastamiento del elemento.

Para el análisis cortante de los pernos, se toma que todos los pernos están cargados, si las roscas de los pernos no están en las placas donde se aplican la fuerza cortante y que en este caso hay 4 pernos. El factor de seguridad para el cortante de los pernos se calcula como:

$$\eta_{d, cort} = \frac{0.577 * \pi * d^2 * S_p}{F} \quad (26)$$

Por lo que el factor de seguridad contra cortante de los pernos de la base de la chumacera se calcula como:

$$\eta_{d, cort (chumacera)} = \frac{0.577 * \pi * d^2 * S_p}{F_{viento, aspas}}$$

$$\eta_{d, cort (chumacera)} = \frac{0.577 * \pi * (14 mm)^2 * (225 MPa)}{(153.89 N)}$$

$$\eta_{d, cort (chumacera)} = 519.46$$

Cuadro 19: Factores de seguridad del cortante de los pernos de la base de la chumacera y del motor.

Variable	Valor
$\eta_{d, cort (chumacera)}$	519.46
$\eta_{d, cort (motor)}$	265.00

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en el Cuadro 19, ambos factores de seguridad son muy altos, por lo que se puede concluir que los pernos de la base del motor y de la chumacera no van a fallar por cortante en los pernos.

En el análisis cortante de la rosca o el cuerpo se debe analizar si la rosca del perno está en contacto en con alguno de las placas. En ambos casos, la rosca de los pernos del motor y de la chumacera no están en contacto con las placas donde se aplica la fuerza, por lo que no es necesario realizar dicho análisis. Es suficiente con el análisis de cortante en el perno.

Para el análisis cortante del borde del elemento, se toman únicamente los pernos que están en el borde del elemento, que en ambos casos son 2 pernos. El factor de seguridad para el cortante del borde del elemento se calcula como:

$$\eta_{d, borde} = \frac{0.577 * 4 * a * t * S_y}{F} \quad (27)$$

Se conocen las distancias de los agujeros al borde (a), que en ambos casos son de 5 mm. Por lo que el factor de seguridad contra cortante en el borde de la base de la chumacera se calcula como:

$$\eta_{d, borde (chumacera)} = \frac{0.577 * 4 * a * t * S_y}{F_{viento, aspas}}$$

$$\eta_{d, borde (chumacera)} = \frac{0.577 * 4 * (5 mm) * (2 mm) * (170 MPa)}{(153.89 N)}$$

$$\eta_{d, borde (chumacera)} = 25.5$$

Cuadro 20: Factores de seguridad contra el cortante del borde de la base de la chumacera y de la del motor.

Variable	Valor
$\eta_{d, \text{borde (chumacera)}}$	25.5
$\eta_{d, \text{borde (motor)}}$	25.5

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en el Cuadro 20, ambos factores de seguridad son muy altos, por lo que se puede concluir que los pernos de la base del motor y de la chumacera no van a fallar por cortante en el borde de los elementos.

Para el análisis de fluencia por tensión de los elementos a lo largo de los agujeros de los pernos, se toma que todos los agujeros de los pernos están activos, que para ambos casos son 4 agujeros. El factor de seguridad de fluencia por tensión de los elementos a lo largo de los agujeros de los pernos se calculan como:

$$\eta_{d, \text{fluencia}} = \frac{(w - 2 * d) * t * S_y}{F} \quad (28)$$

Se conocen los anchos de las placas (w), que para la de la base del motor es de 120 mm y la de la base de la chumacera es de 130 mm. Por lo que el factor de seguridad de fluencia por tensión de los elementos a lo largo de los agujeros de los pernos de la chumacera se calcula como:

$$\begin{aligned} \eta_{d, \text{fluencia (chumacera)}} &= \frac{(w - 2 * d) * t * S_y}{F_{\text{viento, aspas}}} \\ \eta_{d, \text{fluencia (chumacera)}} &= \frac{[(130 \text{ mm}) - 2 * (14 \text{ mm})] * (2 \text{ mm}) * (170 \text{ MPa})}{(153.89 \text{ N})} \\ \eta_{d, \text{fluencia (chumacera)}} &= 225.36 \end{aligned}$$

Cuadro 21: Factores de seguridad de fluencia por tensión de los elementos a lo largo de los agujeros de los pernos de la base de la chumacera y de la del motor.

Variable	Valor
$\eta_{d, \text{fluencia (chumacera)}}$	225.36
$\eta_{d, \text{fluencia (motor)}}$	220.94

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en el Cuadro 21, ambos factores de seguridad son muy altos, por lo que se puede concluir que los pernos de la base del motor y de la chumacera no van a fallar por fluencia por tensión de los elementos a lo largo de los agujeros de los pernos.

Para el análisis de la capacidad de los elementos, el área transversal del elemento es su ancho por el espesor de la placa. El factor de seguridad se calcula como:

$$\eta_{d, \text{capacidad}} = \frac{w * t * S_y}{F} \quad (29)$$

Se conocen los anchos de las placas (w), que para la de la base del motor y de la chumacera es de 130 mm. Por lo que el factor de seguridad de la capacidad de la placa de la chumacera se calcula como:

$$\eta_{d, capacidad (chumacera)} = \frac{w * t * S_y}{F_{viento, aspas}}$$

$$\eta_{d, capacidad (chumacera)} = \frac{(130 \text{ mm}) * (2 \text{ mm}) * (170 \text{ MPa})}{(153.89 \text{ N})}$$

$$\eta_{d, capacidad (chumacera)} = 287.2$$

Cuadro 22: Factores de seguridad de la capacidad de los elementos de la base de la chumacera y de la del motor.

Variable	Valor
$\eta_{d, capacidad (chumacera)}$	287.2
$\eta_{d, capacidad (motor)}$	287.2

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en el Cuadro 22, ambos factores de seguridad son muy altos, por lo que se puede concluir que los pernos de la base del motor y de la chumacera no van a fallar por la capacidad de los elementos.

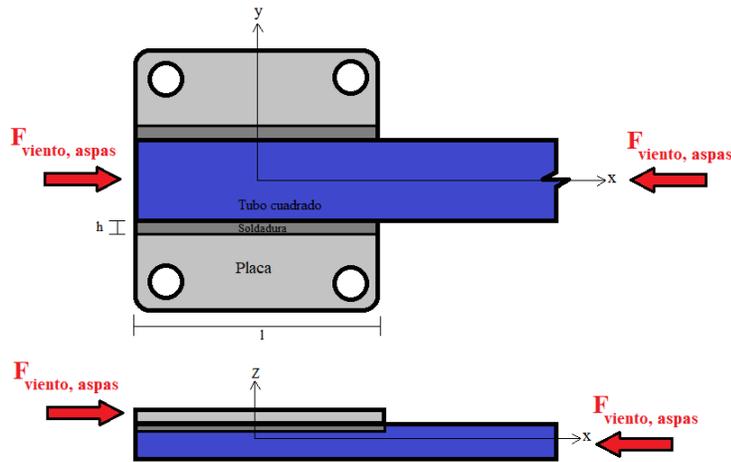
Al evaluar el análisis de los pernos de la base de la chumacera y del motor, todos los factores de seguridad son significativamente altos, por lo que se puede concluir que los pernos seleccionados de grado SAE 4.6 M10 de 120 mm de largo para la base del motor y de grado SAE 4.6 M14 de 40 mm de largo para la base de la chumacera van a soportar las cargas provocadas por la fuerza del viento.

Debido a que los factores de seguridad obtenidos son significativamente altos, se planteó utilizar pernos más pequeños. Sin embargo, existe la limitación de los agujeros existentes de las bases, por lo que la selección previa se mantiene.

5.2.12. Soldadura

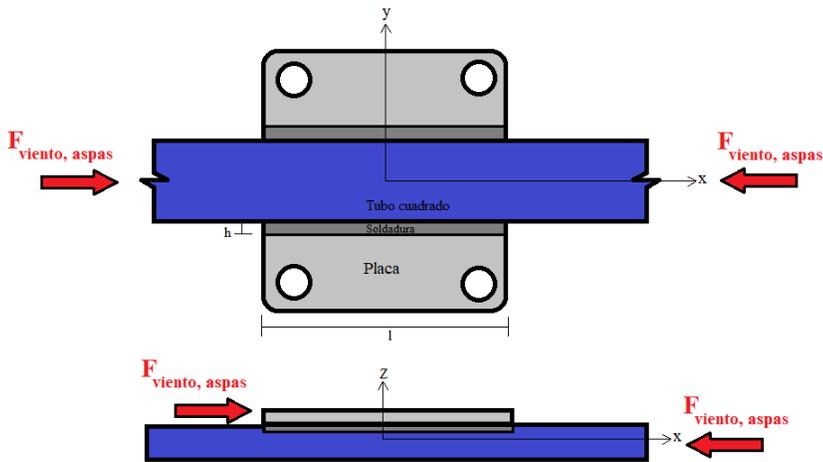
Las placas de la base del motor y la placa de la base de la chumacera van soldadas al tubo cuadrado, que la estructura de la turbina. La soldadura de estas placas debe soportar las fuerzas del viento. Ambas placas son cuadradas y están soldadas por el centro con el tubo cuadrado. A continuación, se muestran los DCL de ambas placas soldadas.

Figura 51: DCL de la placa de la base de del motor soldada al tubo cuadrado estructural.



Fuente: elaboración propia

Figura 52: DCL de la placa de la base de la chumacera soldada al tubo cuadrado estructural.



Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en los dos DCL de las placas soldadas en las figuras 51 y 52, la fuerza del viento actúa de manera paralela a los cordones de soldadura, por lo que estos son un caso de soldadura de filete paralela a la carga, según el libro de *Shigley*. Se utiliza el método propuesto en dicho libro para calcular los factores de seguridad de las soldaduras y verificar que estas soportan las cargas. Debido a que el procedimiento es el mismo para ambas soldaduras, únicamente se presenta el procedimiento para la soldadura de la placa base del motor y se presentan los resultados de ambas en un cuadro.

Se decide utilizar electrodo E60xx debido a que es muy accesible en el mercado nacional y es ideal para aceros de bajo carbono como el acero estructural de las placas base y del tubo cuadrado. Las propiedades de este electrodo se obtienen de la Tabla 9-3 del libro de *Shigley*, donde la resistencia a la fluencia para este tipo de electrodo es de 345 MPa.

Figura 53: Tabla 9-3, propiedades mínimas del metal de aporte.

Tabla 9-3

Propiedades mínimas del metal de aporte

Número de electrodo AWS*	Resistencia a la tensión, kpsi (MPa)	Resistencia a la fluencia, kpsi (MPa)	Elongación porcentual
E60xx	62 (427)	50 (345)	17-25
E70xx	70 (482)	57 (393)	22
E80xx	80 (551)	67 (462)	19
E90xx	90 (620)	77 (531)	14-17
E100xx	100 (689)	87 (600)	13-16
E120xx	120 (827)	107 (737)	14

Fuente: Budynas y col., 2012

El esfuerzo cortante en el modelo de soldaduras de filete paralelas a la carga en el libro de *Shigley* se calcula como:

$$\tau = \frac{F}{0.707 * h * l} \quad (30)$$

Donde τ [MPa] es el esfuerzo de cortante, F [N] es la fuerza cortante, h [mm] es la garganta del cordón de soldadura y l [mm] es el largo del cordón de soldadura.

Según el libro de *Shigley*, para determinar el tamaño de la garganta de la soldadura se toma en cuenta el espesor de la pieza más gruesa a soldar, que para ambos casos es el tubo cuadrado de 1.5 pulgadas. Por lo que la garganta para un espesor de 1.5 pulgadas es de $\frac{3}{8}$ de pulgada, que equivalen a 9.5 mm. La soldadura se realiza a lo largo de las placas base, por lo que el largo del cordón de soldadura es igual al largo de las placas en ambos casos. Para la placa del motor y de la chumacera el largo es de 130 mm.

Por lo que el esfuerzo cortante en la placa del motor se calcula como:

$$\tau_{soldadura, motor} = \frac{F_{viento, aspas}}{0.707 * h * l}$$

$$\tau_{soldadura, motor} = \frac{(153.89 N)}{0.707 * (9.5 mm) * (130 mm)}$$

$$\tau_{soldadura, motor} = 0.176 MPa$$

Cuadro 23: Esfuerzos cortantes en las placas soldadas del motor y de la chumacera.

Variable	Valor
$\tau_{soldadura, motor}$	0.176 MPa
$\tau_{soldadura, chumacera}$	0.176 MPa

Fuente: elaboración propia

Los esfuerzos permisibles para los diferentes tipos de esfuerzos en las soldaduras se muestran en la tabla 9-4 del libro de *Shigley*, en la que para los esfuerzos cortantes en soldaduras de filete es $0.40S_y$, que es 0.40 veces la resistencia a la fluencia del electrodo E60xx de 345 MPa.

Figura 54: Tabla 9-4, esfuerzos permisibles del Código AISC para metal de aporte.

Tabla 9-4

Esfuerzos permisibles del Código AISC para metal de aporte

Tipo de carga	Tipo de soldadura	Esfuerzo permisible	n^*
Tensión	A tope	$0.60S_y$	1.67
Aplastamiento	A tope	$0.90S_y$	1.11
Flexión	A tope	$0.60-0.66S_y$	1.52-1.67
Compresión simple	A tope	$0.60S_y$	1.67
Cortante	A tope o de filete	$0.30S_{ut}^\dagger$	

* El factor de seguridad n se ha calculado mediante la teoría de la energía de distorsión.

† El esfuerzo cortante en el metal base no debe exceder de $0.40S_y$ del metal base.

Fuente: Budynas y col., 2012

Por lo que el factor de seguridad para la soldadura de filete con esfuerzo cortante para la placa del motor, utilizando el criterio de falla de energía de distorsión, se calcula como:

$$\eta_{soldadura, motor} = \frac{0.4 * S_y}{\tau_{soldadura, motor}}$$

$$\eta_{soldadura, motor} = \frac{0.4 * (345 MPa)}{(0.176 MPa)}$$

$$\eta_{soldadura, motor} = 784.1$$

Cuadro 24: Factores de seguridad de las soldaduras a filete con esfuerzos cortantes de las soldaduras de la placa del motor y de la chumacera.

Variable	Valor
$\eta_{soldadura, motor}$	784.1
$\eta_{soldadura, chumacera}$	784.1

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en el Cuadro 24, ambos factores de seguridad son muy altos, por lo que se puede concluir que las soldaduras de las placas del motor y de la chumacera van a soportar las fuerzas cortantes. Por lo que se concluye que se utilizara electrodo E60xx para soldar ambas placas al tubo cuadrado de la estructura, con una garganta de 9.5 mm.

Debido a que los factores de seguridad obtenidos para la soldadura son muy altos, se puede realizar una soldadura con una garganta de menor ancho, con un valor de 5 mm. Y en lugar de realizar un cordón de soldadura a lo largo de toda la placa, este se puede dividir en 3 cordones de 30 mm de largo espaciados a 20 mm cada uno. Estos cambios reducen los factores de seguridad a 170, lo cual sigue siendo alto, pero reduce los costos de soldadura.

5.3. Fabricación del prototipo

Para la fabricación del prototipo de la turbina eólica se utilizaron los materiales seleccionados durante la fase de diseño que estaban disponibles en Guatemala. Una vez se obtuvieron todos los materiales, se comenzó con el proceso de fabricación, el cual en gran parte fue llevado a cabo en el taller mecánico y de mantenimiento de la empresa PROCHEINSA y en la casa del autor del presente trabajo.

Como se mencionó en la fase de diseño, se realizó un modelo CAD empleando el programa *Autodesk Inventor 2019*, con el cual se realizaron un juego de planos para todos los componentes que se debían fabricar del prototipo de la turbina eólica. Estos planos fueron utilizados como guía de todas las medidas para el proceso de fabricación del prototipo y se encuentran en el anexo 11.6.

El proceso de fabricación del prototipo de la turbina se detalla a profundidad en el manual de fabricación de la misma que se encuentra en el anexo 11.5. En este manual se detallan los materiales, componentes, herramientas y equipos necesarios, así como los pasos de cada uno de los procesos de fabricación y ensamble del prototipo.

5.3.1. Obtención de los materiales y componentes

Para la selección y obtención de los materiales para la fabricación del prototipo se tomaron en cuenta los objetivos planteados y la fase de diseño de este proyecto. Siendo uno de los factores principales que estos materiales y componentes fueran accesibles y estuvieran disponibles en el territorio guatemalteco.

En el proceso de selección del motor a utilizar como generador, se investigó y cotizó en diferentes proveedores de repuestos para carros motores eléctricos de radiador. Este motor debía ser de imanes permanentes, operar con corriente continua y tener las aspas del ventilador en buen estado. Para verificar que el motor funcionara, se utilizó un multímetro para comprobar que entregara un voltaje al girar el eje. También se conectó a una batería para carro de 12 voltios para comprobar que este funcionara adecuadamente. Se seleccionó el motor del radiador de una *Hyundai Santa Fe* modelo 2002 al 2009, ya que este cumplía con los requisitos y especificaciones del prototipo.

En el caso de los elementos metálicos estructurales, que son el tubo cuadrado de 1", el tubo redondo para la torre de 1", una plancha de acero estructural de 2 mm y otra de 4 mm de espesor, se investigó y cotizó con diferentes proveedores de material metálico. Sin embargo, únicamente vendían el material presentaciones muy grandes para las dimensiones del prototipo, lo que elevaba el costo del este y se desperdiciaba grandes cantidades de material. Por lo que se optó por buscar en distribuidoras de material metálico extraído de componentes industriales descartados o coloquialmente conocidas como “recicladoras industriales”. En estos proveedores se obtiene el material por peso y, por lo tanto, se puede conseguir únicamente el material necesario a utilizar. Al seleccionar el material se verificó que este cumpliera con las dimensiones, material adecuado y que estuviera en buen estado.

Para la obtención del rodamiento también se realizó un proceso de investigación y cotización con proveedores dentro del territorio guatemalteco. Sin embargo, el costo de este componente era muy elevado, por lo que se optó por buscar con proveedores de componentes industriales de segunda mano. En este caso se obtuvo el rodamiento seleccionado en la fase de diseño, marca KML modelo UCF 206-19 o F208.

Los componentes eléctricos y electrónicos se obtuvieron de electrónicas dentro del territorio nacional, usando las especificaciones del fabricante como guía para verificar que cumplieran con los requisitos del proyecto. Los elementos de sujeción, pinturas y demás materiales extras se obtuvieron de ferreterías donde estuvieran disponibles y tuvieran mejor precio dichos elementos.

5.3.2. Fabricación del rotor

El rotor de la turbina se fabricó a partir del ventilador de radiador de carro. Primero se le cortaron las aspas originales del ventilador. Después se lijaron los restos de las aspas originales para dejar un disco liso. Por último, se marcaron y perforaron los agujeros para sujetar las aspas.

Figura 55: Rotor con el primer juego de agujeros perforados.



Fuente: elaboración propia

5.3.3. Fabricación de las aspas

Como se discutió en la fase de diseño, las aspas se fabricaron a partir de un tubo de PVC de 3 pulgadas de diámetro. Primero se cortó el tubo al largo que tendrían las aspas. Después se marcaron las divisiones para cortar el tubo a lo largo en tres partes iguales. Se procedió a hacer las marcas de los cortes y darle la forma final a las aspas. Se lijaron los cortes para quitar excedentes y dar un buen acabado a las aspas. Por último se marcaron y perforaron los agujeros de las aspas para ensamblarlas al rotor.

Figura 56: Aspas en su forma final y parte del equipo para marcar los cortes.



Fuente: elaboración propia

5.3.4. Fabricación de la estructura

La estructura se compone de tres elementos, el tubo cuadrado metálico como soporte principal, la placa base para la chumacera y la placa base para el motor. El tubo cuadrado se marcó y cortó al largo deseado según el diseño. También se marcaron y perforaron los agujeros para sujetar la cola y el agujero para permitir el paso del cableado del motor. Para las placas base de la chumacera y el motor, se marcó y cortó una plana de acero estructural de 4 mm de espesor. Se utilizó una plancha del doble de espesor que la que se definió en la fase de diseño, debido a que estas placas se debían soldar al tubo estructural y, por lo tanto, debían de soportar altas temperaturas sin deformarse. Posteriormente, se marcaron y perforaron los agujeros correspondientes de cada placa. Una vez se tenían listos el tubo y las placas base, se soldaron las placas al tubo empleando una soldadora de arco eléctrico y electrodo E6013, debido a que todos los componentes eran de acero estructural. Por último, se pintó la estructura finalizada con pintura para exteriores, con el fin de proteger el metal de corrosión al estar expuesto al ambiente.

Figura 57: Estructura del prototipo.



Fuente: elaboración propia

5.3.5. Fabricación de la aleta

La cola se fabricó a partir de una plancha de acero estructural de 2 mm de espesor. Se marcó y se cortó la forma triangular en la plancha y se lijaron las rebabas para dejar un acabado adecuado. Después, se marcaron y perforaron los agujeros para sujetarla a la estructura. Por último, se pintó para protegerla de las condiciones del ambiente exterior.

Figura 58: Aleta del prototipo.



Fuente: elaboración propia

5.3.6. Fabricación de la torre

Para la torre se utilizó un tubo de acero al carbón de 4 metros de largo debido a que era el que estaba disponible y cumplía con los requisitos de diámetro para entrar en la chumacera. En la fase de diseño se había seleccionado un tubo de iguales dimensiones, pero de acero galvanizado, ya que este soportaba mejor el desgaste por estar expuesto al exterior. Sin embargo, el acero al carbón tiene una resistencia a la fluencia de 350 Mpa, la cual es mayor a la del acero galvanizado (303 Mpa). Por lo que se puede concluir que el tubo de acero al carbón va a soportar sin problemás los esfuerzos a los que será sometido. Fue necesario pintar el tubo para protegerlo del ambiente exterior, ya que podía sufrir corrosión. La única modificación que se le hizo al tubo, fue un agujero debajo del extremo donde se ensambla el rodamiento para permitir el paso de los cables eléctricos que salen del generador.

5.3.7. Fabricación del circuito eléctrico para almacenar la energía generada

Como se mencionó tanto en los requisitos como en la fase de diseño de este proyecto, la energía generada por el prototipo se debe almacenar en un acumulador para poder ser aprovechado posteriormente. Por lo que, era necesario crear un circuito que permitiera cargar una batería utilizando la energía generada por el prototipo. Para lograr este objetivo se realizó un circuito de carga con los siguientes elementos:

- Módulo elevador de voltaje RT9266.
Este módulo entrega un voltaje de salida constante al elevar el voltaje de entrada. Funciona con voltajes de corriente continua DC, entregando 5 voltios a 1 amperio constantes en la salida y permite voltajes de entrada desde 1 hasta 5 voltios. (Electrónica, s.f.-d)
- Módulo elevador de voltaje MT3608.
Este módulo entrega un voltaje de salida constante al elevar el voltaje de entrada. Funciona con voltajes de corriente continua DC, entregando hasta 28 voltios a 2 amperios constantes en la salida y permite voltajes de entrada desde 2 hasta 24 voltios. El módulo cuenta con un potenciómetro para regular el voltaje de salida. (La Electrónica, s.f.-a)
- Módulo regulador de voltaje LM2596.
El módulo regulador de voltaje tiene como función entregar un voltaje constante menor al de entrada. Este moduló es específico para cargar dispositivos móviles, por lo que entrega un voltaje constante de 5 voltios a 3 amperios. Además, cuenta con dos puertos USB tipo A para conectar cables para cargar los dispositivos móviles. (La Electrónica, s.f.-b)
- Módulo controlador de carga XH-M603.
Este módulo controla automáticamente el proceso carga de una batería de ácido-plomo de 12 hasta 24 voltios. Permite configurar el voltaje mínimo al que comienza a cargar la batería y el voltaje máximo para desconectar el circuito cuando se termine de cargar la beatería. El módulo mide constantemente el voltaje de la beatería y conecta el circuito por medio de un relé cuando el voltaje de la batería es menor al mínimo configurado. Una vez el voltaje medido es igual al voltaje máximo configurado, se desconecta el relé y corta el paso de la corriente a la batería. (CORPORACIÓN R&CH, s.f.)
- Diodo 6A10.
El diodo 6A10 es de tipo rectificador, que permite únicamente el flujo de la corriente en una dirección. Soporta un voltaje máximo de 1,000 voltios y 25 amperios. (Electrónica, s.f.-b)
- Voltímetro digital.
Despliega en una pantalla digital el valor de voltaje que está midiendo, que pueden ser desde 4.5 voltios hasta 30 voltios. (Electrónica, s.f.-e)

- Indicador de carga de baterías de ácido-plomo.

El indicador de carga despliega en su pantalla el voltaje que mide de la batería de ácido-plomo y cuenta con un indicador de 8 líneas para indicar el porcentaje de carga de la batería. Está diseñado para baterías de ácido-plomo de 12 hasta 60 voltios. (Electrónica, s.f.-c)

- Batería de ácido-plomo 12V-7Ah.

Esta batería es de sellada de ácido-plomo de 12 voltios y capacidad de 7Ah. Es recargable y soporta hasta 1,000 ciclos de carga y descarga. La batería tiene un rango de carga de 11.9 hasta 13.8 voltios. Siendo el mínimo de carga 11.9 V y el máximo de carga 13.8 V. (Steren, s.f.)

- Cable de cobre calibre 16 AWG.

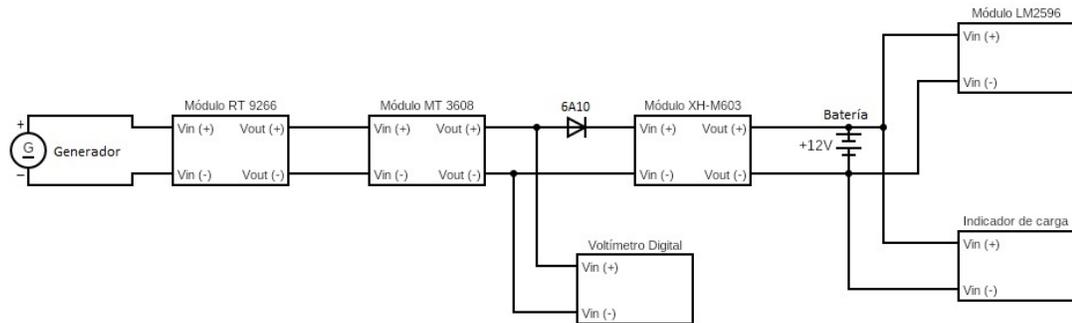
El cable de cobre 16 AWG soporta voltajes de hasta 60 voltios y hasta 13 amperios. (Electrónica, s.f.-a)

Para la elaboración del circuito de carga se tomaron en cuenta los requisitos y necesidades del proyecto; seleccionando de esta manera los que mejor cumplían dichas demandas. Para unir los módulos y componente que no tenían incorporados puntos de sujeción para los cables, se utilizó un cautín tipo lápiz y estaño para soldarlos.

El circuito comienza con los cables que salen del generador, que son el de la corriente negativa, que es la tierra, y el de corriente positiva, que es la carga viva. Se decidió utilizar el código de colores convencionales para el cableado, utilizando el color negro para la corriente negativa y el color rojo para la corriente positiva. Del generador se conecta al primer módulo elevador de voltaje, que es el módulo RT9266, el cual eleva el voltaje que entrega el generador (una vez alcance 1 voltio DC) y entrega 5 voltios DC constantes. Después, se conecta en serie el módulo elevador de carga MT3608, el cual recibe los 5 voltios del módulo RT9266 y los eleva a 13.8 voltios, que es el voltaje necesario para cargar la batería. A la salida del módulo MT3608 se conecta el voltímetro, para medir, configurar y verificar el voltaje que está entregando dicho módulo. También de este módulo salen dos cables, los que entran el módulo regulador de carga de la batería XH-M603. Sin embargo, para evitar que el voltaje de la batería salga del módulo controlador XH-M603, se coloca el diodo 6A10 en el cable de corriente positiva (color rojo) que sale del módulo MT3608. Después del diodo, entran los cables al módulo controlador XH-M603, el cual se va a encargar de controlar el ciclo de carga de la batería. Del módulo XH-M603, salen los cables de corriente que entran a la batería, tanto para medir el voltaje de carga, como para cargar la batería. Por último, se conectan el indicador de carga en los polos de la batería, para poder verificar el nivel de carga de la misma.

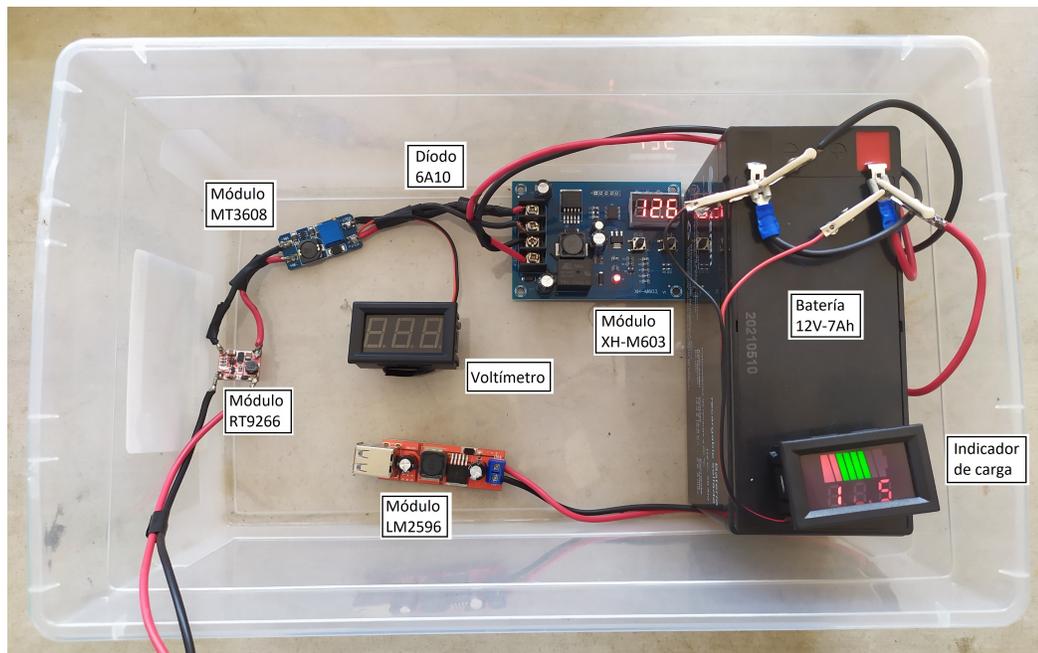
Para utilizar la energía almacenada en la batería, se conecta el módulo LM2596 por medio de ganchos conectados a los polos de la batería para cargar los dispositivos móviles. También se puede conectar los focos LED de 3W y 12 voltios utilizando el mismo método. Se colocó el circuito dentro de una caja plástica para proteger al mismo de condiciones externas.

Figura 59: Diagrama del circuito eléctrico de carga.



Fuente: elaboración propia

Figura 60: Circuito eléctrico para almacenar la carga generada por el prototipo con sus elementos identificados.



Fuente: elaboración propia

5.3.8. Ensamble del prototipo

Una vez se tenían todos los componentes y elementos fabricados, se ensambló el prototipo. Este proceso se realizó dividiendo el ensamble en cuatro subensambles, los cuales son: el subensamble del rotor, el subensamble de la estructura, el subensamble de la torre y el subensamble eléctrico. Para completar el ensamble final del prototipo, se ensamblan todos los subensambles juntos.

El ensamble del rotor está conformado por las tres aspas de PVC y el rotor. Las aspas se ensamblaron por medio de dos pernos por cada aspa con su respectiva tuerca, una roldana plana para no dañar el plástico y una roldana de presión para evitar que se aflojara. Al rotor fue necesario hacerle un balance estático para reducir las vibraciones entre el rotor y el generador. Para este balance se colocó el rotor horizontalmente únicamente sostenido de su acople central y se agregaron roldanas planas a los pernos más cercanos al rotor hasta lograr que este se balanceara sobre su centro.

En el caso del subensamble de la estructura, este está compuesto por la estructura principal a la que se le ensamblan la aleta y el generador por medio de pernos con sus respectivas roldanas planas y de presión. A este subensamble se le ensambla el subensamble del rotor por medio del acople del rotor con el eje del generador. A la torre se le ensambla el rodamiento, ingresando a presión el tubo de acero dentro del acople de la chumacera y apretándolo con las castigaderas; formando así el subensamble de la torre. Después, se ensambla el subensamble de la estructura con el rotor a la torre por medio de la chumacera, utilizando los 4 pernos correspondientes con sus roldanas. Por último, se conectan los cables que salen del generador con el circuito eléctrico, finalizando así el ensamble del prototipo.

Figura 61: Subensamble del rotor, compuesto por las tres aspas PVC y el rotor.



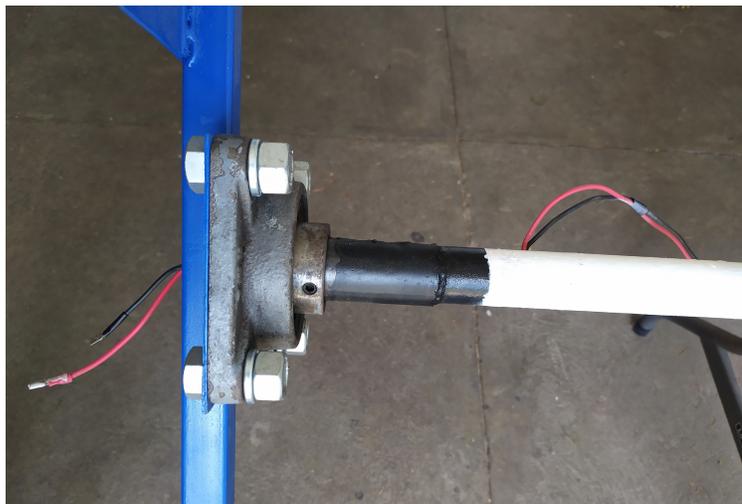
Fuente: elaboración propia

Figura 62: Subensamblaje de la estructura con el subensamblaje del rotor, compuesto por la estructura principal, el generador, la aleta y el rotor con sus aspas.



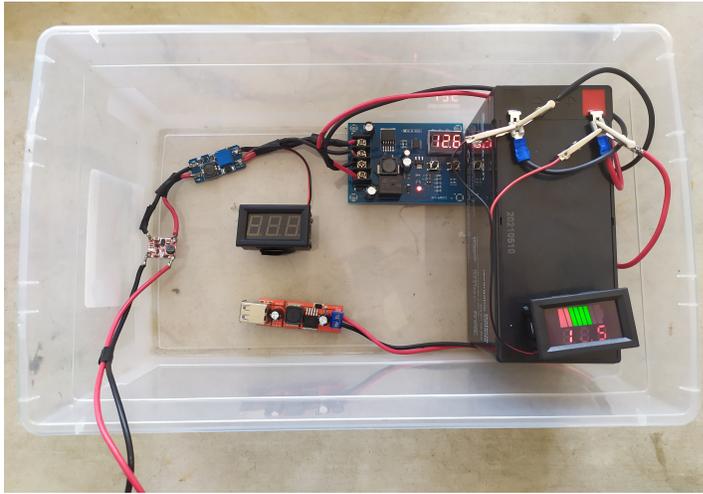
Fuente: elaboración propia

Figura 63: Subensamblaje de la torre, compuesto por el rodamiento, la torre y el cableado para conectar el generador al circuito de carga. El subensamblaje de la turbina se acopla al de la torre por medio de 4 pernos.



Fuente: elaboración propia

Figura 64: Subensamble del circuito eléctrico de carga.



Fuente: elaboración propia

Figura 65: Ensamble final del prototipo.



Fuente: elaboración propia

6.1. Prototipo fabricado

Al finalizar el proceso de fabricación, se obtuvo un prototipo de turbina eólica de eje horizontal, el cual es capaz de alinearse a la dirección del viento, soportar las cargas a las que es sometido, soportar las condiciones externas del ambiente y generar energía eléctrica que es almacenada en una batería para su posterior uso.

Figura 66: Prototipo de turbina eólica fabricado en funcionamiento.



Fuente: elaboración propia

6.2. Pruebas de funcionamiento

6.2.1. Protocolo de pruebas

A continuación, se describe el protocolo de pruebas para el prototipo de turbina eólica. Se detallan los pasos a seguir, los instrumentos y materiales a utilizar; y las tablas para ingresar los resultados obtenidos.

Equipo y materiales

- Multímetro
- Anemómetro
- Prototipo de turbina eólica
- Computadora portátil
- Teléfono celular

Proceso para realizar las pruebas

1. Identificar que el lugar donde se realizarán las pruebas cumpla con las condiciones adecuadas, siendo estas:
 - El lugar tenga un radio de 5 metros libre de obstáculos (edificios, casas, árboles, entre otros)
 - El lugar debe tener velocidades de viento mayores a los 2.5 m/s (medir con el anemómetro)
2. Instalar el prototipo en el punto seleccionado.

Se debe fijar el prototipo de tal manera que la torre quede perfectamente vertical con el suelo.
3. Preparar el equipo de medición.

Conectar el multímetro a los cables del prototipo (positivo y negativo) y colocarlo en medición de voltaje continuo. Configurar el anemómetro para mediciones de velocidad de viento en metros sobre segundos (m/s). Abrir la hoja de toma de datos de *Excel* en la computadora portátil para anotar los datos y resultados obtenidos.
4. Recopilar los datos.

Se debe anotar la hora a la que se está haciendo las mediciones, así como el voltaje que entrega el prototipo y la velocidad de viento a la que entrega dicho voltaje. Estos datos se leen directamente del multímetro y el anemómetro; y se ingresan a la hoja de toma de datos en *Excel*. El anemómetro se debe alinear con la dirección del viento, por lo que se debe guiar con la posición de la aleta del prototipo. En la hoja de *Excel* de toma de datos se deben ingresar otros datos importantes como lo son: la fecha, hora y lugar de las pruebas, voltaje máximo y a qué velocidad de viento se obtuvo, duración de la prueba y la carga inicial y final de la batería.

5. Tomar fotos y vídeos de las muestras.

Con el teléfono celular, tomar fotografías y vídeos del funcionamiento del prototipo y de las mediciones del multímetro y anemómetro. Esto con el fin de tener evidencia de las pruebas y poder revisar el material para referencia de los resultados.

Hoja de toma de datos para las pruebas

Una hoja de toma de datos de las pruebas realizada en el programa *Excel* se encuentra en los anexos de dicho trabajo como referencia de cómo se obtuvieron los datos.

6.2.2. Resultados de las pruebas de funcionamiento

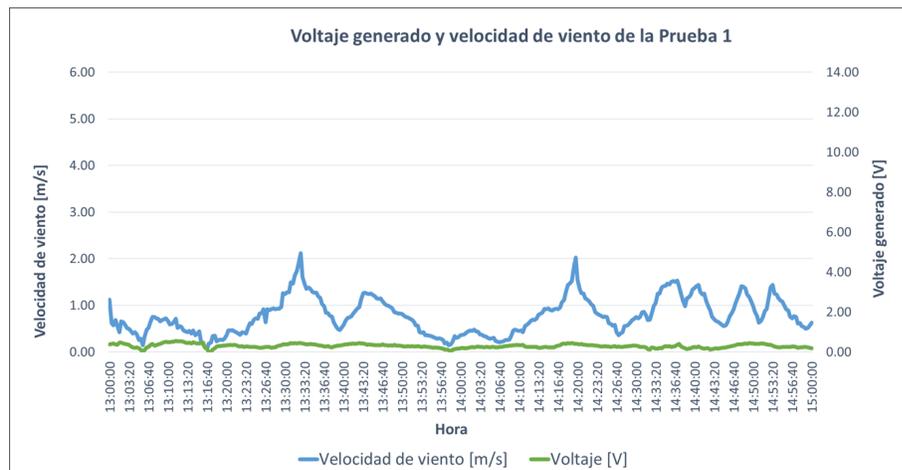
Resultados de la prueba 1

Cuadro 25: Resultados de la Prueba 1.

Parámetro	Dimensional	Valor
Duración de las pruebas	[hrs]	2
Carga inicial de la batería	[V]	–
Carga final de la batería	[V]	–
Voltaje máximo alcanzado	[V]	0.55
Velocidad de viento a la que se obtuvo el voltaje máximo	[m/s]	2.12
Velocidad de viento máxima	[m/s]	2.12
Velocidad de viento mínima	[m/s]	0.06
Velocidad de viento promedio	[m/s]	0.78

Fuente: elaboración propia

Figura 67: Gráfica de voltaje generado y velocidad de viento de la Prueba 1.



Fuente: elaboración propia

Las primeras pruebas se llevaron a cabo en la 5A Calle, Zona 6 de Mixco, en donde anteriormente se habían hecho mediciones de viento y se habían obtenido velocidades mayores a 2.5 m/s. Sin embargo, el día de las mediciones no se obtuvieron las velocidades esperadas. Por lo que, para las demás pruebas se buscó una ubicación diferente que tuviera mejores condiciones de viento.

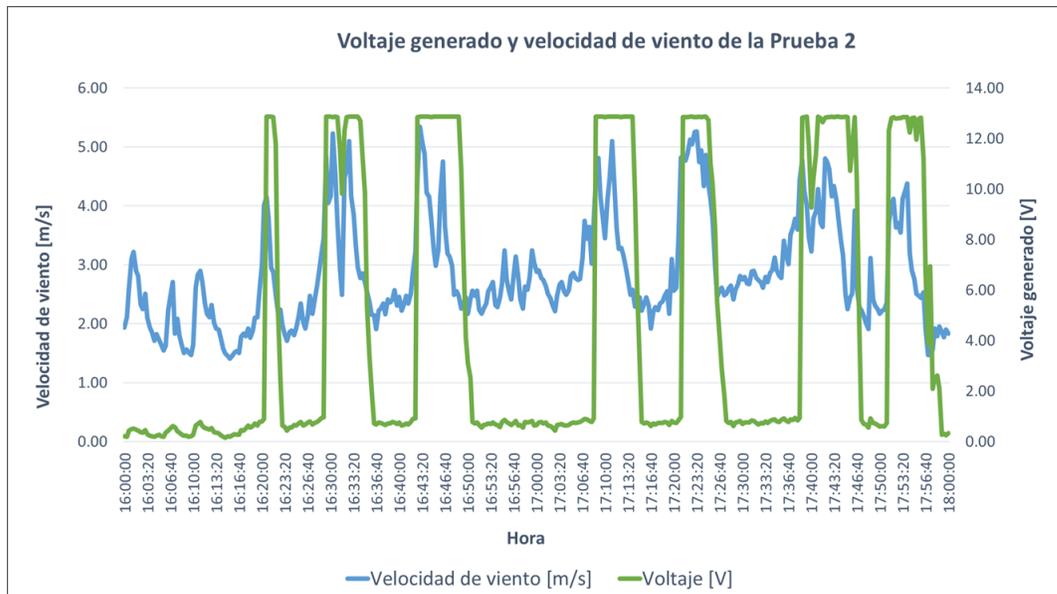
Resultados de la prueba 2

Cuadro 26: Resultados de la Prueba 2.

Parámetro	Dimensional	Valor
Duración de las pruebas	[hrs]	2
Carga inicial de la batería	[V]	12.5
Carga final de la batería	[V]	12.7
Voltaje aumentado de la batería	[V]	0.2
Porcentaje de aumento de carga de la batería	[%]	10 %
Voltaje máximo alcanzado	[V]	12.86
Velocidad de viento a la que se obtuvo el voltaje máximo	[m/s]	5.34
Velocidad de viento máxima	[m/s]	5.34
Velocidad de viento mínima	[m/s]	1.41
Velocidad de viento promedio	[m/s]	2.86

Fuente: elaboración propia

Figura 68: Gráfica de voltaje generado y velocidad de viento de la Prueba 2.



Fuente: elaboración propia

Para esta y las siguientes pruebas se determinó un nuevo punto en el cual se obtuvieron mejores condiciones de viento, el cual está ubicado en el Km 18.5 carretera a Fraijanes, interior Finca Santa Isabel, Guatemala.

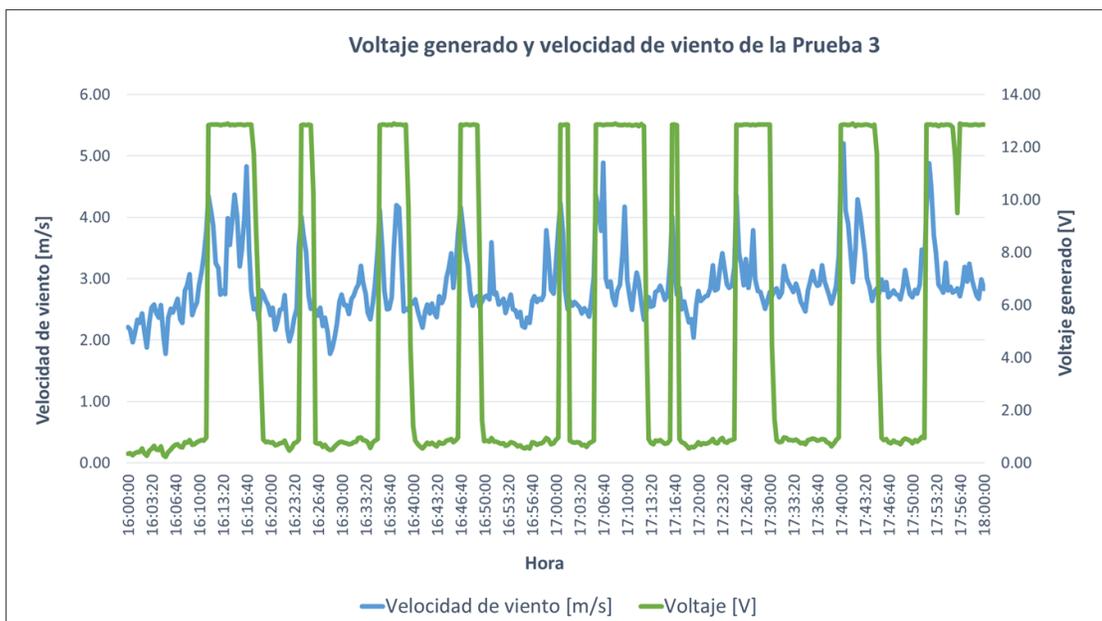
Resultados de la prueba 3

Cuadro 27: Resultados de la Prueba 3.

Parámetro	Dimensional	Valor
Duración de las pruebas	[hrs]	2
Carga inicial de la batería	[V]	12.5
Carga final de la batería	[V]	12.8
Voltaje aumentado de la batería	[V]	0.3
Porcentaje de aumento de carga de la batería	[%]	15 %
Voltaje máximo alcanzado	[V]	12.89
Velocidad de viento a la que se obtuvo el voltaje máximo	[m/s]	5.20
Velocidad de viento máxima	[m/s]	5.20
Velocidad de viento mínima	[m/s]	1.78
Velocidad de viento promedio	[m/s]	2.89

Fuente: elaboración propia

Figura 69: Gráfica de voltaje generado y velocidad de viento de la Prueba 3.



Fuente: elaboración propia

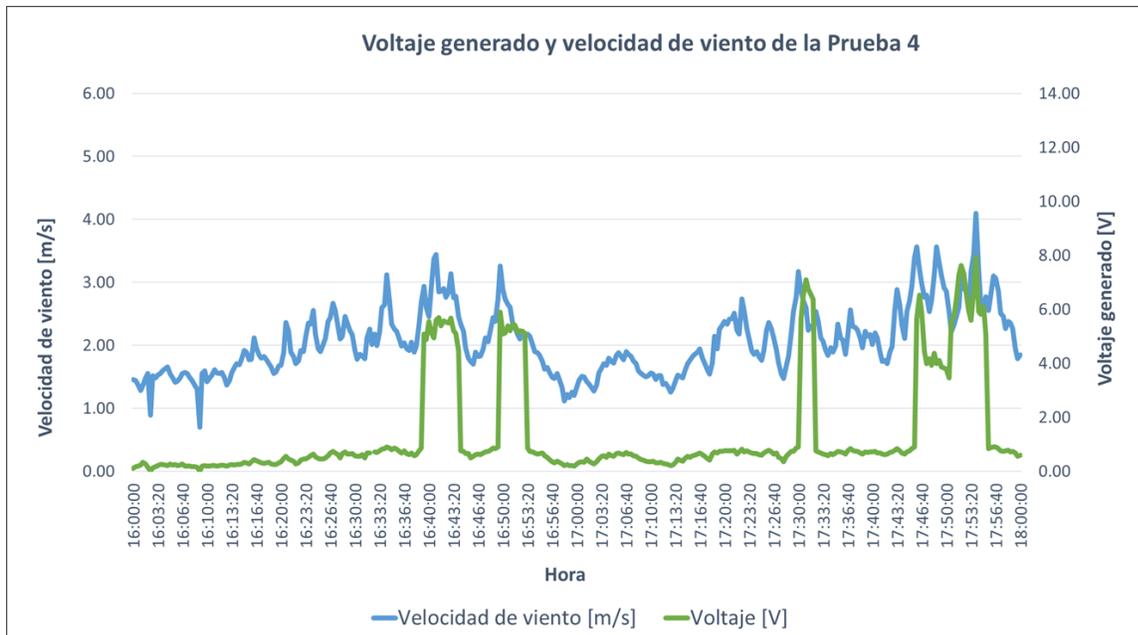
Resultados de la prueba 4

Cuadro 28: Resultados de la Prueba 4

Parámetro	Dimensional	Valor
Duración de las pruebas	[hrs]	2
Carga inicial de la batería	[V]	12.5
Carga final de la batería	[V]	12.5
Voltaje aumentado de la batería	[V]	0
Porcentaje de aumento de carga de la batería	[%]	0%
Voltaje máximo alcanzado	[V]	7.93
Velocidad de viento a la que se obtuvo el voltaje máximo	[m/s]	4.09
Velocidad de viento máxima	[m/s]	4.09
Velocidad de viento mínima	[m/s]	0.70
Velocidad de viento promedio	[m/s]	2.06

Fuente: elaboración propia

Figura 70: Gráfica de voltaje generado y velocidad de viento de la Prueba 4.



Fuente: elaboración propia

6.3. Resultados del aprovechamiento de la energía generada

Para realizar las pruebas de utilización de la energía generada por el prototipo se tomó como base el voltaje aumentado de la batería durante las pruebas 2 y 3, que son de 0.2 V y 0.3 V respectivamente. Después, se procedió a determinar cuanto tiempo dura un foco LED encendido y cuánto aumenta el porcentaje de carga de un celular móvil utilizando dichos consumos de voltaje de la batería del prototipo.

6.3.1. Proyección del tiempo de carga completa de la batería

Con el fin de determinar el tiempo necesario para cargar completamente la batería del prototipo, se proyectó dicho tiempo asumiendo que se mantienen las condiciones de viento y generación de las pruebas 2 y 3. Se utilizó el aumento del voltaje y el tiempo que estuvo cargando la batería en dichas pruebas. También fue necesario determinar el rango de carga de la batería empleada que, basándonos en los datos del proveedor, la batería de 12V - 7Ah de *Steren* tiene un rango de voltaje de 11.9 V a 13.8 V. Por lo que los tiempos proyectados para la carga completa de la batería se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 29: Tiempos proyectados para cargar completamente la batería del prototipo.

Prueba del prototipo	Voltaje inicial de la batería	Voltaje final de la batería	Aumento del voltaje de la batería	Aumento de carga de la batería	Tiempo de carga	Tiempo proyectado para cargar la batería
	[V]	[V]	[V]	[%]	[hrs]	[hrs]
Prueba 2	12.5	12.7	0.2	10 %	2	20.00
Prueba 3	12.5	12.8	0.3	15 %	2	13.33

Fuente: elaboración propia

6.3.2. Duración de un foco LED encendido

En esta prueba se utilizó un foco LED de 3 W de potencia y 12 V marca PROTOL y se conectó a la batería de 12 V y 7 Ah de ácido-plomo. Para medir el consumo de voltaje de la batería se conectó a los terminales de esta un multímetro y el indicador de carga para baterías. El foco cuenta con un *socket* con perilla de encendido y apagado, por lo que una vez conectado todos los componentes a la batería, se encendió el foco y se anotó el voltaje inicial de la batería. Con un cronómetro se midió el tiempo que duraba el foco encendido hasta consumir los voltajes de la batería establecidos. Los resultados se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 30: Resultados de la prueba de tiempo de duración del foco LED encendido.

Voltaje inicial de la batería	Voltaje final de la batería	Voltaje utilizado de la batería	Duración total del foco encendido	Duración del foco encendido
[V]	[V]	[V]	[hh:mm:ss]	[hrs]
12.66	12.56	0.1	03:27:15	3.45
12.66	12.46	0.2	07:13:34	7.23
12.66	12.36	0.3	11:58:21	11.97

Fuente: elaboración propia

6.3.3. Porcentaje de aumento de la carga de un teléfono celular

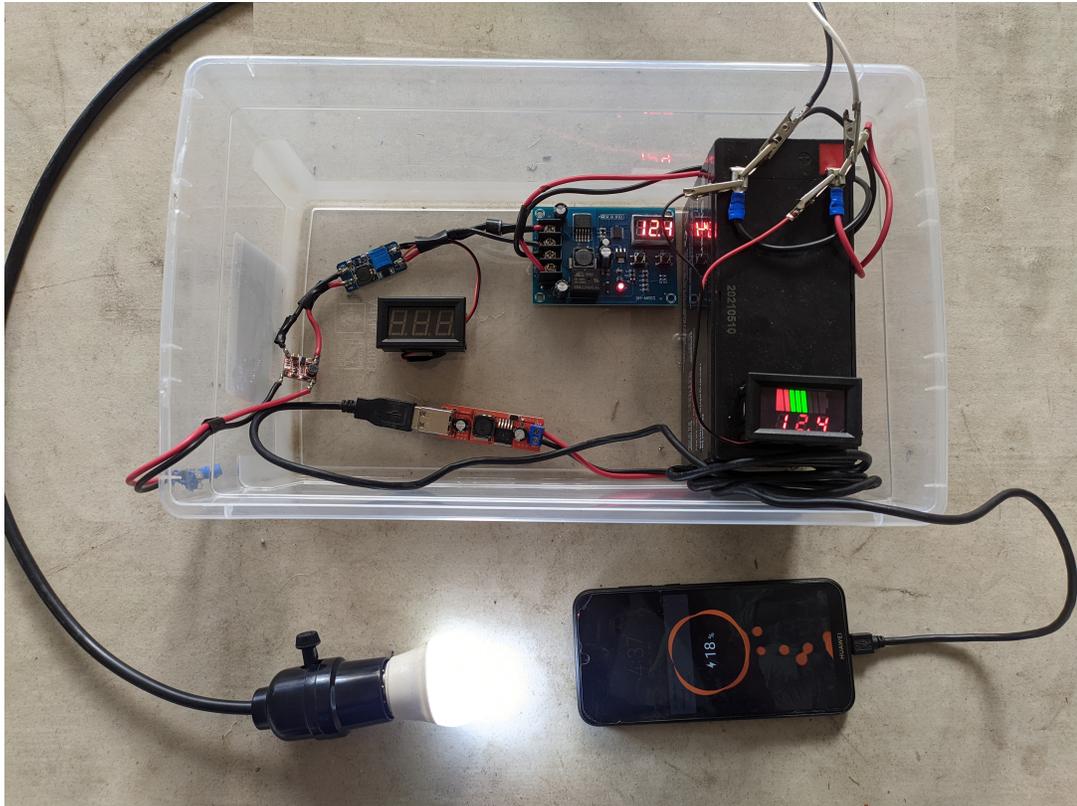
Para esta prueba se utilizó un teléfono celular marca *Huawei* modelo Y5 del año 2019, el cual cuenta con una batería de 3,020 mAh de capacidad. Se conectó el celular con el cable USB a la batería del prototipo por medio del módulo LM2596. De igual manera que en la prueba anterior, se conectó el multímetro y el indicador de carga para monitorizar y medir el voltaje de la batería del prototipo. También, se utilizó un cronómetro para determinar cuánto tiempo le llevaba aumentar el porcentaje de carga de la batería del celular al consumir los voltajes establecidos de la batería del prototipo. Se tomó como base el voltaje inicial de la batería del prototipo al momento de conectar el celular y el porcentaje de carga inicial de la batería del teléfono celular. Una vez se llegaba al consumo establecido, se anotó el porcentaje de carga del celular y el tiempo que este estuvo conectado. Los resultados de esta prueba se detallan en el siguiente cuadro.

Cuadro 31: Resultados de la prueba de aumento del porcentaje de carga del teléfono celular.

Voltaje inicial de la batería	Voltaje final de la batería	Voltaje usado de la batería	Carga inicial del celular	Carga final del celular	Amento de la carga del celular	Tiempo de carga
[V]	[V]	[V]	[%]	[%]	[%]	[hh:mm:ss]
12.71	12.61	0.1	32 %	46 %	14 %	00:17:32
12.71	12.51	0.2	32 %	65 %	33 %	00:42:36
12.71	12.41	0.3	32 %	90 %	58 %	01:21:07

Fuente: elaboración propia

Figura 71: Foco LED y teléfono celular conectados al circuito eléctrico de almacenaje de la energía generada del prototipo.



Fuente: elaboración propia

En la Figura 71 se puede observar que tanto el foco LED, como el teléfono celular, están conectados a la batería del circuito de almacenaje de la energía generada por el prototipo y se observa que el foco está encendido y el celular está cargando.

6.4. Costos del prototipo

Cuadro 32: Costos del prototipo.

Artículo	Proveedor	Cantidad	Precio unitario	Costo
Motor de ventilador de radiador de Hyundai Santa Fe 2009	Repuestos Quiche	1	Q 50.00	Q 50.00
Plancha de acero estructural de 2 mm de espesor de 50 x 50 cm	Recicladora "La Bendición"	1	Q 10.00	Q 10.00
Plancha de acero estructural de 4 mm de espesor de 20 x 40 cm	Recicladora "La Bendición"	1	Q 10.00	Q 10.00
Tubo cuadrado de acero estructural de 1" y 2.2 m de largo	Recicladora "La Bendición"	1	Q 30.00	Q 30.00
Chumacera KML modelo F208	Recicladora "El Esfuerzo"	1	Q 75.00	Q 75.00
Tubo de acero al carbon de 1" de diámetro y 4 m de largo.	Recicladora "La Bendición"	1	Q 73.00	Q 73.00
Abrazadera de doble oreja de 4"	Novex	1	Q 8.00	Q 8.00
Soldadura		1	Q 20.00	Q 20.00
Tubo PVC de 3" de diámetro y 1 m de largo.	Novex	1	Q 38.00	Q 38.00
Tornillo Hexagonal rosca ordinaria de zinc M6 X 25	Novex	3	Q 0.65	Q 1.95
Tornillo Hexagonal rosca ordinaria de zinc M6 X 40	Novex	3	Q 0.75	Q 2.25
Tuerca de acero Hexagonal rosca ordinaria de zinc M6	Novex	6	Q 0.25	Q 1.50
Roldana de acero zinc 1/4	Novex	20	Q 0.20	Q 4.00
Washa de presión de acero zinc 1/4	Novex	6	Q 0.20	Q 1.20
Tornillo Hexagonal rosca ordinaria de zinc M8 X 40	Novex	2	Q 1.00	Q 2.00
Tuerca de acero Hexagonal rosca ordinaria de zinc M8	Novex	2	Q 0.50	Q 1.00
Roldana de acero zinc 3/8"	Novex	2	Q 0.25	Q 0.50
Washa de presión de acero zinc 3/8"	Novex	2	Q 0.25	Q 0.50
Tornillo Hexagonal rosca ordinaria de zinc de 7/16 X 1"	Novex	4	Q 2.25	Q 9.00
Tuerca de acero Hexagonal rosca ordinaria de zinc 7/16"	Novex	4	Q 0.75	Q 3.00
Roldana de acero zinc 7/16"	Novex	4	Q 0.70	Q 2.80
Washa de presión de acero zinc 7/16"	Novex	4	Q 0.60	Q 2.40
Tornillo Hexagonal rosca ordinaria de zinc de 5/8 X 1 1/2"	Novex	4	Q 4.00	Q 16.00
Tuerca de acero Hexagonal rosca ordinaria de zinc 5/8"	Novex	4	Q 2.00	Q 8.00
Washa de presión de acero zinc 5/8"	Novex	4	Q 0.90	Q 3.60
Batería de ácido plomo sellada de 12V y 7Ah	Steren	1	Q 220.00	Q 220.00
Módulo elevador de voltaje MT3608	La Electrónica	1	Q 19.00	Q 19.00
Módulo elevador de voltaje RT9266	La Electrónica	1	Q 24.00	Q 24.00
Módulo regulador de voltaje LM2595	La Electrónica	1	Q 29.00	Q 29.00
Voltímetro digital	La Electrónica	1	Q 40.00	Q 40.00
Indicador de carga para baterías de ácido plomo de 12V	La Electrónica	1	Q 49.00	Q 49.00
Diodo rectificador 6A10	La Electrónica	1	Q 3.50	Q 3.50
Cable calibre 16 AWG rojo	La Electrónica	5	Q 3.00	Q 15.00
Cable calibre 16 AWG negro	La Electrónica	5	Q 3.00	Q 15.00
Terminal macho para cable calibre 16-14	La Electrónica	5	Q 1.00	Q 5.00
Terminal hembra para cable calibre 16-14	La Electrónica	5	Q 1.00	Q 5.00
Módulo controlador de carga de batería XH-M603	Electrónica R & CH	1	Q 82.00	Q 82.00
Cable con lagartos en cada extremo	Electrónica R & CH	4	Q 3.00	Q 12.00
Foco PROTOL LED de 3W y 12 V	Electrónica R & CH	1	Q 20.00	Q 20.00
Socket baquelita con perilla	Novex	1	Q 16.00	Q 16.00
Cable TSJ calibre 16	Novex	1	Q 6.00	Q 6.00
Pintura en aerosol para exteriores marca Evans	Novex	3	Q 16.00	Q 48.00
Caja de plástico transparente con tapadera	Dollar City	1	Q 16.00	Q 16.00
Total				Q998.20

Fuente: elaboración propia

6.5. Manual de fabricación del prototipo

Se realizó un manual para la fabricación del prototipo en el que se detallan los materiales, componentes, herramientas y los procesos de fabricación y ensamble del prototipo. Este manual se encuentra en el anexo 11.5.

6.6. Planos para la fabricación del prototipo

Para la fabricación del prototipo, se realizaron un juego de planos mecánicos en los que se detallan las dimensiones y características de las piezas que se deben fabricar. Este juego de planos se encuentra en el anexo 11.6.

7.1. Prototipo fabricado

El proceso de fabricación del prototipo se llevó a cabo utilizando como guía la fase de cálculos y diseños de este trabajo. Sin embargo, hubo modificaciones que se atribuyen tanto a indisponibilidad de materiales, como mejoras para cumplir de mejor manera los requisitos del mismo. En el caso del tubo utilizado como torre, se utilizó un tubo de acero al carbón de 1 pulgada de diámetro y 4 metros de largo. Mientras que, en la fase de diseño se había seleccionado un tubo de acero galvanizado con las mismas dimensiones. Se hizo este cambio debido a la disponibilidad del material. Sin embargo, el acero al carbón tiene una mayor resistencia a la fluencia que el acero galvanizado, por lo que se puede concluir que soporta las cargas a las que será sometido. Pero para compensar las propiedades de resistencia a ser expuesto a las condiciones del exterior, se pintó el tubo.

Otra modificación fue usar abrazaderas de acero de doble oreja en lugar de abrazaderas de tipo “U”. Esto se debe a que las abrazaderas de doble oreja, al ser diseñadas específicamente para tubos, tiene una superficie plana, lo que permite una mayor área de contacto con el elemento a sujetar. Mientras que, las abrazaderas tipo “U” al ser cilíndricas, el punto de contacto es mucho menor al compararlo con el de las abrazaderas de doble oreja. No obstante, las abrazaderas son del mismo material, se utilizaron la misma cantidad de pernos y de las mismas dimensiones. Por lo que, tomando en cuenta que los factores de seguridad obtenidos para estos elementos de fijación son significativamente altos, los cuales se observan en los cuadros del 18 al 22, se concluyó que iban a soportar las cargas del motor. Cabe destacar que otro factor importante para esta modificación fue la disponibilidad de estos elementos de sujeción, siendo la abrazadera de acero de doble oreja para tubo la más accesible.

En el circuito eléctrico se realizó una modificación para poder generar el voltaje necesario con velocidades más bajas de viento. Originalmente, se había utilizado únicamente el módulo

elevador de voltaje MT3608, el cual permite una entrada mínima de voltaje de 2 voltios. Sin embargo, para poder generar ese voltaje mínimo se requería velocidades de viento muy altas. Por lo que se decidió colocar el módulo elevador de carga RT9266, el cual permite como mínimo un voltio, en serie con el módulo MT3608. Logrando así elevar el voltaje a los 13.8 voltios necesarios para cargar la batería con velocidades de viento más bajas. Al circuito eléctrico se le agregaron dos puntos de conexión, uno en los cables que salen del motor y otro antes de entrar al circuito descrito en la Figura 60. Se agregó también el módulo de control de carga de baterías XH-M603 para automatizar el proceso de desconectar la batería del circuito de carga una vez esta haya alcanzado su carga máxima. Esto con el fin de proteger a la batería de sobre cargas

Tanto los materiales y componente, como las herramientas necesarias para fabricar el prototipo, se seleccionaron para cumplir los requisitos de ser accesible y fácil de replicar. En el caso de las herramientas para fabricar el prototipo se debía de poder utilizar herramientas comunes que no requieran capacitación para ser utilizadas (Requisito T-5). En general todas las herramientas utilizadas cumplen con este requisito, siendo la soldadura con arco eléctrico la única que no cumple. Sin embargo, existen una gran cantidad de herrerías en Guatemala en donde prestan el servicio de soldadura. Por lo que, tomando en cuenta que son pequeños cordones de soldadura y que el diseño no es complicado, estas soldaduras pueden ser realizadas en dichas herrerías. Incluso para obtener el costo de soldadura para el prototipo, se cotizó en con la herrería “Hernández” en la zona 10 de la ciudad de Guatemala. Sin embargo, la soldadura y gran parte de la fabricación del prototipo fue realizada por el autor de este trabajo en el taller mecánico de la empresa PROCHEINSA.

Una vez completada la fabricación y ensamble del prototipo, se realizaron pruebas preliminares, de las cuales se determinaron los aspectos a mejorar del prototipo. Un aspecto que resaltó es el peso de la estructura del prototipo, que se atribuye principalmente al tubo estructural cuadrado. Esto se debe a que su largo está directamente relacionado con el largo de las aspas, como se observa en la ecuación 19. Sin embargo, al hacer las pruebas, tanto la torre, la chumacera, la estructura de soporte y los pernos soportaron las cargas sin ningún problema. De estas pruebas preliminares también se determinó que el sistema de alineación de la turbina con la dirección del viento, el cual consta de la cola, la aleta y la chumacera, funcionó adecuadamente. Así también como las aspas fabricadas de PVC, que permitían girar el rotor sin problemás. Sin embargo, se identificó que al no estar balanceado el rotor existía vibraciones en el acople del rotor con el eje del motor. Por lo que, fue necesario hacer un balance estático del rotor con las aspas para reducir dichas vibraciones.

El requisito T-10 indica que el prototipo debe de ser accesible y desmontable para su mantenimiento y reparación de ser necesario. Para cumplir con este requisito se implementó en el diseño diferentes características. La torre tiene una altura sobre la superficie de 3 metros, por lo que el ensamble de la turbina a la torre es fácilmente accesible por medio de una escalera. El prototipo está acoplada a la torre por medio de 4 pernos que unen la estructura del este con la chumacera. Por lo que para el desmontaje es necesario únicamente remover estos 4 pernos, los cuales están ubicados en un punto de fácil acceso, como se observa en la Figura 63. El peso total del subensamble de la turbina, que es la estructura de soporte, la aleta, el motor y el rotor con sus aspas, tiene un peso total de 7.2 kg o aproximadamente 16 libras. Por lo que, en combinación con las dimensiones generales de dicho subensamble, lo hacen fácil de desmontar y mover para su mantenimiento o reparación. Adicionalmente,

todos los elementos que podrían dañarse, como lo son el rotor, las aspas, la aleta y la chumacera, están sujetos por medio de pernos, logrando que su desmontaje, reparación o incluso cambio sea simple.

El mantenimiento necesario para la turbina se resume en protección de los elementos metálicos de la corrosión, fallos por velocidades de viento mayores a la máxima de diseño de 24 m/s y re-engrase de los rodamientos. Los primeros dos factores únicamente requieren una inspección constante para determinar si es necesario pintar, reparar o remplazar algún componente que esté dañado. En el caso del rodamiento de la chumacera, lo que recomienda el fabricante en su catálogo es un re-engrase cada 10,000 horas de uso. Sin embargo, esto depende de varios factores como lo es la carga sobre el rodamiento, la temperatura, rpm a los que gira, entre otros. Por lo que, se recomendaría un reengrase al año para asegurar el funcionamiento adecuado del rodamiento y cumplir con el requisito T-9. (KML Bearing USA, 2020)

El prototipo fue diseñado para soportar velocidades de viento máximas de 24 m/s, como lo indica el requisito T-7. Sin embargo, la velocidad máxima a la que fue expuesto el prototipo es de 5.34 m/s, ya que esta fue la velocidad máxima alcanzada en las pruebas de funcionamiento. Durante las pruebas realizadas no se experimentó ninguna falla de los elementos estructurales, elementos de sujeción, ni ninguno de los demás componentes. No obstante, sería necesario someter el prototipo a mayores velocidades de viento para concluir con certeza.

Con el fin de proteger el prototipo de la lluvia y cumplir con el requisito T-8, todos los componentes metálicos fueron pintados con pintura para exteriores y las conexiones eléctricas fueron adecuadamente asiladas. El rodamiento de la chumacera cuenta con un sello plástico para evitar que entre el agua a los balines. El motor seleccionado cuenta con una carcasa metálica completamente cerrada, únicamente con agujeros en la parte frontal, los cuales están tapados por el mismo rotor. Cabe destacar que motor está diseñado para estar en condiciones externas, ya que está diseñado para ventiladores de radiador para vehículos.

El prototipo fue fabricado a partir de materiales y componentes que estaban disponibles y eran accesibles en el mercado nacional, como se observa en el Cuadro 32. Esto con el fin de que el diseño fuera replicable y accesible para comunidades dentro del territorio nacional, cumpliendo con el requisito T-4.

Por último, el circuito eléctrico de carga de la batería se colocó dentro de una caja plástica, tanto para protegerlo de condiciones externas, como para proteger a los usuarios, como se observa en la Figura 64. La conexión del circuito a la batería, así como la de los componentes para cargar celulares y encender el foco LED, deben hacerse manualmente. Para facilitar esto, se implementaron las terminales de lagarto, las cuales cuentan con un recubrimiento plástico que funciona como aislante. Esto con el fin de proteger al circuito eléctrico de un corto circuito y a los usuarios de una descarga eléctrica. Cumpliendo así el requisito T-11.

7.2. Pruebas de funcionamiento

Para realizar las pruebas de funcionamiento era esencial encontrar una ubicación que cumpliera con las condiciones de viento adecuadas. Se evaluaron diferentes puntos del territorio nacional, utilizando como referencia el mapa de viento de Guatemala presentado por el MEM, el cual se observa en la Figura 3. Se puede observar en dicha figura, que al sur del departamento de Guatemala, cerca de la frontera con el departamento de Escuintla, existe un alto potencial de viento. Es por esta razón que las eólicas “San Antonio el Sitio” y “Viento Blanco” están ubicadas en dicha región. Además, se utilizaron varias páginas y aplicaciones de pronóstico del clima para monitorear que puntos presentaban velocidades de viento promedio altas. Otro factor importante para la selección de la ubicación fue la accesibilidad logística, ya que era necesario estar trasladando constantemente el prototipo para realizar cada prueba. Esto se atribuye a que no fue posible encontrar un punto en donde fuese seguro poder dejar instalado el prototipo de forma fija. Para la obtención de los datos y resultados de estas pruebas, se empleó el protocolo de pruebas anteriormente descrito en la sección de resultados.

Prueba 1

La primera prueba fue realizada en la 5A Calle, Zona 6 de Mixco, ya que en mediciones previas, se habían obtenido velocidades de viento mayores a 2.5 m/s y al estar ubicada cerca del taller mecánico de PROCHEINSA, era una ubicación logísticamente ventajosa. Sin embargo, al realizar las pruebas los resultados obtenidos no fueron los esperados. Como se observa en la gráfica de la Figura 67, durante el periodo de las pruebas no se obtuvo una velocidad mayor a 2.5 m/s, por lo que el voltaje que generó era muy bajo y, por lo tanto, no podía ser aprovechado. También, se observa en dicha figura que la velocidad del viento no era constante, ya que se observan varios picos y valles a lo largo de la curva. En el Cuadro 25 se observa que el voltaje máximo alcanzado en dicha prueba fue de 0.55 V y la velocidad de viento máximo fue de 2.12 m/s. Las velocidades de viento obtenidas durante la prueba fueron muy bajas, por lo que se obtuvo una velocidad de viento de 0.78 m/s. Sin embargo, esta prueba permitió determinar que funcionamiento mecánico del prototipo y fue fundamental para determinar las mejoras que fueron discutidas anteriormente. Además, permitió descartar dicho punto como ubicación para realizar las pruebas y buscar uno que tuviera mejores condiciones de viento.

Prueba 2

Las siguientes pruebas se llevaron a cabo en el Km 18.5 carretera a Fraijanes, en el interior de la Finca Santa Isabel, en el departamento de Guatemala. Estas pruebas se realizaron el día 12 de marzo del presente año y tuvieron una duración de dos horas, comenzando a las 4:00 pm y terminando a las 6:00 pm. Se seleccionó este horario por motivos de disponibilidad de tiempo y logística. Sin embargo, debido a que es un área privada, no había alumbrado público y por lo que después de las 6:00 pm no había luz. Esto volvía difícil la toma de datos y pruebas fotográficas, con lo cual se concluían las pruebas a dicha hora. Este punto se encuentra en la región de alto potencial de viento en el sur del departamento de Guatemala,

cómo se observa en la Figura 3. Incluso esta ubicación se encuentra a aproximadamente 30 kilómetros de la eólica “San Antonio el Sitio”.

Al realizar las pruebas de funcionamiento, los resultados fueron mucho más favorables. Como se observa en el Cuadro 26, el voltaje máximo obtenido fue de 12.86 voltios y la velocidad máxima del viento fue de 5.34 m/s. Con estas condiciones se logró aumentar el voltaje de carga de la batería de 12.5 V a 12.7 V. Este aumento de la carga fue de 0.2 V, que equivalen al 10% de la carga de la batería. Debido a que las condiciones de viento fueron mejores, la velocidad de viento promedio para esta prueba fue de 2.86 m/s.

En la gráfica del voltaje generado y velocidad del viento de la prueba 2, que se observa en la Figura 68, se ve que la velocidad de viento en general fue más constante en comparación de la prueba anterior, manteniéndose por encima de los 2 m/s. Pero no es hasta que la velocidad del viento supera los 4 m/s que se lograba generar 12.86 V, lo que queda evidenciado en los picos de voltaje generado y velocidad de viento. Esto se debe a que el circuito de carga está diseñado para elevar el voltaje de entrada a 12.86 V cuando este superaba 1 voltio. Esto se ve reflejado en la curva de voltaje generado, en donde cuando este se acerca a 1 voltio, se da un salto hasta los 12.8 V. También se observa que, entre más durase el viento sobre los 4 m/s, más tiempo se generaba los 12.86 V, incluso cuando la velocidad iba disminuyendo. Esto se debe a que el rotor lograba alcanzar una inercia que le permitía mantener la velocidad incluso cuando disminuía la velocidad del viento y, por lo tanto, seguía generando más de un voltio. Cabe resaltar, que una vez disminuía la velocidad del viento de los 4 m/s, el prototipo dejaba de generar progresivamente, en contraste al salto abrupto cuando se alcanzaban ráfagas mayores a los 4 m/s. Esto se debe a que varios de los módulos reguladores de carga cuentan con capacitores, que mantenían la carga incluso cuando el prototipo dejaba de generar el voltio necesario para activar el circuito. Una vez descargados los capacitores, el prototipo volvía a generar menos de un voltio, hasta alcanzar la siguiente ráfaga de viento con velocidades mayores a los 4 m/s.

Prueba 3

La tercera prueba se realizó de igual manera en el mismo punto y misma hora de la prueba 2, pero el día 13 de marzo del presente año. Sin embargo, en esta prueba se obtuvieron mejores resultados, los cuales se pueden observar en el Cuadro 27. Se logró alcanzar un voltaje máximo de 12.89 voltios y una velocidad de viento máxima de 5.20 m/s. El voltaje de la batería se aumentó de 12.5 V a 12.8 V. Un aumento neto de 0.3 V, que equivalen al 15% de la batería. Las mejores condiciones de viento en esta prueba se ven reflejadas en la velocidad de viento promedio obtenida de 2.89 m/s.

Como se observa en la gráfica del voltaje generado y velocidad de viento en la Figura 69, las condiciones de viento para esta prueba fueron más constantes que en la prueba 2. Se ve una tendencia más fuerte cerca de los 3 m/s y aunque hubo varios picos, no se tuvieron valles en dicha curva. Sin embargo, al igual que en la prueba anterior, no es hasta que se tienen ráfagas mayores a los 4 m/s, que el prototipo logra generar los 12.86 V. Esto se ve evidenciado en la coincidencia de los picos de la curva de voltaje generado y de velocidad de viento. En comparación con la prueba 2, en esta prueba se puede observar más picos de voltaje, que se atribuyen a que hubo más ráfagas de viento que superaban los 4 m/s y se

ven reflejado en el aumento de la carga de la batería.

Prueba 4

Esta prueba se realizó el día 19 de marzo del presente año en el mismo punto y hora de la prueba 2. Pero al analizar los resultados del Cuadro 28, estos no fueron los esperados al compararlo con las pruebas 2 y 3. El voltaje máximo alcanzado fue de 7.93 V y una velocidad máxima de viento de 4.09 m/s. Esto se atribuye a que las condiciones de viento no fueron las adecuadas, lo que se ve reflejado en una velocidad de viento promedio de 2.06 m/s. No se logró generar el voltaje suficiente para cargar la batería, por lo que no se obtuvo ningún aumento del voltaje de la misma.

Al analizar los resultados de la gráfica en la Figura 70, se puede observar que la curva de velocidad de viento para esta prueba tuvo un comportamiento irregular, como lo demuestra sus valles y picos. Al variar tanto la velocidad, el prototipo no lograba mantener una velocidad ni constante ni lo suficientemente alta para generar el voltio necesario para activar el circuito. Se pueden observar pequeños picos de voltaje que no superan los 8 voltios. Esto se puede atribuir a que, como se discutió anteriormente, el circuito de carga está compuesto por módulos que contienen capacitores. Estos, después de estar vario tiempo cargándose con el poco voltaje que generaba el prototipo, lograban activar el circuito de carga. Pero debido a que el voltaje no era constante, el módulo trataba de compensar las caídas de voltaje con la misma carga de sus capacitores y estos se descargaron. Por lo que por pequeños momentos lograba elevar el voltaje, pero al no tener una alimentación de suficiente magnitud ni constancia, se caía de nuevo el voltaje. Se puede observar que cerca de las 5:54 pm, hubo una ráfaga de viento que supero los 4 m/s. Sin embargo, al ser únicamente una pequeña ráfaga, no fue suficiente para generar el voltaje que activaría el circuito de carga. Cabe destacar que durante esta prueba el viento cambiaba mucho de dirección, esto se debe a que era turbulento. Esto provocaba que el prototipo cambiara constantemente su dirección, tratando de alinearse a los cambios turbulentos de viento. Lo que evitaba que el rotor girar con continuidad, evitando que este lograra generar.

7.3. Aprovechamiento de la energía generada

Uno de los requisitos de los requisitos de este proyecto es que la energía generada por la turbina pudiera ser almacenada en una batería con la capacidad de mantener encendido un foco LED de 1.5 W por 5 horas y cargar un celular con una batería de 600 mAh en un día (Requisitos T-1 y T-2). Por lo que, con la energía generada en las pruebas 2 y 3 se buscó determinar si era posible cumplir con dichos requisitos.

Proyección del tiempo de carga completa de la batería

Para esta prueba se proyectó el tiempo necesario para cargar completamente la batería de ácido-plomo de 12 V y 7 Ah, asumiendo que las condiciones de cuando se realizaron las pruebas se mantendrían constantes. Es decir que se generaría el mismo aumento de voltaje

de la carga de la batería en cada una de las pruebas cada dos horas. Los resultados de esta proyección se observan en el Cuadro 29, donde vemos que para la prueba 2, se necesitarían 20 horas con las mismas condiciones para cargar totalmente la batería. Mientras que, para la prueba 3 en la que se obtuvo una mayor generación de energía, se necesitarían 13.33 horas. Por lo que, se podría concluir que con las condiciones adecuadas de viento es posible cargar la batería del prototipo en un día.

Sin embargo, no es posible asumir que las condiciones de viento se mantengan constantes a lo largo del día. En el año 2019 MEM presentó un reporte de las mediciones de viento de la finca “El Sitio”, donde se encuentra la eólica “San Antonio el Sitio”. Este estudio se realizó con los datos de la estación de mediciones del MEM con diferentes equipos, incluyendo un anemómetro colocado en una torre de 40 metros de altura. En este estudio se muestra que para el mes de marzo año 2017 se aprovecharon el 76.2% de todas las horas de viento medidas en el mes. El criterio para determinar si eran aprovechables o no es que la velocidad promedio de una hora de medición fuera mayor a los 5 m/s. Además, el promedio de anual de horas de viento aprovechables desde el año 2011 al 2017 es del 54.7%. Cabe resaltar que el criterio de velocidad mínima de 5 m/s como aprovechable es más alto que el de 2.8 m/s promedio que necesita el prototipo. Sin embargo, las mediciones de este estudio fueron realizadas a una altura de 40 metros, donde el viento tiene un flujo que menos turbulento al no ser perturbado por obstrucciones de la superficie terrestre. Asumiendo que únicamente se pueden aprovechar el 76.2% de las horas del mes de marzo, diariamente únicamente se tendrían un total de 18.3 horas aprovechables, que únicamente sería alcanzable con las condiciones de la prueba 3. También es importante tomar en cuenta que estos resultados son de un punto con alto potencial de viento, por lo que las condiciones en otros puntos del país pueden ser menos favorables. (Ministerio de Energía y Minas (MEM), 2019)

Duración de un foco LED encendido

El requisito T-1 establece que el prototipo debía de poder generar la suficiente energía eléctrica para mantener un foco LED de 1.5 W encendido por 5 horas. Para esta prueba se utilizó un foco LED marca PROTOL de 3 W, el cual está diseñado para sistemas de paneles solares. La potencia del foco es del doble de lo establecida en el requisito, pero se utilizó este foco debido a que era el de menor potencia que es accesible en el mercado nacional. Los resultados de la prueba de duración del foco LED encendido se observan en el Cuadro 30. Se obtuvo que para el consumo de 0.2 V de la carga de la batería, el foco LED se mantuvo encendido por 7.23 horas continuas. Mientras que, para el consumo de los 0.3 V generados en la prueba 3, el foco se mantuvo 11.97 horas encendidas, aproximadamente medió día de luz continua. Estos resultados son muy satisfactorios, considerando que los aumentos de voltajes generados en dichas pruebas 2 y 3 equivalen al 10% y 15% de la carga total de la batería. Esto tomando en cuenta que fueron únicamente 2 hora de generación y que el foco LED es del doble de potencia que el establecido en el requisito. Por lo cual, teniendo condiciones de viento adecuadas y generando un aumento en la carga de la batería de al menos 0.2 V, es posible mantener un foco LED de 3 W encendido por más de 5 horas.

Porcentaje de aumento de la carga de un teléfono celular

Basándose en el requisito T-1, la energía generada por el prototipo y almacenada en la batería, debía ser capaz de cargar un celular con una batería de 600 mAh en un día. Para comprobar este requisito se utilizó un celular *Huawei Y5 2019* con una batería de 3020 mAh. La batería de este celular tiene 5 veces la capacidad que la descrita en el requisito, pero era el celular con la batería más pequeña que se tenía disponible. Los resultados de esta prueba se observan en el Cuadro 31, donde para el consumo de 0.2 V de la batería del prototipo, se aumentó en un 33 % la carga del celular en aproximadamente 43 minutos. Un 33 % de carga del celular *Huawei Y5* equivalen a 996.6 mAh, que es más que los 600 mAh establecidos en el requisito. También se observa que para el consumo de 0.3 V de la batería del prototipo, el celular experimentó un aumento neto en la carga de su batería en un 58 % en 1 hora y 21 minutos. El aumento del 58 % de la carga del celular equivale a 1,751.6 mAh, que es casi 3 veces la capacidad de la batería establecida en el requisito. Por lo que se puede comprobar que es posible cargar un celular con batería de 600 mAh.

Como se observa en Figura 71, es posible conectar tanto el foco LED como cargar un celular al mismo tiempo con la batería del prototipo. Cabe resaltar, que durante estas pruebas únicamente se utilizó los voltajes generados durante las pruebas de funcionamiento, que equivalen al 10 % y 15 % de la carga total que puede almacenar la batería. Por lo que, se puede concluir que al cargar la batería completamente con el prototipo, es posible conectar más de un foco LED al mismo tiempo y mantenerlos encendidos por largos periodos de tiempo. Así también, se puede cargar celulares con baterías más grandes que el utilizado en las pruebas. Además, el módulo de carga de celulares LM2596 cuenta con dos entradas USB, por lo que es posible incluso cargar dos celulares al mismo tiempo. Esto permite concluir que el prototipo es capaz de cargar una batería con la capacidad de cumplir los requerimientos T-1 y T-2 satisfactoriamente.

7.4. Costos del prototipo

Para la fabricación del prototipo se estableció un presupuesto máximo de Q1,000.00, el cual describe el requisito T-3. Esto con el fin de poder ser accesible económicamente y ser competitivo en comparación del precio de otras fuentes de energía alternas, como lo son los sistemas fotovoltaicos. De igual manera, todos los componentes y materiales debían obtenerse dentro del mercado guatemalteco, como se describe en el requisito T-4, para cumplir con el objetivo de ser replicable. En el Cuadro 32 se listan todos los componentes y materiales utilizados para la fabricación de este prototipo. Se puede observar que el costo total de este fue de Q998.20, el cual cumple con el límite establecido en requisito T-3. Además, en dicha tabla se listan los proveedores de donde se obtuvieron dichos componentes y materiales. Los cuales están todos del territorio guatemalteco y para ser más específico, dentro de la ciudad de Guatemala; cumpliendo así con el requisito T-4.

En el Cuadro 32 de los costos del prototipo, no se incluyen los costos de mano de obra, ya que la totalidad de este prototipo fue fabricado por el autor de este trabajo. Parte de las herramientas y equipo necesario para la fabricación de este prototipo eran propiedad del autor y la otra parte fue prestada sin costo por el taller mecánico de PROCHEINSA. Como

se mencionó anteriormente en la fase de fabricación del prototipo, el equipo más complicado a utilizar es la soldadura eléctrica. Por lo que, en lugar de colocarse el costo del electrodo utilizado, se colocó la cotización de la soldadura de la herrería “Hernández”. Sin embargo, el electrodo E6013 empleado en este prototipo se vende por libra con un costo de Q13.00, lo que no es tan alejado al costo de la cotización.

Es importante resaltar que los costos podrían variar por la disponibilidad de estos. Lo que es más probable con los materiales metálicos y la chumacera obtenidos de recicladoras industriales y el motor de radiador de carro obtenido en una venta de repuestos de segunda mano. Esto se debe a que, al no ser productos nuevos, los inventarios pueden variar por disponibilidad. Sin embargo, existen varios proveedores dentro de la ciudad de Guatemala, por lo que siguen siendo accesibles. Cabe agregar que, se describen los requerimientos de estos componentes para asegurarse de obtener los adecuados y que estén en buen estado al momento de adquirirlos con otros proveedores.

Los componentes electrónicos podrían ser uno de los elementos más complicados de obtener fuera de la ciudad de Guatemala. Sin embargo, todas las electrónicas de donde se obtuvieron dichos componentes cuentan con servicios de entrega a todo el territorio nacional. El único inconveniente es que si no se excede un consumo mínimo, se agrega un costo de envío, lo que aumentaría los costos del prototipo.

Como se observa en el Cuadro 32, una gran parte de los costos del prototipo se atribuyen al circuito de almacenamiento de la energía generada. En esta tabla se resalta el costo de la batería de ácido-plomo de 12V - 7Ah de Q220.00 y el módulo de carga de la batería XH-M603 de Q82.00. En conjunto todos los componentes del circuito tienen un costo de Q576.50, lo que equivale al 57.8% del costo total del prototipo. Por lo que, para reducir los costos del prototipo se debe analizar el diseño del circuito de almacenamiento de la energía generada.

7.5. Manual de fabricación del prototipo

Para cumplir con el objetivo de que el prototipo fuera replicable, se realizó un manual de fabricación. En este manual se detallan los pasos de cada uno de los procesos de fabricación y ensamble de la turbina eólica y del sistema de almacenaje de la energía generada. También, se detallan los materiales y componentes necesarios para fabricar el prototipo, así como las cantidades respectivas de cada uno. Además, se detallan las herramientas y equipo necesario para la fabricación de la turbina. En cada fase de fabricación y ensamble se detallan los materiales y herramientas que se utilizaran. Para aclarar aún más los procesos, se incluyeron imágenes en cada una de las fases. Por lo tanto, este manual cumple con los requisitos T-12 y T-13 planteados para este proyecto.

7.6. Funcionamiento del prototipo

Como ya se discutió anteriormente, el prototipo es funcional y logra cumplir satisfactoriamente con la gran mayoría de los requisitos establecidos. Sin embargo, uno de los requisitos de este proyecto es que el prototipo funcionara en velocidades bajas de viento, específicamente a velocidades de viento mínimas de 2.5 m/s (requisito T-6). Esta velocidad mínima de viento se seleccionó basándose en los resultados del reporte de mediciones de viento presentado por el MEM en el 2014, en donde el promedio mensual de dicho año superaba los 2 m/s, como se observa en la Figura 5. Sin embargo, los resultados de las pruebas de funcionamiento demostraron que, aunque el prototipo comienza a generar con velocidades menores de 2 m/s, no es hasta que se obtienen velocidades de viento mayores a 4 m/s que la turbina comienza a generar un voltaje aprovechable. Esto se evidencia en las gráficas de las pruebas de funcionamiento en las figuras 68 y 69. También se determinó que la velocidad de viento no es el único factor necesario, sino también que el viento sea continuo tanto en su flujo como en su intensidad. Sin embargo, estas condiciones necesarias de viento limitan donde pueda ser aplicado este prototipo. Ya que, como se muestra en la Figura 3 y la Figura 6, no hay muchos puntos en el territorio guatemalteco que presenten dichas condiciones.

En la Figura 13 se observa una tabla en la que se comparan las especificaciones del fabricante de 6 turbinas eólicas pequeñas comerciales. De esta comparación se puede destacar que las velocidades de entrada de estas turbinas están cercanas a los 3 m/s, mientras que la velocidad nominal está por encima de los 12 m/s. La turbina fabricada por *Ampair* es la que más se acerca a las características del prototipo y se puede observar que su velocidad de entrada es de 3.6 m/s y su velocidad nominal es de 12.6 m/s. Por lo que, incluso turbinas eólicas comerciales requieren de condiciones de viento altas para generar.

Para lograr que el prototipo genere a velocidades de viento más bajas, una solución sería aumentar los rpm del motor. Esto es posible por medio de sistemas de aumento de rpm, como lo son los engranajes, sistema de poleas con faja y/o sistema de cadena con *sprockets*. Sin embargo, la implementación de estos sistemas dificultan el diseño del prototipo, ya que sería necesario agregar un segundo eje con sus soportes y rodamientos, además de los componentes de del sistema de aumento de rpm. Esto también representaría un aumento en el costo del prototipo, mayor dificultad al momento de fabricarlo y mayores requerimientos de mantenimiento. Por lo que, al implementar estos sistemas no sería posible cumplir con los requerimientos del diseño para que el prototipo sea accesible económicamente y replicable.

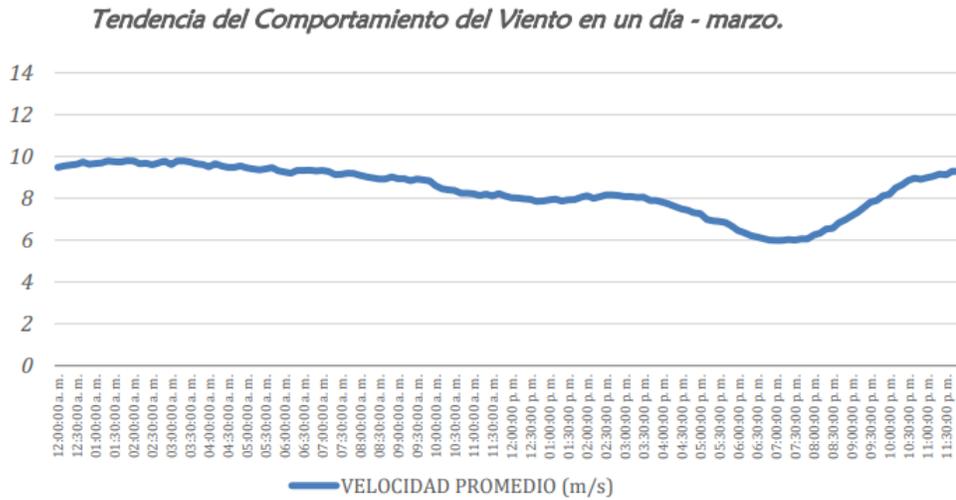
Otra razón por la que el prototipo requiera de condiciones de viento más elevadas y específicas es por el motor seleccionado para utilizarlo como generador. Aunque, este motor es de imanes permanentes y genera corriente DC, este no está diseñado para funcionar como generador. Esto se debe a que este motor está diseñado con imanes permanentes son de ferrita, mientras que, los imanes de generadores eléctricos son de neodimio. Esto se debe a que los imanes de neodimio tienen una mayor densidad de flujo magnético, los que les hace generar un campo magnético de mayor magnitud y, por lo tanto, inducen un voltaje de mayor magnitud que los imanes de ferrita. El inconveniente es que dentro del mercado nacional no hay proveedores de generadores eléctricos de estas características, por lo que la única opción sería importarlos. En la tienda en línea de *Amazon* se pueden comprar generadores eléctricos específicos para turbinas eólicas, como el generador DC marca *Marsrock* de 100 W- 12 a 24 V- imanes permanentes de neodimio, con un precio de USD\$259.69. Otra opción

sería un dinamo de 12 V para bicicletas, el inconveniente es que su costo es más elevado que el del motor de ventilador de radiador y no es accesible en el mercado nacional. Con lo cual, estas soluciones irían en contra de los requisitos de replicabilidad y accesibilidad del proyecto. (Manakshya, 2021) (Amazon, s.f.)

La altura de la torre del prototipo es otro factor que influye en que este requiera de condiciones de viento más específicas para generar. Como se discutió en el marco teórico, al comparar los resultados de las mediciones de viento presentadas por el MEM en la Figura 5 con los presentados por el INSIVUMEH en la Figura 6, se puede observar que los resultados del INSIVUMEH son más bajos. Esto se debe a que, los datos del MEM fueron obtenidos a 30 metros sobre el nivel del suelo, mientras que los del INSIVUMEH se realizaron a 10 metros. Esto demuestra que a mayor altura de la superficie terrestre, mejores son las condiciones del viento. Esto se atribuye a que hay menos obstáculos, por lo que el viento puede fluir a condiciones más similares a las de un flujo laminar. Es por esta razón que varios autores de proyectos de turbinas eólicas pequeñas recomiendan que la torre de la turbina tenga una altura mayor a 10 m. Aunque una mayor altura de la torre permita acceder a mejores condiciones de viento, esta representa un aumento directo en su costo. Además, una altura muy elevada de la torre la vuelve menos accesible para mantenimiento o reparación. Por lo que, de igual manera, esta solución va en contra de los requisitos planteados para este proyecto. (Simon, 2011) (Rathod, 2014) (Tong, 2010) (Van den Bossche, 2013)

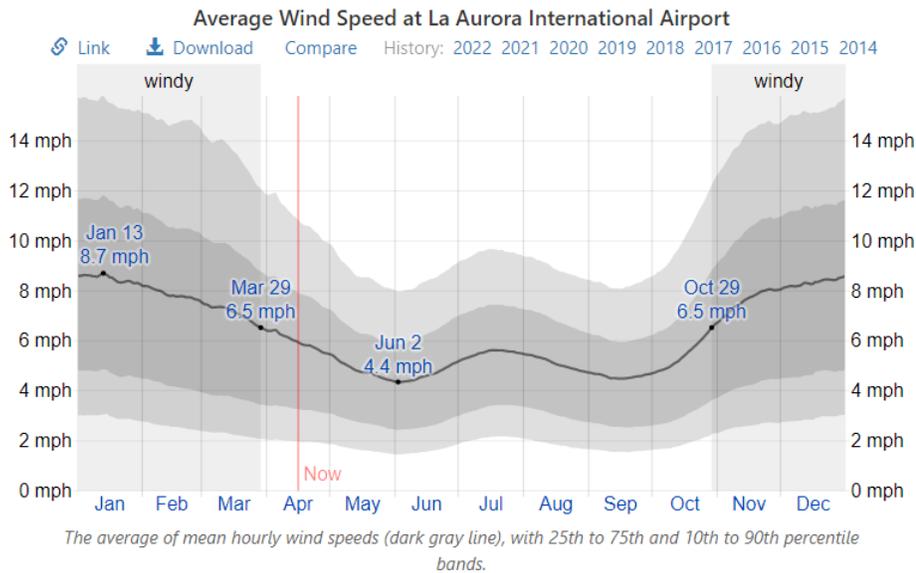
Es importante tomar en cuenta que la energía eólica es una fuente de energía intermitente, que son aquellas que dependen de una fuente natural que no es controlable, por lo que no se puede asegurar una generación continua. El viento es provocado por el calentamiento desigual de la atmósfera terrestre, provocando que masas de aire con mayor temperatura se eleven desplazando a las masas de menor temperatura. Es por esta razón que no es posible controlar el viento, ya que es un fenómeno natural que depende de varios factores como lo es la temperatura, superficie terrestre, características geográficas, nubosidad, entre otros. Sin embargo, debido a que el viento depende en gran parte de la temperatura y las condiciones geográficas se mantienen constantes, se observa que durante el año se mantiene un comportamiento. En el que en los meses de invierno aumenta el viento y disminuye en los meses de verano. Esto se puede observar en la Figura 72, que muestra el promedio de 7 años de las velocidades del viento medidas en la estación del aeropuerto internacional “La Aurora”. En el estudio de viento del MEM en la finca “El Sitio”, basado en las mediciones de 5 años, se determinó un comportamiento diario del viento. Se observa en la Figura 73, que en el mes de marzo el viento aumenta desde las 8:00 pm hasta las 12:00 am y desciende en el rango restante. Este comportamiento se mantiene en los demás meses, pero si varían los rangos de horas y magnitudes según el mes.

Figura 72: Comportamiento promedio de la velocidad de viento marzo.



Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MEM), 2019

Figura 73: Velocidad de viento promedio en el aeropuerto internacional La Aurora.



Fuente: Weather Spark, s.f.

La principal competencia de la energía eólica, es la energía fotovoltaica. Esto se debe a que, gracias a los avances tecnológicos, los paneles solares son más accesibles. Incluso en Guatemala hay empresas que venden de sistemas fotovoltaicos. Como es el caso de la empresa SolarGuat, que vende un kit de un panel solar de 20 W, con 4 focos LED y un controlador de carga que cuenta con radio FM, a un precio de Q1,375.00. Kingo es una empresa guatemalteca que vende energía eléctrica prepagada por medio de sus propios sistemas

de paneles solares y controladores de energía. El kit “Kingo 15” permite conectar tres focos LED y dos celulares a un costo de USD\$ 13.75 al mes, llevando a un costo anual de USD\$ 165.00 que equivalen a aproximadamente Q1,275.00. Las ventajas del diseño del prototipo en comparación de estos kits son el costo, la capacidad de ser reparable y la versatilidad del aprovechamiento de la energía generada. Además, la energía solar es una fuente de energía intermitente que depende de una cantidad de horas de radiación limitadas al día que de igual manera varían durante las estaciones del año. La ventaja de la energía solar es que es más constante que la eólica, pero la eólica tiene la ventaja de poder generar en cualquier momento del día en el que se tengan las condiciones de viento adecuadas. (Solar Guat, s.f.) (García, 2018)

Por lo que, una solución podría ser crear un sistema híbrido, en el que se implemente un panel solar al prototipo para que ambas tecnologías complementen sus debilidades y permitan una mayor generación de energía durante el año. En la empresa “La Electrónica”, que es uno de los proveedores de los componentes electrónicos utilizados en este prototipo, distribuye un panel solar 6 V a 10 W con un costo de Q299.00. El cual cumple con los requerimientos de potencia y puede conectarse al circuito de carga del prototipo. Únicamente sería necesario diseñar un soporte para instalar el panel. Esto elevaría el costo del mismo, pero se aumentaría la capacidad de generación significativamente, por lo que podría ser una solución viable. (La Electrónica, s.f.-c)

1. Se diseñó y fabricó un prototipo de turbina eólica de eje horizontal que cumple con los requisitos de ser replicable y accesible para su implementación en comunidades guatemaltecas.
2. El sistema de almacenamiento de la energía generada por el prototipo es capaz de mantener encendido un foco LED por más de 11 horas continuas y cargar en un 58 % la batería de 3,020 mAh de un celular. El sistema de almacenamiento de la energía está adecuadamente aislado y protegido para asegurar la seguridad de los usuarios.
3. El prototipo fue diseñado para soportar velocidades de viento de hasta 24 m/s y en las pruebas realizadas, la estructura de la turbina soportó velocidades de hasta 5.2 m/s sin presentar ningún fallo.
4. Se realizó un manual de fabricación del prototipo donde se detallan los pasos a seguir, los materiales, componentes y herramientas necesarias.
5. Se estableció como requisito que el prototipo debía generar con velocidades de viento de 2.5 m/s, pero se determinó que requiere flujos de viento constante a velocidades mayores a los 4 m/s.
6. El prototipo fue fabricado con materiales y componentes obtenidos en el mercado nacional, manteniendo un costo menor a Q1,000.00.
7. Para lograr que el prototipo genere a velocidades de viento más bajas es necesario implementar sistemas de aumento de RPM u obtener generadores eléctricos fuera del mercado nacional, lo que representaría un aumento significativo en el costo y complejidad del diseño.
8. El 57.8 % de los costos totales del prototipo se atribuyen a los componentes del circuito de almacenamiento de la energía generada.

Recomendaciones

- Evaluar otras opciones de motores DC de imanes permanentes o generadores eléctricos para poder generar a velocidades de viento más bajas.
- Implementar un sistema de aumento de los RPM del generador que cumpla con los requerimientos de complejidad y costo del prototipo, para que siga siendo accesible y replicable.
- Evaluar diseños para aumentar la altura de la torre del prototipo sin elevar significativamente el costo del mismo.
- Estudiar con más profundidad la ubicación para evaluar el funcionamiento del prototipo. Esto con el fin de poder realizar la mayor cantidad de pruebas y datos del funcionamiento del prototipo.
- Evaluar un diseño híbrido para el prototipo, implementando un panel solar que en conjunto permita compensar las debilidades de ambas fuentes de energía.
- Analizar el diseño y los componentes del circuito de almacenamiento de la energía generada por el prototipo, con el fin de reducir los costos del prototipo.

- Aerosemi. (s.f.). *MT3608 - High Efficiency 1.2 MHz 2A Step Up Converter*. Aerosemi Technology Co. <https://www.electrothinks.com/2021/08/MT3608-2a-dc-to-dc-step-up-power-boost-converter-module.html>
- Alex, K. & Katherine, D. (2011). *Wind Power Wind Power Fundamentals*. MIT Wind Energy Group & Renewable Energy Projects in Action Renewable Energy Projects in Action. <http://web.mit.edu/windenergy>
- Amazon. (s.f.). *Marsrock 600r/m 100W 12V or 24V Permanent Magnet Generator AC Alternator for Vertical or Horizontal Wind Turbine 100W Wind Generator (12V)*. https://www.amazon.com/Marsrock-Permanent-Generator-Alternator-Horizontal/dp/B075R7L9K1/ref=sr_1_4?crid=3C2IJSK42LHZI&keywords=generator+DC+24+v&qid=1650079093&prefix=generator+dc+24+v%2Caps%2C112&sr=8-4
- Banco Mundial. (s.f.). *Quiénes somos*. <https://www.bancomundial.org/es/who-we-are>
- Blackwood, M. (2016). *Maximum Efficiency of a Wind Turbine* (Vol. 6). <https://scholarcommons.usf.edu/ujmm/vol6/iss2/2>
- Bolaños, R. M. (2019). *Cómo llevar energía eléctrica a las comunidades más aisladas del país - Prensa Libre*. <https://www.prensalibre.com/economia/como-llevar-energia-electrica-a-las-comunidades-mas-aisladas-del-pais/>
- Budynas, R. G., Nisbett, J. K., Murrieta Murrieta, J. E., Alatorre Miguel, E. & Shigley, J. E. (Eds.). (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* [OCLC: 427540720]. McGraw-Gill Interamericana.
- Chapman, S. J. (2012). *Electric machinery fundamentals* (5. ed., internat. ed) [OCLC: 729994141]. McGraw-Hill.
- Chiras, D. D., SAGRILLO, M. & WOOFENDEN, I. (2010). *Wind power basics*. New Society Publishers.
- CORPORACIÓN R&CH, S. (s.f.). *MD-M603 Módulo controlador de carga de batería XH-M603*. Consultado el 31 de marzo de 2022, desde <https://electronicarych.com/shop/product/md-m603-md-m603-modulo-controlador-de-carga-de-bateria-xh-m603-14278?page=7&category=105>
- Electrónica, L. (s.f.-a). *Cable primario 16 AWG, negro (metro)*. <https://laelectronica.com.gt/cable-primario-16-awg-negro-metro>

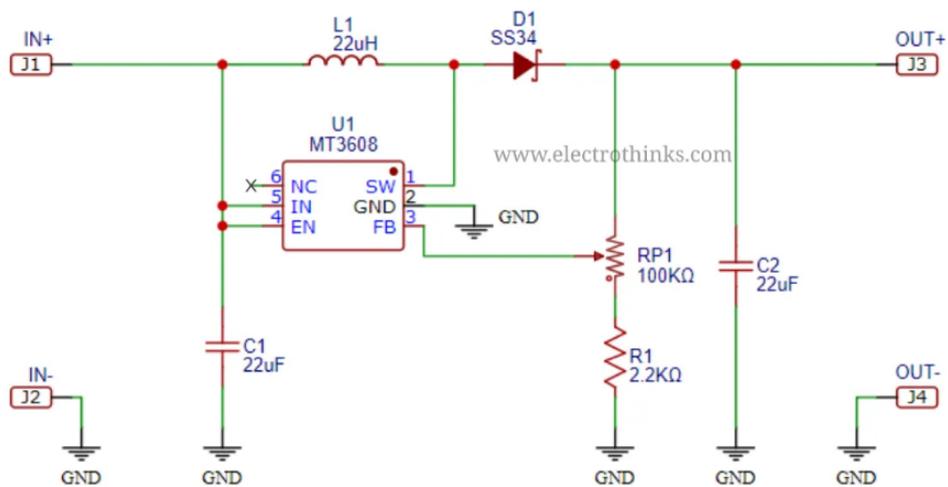
- Electrónica, L. (s.f.-b). *Diodo rectificador 6A10*. Consultado el 31 de marzo de 2022, desde <https://laelectronica.com.gt/diodo-rectificador-6a10>
- Electrónica, L. (s.f.-c). *Indicador de carga de baterías de ácido plomo de 12 a 60 V*. Consultado el 31 de marzo de 2022, desde <https://laelectronica.com.gt/indicador-de-carga-de-baterias-de-acido-plomo-de-12-a-60-v>
- Electrónica, L. (s.f.-d). *Módulo elevador de voltaje MT3608 - 2A*. Consultado el 31 de marzo de 2022, desde <https://laelectronica.com.gt/modulo-elevador-de-voltaje-mt3608---2a>
- Electrónica, L. (s.f.-e). *Voltímetro digital de 4.5~30V*. Consultado el 31 de marzo de 2022, desde https://laelectronica.com.gt/voltimetro-de-4_5--30v
- García, N. (2018). *Con Kingo puedes pagar energía solar vía prepago* [publisher: Forbes México]. Consultado el 17 de abril de 2022, desde <https://www.forbes.com.mx/conkingo-puedes-pagar-energia-solar-via-prepago/>
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2018). *Compendio Estadístico Ambiental 2018*. Instituto Nacional de Estadística, Dirección de Índices y Estadísticas Continuas, <https://www.ine.gob.gt/ine/estadisticas/bases-de-datos/estadisticas-ambientales/>
- IRENA. (2019). *Renewable Power Generation Costs in 2019*. Consultado el 31 de marzo de 2022, desde <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>
- Kirsch, J. (2009). *Design of a small wind turbine for electric power generation (1-5kW)* (Tesis doctoral). University of Southern Queensland. Toowoomba, Australia.
- KML Bearing USA. (2020). *KML Bearing USA Bearing Catalog* (6.^a ed.). KML Bearing USA.
- La Electrónica. (s.f.-a). *Módulo elevador de voltaje MT3608 - 2A*. Consultado el 10 de mayo de 2021, desde <https://laelectronica.com.gt/modulo-elevador-de-voltaje-mt3608---2a>
- La Electrónica. (s.f.-b). *Módulo regulador de voltaje LM2596 de 5V 3A con dos puertos USB*. Consultado el 10 de mayo de 2021, desde <https://laelectronica.com.gt/modulo-regulador-de-voltaje-lm2596-de-5v-3a-con-dos-puertos-usb>
- La Electrónica. (s.f.-c). *Panel solar de 6V a 10W*. Consultado el 10 de abril de 2022, desde <https://laelectronica.com.gt/panel-solar-de-6v-a-10w>
- Leahy, M., Connolly, D. & Buckley, D. (2010). *Wind energy storage technologies* (Vol. 44). www.witpress.com
- Manakshya, N. (2021). *Permanent magnet synchronous machine using ferrite vs rare earth magnets : how do they compare?* (Dissertation). School of Electrical Engineering y Computer Science, KTH Royal Institute of Technology. Sweden. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-302658>
- MatWeb. (s.f.). *Online Materials Information Resource - MatWeb*. <https://www.matweb.com/>
- Ministerio de Energía y Minas (MEM). (2014). *Resultados de las mediciones de viento a partir del año 2006 hasta el año 2014*. Dirección General de Energía, Ministerio de Energía y Minas. <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/Resumen-de-Mediciones-de-viento-en-Guatemala-hasta-el-2014.pdf>
- Ministerio de Energía y Minas (MEM). (2017a). *Índice de cobertura eléctrica 2016*. Dirección General de Energía, Ministerio de Energía y Minas. <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/05/Cobertura-Elctrica-2016.pdf>

- Ministerio de Energía y Minas (MEM). (2017b). *Proyecto de medición eólica en Guatemala*. Dirección General de Energía, Ministerio de Energía y Minas. https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2015/06/0001_-Chisp%C3%A1n-Estanzuela.pdf
- Ministerio de Energía y Minas (MEM). (2019). *Estudio y perfil básico de la medición de viento finca "El Sitio"*. (Inf. téc.). Dirección General de Energía. Guatemala. <https://mem.gob.gt/wp-content/uploads/2020/10/Estudio-de-Medici%C3%B3n-de-Viento-Finca-EL-SITIO-DGE-DER-30-07-19.pdf>
- Mundial, B. (2018). *Acceso a la electricidad (% de población)*. <https://www.bancomundial.org>
- O. A. Ajayi. (2012). *Application of automotive alternators in small wind turbines* (Tesis de maestría). Delft University of Technology. Delft, Holanda.
- Ofordile, S. (2013). *Low Cost Small Wind Turbine Generators for Developing Countries* (Master of Electrical Engineering). University of Nigeria Nsukka. Nigeria.
- Perry, R. (2010). *Design of a Small Wind Turbine for a Rural Community in Australia* (Bachelor of Engineering). University of Southern Queensland. Australia.
- PNUD. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible | Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo*. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- Portela, P., Sepúlveda, J. & Esteves, J. (2008). *Alternating Current and Direct Current Generator* (Vol. 1).
- Rathod, V. (2014). *Design of PVC Bladed Horizontal Axis Wind Turbine for Low Wind Speed Region* (Vol. 4). www.ijera.com
- Richtek. (2007). *RT9266 - Tiny Package, High Efficiency, Step-up DC/DC Converter*. Richtek. <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/207989/RICHTEK/RT9266/293/1/RT9266.html>
- Schubel, P. & Crossley, R. (2012). *Wind Turbine Blade Design*. Faculty of Engineering, University of Nottingham.
- Simon, M. (2011). *Design and Engineering of Wind-Powered Machinery for Developing Countries* (Tesis doctoral). The Ohio State University.
- Solar Guat. (s.f.). *Kit solar 20W + Radio FM*. Consultado el 10 de abril de 2022, desde <http://solarguat.com/celsg/es/kits-solares/296-kit-solar-18-w.html>
- Soteris, K. (2014). *Solar Energy Engineering Processes and Systems* (Second edition). Academic Press.
- Steren. (s.f.). *Batería sellada de ácido-plomo, 12 Vcc 7 Ah*. <https://www.steren.com.gt/bateria-sellada-de-acido-plomo-12-vcc-7-ah.html>
- Texas Instruments. (2021). *LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator*. Texas Instruments. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
- Tong, W. (Ed.). (2010). *Wind power generation and wind turbine design* [OCLC: ocn489011685]. WIT Press.
- Van den Bossche, A. (2013). *Low wind speed wind turbine in DIY version*. Ghent University.
- Weather Spark. (s.f.). *Climate and Average Weather Year Round at La Aurora International Airport Guatemala*. <https://weatherspark.com/y/146334/Average-Weather-at-La-Aurora-International-Airport-Guatemala-Year-Round#Figures-WindSpeedHeatMap>
- WiscWind. (2017). *WiscWind University of Wisconsin - Madison*. University of Wisconsin - Madison.

11.1. Diagramas de los circuitos eléctricos y especificaciones de los componentes electrónicos.

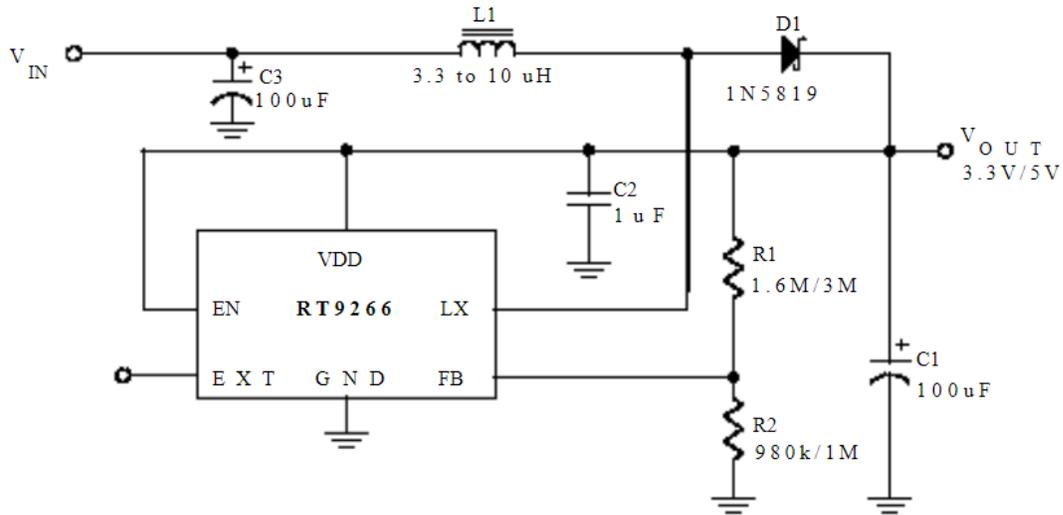
Figura 74: Diagrama del circuito del módulo MT3608.

MT3608 Module Circuit Diagram



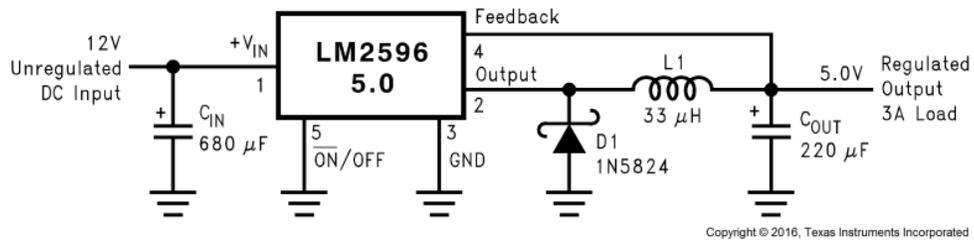
Fuente: Arosemi, s.f.

Figura 75: Diagrama del circuito del módulo RT9266.



Fuente: Richtek, 2007

Figura 76: Diagrama del circuito del módulo LM2596.



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

Fuente: Texas Instruments, 2021

Figura 77: Hoja de especificaciones de la batería de ácido-plomo de 12 V - 7 Ah



ESPECIFICACIONES

Voltaje Nominal		12V
Capacidad Promedio (tasa de 20 hrs.)		7AH
Dimensiones	Altura Total (con terminales)	101mm (3.98 pulg.)
	Altura	94mm (3.7 pulg.)
	Largo	150mm (5.9 pulg.)
	Ancho	65mm (2.56 pulg.)
Peso		Aprox. 2.5kg (5.84 libras)

CARACTERÍSTICAS

Capacidad 77°F (25°C)	Tasa de 20 hrs. (300mA)	7AH
	Tasa de 10 hrs. (558mA)	6.5AH
	Tasa de 5 hrs. (1.02A)	6AH
	Tasa de 1 hr. (3.6A)	4.2AH
	Tasa de 15 min. (13.2A)	3.2AH
Resistencia Interna	Carga máxima de la batería 77°F (25°C)	25mΩ
Capacidad afectada por la temperatura (20 rango de hora)	104°F (40°C)	102%
	77°F (25°C)	100%
	32°F (0°C)	85%
	5°F (-15°C)	65%
Autodescarga 77°F (25°C)	Capacidad después de 3 meses de almacenaje	91%
	Capacidad después de 6 meses de almacenaje	82%
	Capacidad después de 12 meses de almacenaje	64%
Descarga Máxima de Corriente 77°F (25°C)	105A (5S)	
Terminal	Estándar	F1
	Opcional	F2
Carga (Voltaje Constante)	Ciclo	Carga de Corriente Inicial 2.4A o menor 14.5V ~ 14.9V/77°F (25°C)
	Flotante	13.6V ~ 13.8V/77°F (25°C)

Fuente: Steren, s.f.

11.2. Obtención de los materiales

Figura 78: Motor de ventilador de radiador de Hyundai Santa Fe 2002 - 2009 utilizado en el prototipo



Fuente: elaboración propia

Figura 79: Aspas originales del ventilador para radiador del motor seleccionado, del cual se fabricó el rotor del prototipo.



Fuente: elaboración propia

Figura 80: Chumacera KML F208 utilizada en el prototipo.



Fuente: elaboración propia

Figura 81: Selección de la chumacera en la recicladora “El Esfuerzo”. Se puede observar la gran cantidad de rodamientos de diferentes tamaños y tipos en las estanterías.



Fuente: elaboración propia

11.3. Fabricación del prototipo

Figura 82: Balance estático del rotor por medio de agregar roldanas en los pernos que unen las aspas al rotor.



Fuente: elaboración propia

11.4. Pruebas del prototipo

Figura 83: Anemómetro PYLE PMA 90 utilizado para las mediciones de velocidad del viento.



Fuente: elaboración propia

Figura 84: Mediciones de velocidad de viento y voltaje generado utilizando el anemómetro y multímetro.



Fuente: elaboración propia

Figura 85: Prueba de funcionamiento del prototipo en el Km 18.5 carretera a Fraijanes, Guatemala.



Fuente: elaboración propia

Figura 86: Otra prueba del funcionamiento del prototipo en el Km 18.5 carretera a Fraijanes, Guatemala. Se puede observar que es un terreno sin obstrucciones por parte de construcciones cercanas.



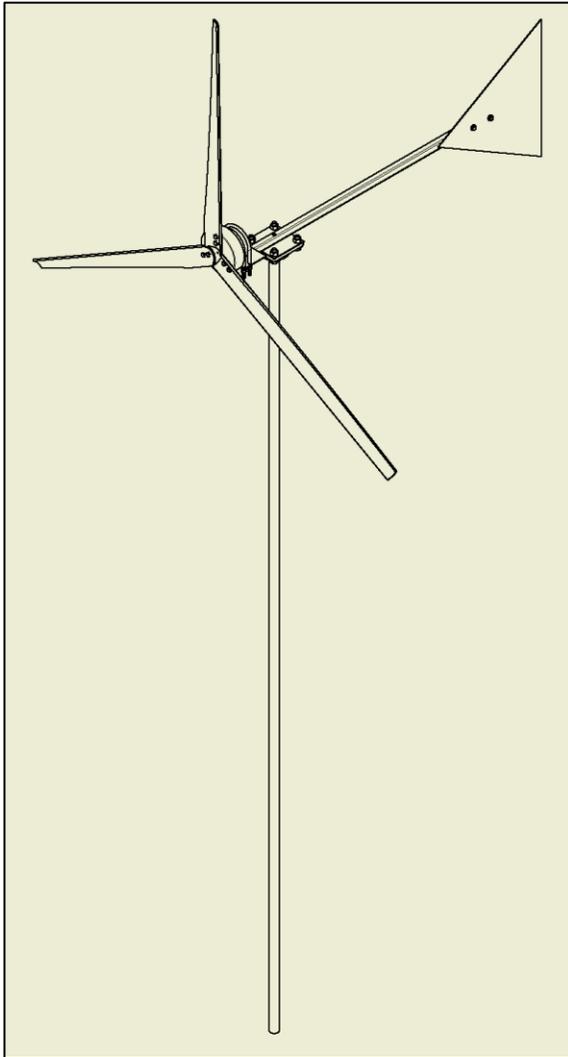
Fuente: elaboración propia

Figura 88: Parte de la hoja de Excel de para la toma de datos de la prueba de funcionamiento 2.

Prueba de funcionamiento de pototipo de turbina eólica		
Lugar:	Km 18.5 carretera a Fraijanes, interior Finca Santa Isabel	
Fecha:	13/03/2022	Hora: 4:00 p. m.
Duración de las pruebas	[hrs]	2
Carga inicial de la batería	[V]	12.5
Carga final de la batería	[V]	12.8
Voltaje máximo alcanzado	[V]	12.89
Velocidad de viento a la que se obtuvo el voltaje máximo	[m/s]	5.20
Voltaje máximo	[V]	12.89
Voltaje mínimo	[V]	0.22
Velocidad de viento máxima	[m/s]	5.20
Velocidad de viento mínima	[m/s]	1.78
Velocidad de viento promedio	[m/s]	2.89
Hora	Voltaje	Velocidad de viento
[hh:mm:ss]	[V]	[m/s]
16:00:00	0.34	2.21
16:00:20	0.36	2.17
16:00:40	0.28	1.96
16:01:00	0.36	2.11
16:01:20	0.41	2.33
16:01:40	0.40	2.28
16:02:00	0.55	2.43
16:02:20	0.37	2.17
16:02:40	0.26	1.88
16:03:00	0.46	2.30
16:03:20	0.53	2.53
16:03:40	0.64	2.58
16:04:00	0.51	2.44
16:04:20	0.48	2.36
16:04:40	0.63	2.57
16:05:00	0.29	2.06
16:05:20	0.22	1.78
16:05:40	0.40	2.36
16:06:00	0.51	2.51

Fuente: elaboración propia

11.5. Manual de fabricación del prototipo



Manual de Fabricación

*Turbina eólica para
comunidades*

Jorge Fuentes

Guatemala, 2022

Índice

1.	Información general	1-1
1.1	Trabajar con seguridad.....	1-1
2.	Listado de materiales y componentes	2-1
2.1	Obtención de los materiales y componentes.....	2-3
3.	Listado de herramientas y equipos.....	3-1
3.1	Procesos generales	3-2
4.	Fabricación de la turbina eólica	4-1
4.1	Fabricación de las aspas.....	4-1
4.2	Fabricación del rotor	4-4
4.3	Fabricación de la placa base para el motor	4-6
4.4	Fabricación de la placa base para la chumacera	4-8
4.5	Fabricación de la aleta	4-10
4.6	Fabricación de la base estructural	4-12
4.7	Fabricación de la estructura de soporte.....	4-14
4.7	Fabricación de la torre	4-16
4.9	Fabricación del circuito de almacenamiento de la energía generada.....	4-17
5.	Ensamble de la turbina eólica	5-1
5.1	Subensamble del rotor.....	5-1
5.2	Subensamble del cuerpo	5-3
5.3	Subensamble de la torre	5-5
5.4	Ensamble final de la turbina	5-6

1. INFORMACIÓN GENERAL

En este manual de fabricación se presenta el proceso para fabricar una turbina eólica de eje horizontal con una capacidad de 5 W de potencia. Esta turbina funciona aislada de la red eléctrica, por lo que la energía generada es almacenada en una batería, la cual puede ser utilizada para encender un foco LED de 3 W y cargar hasta dos teléfonos celulares con baterías de 3,000 mAh. Este diseño de turbina eólica requiere de condiciones de velocidades de viento de 4 m/s para poder generar. Por lo que se recomienda evaluar las condiciones de viento del área donde se va a colocar la turbina para verificar que cumpla con estos requerimientos de viento. Este diseño cuenta con una cola y aleta para alinear la turbina con la dirección del viento.

A continuación, se detallan los pasos para el proceso de fabricación de la turbina eólica y su sistema de almacenamiento de energía, así como los materiales y herramientas necesarias para la fabricación.

Este diseño está hecho para ser replicado en Guatemala, por lo que los componentes, materiales y proveedores fueron seleccionados en base su accesibilidad dentro del mercado guatemalteco. Por lo que, si se desea implementar en otro país, se debe tomar en cuenta que ciertos componentes no vayan a ser accesibles en el mercado de dicho país.

1.1 Trabajar con seguridad

Es importante recalcar la importancia de utilizar equipo de seguridad al momento de utilizar las herramientas. Estos pueden ser ropa protectora, lentes protectores, guantes, máscaras o lo que se considere pertinente para proteger al usuario.

Utilizar únicamente las herramientas para las que se tiene conocimiento y experiencia. De lo contrario, buscar ayuda de alguien que la tenga.

Siempre velar por la seguridad personal y de las personas que están alrededor.

2. LISTADO DE MATERIALES Y COMPONENTES

A continuación, se presenta el listado de materiales y componentes para la fabricación de la turbina. Se detalla cada artículo y la cantidad necesaria.

Artículo	Cantidad
Motor de ventilador de radiador de Hyundai Santa Fe 2009	1
Plancha de acero estructural de 2 mm de espesor de 50 x 50 cm	1
Plancha de acero estructural de 4 mm de espesor de 15 x 15 cm	1
Plancha de acero estructural de 4 mm de espesor de 15 x 15 cm	1
Tubo cuadrado de acero estructural de 1" y 2 m de largo	1
Chumacera KML modelo F208	1
Tubo de acero al carbón de 1" de diámetro y 4 m de largo.	1
Abrazadera de doble oreja de 4"	2
Tubo PVC de 3" de diámetro y 1 m de largo.	1
Tornillo hexagonal rosca ordinaria de zinc M6 X 25	6
Tuerca de acero hexagonal rosca ordinaria de zinc M6	6
Roldana de acero zinc 1/4	20
Washa de presión de acero zinc 1/4	6
Tornillo hexagonal rosca ordinaria de zinc M8 X 40	2
Tuerca de acero hexagonal rosca ordinaria de zinc M8	2
Roldana de acero zinc 3/8"	2
Washa de presión de acero zinc 3/8"	2
Tornillo hexagonal rosca ordinaria de zinc de 7/16 X 1"	4
Tuerca de acero hexagonal rosca ordinaria de zinc 7/16"	4
Roldana de acero zinc 7/16"	4
Washa de presión de acero zinc 7/16"	4
Tornillo hexagonal rosca ordinaria de zinc de 5/8 X 1 1/2"	4
Tuerca de acero hexagonal rosca ordinaria de zinc 5/8"	4
Washa de presión de acero zinc 5/8"	4
Batería de ácido plomo sellada de 12V y 7Ah	1
Módulo elevador de voltaje MT3608	1
Módulo elevador de voltaje RT9266	1

2.0 Listado de materiales y componentes

Módulo regulador de voltaje LM2595	1
Voltímetro digital	1
Indicador de carga para baterías de ácido plomo de 12V	1
Diodo rectificador 6A10	1
Cable calibre 16 AWG rojo (5 a 10 metros)	5
Cable calibre 16 AWG negro (5 a 10 metros)	5
Terminal macho para cable calibre 16-14	5
Terminal hembra para cable calibre 16-14	5
Módulo controlador de carga de batería XH-M603	1
Cable con lagartos en cada extremo	4
Foco PROTOL LED de 3W y 12 V	1
Socket baquelita con perilla	1
Cable TSJ calibre 16 (3 a 5 metros)	1
Pintura en aerosol para exteriores marca Evans (Rojo, azul y blanco)	3
Caja de plástico transparente con tapadera	1

2.1 Obtención de los materiales y componentes

- El motor para ventilador de radiador de carro que será utilizado como generador para esta turbina puede variar el modelo del carro para el que fue diseñado. Estos motores se pueden conseguir en tiendas de repuestos para vehículos. Lo importante es que este motor debe de funcionar con 12 V (voltios) DC (corriente directa o continua), tener una potencia de más de 300 W y ser de imanes permanentes. La manera más segura de verificar que el motor sea de imanes permanentes es conectando un multímetro a los cables que salen del motor y verificar que se logre medir un voltaje al momento de girar el eje manualmente. Si al girar el eje no se mide ningún voltaje con el multímetro, el motor no es de imanes permanentes. También, se debe tomar en cuenta que el diámetro del motor utilizado en este diseño es de 10 cm, por lo que los elementos de fijación están diseñados con base a esa dimensión.
- La chumacera seleccionada es la KML modelo F208, la cual es posible obtenerla tanto nueva como en recicladoras industriales. Sin embargo, se puede utilizar otra chumacera equivalente, es decir que tenga el mismo diámetro de 1 pulgada dentro de la camisa de la chumacera y que soporte las mismas cargas.
- Los componentes electrónicos se pueden conseguir en electrónicas, pero puede ser complicados obtenerlos. Por lo que, se recomiendan las siguientes electrónicas en las que el autor de este diseño obtuvo dichos componentes. Los módulos reguladores de carga RT9266, MT3608, LM2596, el voltímetro, indicador de carga y el diodo 6A10 fueron obtenidos de la electrónica “La Electrónica”. La batería sellada de ácido-plomo de 12 V y 7Ah fue obtenida de la tienda “Steren”. Por último, el módulo regulador de carga de baterías XH-M603 fue obtenido de la electrónica “Electrónica R & CH”.

3. LISTADO DE HERRAMIENTAS Y EQUIPOS

A continuación, se detalla el listado de herramientas necesarias para los distintos procesos de la fabricación de la turbina.

Herramientas de corte

- Cortadora o pulidora eléctrica
 - Disco de corte fino para metal
 - Disco para pulir metal
- Segueta
 - Sierra de corte para metal
- Navaja o cuchillo

Herramientas de perforación

- Barreno eléctrico
 - Broca para metal de 6 mm
 - Broca para metal de 8 mm
 - Broca para metal de 7/16 “
 - Broca para metal de 5/8 “

Herramientas mecánicas

- Martillo
- Punzón
- Vice Grip
- Prensas “C” o sargentos
- Prensa de banco
- Limatón
- Desarmadores
- Llaves inglesas
- Llave inglesa ajustable
- Alicata
- Llaves Allen

Equipo para soldadura metálica

- Soldadora de arco eléctrico
 - Electrodo E6013

Equipo para soldadura eléctrica

- Cautín
 - Estaño

Herramientas para aplicaciones eléctricas

- Cortador de cable
- Cinta de aislar

Equipos de medición y para marcar

- Cinta métrica
- Escuadra
- Reglas
- Vernier
- Masking tape
- Lápiz, lapicero o marcador
- Compás
- Transportador

3.1 Procesos generales

Proceso de marcar los materiales

Este proceso consiste en marcar el material para su posterior corte o perforación. Para esto se utiliza el masking tape y los equipos de medición necesarios para hacer las marcas que indican las líneas de corte o los puntos donde se realizarán los agujeros de la pieza a fabricar. Las marcas se realizarán en base a las dimensiones presentadas para cada pieza.

Proceso de corte de materiales

En este proceso de fabricación se cortarán dos tipos de materiales, que son metales y plásticos. Por lo que se puede utilizar tanto la cortadora eléctrica como la segueta de mano para realizar los cortes. Esto dependerá de la disponibilidad y capacidad del usuario para utilizar alguna de estas herramientas.

Proceso para marcar los agujeros sobre los materiales metálicos

Es importante marcar físicamente con punto el centro de los agujeros a perforar, esto con el fin de evitar que la broca se mueva al momento de perforar. Para esto se debe utilizar un martillo para golpear un punzón sobre el material metálico, marcando así el centro de donde será el agujero y que sirve para guía al momento de colocar la broca sobre el material.

Proceso para pintar con pintura en aerosol

Para pintar los elementos de la turbina primero se deben lijar las superficies para remover óxido o cualquier elemento externo de la superficie. Se limpia la superficie con diluyente de pintura y un trapo para quitar cualquier suciedad remanente. Después se vuelve a limpiar la superficie con un trapo con agua para quitar los residuos del diluyente, de lo contrario la pintura no se va a adherir. Seguir las instrucciones de uso que indica la lata de pintura en aerosol, que es agitar adecuadamente la lata antes de pintar. Para pintar la superficie se deben hacer trazos continuos a una distancia de 15 cm de la superficie. Al terminar una capa se debe dejar secar por 15 minutos. Según la pintura y el componente a pintar puede ser necesarias más de una capa de pintura.

4. FABRICACIÓN DE LA TURBINA EÓLICA

A continuación, se detallan los pasos para la fabricación de las piezas para la turbina eólica. Para cada pieza se detalla el material, componentes, herramientas y equipos necesarios para su fabricación.

4.1 Fabricación de las aspas

Materiales	Cantidad
Tubo PVC de 3" de diámetro y 1 m de largo.	1

Herramientas
<ul style="list-style-type: none"> • Prensa de mesa • Prensa "C" • Masking tape • Lápiz, lapicero o marcador • Cinta métrica • Reglas • Compas • Transportador • Pulidora eléctrica con disco de corte fino o segueta con sierra • Barreno eléctrico • Broca de 6 mm • Limatón o lija

Dimensiones

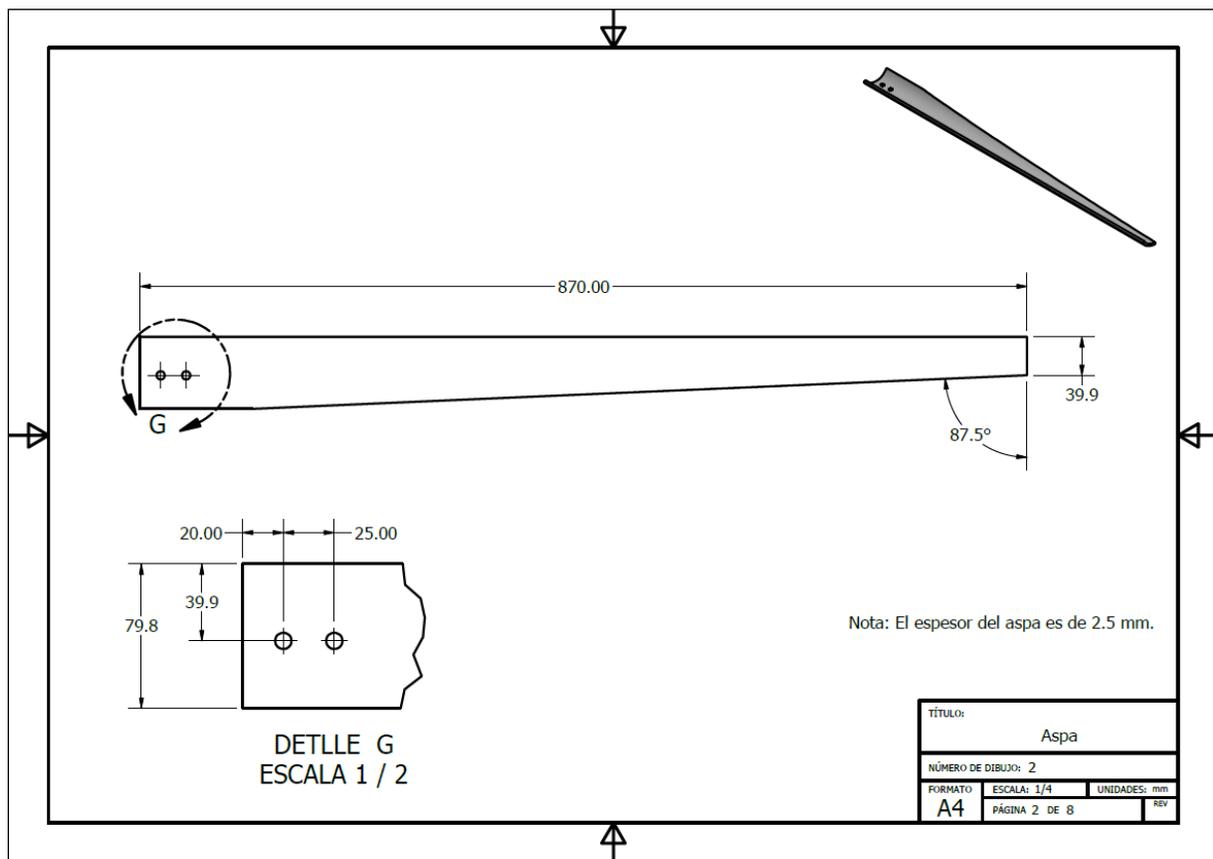


Figura 1: Dimensiones del aspa.

Proceso de fabricación

1. Cortar el tubo PVC a un largo total de 87 cm. Asegurarse que las superficies de ambos extremos queden rectas.
2. Marcar el tubo en 3 partes iguales a lo largo del mismo. Para esto se debe utilizar el compás o el transportador para dividir en 3 partes, con una separación de 120° el diámetro del tubo.
3. Cortar el tubo para obtener 3 partes iguales con un largo de 87 cm y ancho de 7.98 cm.
4. Las dimensiones del plano están presentadas sobre la parte cóncava de las 3 partes iguales cortadas del tubo. Se marca y se hace el corte diagonal sobre las 3 partes iguales del tubo y darle la forma de las aspas.
5. Se marcan y perforan los dos agujeros sobre cada una de las 3 aspas.
6. Se lijan los excesos y rebabas de las esquinas de las aspas.



Figura 2: Aspas marcadas y cortadas.

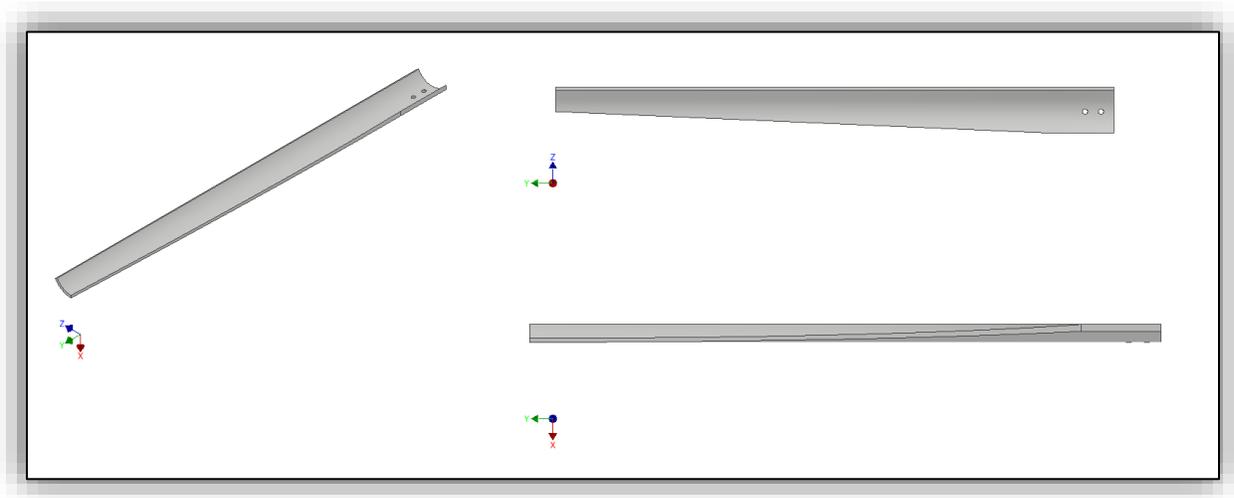


Figura 3: Forma final de las aspas.

4.2 Fabricación del rotor

Materiales	Cantidad
Aspas del ventilador para radiador	1

Herramientas
<ul style="list-style-type: none"> • Prensa de mesa • Prensa “C” • Masking tape • Lápiz, lapicero o marcador • Cinta métrica • Regla y transportador • Pulidora eléctrica con disco de corte fino o segueta con sierra • Barreno eléctrico • Broca de 6 mm • Limatón o lija

Dimensiones

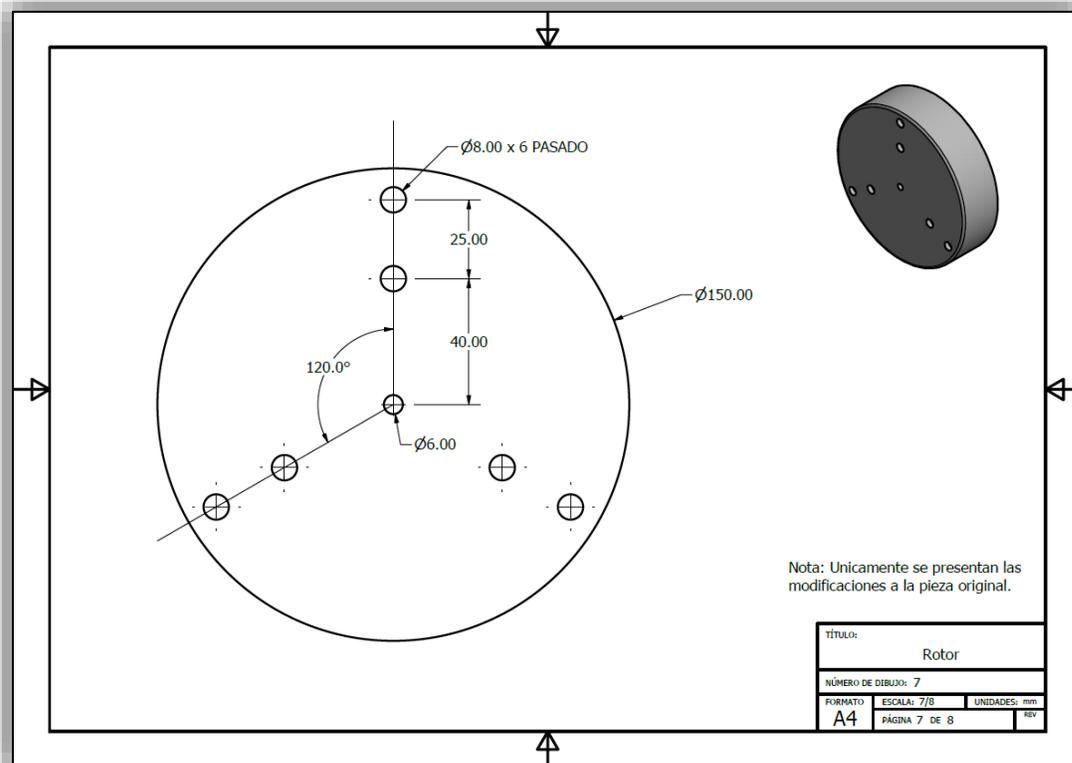


Figura 4: Dimensiones del rotor.

Proceso de fabricación

1. Cortar las aspas originales del ventilador para radiador de carro, dejando únicamente el centro que será utilizado como el rotor.
2. Limar los excesos de las aspas cortadas hasta obtener un disco perfectamente circular.
3. Marcar los agujeros para ensamblar las aspas según las dimensiones de la figura 4. Es importante que los juegos de agujeros queden exactamente a 120° para ensamblar las 3 aspas.
4. Perforar los agujeros marcados con el barreno de mano y la broca de 6 mm.



Figura 5:Aspas originales del ventilador para radiador de carro.



Figura 6: Rotor con el primer juego de agujeros perforados.

4.3 Fabricación de la placa base para el motor

Materiales	Cantidad
Plancha de acero estructural de 4 mm de espesor de 15 x 15 cm	1

Herramientas	
<ul style="list-style-type: none"> • Prensa de mesa • Prensa “C” • Masking tape • Lápiz, lapicero o marcador • Cinta métrica • Reglas • Escuadra • Pulidora eléctrica con disco de corte fino o segueta con sierra 	<ul style="list-style-type: none"> • Barreno eléctrico • Broca de 6 mm • Limatón o lija • Martillo • Punzón

Dimensiones

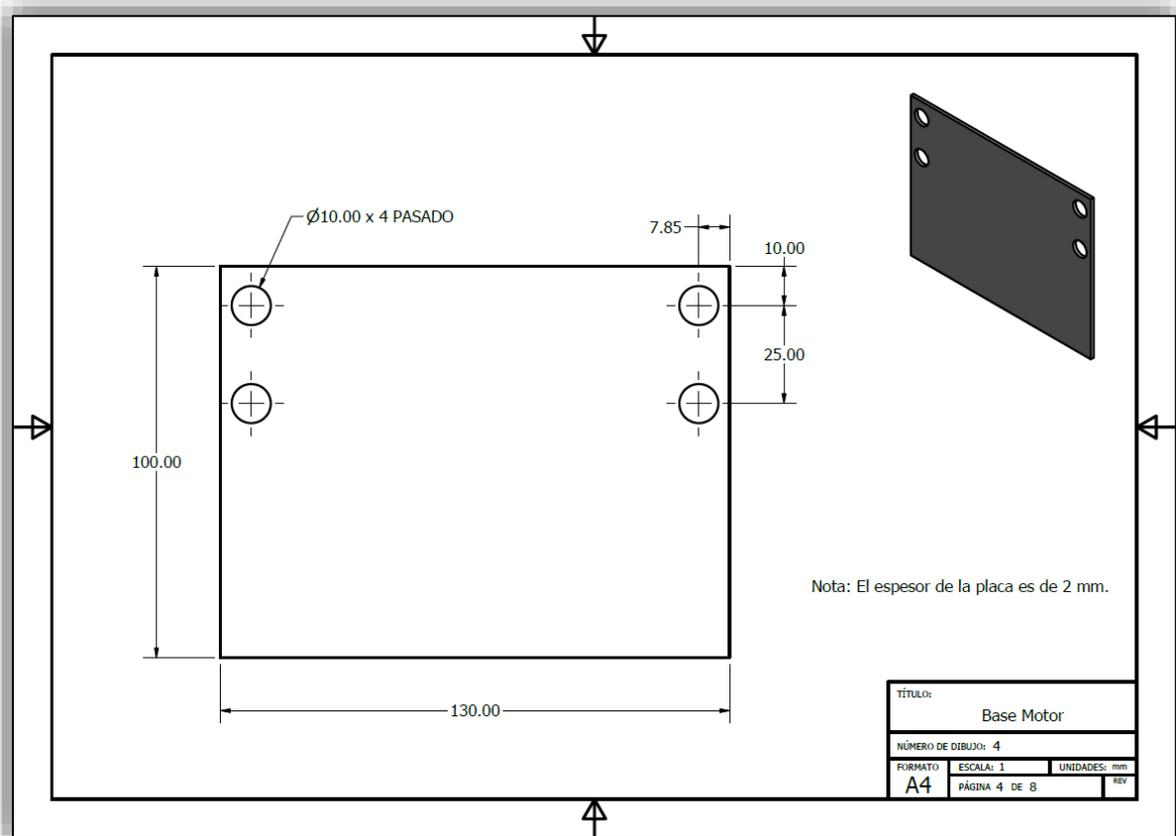


Figura 7: Dimensiones de la placa base para el motor.

Proceso de fabricación

1. Marcar las líneas de las dimensiones generales de la placa base utilizando como guía la Figura 7.
2. Una vez marcadas las líneas, cortar con la pulidora eléctrica la plancha para obtener la placa base.
3. Marcar los agujeros sobre la placa base con punzón y perforarlos utilizando el barreno eléctrico con broca de 10 mm.
4. Limar los excesos y rebabas de los cortes de la placa para evitar cortes al momento de sujetarlo con las manos y darle un buen acabado.

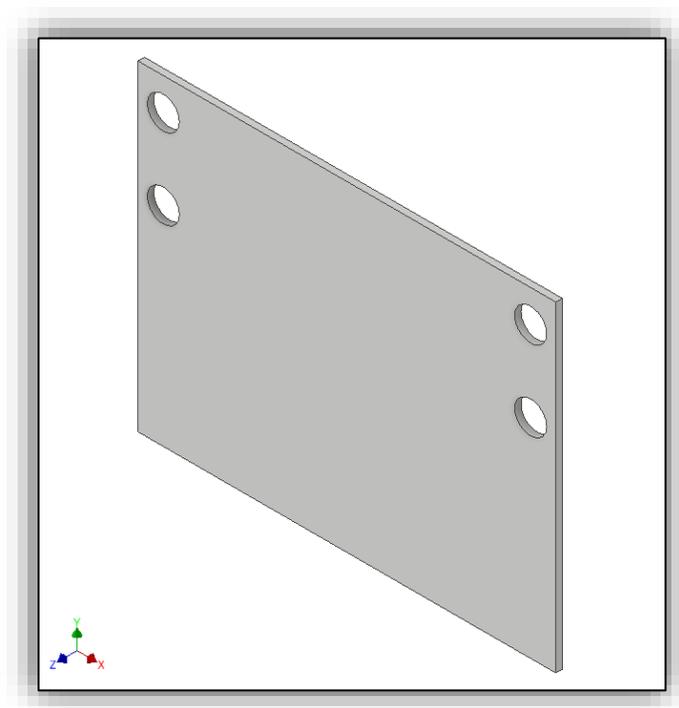


Figura 8: Placa base para el motor.

4.4 Fabricación de la placa base para la chumacera

Materiales	Cantidad
Plancha de acero estructural de 4 mm de espesor de 15 x 15 cm	1

Herramientas	
<ul style="list-style-type: none"> • Prensa de mesa • Prensa “C” • Masking tape • Lápiz, lapicero o marcador • Cinta métrica • Reglas • Escuadra • Pulidora eléctrica con disco de corte fino o segueta con sierra 	<ul style="list-style-type: none"> • Barreno eléctrico • Broca de 6 mm • Limatón o lija • Martillo • Punzón

Dimensiones

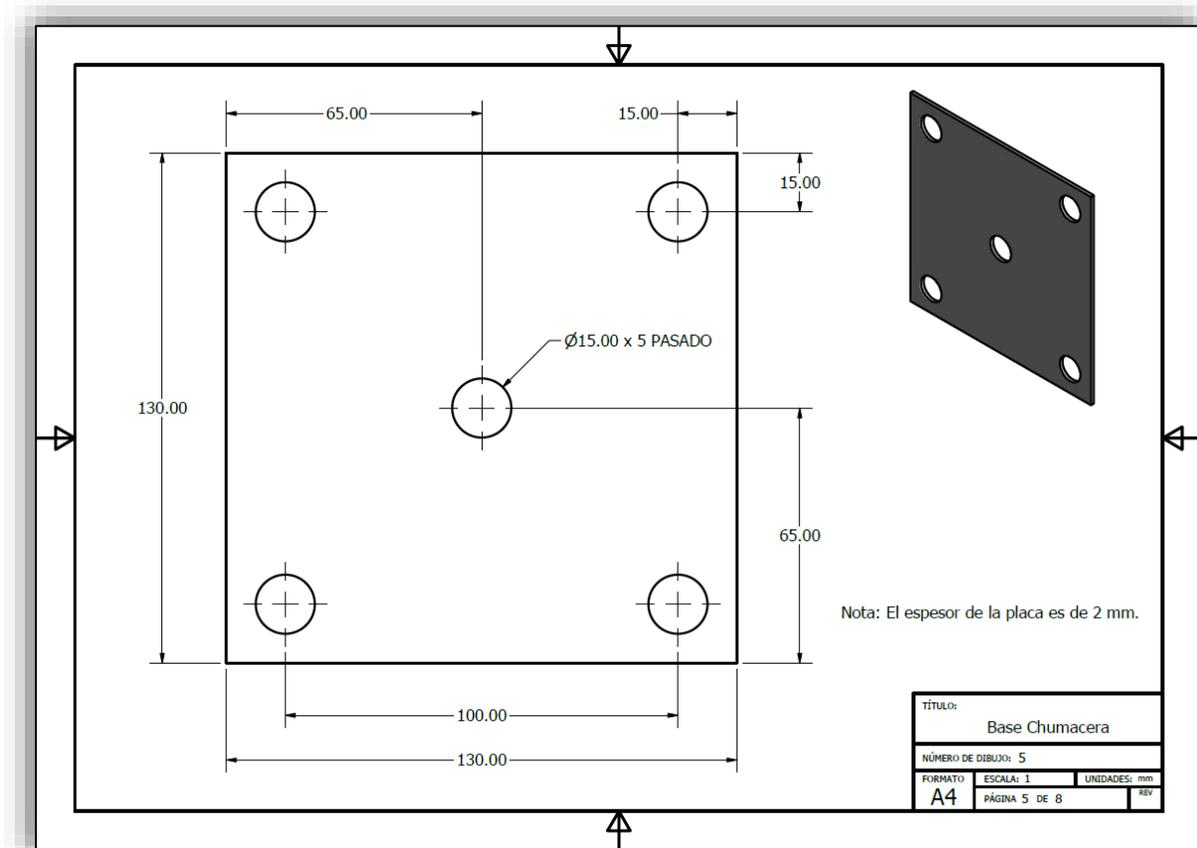


Figura 9: Dimensiones de la placa base de la chumacera.

Proceso de fabricación

5. Marcar las líneas de las dimensiones generales de la placa base utilizando como guía la figura 9.
6. Una vez marcadas las líneas, cortar con la pulidora eléctrica la plancha para obtener la placa base.
7. Marcar los agujeros sobre la placa base con punzón y perforarlos utilizando el barreno eléctrico con broca de 10 mm para el agujero central y 5/8" para los agujeros de las esquinas.
8. Limar los excesos y rebabas de los cortes de la placa para evitar cortes al momento de sujetarlo con las manos y darle un buen acabado.



Figura 10: Placa base de la chumacera marcada con tape y los centros de los agujeros marcados con punzón y martillo.



Figura 11: Placa base de la chumacera.

4.5 Fabricación de la aleta

Materiales	Cantidad
Plancha de acero estructural de 2 mm de espesor de 50 x 50 cm	1

Herramientas	
<ul style="list-style-type: none"> • Prensa de mesa • Prensa “C” • Masking tape • Lápiz, lapicero o marcador • Cinta métrica • Reglas • Escuadra • Pulidora eléctrica con disco de corte fino o segueta con sierra 	<ul style="list-style-type: none"> • Barreno eléctrico • Broca de 6 mm • Limatón o lija • Martillo • Punzón

Dimensiones

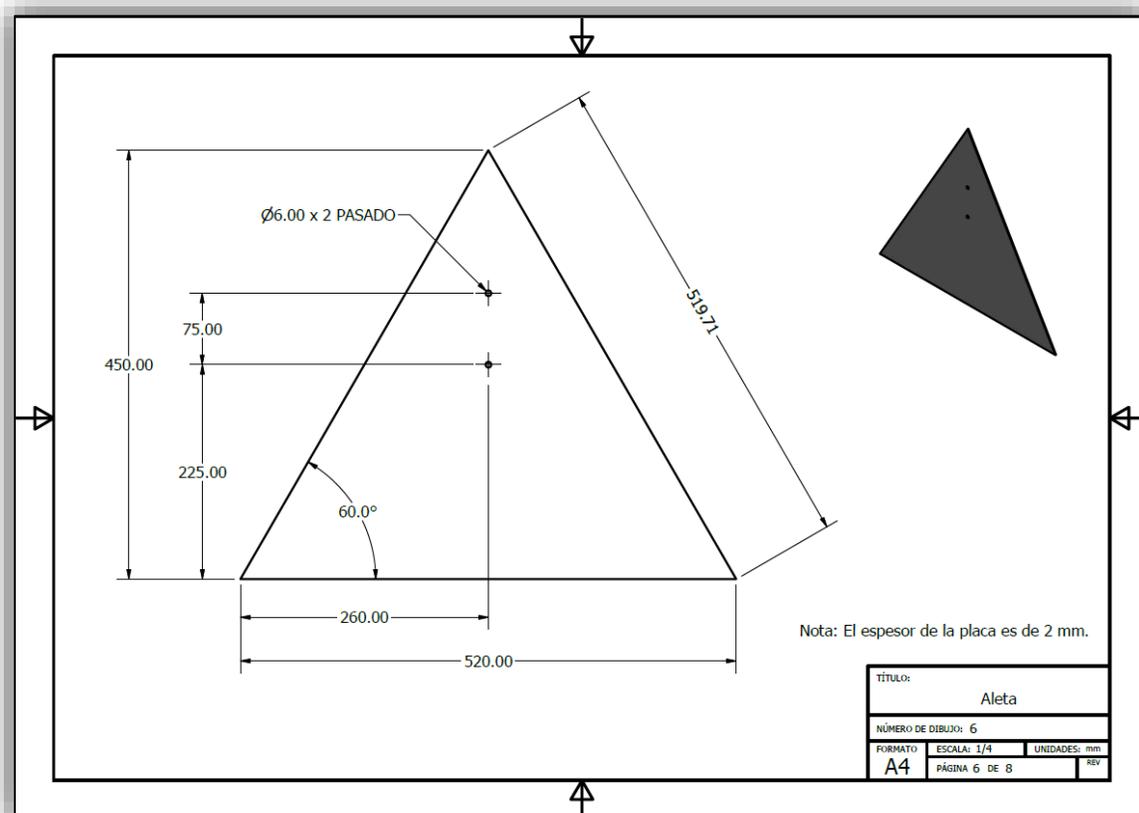


Figura 12: Dimensiones de la aleta.

Proceso de fabricación

1. Marcar las líneas de las dimensiones generales de la placa base utilizando como guía la figura 12.
2. Una vez marcadas las líneas, cortar con la pulidora eléctrica la plancha para obtener la placa base.
3. Marcar los agujeros sobre la placa base con punzón y perforarlos utilizando el barreno eléctrico con broca de 8 mm.
4. Limar los excesos y rebabas de los cortes de la placa para evitar cortes al momento de sujetarlo con las manos y darle un buen acabado.
5. Pintar la aleta con pintura en aerosol para exteriores.



Figura 13: Aleta finalmente fabricada y pintada.

4.6 Fabricación de la base estructural

Materiales	Cantidad
Tubo cuadrado de acero estructural de 1" y 2 m de largo	1

Herramientas	
<ul style="list-style-type: none"> • Prensa de mesa • Prensa "C" • Masking tape • Lápiz, lapicero o marcador • Cinta métrica • Reglas • Escuadra • Pulidora eléctrica con disco de corte fino o segueta con sierra 	<ul style="list-style-type: none"> • Barreno eléctrico • Broca de 6 mm • Limatón o lija • Martillo • Punzón

Dimensiones

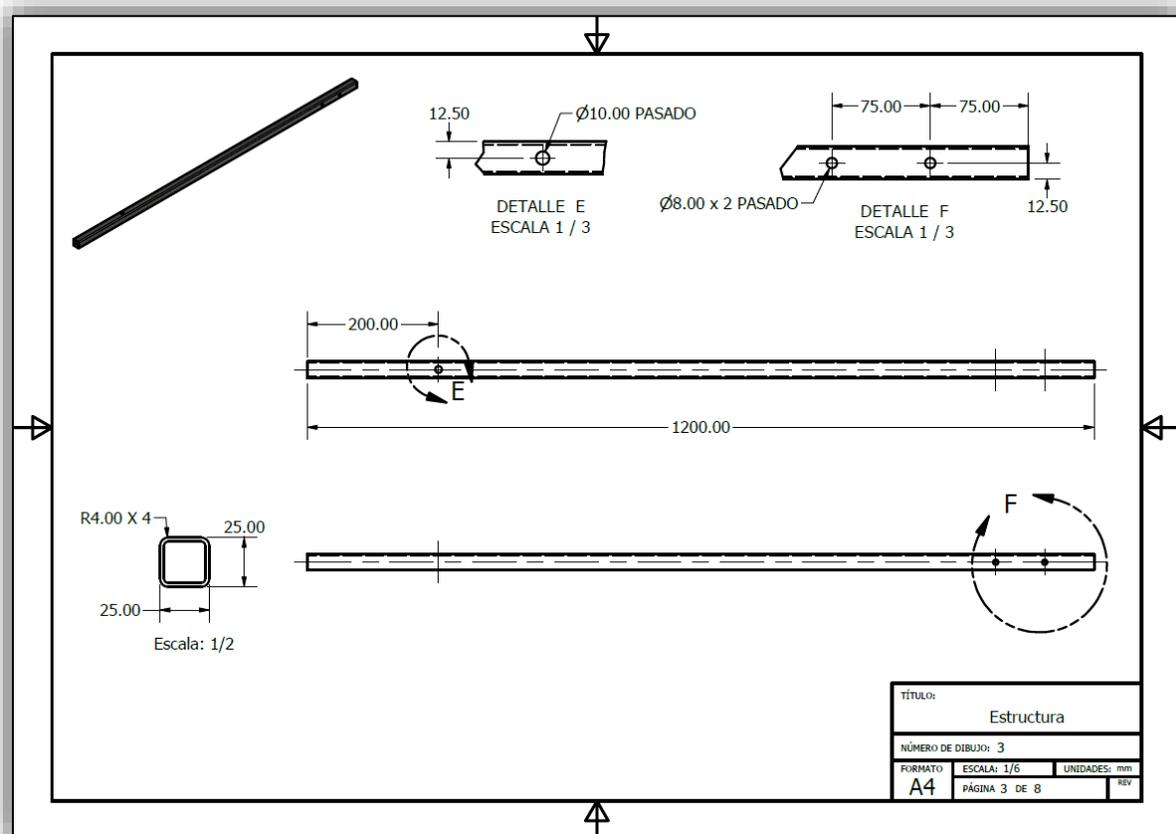


Figura 14: Dimensiones de la base estructural.

Proceso de fabricación

1. Marcar el tubo cuadrado estructural a un largo de 120 cm y cortarlo con la pulidora eléctrica.
2. Marcar los agujeros sobre la placa base con punzón y perforarlos utilizando el barreno eléctrico con broca de 8 mm para los dos agujeros de la aleta y la broca de 10 mm para el agujero donde pasan los cables eléctricos. Utilizar la Figura 14 como guía para realizar los agujeros.
3. Limar los excesos y rebabas de los cortes de la placa para evitar cortes al momento de sujetarlo con las manos y darle un buen acabado.

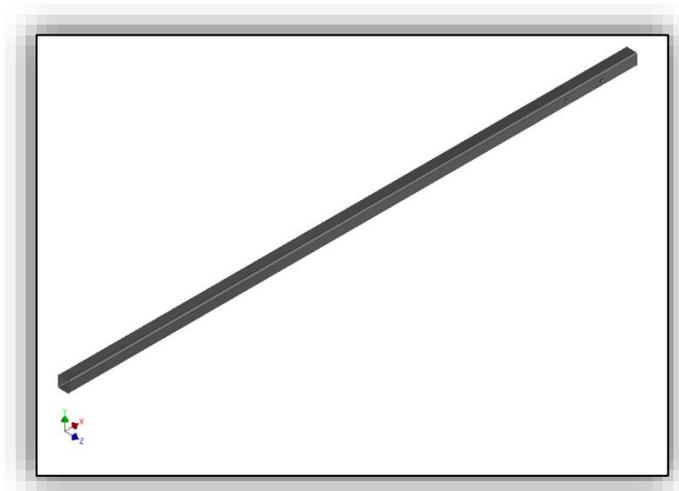


Figura 15: Vista isométrica de la base estructural.



Figura 16: Vista frontal y superior de la base estructural.

4.7 Fabricación de la estructura de soporte

Materiales	Cantidad
Base estructural	1
Placa base para el motor	1
Placa base para la chumacera	1

Herramientas	
<ul style="list-style-type: none"> • Prensa de mesa • Prensa “C” • Masking tape • Lápiz, lapicero o marcador • Cinta métrica • Reglas • Escuadra 	<ul style="list-style-type: none"> • Soldadora de arco eléctrico <ul style="list-style-type: none"> ○ Electrodo E6013 • Vice grip • Equipo de protección para soldar • Martillo

Dimensiones

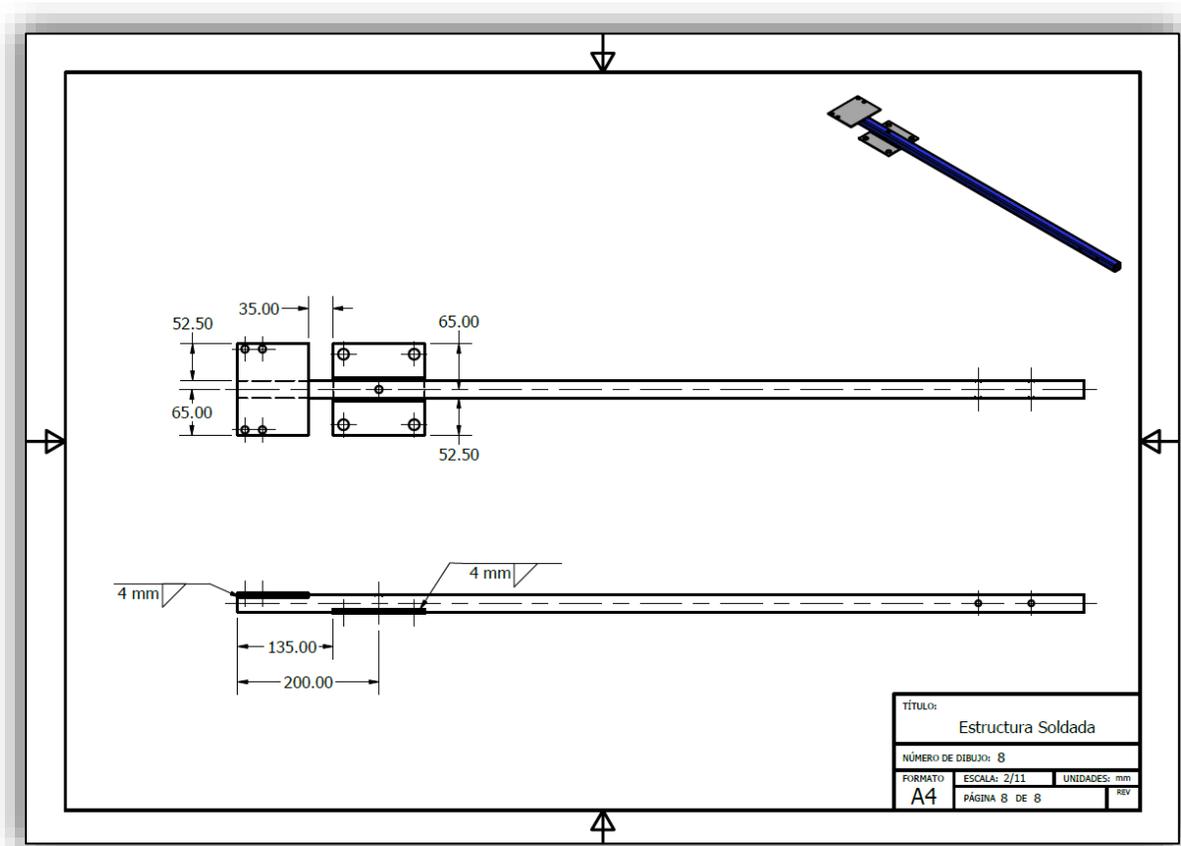


Figura 17: Dimensiones de la estructura de soporte.

Proceso de fabricación

1. Medir y fijar la placa base de la chumacera y la placa base del motor según lo indica la Figura 17. Para fijar las placas utilizar vice grips o prensas en “C”, sin estorbar el área donde se realizará el cordón de soldadura.
2. Con las placas fijadas en su posición, soldar ambas placas a la base estructural utilizando la soldadora de arco eléctrico y electrodo E6013. Es importante tener cuidado el momento de soldar las placas, ya que, al tener un espesor bajo, se pueden deformar al exponerse al calor del arco eléctrico de la soldadora.
3. Limar los cordones de soldadura del recubrimiento y pulirlos de ser necesario.
4. Pintar la base estructural con pintura en aerosol para exteriores.



Figura 18: Estructura de soporte soldada y pintada.

4.7 Fabricación de la torre

Materiales	Cantidad
Tubo de acero al carbón de 1" de diámetro y 4 m de largo.	1

Herramientas
<ul style="list-style-type: none">• Masking tape• Lápiz, lapicero o marcador• Cinta métrica• Reglas• Barreno eléctrico• Broca de 10 mm• Limatón o lija

Proceso de fabricación

1. En un extremo del tubo perforar a 30 cm un agujero de 10 mm de diámetro para permitir el paso de los cables eléctricos que van al generador.
2. Pintar la torre con pintura en aerosol para exteriores.

4.9 Fabricación del circuito de almacenamiento de la energía generada

Materiales	Cantidad
Batería de ácido plomo sellada de 12V y 7Ah	1
Módulo elevador de voltaje MT3608	1
Módulo elevador de voltaje RT9266	1
Módulo regulador de voltaje LM2595	1
Voltímetro digital	1
Indicador de carga para baterías de ácido plomo de 12 V	1
Diodo rectificador 6A10	1
Cable calibre 16 AWG rojo (5 a 10 metros)	5
Cable calibre 16 AWG negro (5 a 10 metros)	5
Terminal macho para cable calibre 16-14	5
Terminal hembra para cable calibre 16-14	5
Módulo controlador de carga de batería XH-M603	1
Cable con lagartos en cada extremo	4
Foco PROTOL LED de 3 W y 12 V	1
Socket baquelita con perilla	1
Cable TSJ calibre 16 (3 a 5 metros)	1
Caja de plástico transparente con tapadera	1
Tape doble cara	1

Herramientas
<ul style="list-style-type: none"> • Navaja o cuchillo • Pelador de cables • Desarmadores • Alicata de electricista • Cinta de aislar • Reglas • Escuadra • Cautín <ul style="list-style-type: none"> ○ Estaño

Circuito de almacenamiento de la energía generada

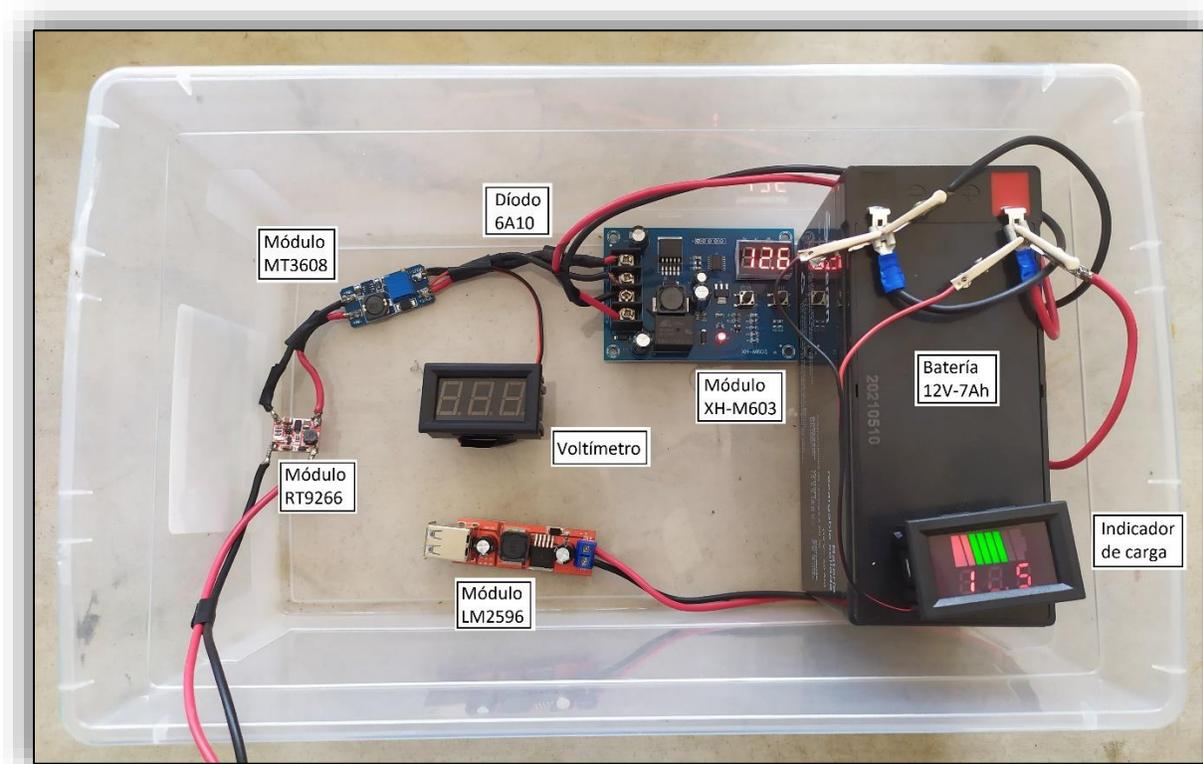


Figura 19: Circuito de almacenamiento de la energía generada con sus partes indicadas.

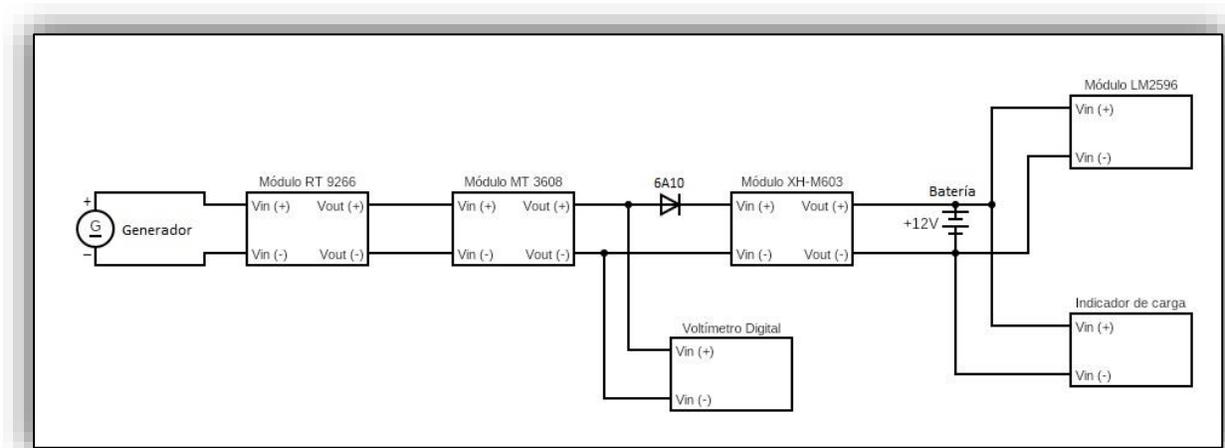


Figura 20: Diagrama del circuito de almacenamiento de la energía generada.

Código de color

- Para el voltaje positivo (+) se utilizará el cable calibre 16 AWG rojo.
- Para el voltaje negativo (-) se utilizará el cable calibre 16 AWG negro.

Proceso de fabricación

1. Medir y cortar un cable rojo y uno negro de un largo de aproximadamente 5 a 6 metros. Pelar los extremos de ambos cables y colocarles en un extremo terminales hembras y el otro extremo con terminales macho. Unir ambos cables con cinta de asilar colocando cinta cada 30 cm. Estos son los cables que salen del generador de la turbina y entraran al circuito de almacenamiento de carga.
2. Cortar un cable rojo y uno negro de aproximadamente 20 cm. En un extremo de los cables colocar terminales macho y el otro extremo dejar expuesto el cobre. Unir paralelamente ambos cables con cinta de aislar, dejando en el mismo lado los extremos de los cables que tienen las terminales macho. Soldar el extremo pelado del cable rojo al pin de voltaje de entrada positivo (in +) del módulo RT9266. Después, soldar el extremo pelado del cable negro al pin de voltaje de entrada negativo (in -) del módulo RT9266.
3. Cortar un cable rojo y uno negro de aproximadamente 5 cm. Pelar ambos extremos de los cables y unirlos paralelamente con cinta de aislar. Soldar un extremo pelado del cable rojo al pin de voltaje de salida positiva (out +) del módulo RT9266. Después, soldar el extremo pelado del cable negro del mismo lado al pin de voltaje de salida negativa (out -) del módulo RT9266. Como siguiente paso, soldar el otro extremo pelado del cable rojo al pin de voltaje de entrada positiva (Vin+) del módulo MT3608. Por último, soldar el otro extremo pelado del cable negro al pin de voltaje de entrada negativa (Vin-) del módulo MT3608.
4. Soldar el cable rojo del voltímetro al pin de voltaje de salida positiva (Vout +) del módulo MT3608. Después, soldar el cable negro del voltímetro al pin de voltaje de salida negativa (Vout -) del módulo MT3608.
5. Cortar un cable rojo de aproximadamente 5 cm y partirlo a la mitad. Pelar los extremos de ambas mitades del cable rojo y soldar el diodo 6A10 para unir ambas mitades del cable rojo. Cortar un cable negro del mismo largo del cable rojo con el diodo soldado. Pelar ambos extremos de los cables y unirlos paralelamente con cinta de aislar. Soldar un extremo pelado del cable rojo al pin de voltaje de salida positiva (Vout +) del módulo MT3608. Después, soldar el extremo pelado del cable negro del mismo lado al pin de voltaje de salida negativa (Vout -) del módulo MT3608. Como siguiente paso, atornillar el otro extremo pelado del cable rojo al pin de voltaje de entrada positiva (in+) del módulo XH-M603. Por último, atornillar el otro extremo pelado del cable negro al pin de voltaje de entrada negativa (in-) del módulo XH-M603.
6. Cortar un cable rojo y uno negro de aproximadamente 10 cm. En un extremo de los cables colocar terminales hembra y el otro extremo dejar expuesto el cobre. Unir paralelamente ambos cables con cinta de aislar, dejando en el mismo lado los extremos de los cables que tienen las terminales hembras. Atornillar el extremo pelado del cable rojo al pin de voltaje positivo que va a la batería (BAT +) del módulo XH-M603.

Después, atornillar el extremo pelado del cable negro al pin de voltaje de negativo que va a la batería (BAT-) del módulo XH-M603.

7. Insertar la terminal hembra del cable rojo que sale del pin de voltaje positivo que va a la batería (BAT +) del módulo XH-M603 en la terminal de voltaje positivo (+) de la batería de ácido-plomo de 12V-7Ah. Después, insertar la terminal hembra del cable negro que sale del pin de voltaje negativo que va a la batería (BAT -) del módulo XH-M603 en la terminal de voltaje negativo (-) de la batería de ácido-plomo de 12V-7Ah.
8. En los otros extremos de los cables rojo y negro del indicador de carga de baterías, acoplar lagartos para poder conectarlos a las terminales de la batería de ácido-plomo de 12V-7Ah cuando se desee conocer el nivel de carga de esta.
9. Cortar un cable rojo y uno negro de 15 cm. Pelar los externos de ambos cables y unirlos con cinta de aislar. Atornillar el cable rojo al pin de voltaje de entrada positivo (IN+) del módulo LM2596. Después, atornillar el cable negro al pin de voltaje de entrada negativo (IN-) del módulo LM2596. En los otros extremos pelados del cable, acoplar lagartos para poder conectarlos a las terminales de la batería de ácido-plomo de 12V-7Ah cuando se desee cargar los celulares.
10. Pelar ambos extremos del cable Cable TSJ calibre 16. Acoplar el socket de baquelita en uno de los extremos del cable, atornillando el cable blanco a la base inferior del socket y el cable negro a la base lateral del socket. Enroscar el foco LED de 3 W en el socket de baquelita. En los otros extremos pelados del cable, acoplar lagartos para poder conectarlos a las terminales de la batería de ácido-plomo de 12V-7Ah cuando se desee encender el foco LED.
11. Colocar el circuito de carga dentro de la caja transparente de plástico para protegerlo de condiciones externas. Se deben fijar los componentes al fono de la caja por medio de tape de doble cara, especialmente la batería de ácido-plomo, ya que es muy pesada.
12. Para conectar el circuito de almacenamiento de carga, se deben acoplar las terminales hembras del cable que sale de la turbina, con las terminales macho del cableado que entra el circuito.
13. Se debe verificar que todos los componentes estén bien soldados, acoplados y aislados.
14. Regular el voltaje de salida del módulo MT3608 por medio de su potenciómetro. En el voltímetro se despliega el voltaje de salida, para poder configurar los 13.8 V necesarios para cargar la batería.
15. Al módulo XH-M603 se le debe configurar el voltaje máximo de la batería cuando está cargada completamente que es de 13.8 V. También el voltaje mínimo para que empiece a cargar la batería que puede ser de 11.9 hasta 12.5 V.

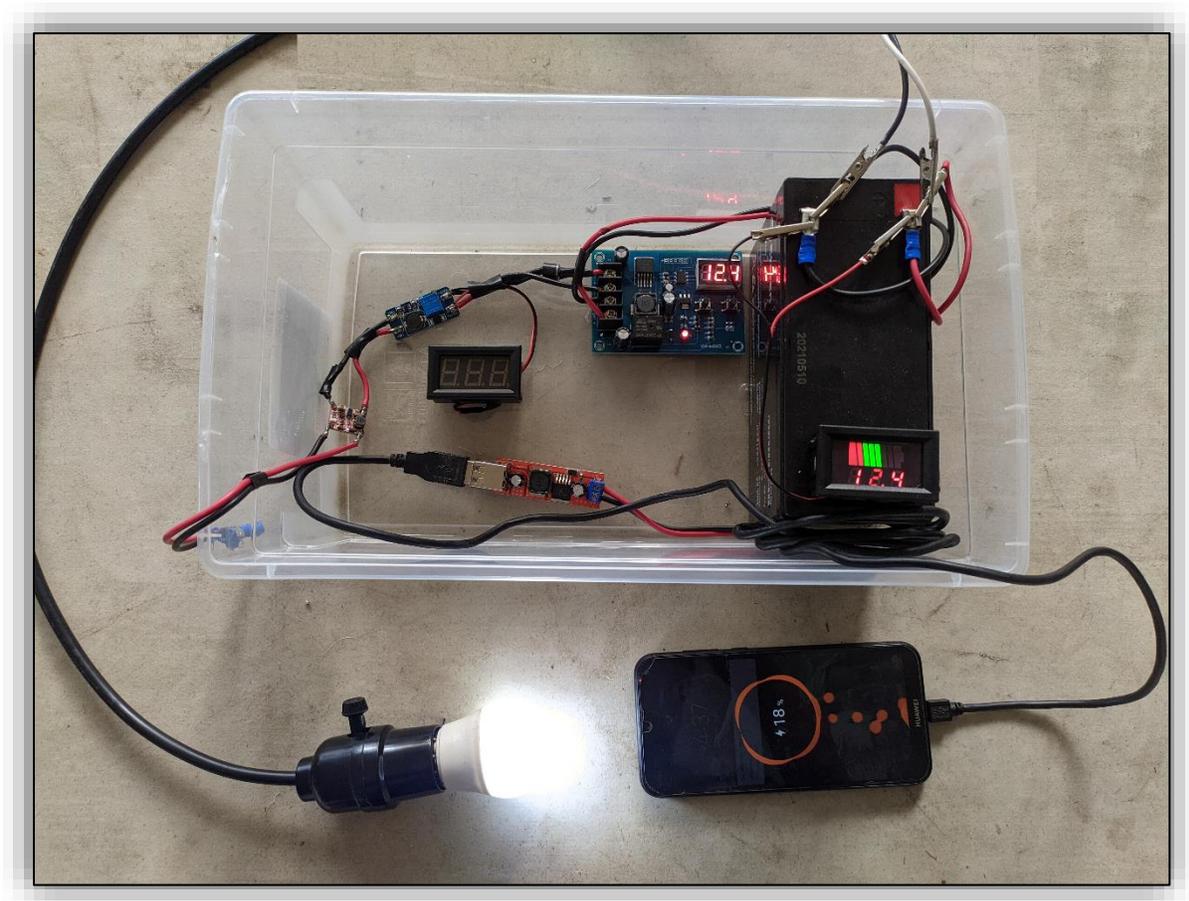


Figura 21: Circuito de almacenamiento de carga con el foco LED conectado y el módulo LM2596 para cargar el celular.

5. ENSAMBLE DE LA TURBINA EÓLICA

A continuación, se detallan los pasos para ensamblar los diferentes componentes de la turbina. El ensamble final se compone de los siguientes subensambles:

- Subensamble del rotor
- Subensamble del cuerpo
- Subensamble de la torre

5.1 Subensamble del rotor

Materiales	Cantidad
Aspas de PVC	3
Rotor	1
Tornillo hexagonal rosca ordinaria de zinc M6 X 25	6
Tuerca de acero hexagonal rosca ordinaria de zinc M6	6
Roldana de acero zinc 1/4	20

Herramientas
<ul style="list-style-type: none"> • Llaves inglesas • Llave inglesa ajustable • Alicates

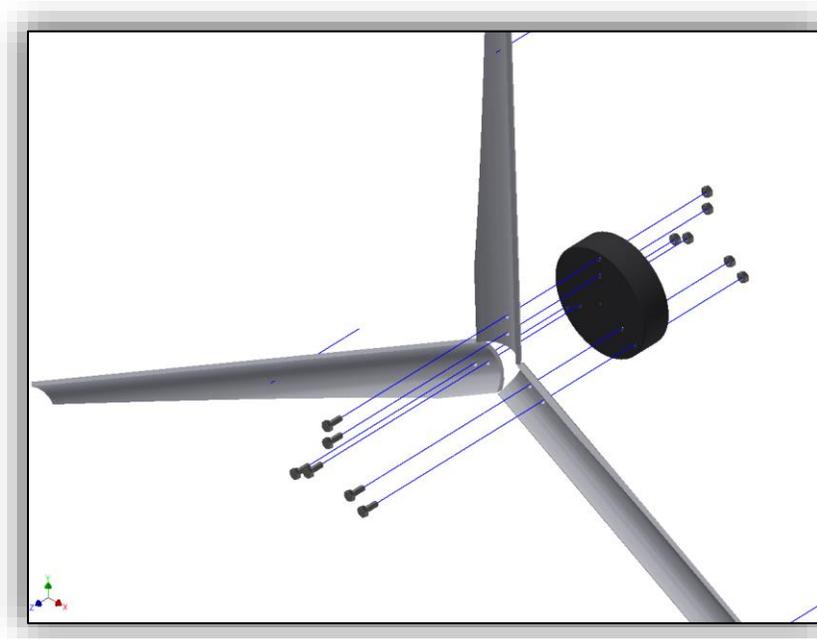


Figura 22: Explosión de los componentes del subensamble del rotor.

Proceso de ensamble

1. Alinear las aspas de PVC con los agujeros correspondientes del rotor.
2. Colocar una roldana dentro del perno hexagonal M6 x 25 e insertarlos dentro de los agujeros del aspa y del rotor.
3. Enroscar las tuercas en los pernos y apretarla utilizando las llaves inglesas.



Figura 23: Subensamble del rotor.

5.2 Subensamble del cuerpo

Materiales	Cantidad
Estructura de soporte	1
Motor	1
Aleta	1
Abrazadera de doble oreja de 4"	2
Tornillo hexagonal rosca ordinaria de zinc de 7/16 X 1"	4
Tuerca de acero hexagonal rosca ordinaria de zinc 7/16"	4
Roldana de acero zinc 7/16"	4
Tornillo hexagonal rosca ordinaria de zinc M8 X 40	2
Tuerca de acero hexagonal rosca ordinaria de zinc M8	2
Roldana de acero zinc 3/8"	2
Washa de presión de acero zinc 3/8"	2

Herramientas
<ul style="list-style-type: none"> • Llaves inglesas • Llave inglesa ajustable • Alicates

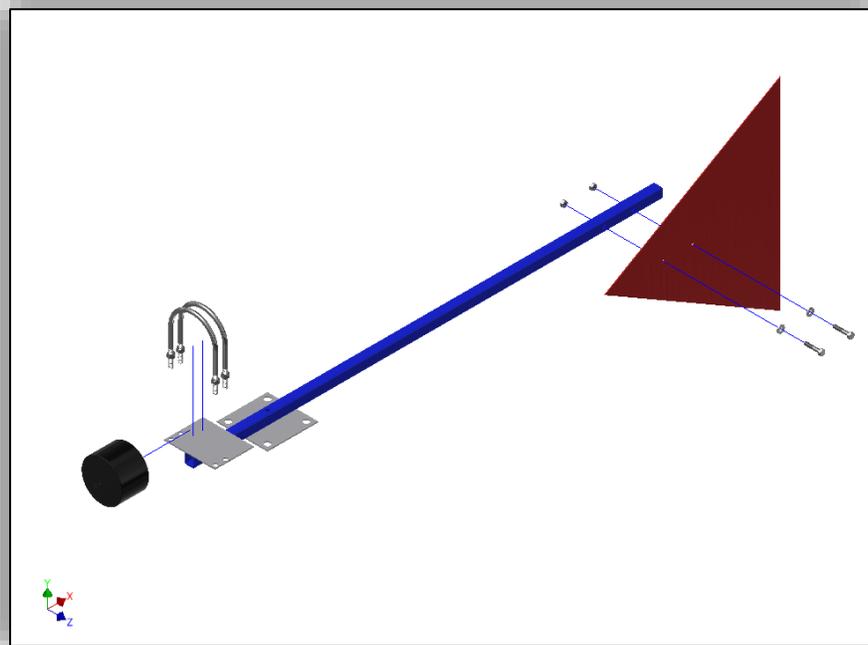


Figura 24: Explosión de los componentes del subensamble del cuerpo.

Proceso de ensamble

1. Acoplar el motor
 - 1.1. Alinear el motor a la placa base para el motor utilizando las abrazaderas de doble orejas o de tipo “U”.
 - 1.2. Se coloca dentro de los pernos hexagonales de 7/16” una roldana plana y se insertan en los agujeros de las abrazaderas y de la placa base.
 - 1.3. Colocar una washita de presión dentro del perno hexagonal 7/16”.
 - 1.4. Enroscar las tuercas en los pernos de 7/16” y apretarlas utilizando las llaves inglesas.

2. Acoplar la aleta
 - 2.1 Alinear los agujeros de la aleta con los agujeros correspondientes en la estructura de soporte.
 - 2.2 Se coloca dentro de los pernos hexagonales de 5/8” una roldana plana y se insertan en los agujeros de la aleta y de la estructura de soporte.
 - 2.3 Colocar una washita de presión dentro del perno hexagonal 5/8”.
 - 2.4 Enroscar las tuercas en los pernos de 5/8” y apretarlas utilizando las llaves inglesas.



Figura 25: Subensamble del cuerpo.

5.3 Subensamble de la torre

Materiales	Cantidad
Chumacera KML modelo F208	1
Tubo de acero al carbón de 1" de diámetro y 4 m de largo.	1
Cable eléctrico rojo y negro calibre 16 AWG 5 metros con terminales	1

Herramientas
<ul style="list-style-type: none"> • Llaves inglesas • Llave inglesa ajustable • Alicata • Martillo • Llaves Allen

Proceso de ensamble

1. Insertar la punta del cable eléctrico con las terminales macho por el agujero en extremo de la torre y extraer aproximadamente 30 cm de cable por dentro del extremo del tubo.
2. Pasar los cables por adentro de la chumacera e insertar a presión la chumacera en el extremo del tubo de la torre. De ser necesario golpear la chumacera hasta que entre por completo el tubo dentro de la camisa del rodamiento.
3. Atornillar los dos castigadores de la chumacera con las llaves Allen para asegurarlo.

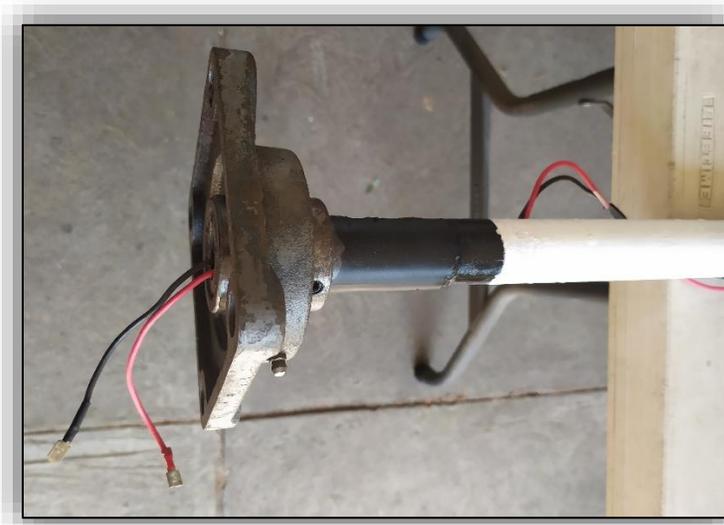


Figura 26: Subensamble de la torre.

5.4 Ensamble final de la turbina

Materiales	Cantidad
Subensamblado del rotor	1
Subensamblado del cuerpo	1
Subensamblado de la torre	1
Circuito de almacenamiento de carga	1
Tornillo hexagonal rosca ordinaria de zinc de 5/8 X 1 1/2"	4
Tuerca de acero hexagonal rosca ordinaria de zinc 5/8"	4
Washa de presión de acero zinc 5/8"	4

Herramientas
<ul style="list-style-type: none"> • Llaves inglesas • Llave inglesa ajustable • Alicates

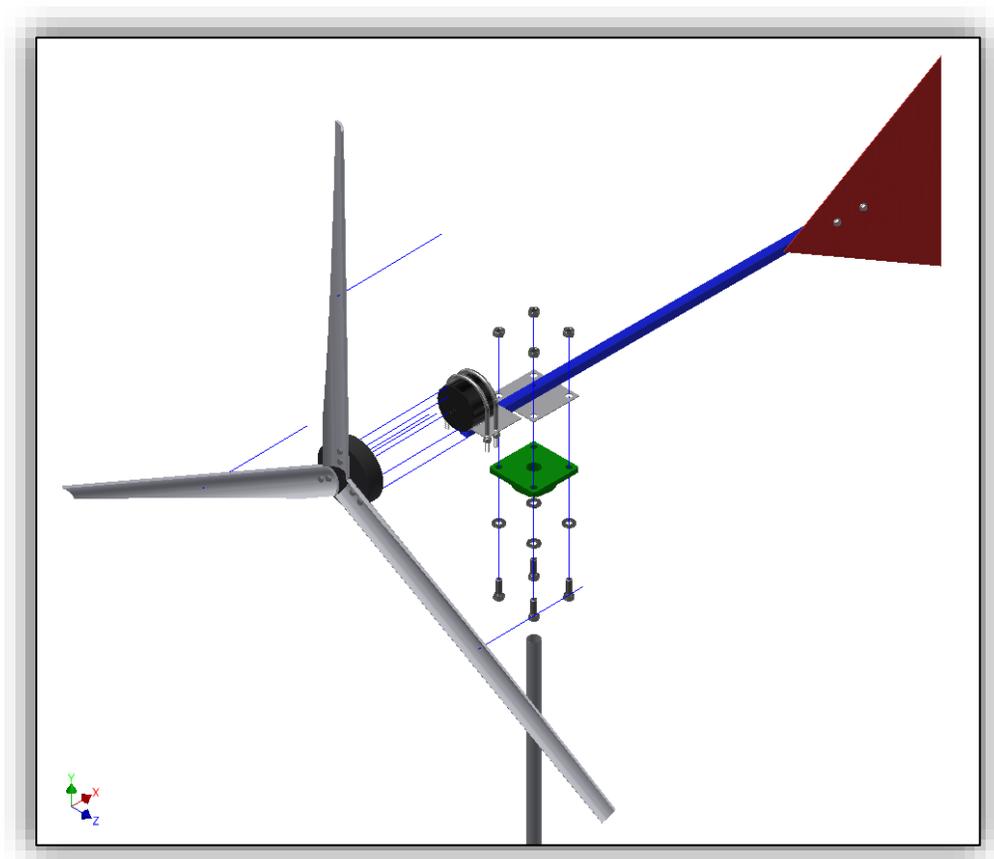


Figura 27: Explosión del ensamble final de la turbina eólica.

Proceso de ensamble

1. Ensamblar el subensamble del rotor con el subensamble de la torre por medio de insertar el eje del motor en el acople central del rotor.
2. Ensamblar el cuerpo de la turbina con el rotor a la torre por medio de los 4 pernos hexagonales que unen la base de la turbina con la base de la chumacera. Se alinea la placa base de la turbina con la base de la chumacera, se pasan los cables eléctricos por el agujero de la base de la turbina y se insertan los 4 pernos en los agujeros. En los extremos de los pernos se insertan washas de presión y se enroscan las tuercas. Por último, se aprietan las tuercas con las llaves inglesas.
3. Se conectan los cables del motor con los cables eléctricos que salen de la torre por medio de las terminales hembras y machos. Por último, se conectan las terminales del extremo inferior de los cables al circuito de almacenamiento de la carga.



Figura 28: Ensamble del subensamble del rotor con el subensamble del cuerpo de la turbina.

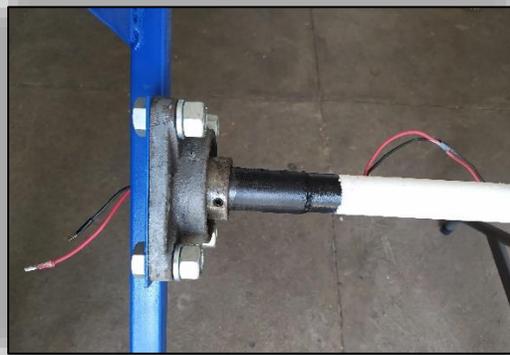


Figura 29: Ensamble de la turbina a la torre por medio de pernos. Se observa como pasan los cables por dentro de la estructura.

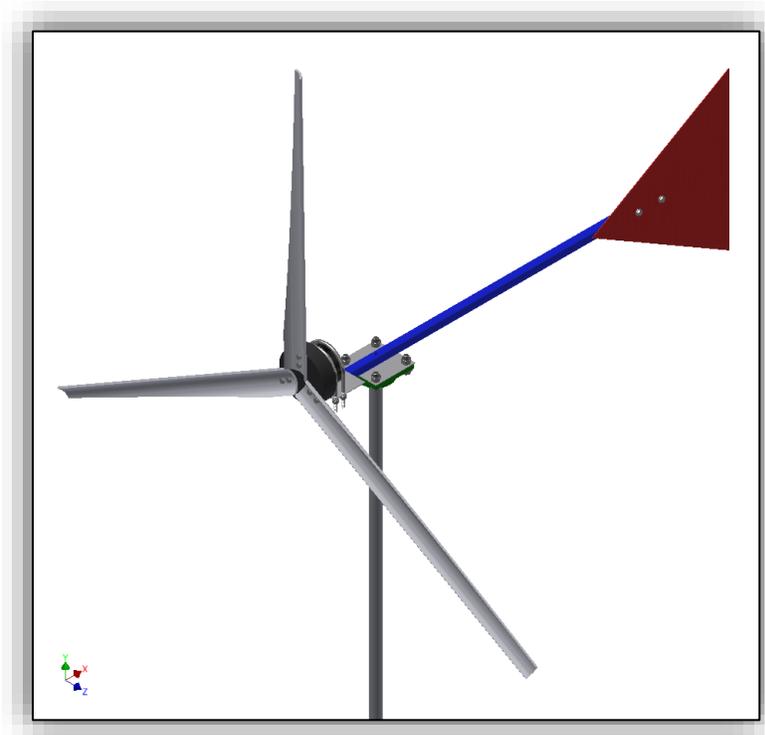
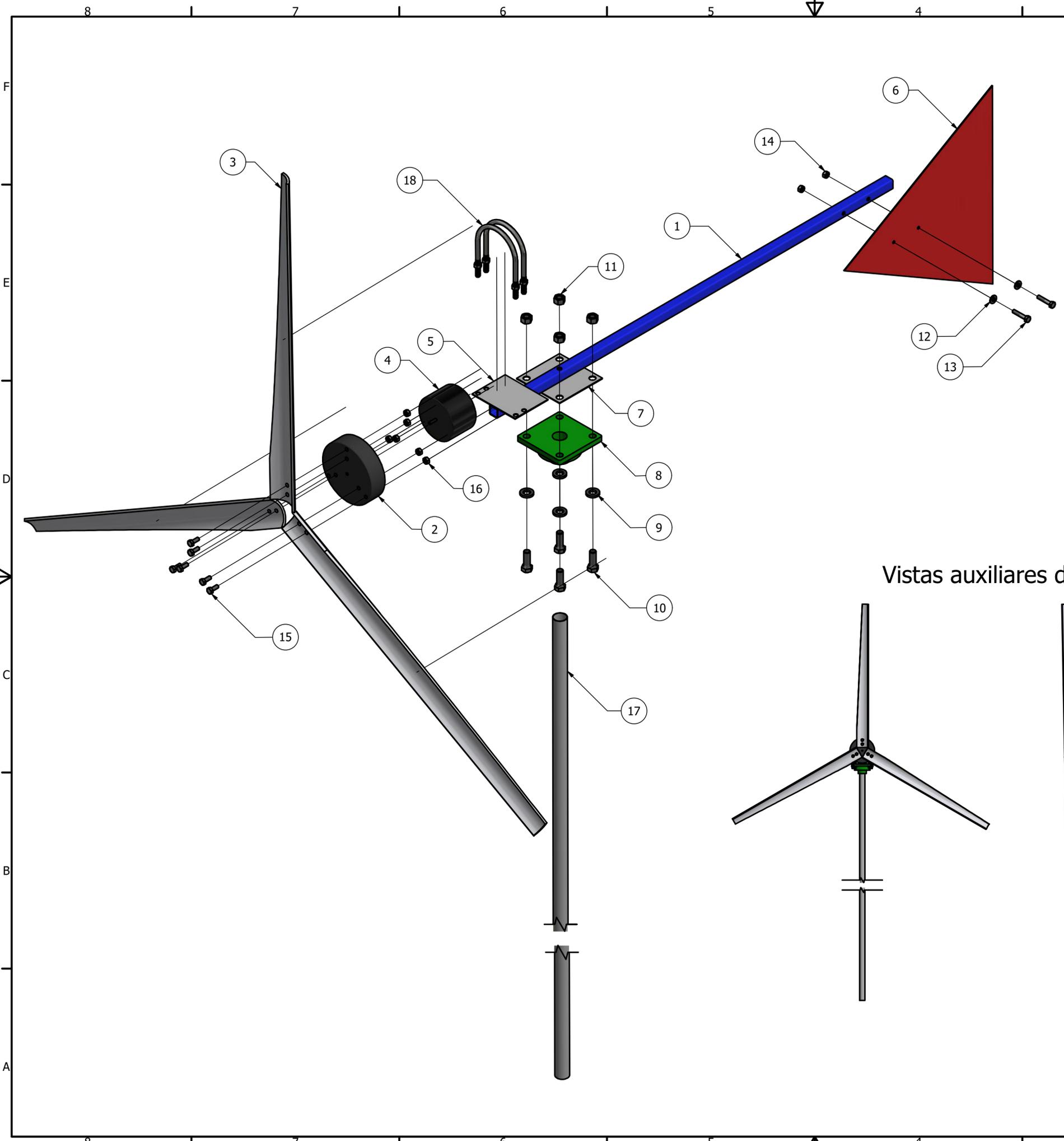


Figura 30: Ensamble final de la turbina.



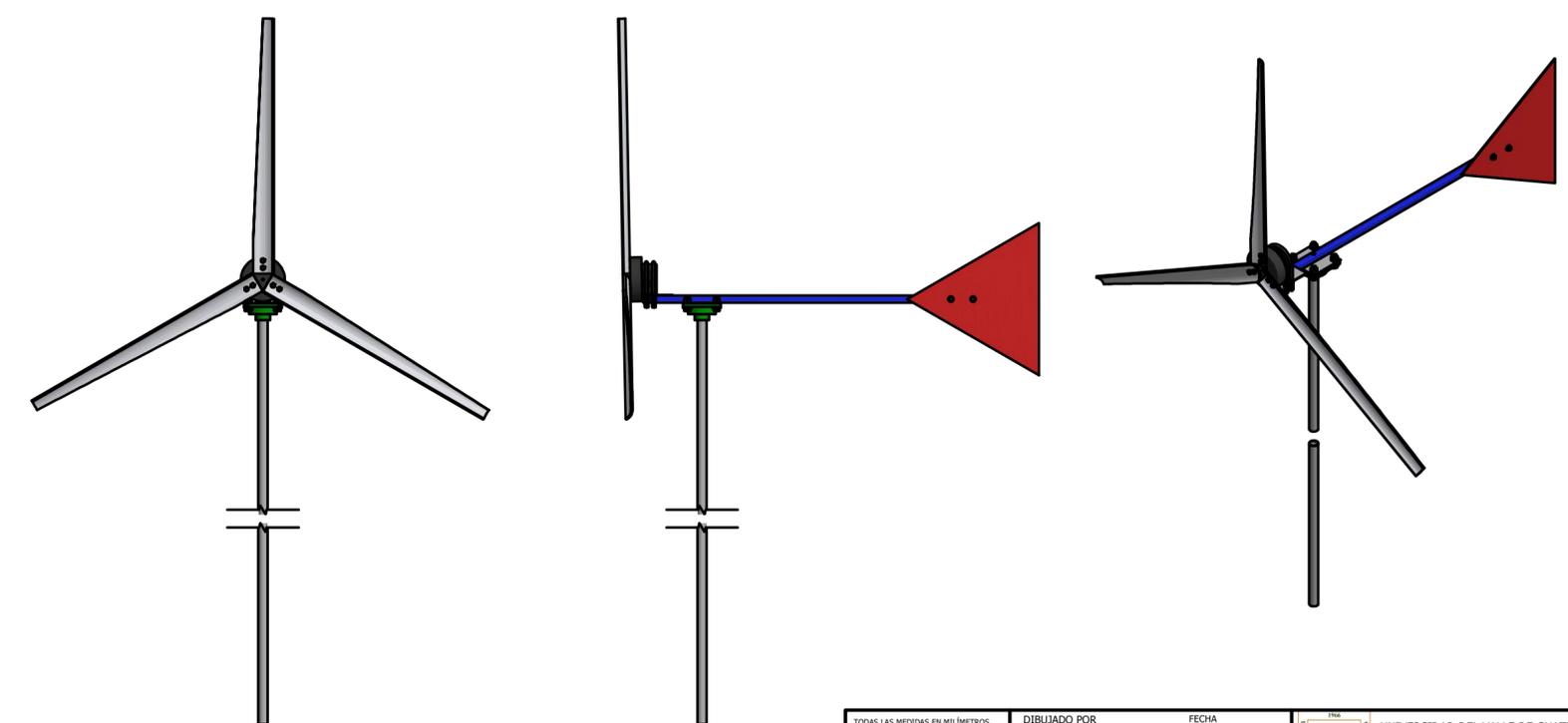
Figura 31: Turbina eólica fabricada por el autor de este manual.

11.6. Planos de construcción

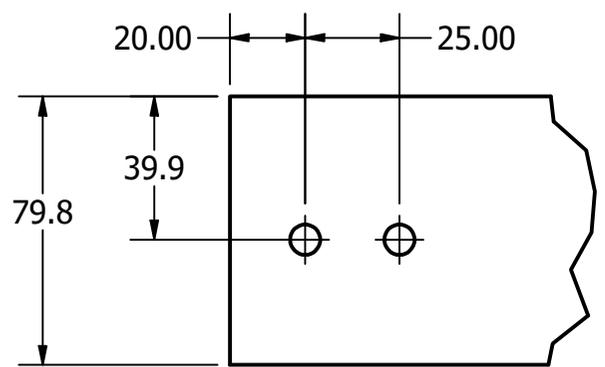
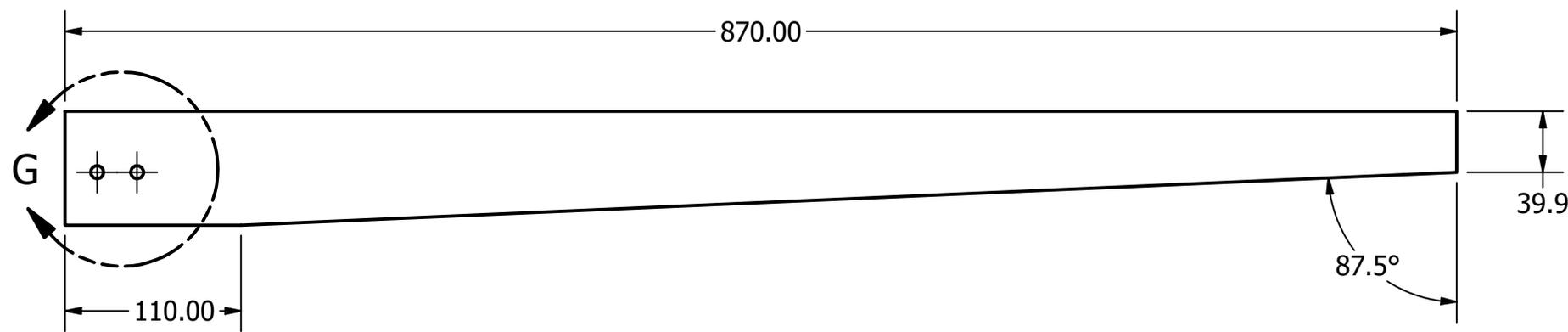
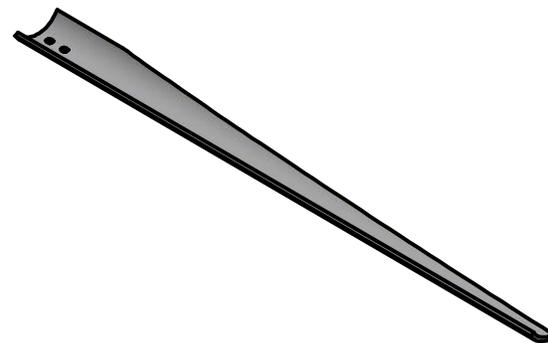


LIISTA DE PARTES			
ELEMENTO	CANTIDAD	PARTE	DESCRIPCION
1	1	Estructura	Tubo cuadrado estructural de 1" x 1" de acero estructural.
2	1	Rotor	Rotor del ventilador de radiador. Plástico.
3	3	Aspas	Aspas fabricadas de tubo PVC de 3".
4	1	Generador	Motor eléctrico de ventilador de radiador de carro.
5	1	Base motor	Placa base para el generador de acero estructural de 2 mm de espesor.
6	1	Aleta	Plancha de acero estructural de 2 mm de espesor.
7	1	Base chumacera	Placa base para la chumacera de acero estructural de 2 mm de espesor.
8	1	Chumacera	Chumacera marca KML modelo F208.
9	4	IFI 535 - 14	Roldana plana 14 mm
10	4	ANSI B18.2.3.5M - M14 x 2 x 40	Perno hexagonal M14 x 40
11	4	ANSI B 18.2.4.1 M - M14 x 2	Tuerca hexagonal M14
12	2	ANSI B18.22M - 8 N	Roldana plana 8 mm
13	2	ANSI B18.2.3.5M - M8 x 1.25 x 40	Perno hexagonal M8 x 40
14	2	ANSI B 18.2.4.1 M - M8 x 1.25	Tuerca hexagonal M8
15	6	ANSI B18.2.3.5M - M8 x 1.25 x 20	Perno hexagonal M8 x 20
16	6	ANSI B 18.2.4.1 M - M8 x 1.25	Tuerca hexagonal M8
17	1	Torre	Tubo de acero galvanizado de 1" de diámetro y 4 m de largo.
18	2	Abrazadera tipo "U"	Uniones pernadas en U.

Vistas auxiliares del ensamble de la turbina eólica. Escala: 1/17



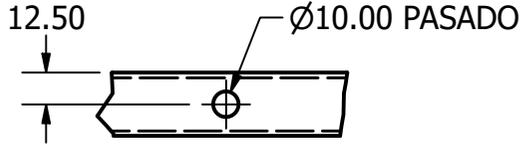
TODAS LAS MEDIDAS EN MILIMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGUN ASME Y14.5 - 2009.	DIBUJADO POR	FECHA	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 info@uvg.edu.gt
	TOLERANCIAS GENERALES	Jorge Fuentes	
LINEAL	.XX ±	DISEÑADO POR	TÍTULO: Prototipo turbina eólica
	.XXX ±	Jorge Fuentes	
ANGULAR ±		REVISADO POR	FECHA
FRACCIONES ±		APROBADO POR	FECHA
RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓		NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO Prototipo turbina eólica	
MATERIAL		NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO Prototipo turbina eólica	
TRATAMIENTO		TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.	
MASA: N/A		FORMATO	ESCALA: 1/6 UNIDADES: mm
		A2	PÁGINA 1 DE 8



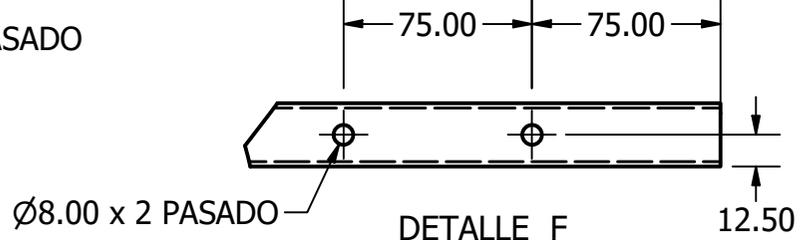
DETALLE G
ESCALA 1 / 2

Nota: El espesor del aspa es de 2.5 mm.

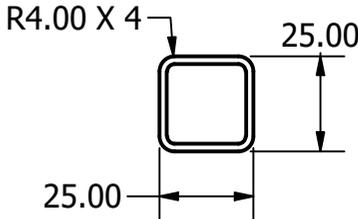
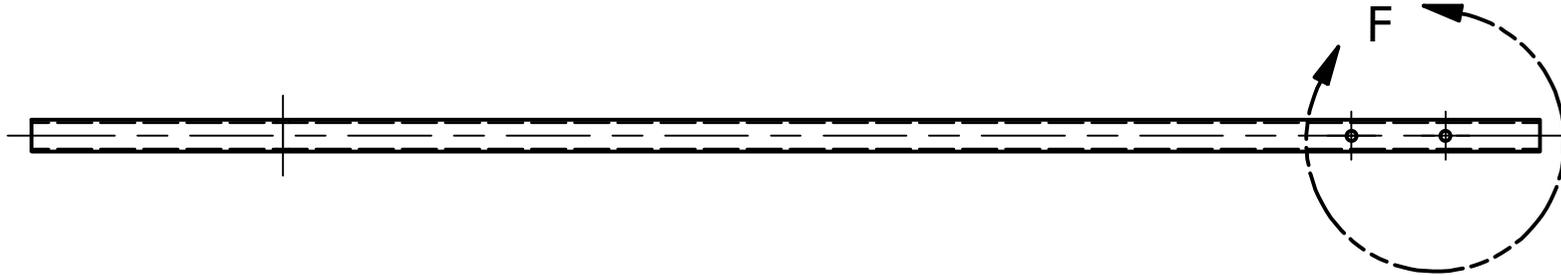
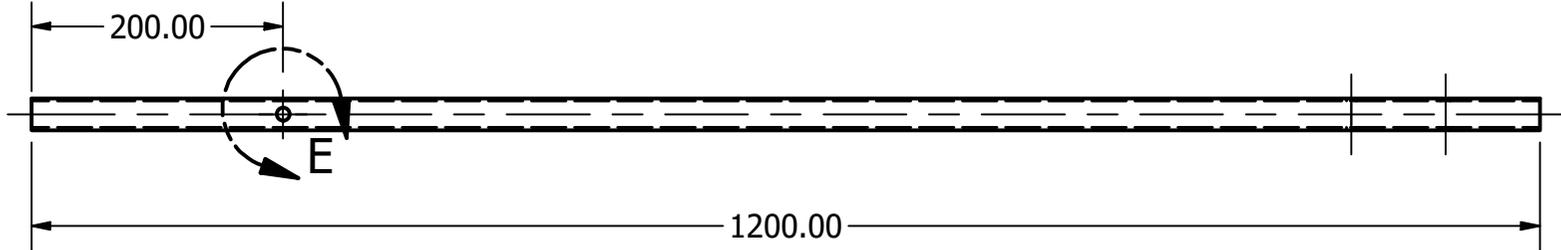
TÍTULO:		
Aspa		
NÚMERO DE DIBUJO: 2		
FORMATO	ESCALA: 1/4	UNIDADES: mm
A4	PÁGINA 2 DE 8	REV



DETALLE E
ESCALA 1 / 3

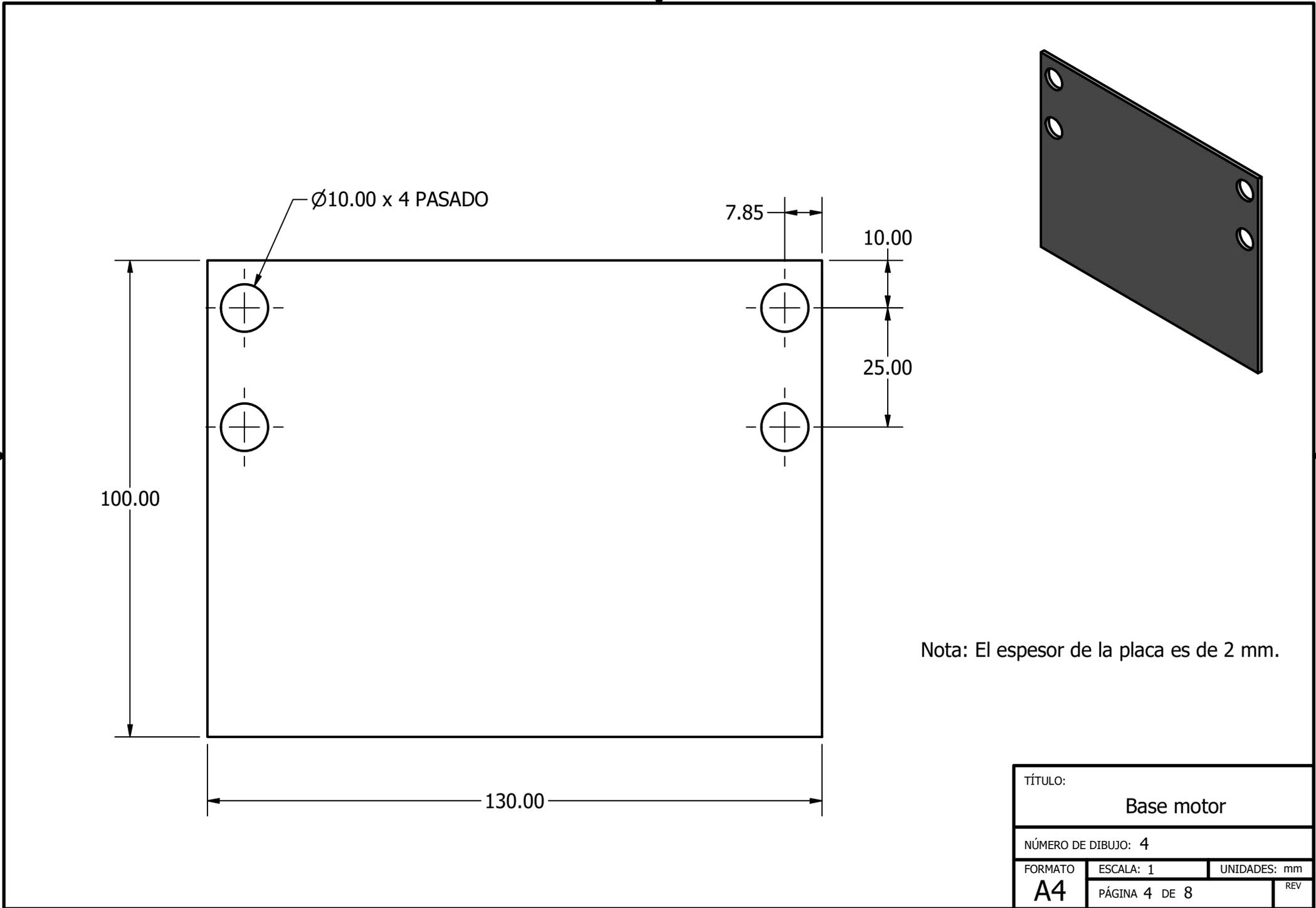


DETALLE F
ESCALA 1 / 3



Escala: 1/2

TÍTULO:		
Estructura		
NÚMERO DE DIBUJO: 3		
FORMATO	ESCALA: 1/6	UNIDADES: mm
A4	PÁGINA 3 DE 8	REV



Ø10.00 x 4 PASADO

7.85

10.00

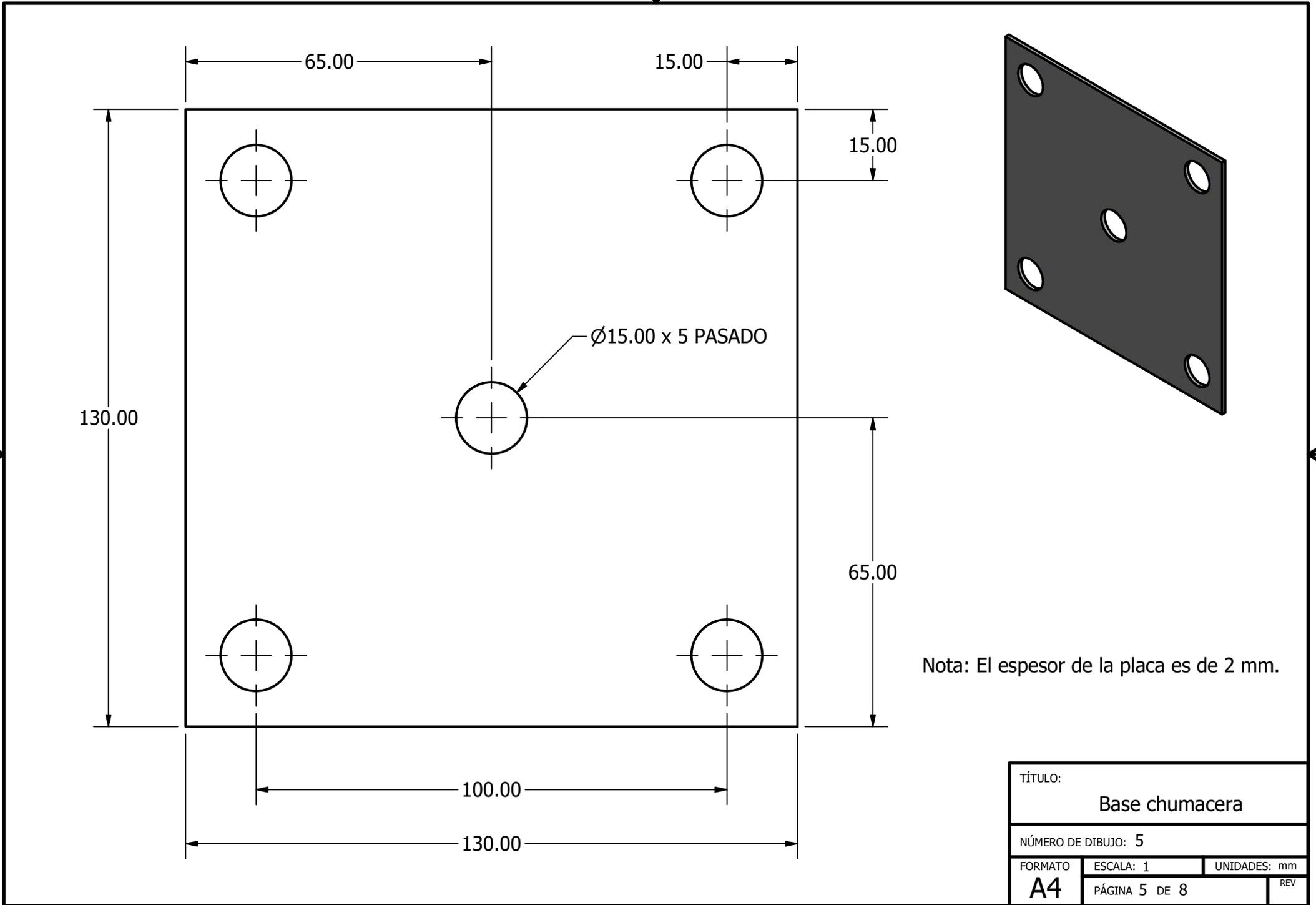
25.00

100.00

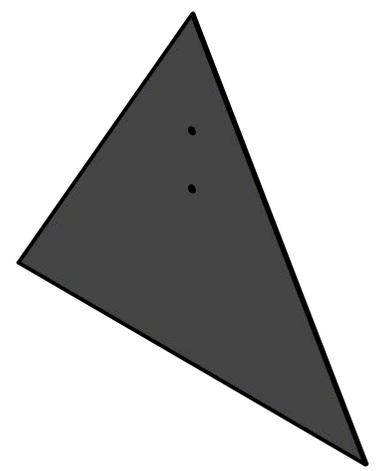
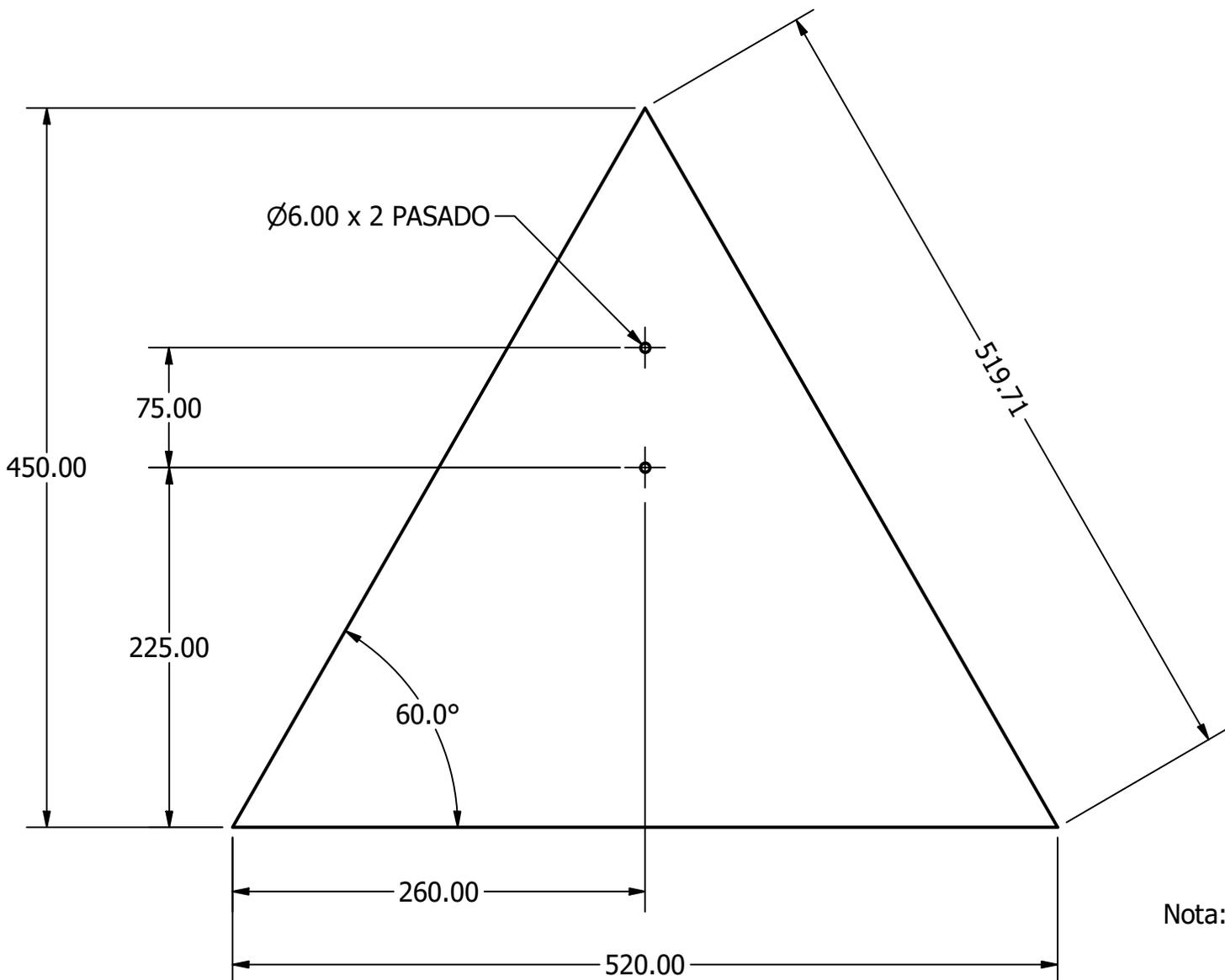
130.00

Nota: El espesor de la placa es de 2 mm.

TÍTULO:		
Base motor		
NÚMERO DE DIBUJO: 4		
FORMATO	ESCALA: 1	UNIDADES: mm
A4	PÁGINA 4 DE 8	REV

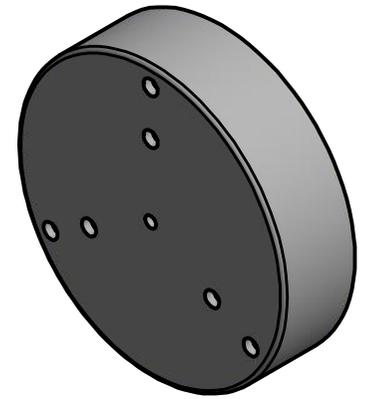
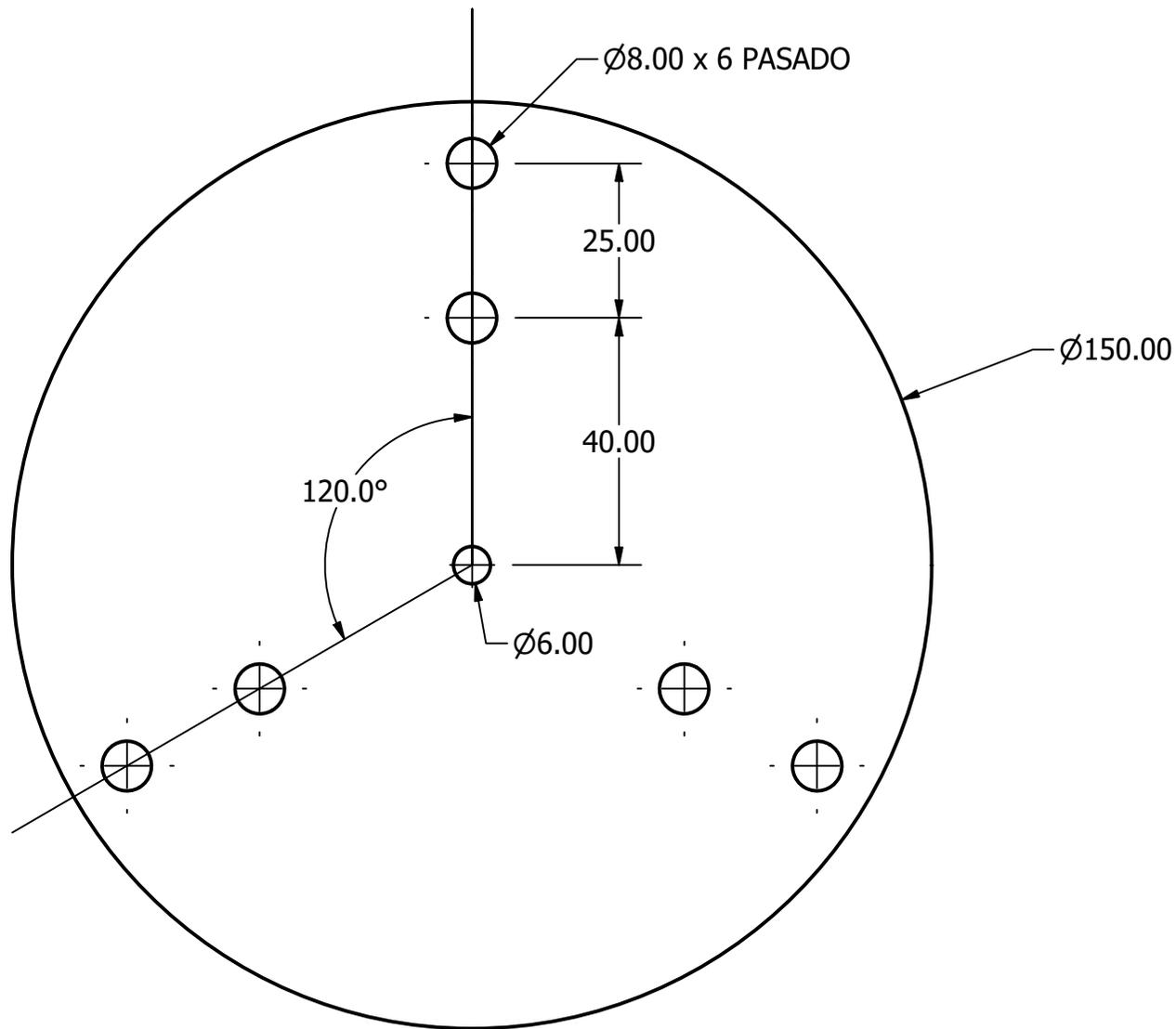


TÍTULO:		
Base chumacera		
NÚMERO DE DIBUJO: 5		
FORMATO	ESCALA: 1	UNIDADES: mm
A4	PÁGINA 5 DE 8	REV



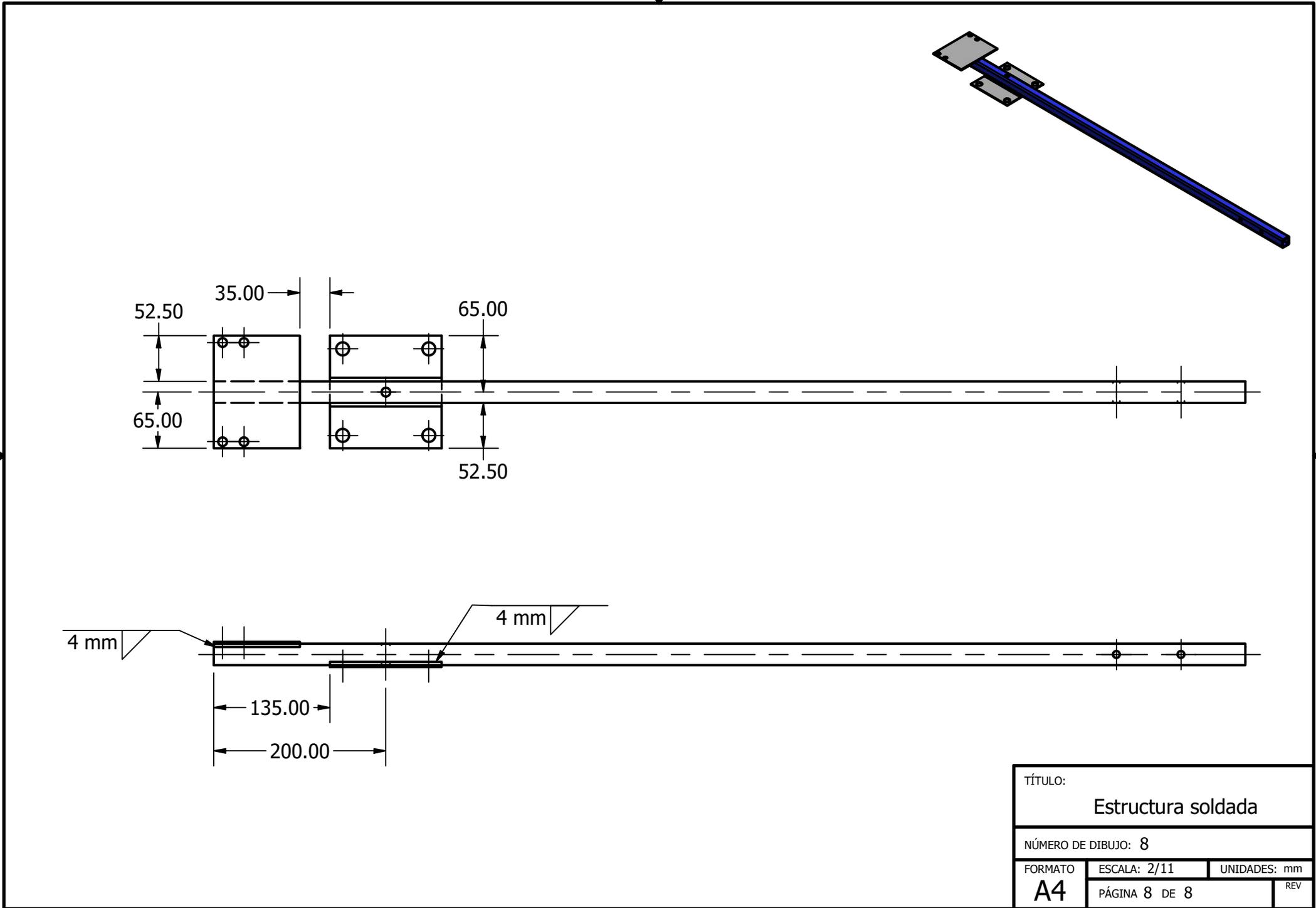
Nota: El espesor de la placa es de 2 mm.

TÍTULO:		
Aleta		
NÚMERO DE DIBUJO: 6		
FORMATO	ESCALA: 1/4	UNIDADES: mm
A4	PÁGINA 6 DE 8	REV



Nota: Unicamente se presentan las modificaciones a la pieza original.

TÍTULO:		
Rotor		
NÚMERO DE DIBUJO: 7		
FORMATO	ESCALA: 7/8	UNIDADES: mm
A4	PÁGINA 7 DE 8	REV



TÍTULO:		
Estructura soldada		
NÚMERO DE DIBUJO: 8		
FORMATO	ESCALA: 2/11	UNIDADES: mm
A4	PÁGINA 8 DE 8	REV