



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

“2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“DESARROLLO DE UN GENERADOR HÍBRIDO  
EÓLICO-SOLAR DE BAJA POTENCIA”.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

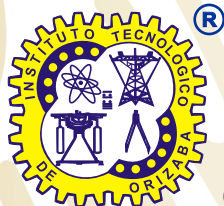
*Ing. Edgar Bruno Carrera Báez*

DIRECTOR DE TESIS:

*Dr. Rubén Posada Gómez*

CODIRECTOR DE TESIS:

*Dr. José Pastor Rodríguez Jarquin*



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

DICIEMBRE 2019



# EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



## TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

### Instituto Tecnológico de Orizaba

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

FECHA: 05/12/2019  
DEPENDENCIA: POSGRADO  
ASUNTO: Autorización de Impresión  
OPCIÓN: I

**C. EDGAR BRUNO CARRERA BAEZ**  
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:  
**INGENIERIA ELECTRONICA**

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**"DESARROLLO DE UN GENERADOR HIBRIDO EOLICO-SOLAR DE BAJA POTENCIA".**

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

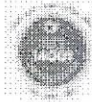
**MARIO LEONCIO ARRIJOJA RODRIGUEZ**  
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México

Tel. 01 (272) 7 24 40 96, Fax. 01 (272) 7 25 17 28 e-mail: orizaba@itorizaba.edu.mx

www.orizaba.tecnm.mx





# EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

FECHA : 03/12/2019

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

**C. MARIO LEONCIO ARRIJOA RODRIGUEZ**  
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACION.  
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

**EDGAR BRUNO CARRERA BAEZ**

la cual lleva el título de:

**"DESARROLLO DE UN GENERADOR HIBRIDO EOLICO-SOLAR DE BAJA POTENCIA".**

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DR. RUBEN POSADA GOMEZ


SECRETARIO : DR. ALBINO MARTINEZ SIBAJA


VOCAL : DR. GERARDO AGUILA RODRIGUEZ


VOCAL SUP. : DR. JOSE PASTOR RODRIGUEZ JARQUIN


EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN INGENIERIA ELECTRONICA

OPCION: I Tesis

  
FIRMA

  
FIRMA

  
FIRMA

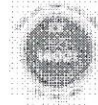
  
FIRMA



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México

Tel. 01 (272) 7 24 40 96, Fax. 01 (272) 7 25 17 28 e-mail: orizaba@itorizaba.edu.mx

www.orizaba.tecnm.mx



---

## **RESUMEN**

El siguiente documento presenta los resultados del proyecto "Desarrollo de un generador híbrido eólico-solar de baja potencia", que aborda los problemas actuales en la generación de energía eléctrica, así como sus consecuencias. Considerando la posibilidad de desarrollar un generador híbrido que combine la generación de energía eléctrica a través de un generador eólico y paneles fotovoltaicos que incrementen la eficiencia de los generadores híbridos que se encuentran actualmente en el mercado nacional, respaldados por una serie de artículos y estudios sobre los tipos de energías renovables, la situación energética mundial y el país, así como la necesidad de un cambio energético en el mundo, sus ventajas y desventajas del uso de estas tecnologías.

---

## **ABSTRACT**

The following document presents the results of the project "Development of a low-power wind-solar hybrid generator", which addresses the current problems in electric power generation, as well as its consequences. Considering the possibility of developing a hybrid generator that combines the generation of electric power through a wind generator and photovoltaic panels that increase the efficiency of hybrid generators currently in the national market, backed by a series of articles and studies on the types of renewable energy, the world energy situation and the country, as well as the need for an energy change in the world, its advantages and disadvantages of the use of these technologies.

---

# Índice

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<i>Índice de Figuras .....</i>	<i>5</i>
<i>Índice de graficas.....</i>	<i>6</i>
<i>Índice de tablas.....</i>	<i>6</i>
<b>INTRODUCCIÓN GENERAL AL TRABAJO DE TESIS .....</b>	<b>7</b>
<i>Problemática.....</i>	<i>8</i>
<i>Hipótesis .....</i>	<i>9</i>
<i>Metodología.....</i>	<i>10</i>
<i>Objetivo general: .....</i>	<i>12</i>
<i>Objetivos específicos:.....</i>	<i>12</i>
Alcances y Limitaciones .....	13
<b>CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE Y CAMPO .....</b>	<b>14</b>
1.1 <i>Estado del arte .....</i>	<i>14</i>
1.1.1 <i>Aerogeneradores .....</i>	<i>14</i>
1.1.2 <i>Aerogeneradores de velocidad fija.....</i>	<i>14</i>
1.1.3 <i>Aerogeneradores de velocidad variable .....</i>	<i>15</i>
1.1.4 <i>Energía Solar .....</i>	<i>15</i>
1.1.5 <i>Sistemas Fotovoltaicos en México.....</i>	<i>16</i>
1.1.6 <i>Sistemas Híbridos.....</i>	<i>16</i>
1.1.7 <i>Sistema Híbrido Eólico-solar.....</i>	<i>17</i>
1.2 <i>Estado del campo .....</i>	<i>18</i>
<b>CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEORICOS PARA EL GENERADOR HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR..</b>	<b>20</b>
2.1 <i>Energía Eólica .....</i>	<i>20</i>
2.1.1 <i>Ventajas de la energía eólica.....</i>	<i>20</i>
2.1.2 <i>Desventajas de la energía eólica.....</i>	<i>20</i>
2.2 <i>Aerogeneradores .....</i>	<i>21</i>
2.2.1 <i>Tipologías existentes.....</i>	<i>21</i>
2.2.1.1 <i>Aerogeneradores de eje vertical.....</i>	<i>23</i>
2.2.1.2 <i>Aerogeneradores de eje horizontal.....</i>	<i>23</i>
2.3 <i>Energía Solar .....</i>	<i>24</i>

---

2.3.1 Celdas Solares.....	24
2.3.2 Energía fotovoltaica .....	25
2.3.3 Sistemas Fotovoltaicos .....	25
2.3.4 Estructura de un módulo.....	25
2.4 Generador eléctrico.....	26
2.4.1 Devanados y campos en el generador.....	26
2.4.2 Alternador de imanes permanentes .....	26
2.6 Tipo de transmisión.....	27
<b>CAPÍTULO 3 DISEÑO DEL GENERADOR HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR DE BAJA POTENCIA.....</b>	<b>29</b>
3.1 Diseño del sistema.....	29
3.1.1 Diseño Mecánico.....	29
3.1.2 Diseño Eléctrico.....	32
3.1.2.1 Generador Eléctrico .....	32
3.1.2.2 Regulador de voltaje eólico .....	35
3.1.2.3 Celdas fotovoltaicas.....	36
3.1.2.4 Regulador de voltaje solar.....	37
<b>CAPÍTULO 4 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO Y DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL GENERADOR HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR.....</b>	<b>39</b>
4.1.1 Construcción del sistema de transmisión. ....	39
4.1.1.1 Fabricación del engrane conducido.....	39
4.1.1.2 Fabricación del engrane motriz.....	40
4.1.2 Construcción del panel solar pentadecágonal.....	41
4.2 Pruebas experimentales por módulo.....	42
4.2.1 Prueba de Generación de energía eólica.....	43
4.2.2 Prueba de eficiencia de panel solar.....	45
4.3 Integración del aerogenerador hibrido eólico-solar .....	49
4.4 Análisis de resultados.....	50
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>52</b>
Conclusiones generales.....	52
Trabajo futuro.....	52
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>52</b>

---

---

## Índice de Figuras

Figura 1 Instalación eléctrica híbrida. ....	17
Figura 2 Pereválov y L. Primak mostrando el Generador solar-eólico hibrido.....	19
Figura 3 Generador solar-eólico hibrido. ....	19
Figura 4 Serie de paneles fotovoltaicos en el generador solar-eólico hibrido.....	19
Figura 5 Relación entre diámetro del rotor y potencia producida. ....	22
Figura 6 Tipos de aerogeneradores: Eje Horizontal / Eje Vertical.....	22
Figura 7 Corte transversal de un panel fotovoltaico.....	25
Figura 8 Devanados Y Campos Generadores.....	26
Figura 9 Alternador de Imanes Permanentes.....	27
Figura 10 Sistema de Poleas.....	27
Figura 11: Acoplamientos mecánicos alineados al eje.....	29
Figura 12: Acoplamientos mecánicos desplazados al eje.....	29
Figura 13 Acoplamiento seleccionado para el generador eléctrico.....	30
Figura 14 Diseño estructural del sistema de generación de energía eólica. ....	30
Figura 15 Diseño del Sistema de transmisión, rotor y generador en FUSION 360. ....	31
Figura 16 Diseño de Adaptador y eje en FUSION 360.....	31
Figura 17 Diseño de la Base y soporte del aerogenerador en FUSION 360 .....	31
Figura 18 Diseño final de engrane motriz. ....	32
Figura 19 Generador eléctrico NE-500M2 de bajas RPM .....	32
Figura 20 Generador eléctrico NE-500M2 de bajas RPM .....	33
Figura 21 Generador eléctrico NE-500M2 de bajas RPM .....	33
Figura 22 Dibujo técnico del generador eléctrico NE-500M2 .....	34
Figura 23 Regulador de voltaje para generador eólico FWS02-12 .....	35
Figura 24: Celdas fotovoltaicas de 0.2W.....	36
Figura 25: Diseño de base para celdas fotovoltaicas en FUSION 360.....	37
Figura 26 Regulador de carga solar PWM de 360W .....	37
Figura 27 Engrane conducido.....	39
Figura 28 Engrane motriz.....	40
Figura 29 Vista inferior del Aerogenerador y eje motriz .....	40
Figura 30: Base del panel solar pentadecágono.....	41
Figura 31: Proceso de soldado de celdas solares.....	41
Figura 32: Agrupación de celdas solares.....	42
Figura 33 Vista superior del panel solar pentadecágono.....	42
Figura 34 Prueba al generador eléctrico NE-200M2.....	43
Figura 35: Tacómetro y multímetro digital. ....	43
Figura 36 Prueba individual a celda solar. ....	45
Figura 37 Prueba de celdas solares agrupadas.....	46
Figura 38 Panel solar pentadecágono.....	46
Figura 39 Salida del generador.....	47
Figura 40: Controlador regulando el voltaje hacia la batería. ....	47



---

Figura 41: Prototipo del generador hibrido eólico-solar de baja potencia. ....	49
Figura 42: Sistema de transmisión del generador eléctrico NE-200M2.....	49

### **Índice de graficas**

Gráfica 1: Generación eléctrica y obtención del modelo matemático del sistema. ....	44
Gráfica 2: Calculo de rpm necesarias para el generador eléctrico NE-200M2. ....	44
Gráfica 3: Prueba de RPM del aerogenerador en relación a la velocidad de viento. ....	45
Gráfica 4: Prueba de generación solar en días soleados. ....	48
Gráfica 5: Prueba de generación solar en días nublados. ....	48
Gráfica 6: Relación flujo luminoso/potencia.....	50
Gráfica 7: Relación de voltaje de salida con respecto a las revoluciones del generador. ....	50
Gráfica 8: Relación de voltaje de salida con respecto a las revoluciones de.....	51

### **Índice de tablas**

Tabla 1: Datos técnicos del generador eléctrico NE-500M2.....	34
Tabla 2: Especificaciones del regulador FWS02-12 .....	35
Tabla 4 Especificaciones del controlador PWM RBL-30A .....	38

---

## INTRODUCCIÓN GENERAL AL TRABAJO DE TESIS

Hoy en día el uso de energías renovables es una prioridad debido al alto índice de contaminación y degradación del medio ambiente. Emplear energías sustentables como la eólica, solar, mareomotriz y geotérmica, también llamadas Energías Renovables No Convencionales (ERNC) son sistemas de generación que aportan un gran beneficio e incluso pueden ser aplicados a la generación eléctrica para el hogar. Si bien cada método de obtención de energía individualmente es capaz de generar la energía suficiente para sustentar a un hogar, es posible la inclusión de dos o más sistemas para hacer mejorar la eficiencia del sistema de obtención.

Es por esta razón que este trabajo consiguió la inclusión de dos métodos de obtención mediante un generador híbrido capaz de captar los rayos solares y la energía del viento para transformarlos en energía eléctrica, y posteriormente ser almacenada. El aumento del uso de energías renovables es una realidad, de hecho, en un futuro se prevé que el uso de estas energías sea una obligación, por lo que aquí se encuentra una gran oportunidad al incursionar en este tipo de sistemas. Es importante generar conciencia en la sociedad para que exista ese interés por emplear en sus hogares este tipo de energía, este proyecto puede ser considerado una opción de generación de energía para baja-mediana potencia, además de que por sus características físicas puede ser adaptable a la mayoría de los hogares.

Este trabajo desarrolló un generador híbrido eólico-solar capaz de generar energía eléctrica mediante el uso de dos ERNC. El cual fue desarrollado mediante la sustentación de ciertos problemas presentes en nuestra sociedad, la identificación de limitaciones y los alcances de nuestro proyecto permitiendo establecer objetivos a cumplir. Se prosiguió una metodología de desarrollo que a lo largo de los siguientes apartados se podrán analizar además de conceptos teóricos, diseños del sistema para analizar sus elementos individualmente y posteriormente ser manufacturados e integrándolos en el generador híbrido.

Además, se analizaron los resultados de eficiencia eléctrica de acuerdo a la generación de su parte solar y su parte eólica. Mostraremos cómo fue posible la integración de dos ERNC además de las conclusiones de nuestro trabajo analizando el producto final del generador híbrido eólico-solar.

---

## **Problemática**

La energía eléctrica es esencial en la vida diaria de la humanidad, pero para poder generarla se afecta el medio ambiente y cada día la generación de esta se vuelve más costosa.

Actualmente, la mayoría de la energía eléctrica se obtiene de dos fuentes: las plantas de generación térmica, que usan carbón y derivados del petróleo para hacer combustión; y las plantas hidroeléctricas que, aun siendo una energía renovable, producen un impacto en el medio ambiente, al inundar grandes terrenos colindantes.

Hoy en día se está comenzando a utilizar cada vez más las Energías Renovables No Convencionales o ERNC, las cuales tienen menor impacto en el medio ambiente. Las ERNC más conocidas y exploradas, son la energía solar, eólica, mareomotriz y geotérmica. México tiene un gran potencial para varias de éstas, incluida la energía eólica y solar sin embargo una de las grandes desventajas es la baja rentabilidad económica para las empresas generadoras que tienen este tipo de iniciativas, requiriéndose de recursos y subsidios del gobierno federal. Del mismo modo, la baja escala de generación no permite compensar la inversión en estas ya que por lo regular generan una cantidad de energía variable dependiendo de las condiciones atmosféricas que no logran satisfacer la demanda energética por si sola.[1]

---

## **Hipótesis**

Es posible desarrollar un generador híbrido eólico-solar a partir del diseño de un extractor eólico que sea capaz de suministrar parte del consumo eléctrico en una vivienda promedio, integrando un panel fotovoltaico sobre este.

---

## Metodología

### 1. Definición del problema

- Definir el tema de investigación.
- Ubicar el tema en el contexto: tiempo, espacio y concepto.
- Delimitar el proyecto: ¿Qué aspectos de diseño van a tratar?
- Definir el objetivo general y los objetivos específicos del proyecto.
- Justificar la realización del proyecto: ¿Por qué es importante el estudio? ¿Qué información aportará? ¿A quiénes beneficia? ¿Qué utilidad tendrá? ¿Qué problemas podría resolver? Planteamiento de la metodología: ¿Cómo se cumplirán los objetivos planteados?

### 2. Recolección de información

- Es necesario realizar una revisión documental (artículos, publicaciones técnicas, bases de datos, patentes, bibliografías de apoyo) que permita conocer a fondo el tema, para poder hacer un balance y tener claridad sobre que se ha investigado y sobre que no.
- Revisar el estado del arte de los aerogeneradores verticales que se han realizado en el mundo y en Colombia.

### 3. Generación de alternativas de solución

- Se evalúan cada una de las soluciones que se tienen planteadas para escoger la mejor solución (viable y factible).

### 4. Diseño mecánico

- Obtener las dimensiones del aerogenerador.
- Diseñar los componentes del aerogenerador vertical.
- Realizar el diseño en FUSION 360 del aerogenerador.
- Seleccionar el material de cada componente.

### 5. Diseño electrónico

- Seleccionar el generador adecuado y los componentes necesarios para la producción de la energía eléctrica.
- Seleccionar las celdas solares adecuadas para su montaje en el aerogenerador.

### 6. Manufactura y ensamble

- 
- Construir las partes que conforman el aerogenerador y mecanizar las piezas que sean necesarias.
  - Ensamblar el aerogenerador.

7. Pruebas finales y análisis de resultados

- Realizar las pruebas pertinentes, corroborando que se cumplan los objetivos del proyecto.

---

**Objetivo general:**

Desarrollar un generador híbrido eólico-solar de eje vertical para aplicaciones de baja potencia.

**Objetivos específicos:**

- Desarrollar un prototipo funcional de un generador eólico-solar de eje vertical.
- Diseñar un acoplamiento entre el generador eólico y el panel solar.
- Implementar y validar el funcionamiento del generador híbrido eólico-solar.

---

### **Alcances y Limitaciones**

Se llevará a cabo el desarrollo de un generador híbrido eólico-solar de baja potencia, el cual se encargará de suministrar una parte del consumo eléctrico de una vivienda promedio.



---

# CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE Y CAMPO

En este capítulo se presenta el estudio del estado del arte y del campo, donde se analizan trabajos de tesis, artículos, prototipos, patentes o productos comerciales relacionados con nuestro tema de tesis, con la finalidad de conocer diferentes soluciones propuestas para esta problemática, así como avances tecnológicos, conceptos, términos que resultan de gran ayuda más adelante.

## 1.1 Estado del arte

Hoy en día se tiene la necesidad de buscar alternativas para la generación de energía renovable, sin embargo, estas ya han formado parte de nosotros desde tiempos remotos. Las energías renovables forman parte importante en los recursos utilizados para satisfacer la demanda energética de la humanidad. El aprovechamiento del viento y la energía del sol han marcado acontecimientos importantes al ser incorporadas en distintas formas a las actividades cotidianas de varias civilizaciones, siendo ejemplo de ello el antiguo Egipto en donde ya se utilizaba la energía del viento en forma de molinos para bombear agua a sistemas de regadío.[2]

### 1.1.1 Aerogeneradores

Ahora bien, sabemos que para generar energía eólica se necesita de un aerogenerador el cual es una máquina que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica aprovechable, mediante la acción de la fuerza del viento sobre unas aspas unidas a un eje común. El eje giratorio puede conectarse a varios tipos de maquinaria para moler grano, bombear agua o en nuestro caso generar electricidad.

En México, el desarrollo de la tecnología de conversión de energía eólica a electricidad se inició con un programa de aprovechamiento de la energía eólica en el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en febrero de 1977.

La Estación Experimental de El Gavillero se habilitó como centro de prueba de pequeños aerogeneradores. La Estación estuvo en operación hasta 1996 en que fue desmantelada.

### 1.1.2 Aerogeneradores de velocidad fija

Los aerogeneradores de velocidad fija son simples de construir y pueden tener métodos de control de potencia generada pasivos. Debido a que no controlan su velocidad, solo pueden maximizar la generación para un número discreto de velocidades del viento, generalmente sólo una.

Control por pérdida aerodinámica (“stall control”): se diseñan las palas de la hélice de forma que el ángulo de ataque de éstas incremente con la velocidad, pero cuando la velocidad supera la nominal, éstas empiezan a entrar en pérdida, para evitar que se embale la turbina. No existe control sobre el ángulo de las palas. Estos aerogeneradores usan un generador de inducción conectado directamente a la red y un banco de condensadores para compensar potencia reactiva.

---

Control del ángulo de ataque de las palas (“pitch control”): éste se logra mediante motores que mueven las palas, tal como se hace en las máquinas con control activo por pérdida aerodinámica, pero en este caso, se mueven las palas en dirección opuesta a la anterior ya que la hélice no está diseñada para aumentar la pérdida aerodinámica cuando aumenta la velocidad. Se necesita un mecanismo de motores más poderoso que mueva las palas. El mecanismo es de acción lenta, más aún al aumentar la potencia.

### **1.1.3 Aerogeneradores de velocidad variable**

Los aerogeneradores de velocidad variable tienen dificultades de construcción y/o de control, pero permiten generar la máxima potencia posible en todo momento.

Velocidad variable limitada: también conocido como “OptiSlip”, en este esquema se usa un generador de inducción de jaula de ardilla al cual, mediante un convertor de electrónica de potencia, se le puede manipular su resistencia, cambiando así el deslizamiento alrededor de un 10%. Sólo se pueden tener velocidades mayores a la síncrona y no se puede reutilizar la energía usada por el rotor.

Generador de inducción de jaula de ardilla (“Squirrel Cage Induction Generator”, SCIG): esta es una solución sencilla en cuanto a diseño, simplemente se usa un generador de inducción de jaula de ardilla y se coloca un convertor de frecuencia de alta potencia entre el generador y la red. Su desventaja proviene del precio del convertor, el cual es muy elevado.[3]

Generador síncrono de flujo axial con imanes permanentes (“Permanent Magnet Synchronous Generator”, PMSG): éstos se construyen de manera totalmente distinta a los generadores convencionales, en lugar de usar flujo radial, se usa flujo axial, lo cual permite tener un gran número de polos en un espacio reducido. Un gran número de polos significa que la velocidad eléctrica del generador es menor, lo que la hace más cercana a la velocidad mecánica de la turbina, pudiéndose acoplar el generador y la turbina sin caja de engranajes si el número de polos es lo suficientemente alto. Finalmente, el generador síncrono de flujo axial es conectado a la red mediante un convertor de frecuencia.[4]

### **1.1.4 Energía Solar**

La energía solar es la energía producida por el Sol que es convertida a energía útil por el ser humano.

En 2009 el CINVESTAV indica que más de la mitad del territorio nacional presenta una densidad en promedio energética de 5 kWh por metro cuadrado al día. Esto significa que para un dispositivo de recolección y transformación de energía solar a energía eléctrica que tuviera una eficiencia de 100%, bastaría un metro cuadrado para proporcionar energía eléctrica a un hogar mexicano promedio que consume 150 kWh por mes.

---

De manera más precisa, considerando eficiencias de 10% para los dispositivos en el mercado, se puede decir que con 200 millones de m<sup>2</sup> de área de colección de radiación podríamos dar electricidad a todos los hogares mexicanos.

### **1.1.5 Sistemas Fotovoltaicos en México**

En [5] se hace mención a los pioneros en el desarrollo de tecnología de generación de electricidad, a partir de celdas fotovoltaicas, fueron investigadores del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), quienes desarrollaron una pequeña planta piloto con una capacidad de producción de fotoceldas, que permitió en los años setenta, proveer de electricidad a un número significativo de aulas dentro del sistema nacional de telesecundarias.[5]

A través de un esfuerzo del gobierno federal dentro del Programa Solidaridad y mediante la participación de instituciones como Comisión Federal de Electricidad (CFE) y los Gobiernos estatales y municipales, entre otros, se instalaron en México alrededor de 40,000 sistemas fotovoltaicos, y otros diez mil por la iniciativa privada, para proveer de electricidad a zonas alejadas de la red eléctrica. Esto ha permitido que miles de pequeños poblados cuenten con iluminación eléctrica durante las noches y, en algunos casos, con electricidad para bombeo de agua. Igualmente, el uso de estos sistemas se ha generalizado para la comunicación, en sistemas de auxilio e iluminación en carreteras federales, para dar energía a estaciones del sistema de comunicación por microondas y a la telefonía rural.[6]

### **1.1.6 Sistemas Híbridos**

En muchas ocasiones el dimensionado de una instalación fotovoltaica por sí sola se encuentra por debajo del margen que garantiza la cobertura del suministro eléctrico todo el año.

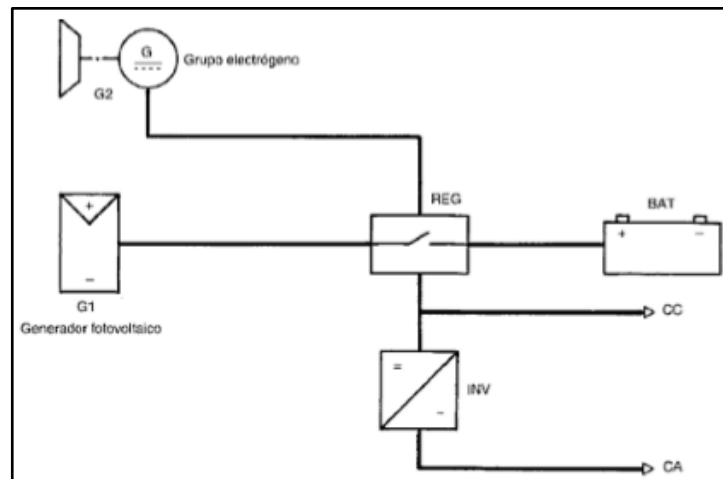
Los sistemas híbridos son una combinación entre un sistema fotovoltaico y otra fuente de suministro de energía eléctrica complementaria que no se trate de la red eléctrica, como son los generadores diésel o eólicos, pequeñas plantas hidroeléctricas y, en general, cualquier otro tipo de fuente energética.

Uno de los sistemas de generación está formado por un módulo de paneles fotovoltaicos que mediante su regulador de carga está conectado a los acumuladores; y en paralelo se encuentra conectado un grupo auxiliar con un generador eólico. No obstante, el diseño óptimo de sistemas híbridos es muy complicado, debido a la variabilidad de la energía solar y la demanda de carga, así como las características no lineales de algunos componentes. Aunque son muchos los resultados que muestran las ventajas de un sistema híbrido frente a un sistema que sólo utiliza paneles fotovoltaicos o generadores eólicos como fuentes de energía.[7]

Los sistemas híbridos son normalmente compuestos por fuentes renovables cuyos recursos son prácticamente inagotables y de ser necesario se complementan con grupos de generación con motores a combustión constituyéndose en una opción concreta, compatible a nivel medio ambiental y social.

---

En Figura 1 se tiene un ejemplo de una instalación con dos fuentes de generación (mixta), generación fotovoltaica y generación por grupo electrógeno (motor de gasolina o de diesel).



**Figura 1 Instalación eléctrica híbrida.**

Actualmente se proyectan sistemas híbridos en los que las fuentes renovables y el almacenamiento proporcionan hasta un 80–90 % de la necesidad energética, dejando al diesel solo la función de emergencia.[8]

Los sistemas híbridos nacen de la unión de dos o más sistemas de generación, uno convencional y uno que utilice fuentes renovables, para garantizar una base de continuidad del servicio eléctrico.

La principal ventaja de un sistema híbrido es la posibilidad del aprovechamiento conjunto y optimizado de los recursos locales disponibles, pudiendo garantizar altos niveles de calidad, confiabilidad y rendimiento. Los sistemas híbridos representan actualmente una solución viable para las exigencias de energía eléctrica en áreas aisladas o no electrificadas. Los sistemas híbridos permiten reducir esos problemas y aprovechar los recursos renovables existentes en el territorio, constituyendo una opción viable y favorable tanto ambiental como social. [9]

### **1.1.7 Sistema Híbrido Eólico-solar**

Se contempla esta posibilidad, cuando en el lugar de la instalación hay presencia de viento y luz solar. Estas condiciones no se dan en todas partes, por lo que es necesario conocer con detalle el potencial eólico y solar de un lugar antes de decidirse por esta opción.[10]

Uno de los sistemas de generación debe estar formado por un aerogenerador que, a través de un regulador de carga, se encargara de suministrar la energía producida a las baterías, y en paralelo una serie de paneles fotovoltaicos que mediante su regulador de carga se conecten a las baterías. Este sistema requiere un controlador más complejo, ya que su fiabilidad total es superior a la de los otros sistemas, por consiguiente, el regulador de carga no debe ser el mismo al de una instalación fotovoltaica o eólica únicamente.[11]

---

## 1.2 Estado del campo

En [12] se patentó una central energética portable la cual está formada por un chasis provisto de patas extensibles niveladoras y un rodamiento motorizado, el cual se hace girar para seguir la trayectoria solar con los paneles solares, además incorpora un banco de baterías, y turbinas que se montan en soportes articulados previstos en los frontales anterior y posterior de la estructura quedando fuera del campo solar. [12]

En el registro de la patente [13] se divulga un aerogenerador de eje vertical estático-rígido que mejora la producción de energía comparado con otro tipo de diseños al aumentar la velocidad del viento con múltiples toberas circulares que contiene. La particularidad de estas toberas es que acelera y dirige en viento a la turbina sin importar la altura de instalación del aerogenerador. [15]

La unidad híbrida de la patente [14] combina paneles fotovoltaicos y al menos un aerogenerador ocupando dispositivos convencionales para el control de la energía con los cuales mueven los paneles fotovoltaicos y el aerogenerador. Además, está provisto de un panel fotovoltaico fijo acoplado a una estructura con un par de cilindros hidráulicos con los cuales reivindican la posición de hasta 90°. [14]

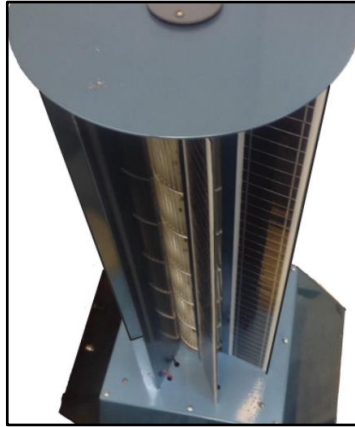
El aerogenerador de velas desplazables que se describe en [15] comprende una estructura giratoria a un eje vertical sobre la cual está montada una turbina eólica que mueve un generador eléctrico, además está provisto de una serie de paneles fotovoltaicos que son operativos cuando no existe una corriente de viento suficiente para el funcionamiento del aerogenerador. Este aerogenerador contiene un seguidor solar que controla la posición de la plataforma giratoria de apoyo enfrentándola al sol y moviendo la inclinación de la turbina. [15]

El método y aparato de la patente [16] se refiere a la invención de un sistema de generación y almacenamiento de energía que se puede adaptar para el uso continuo e ininterrumpido, para convertirse en una fuente primaria de energía en lugares alejados de la red eléctrica. El sistema se diseña con un número y proporción predeterminados de cada tipo de estación de molino de viento para hacer que el sistema sea económico y energéticamente eficaz, cada estación de uso inmediato tiene preferiblemente una turbina de viento horizontalmente orientada y un generador eléctrico localizados en la base del molino de viento. Cada estación de almacenamiento de energía está conectada a un compresor que convierte la fuerza del viento extra en energía por aire comprimido canalizándolo a uno o más tanques de almacenamiento para después liberarlo cuando los vientos son leves o en ausencia de ellos, y así obtener un suministro ininterrumpido. [16]

El Instituto de Energía de Moscú (MPEI) publicó en el artículo [17] un generador híbrido que combina dos fuentes de energía, la eólica y la solar con dos transformadores, dos baterías albergado en una estructura reforzada y una serie de paneles solares fijos. El prototipo logró el mejoramiento de un 40% en el rendimiento en conjunto de las dos fuentes de energía en comparación a sus homólogos modernos y la reducción del ruido. [17]



**Figura 2** Pereváyov y L. Primak mostrando el Generador solar-eólico híbrido.



**Figura 3** Generador solar-eólico híbrido.



**Figura 4** Serie de paneles fotovoltaicos en el generador solar-eólico híbrido.

---

# CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEORICOS PARA EL GENERADOR HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR.

## 2.1 Energía Eólica

La energía eólica es la que aprovecha la energía del viento para producir energía eléctrica o energía mecánica. La utilización de esta energía es una de las más antiguas, se ha usado para navegar, moler trigo, bombear agua, etc.

El elemento que se ocupa de la transformación energética es el aerogenerador o molino de viento: se habla de aerogeneradores cuando se quiere producir energía eléctrica, y de molinos de viento cuando se produce energía mecánica.[18]

### 2.1.1 Ventajas de la energía eólica

- Es renovable ya que tiene su origen en procesos atmosféricos
- Es limpia ya que no produce emisiones atmosféricas ni residuos contaminantes.
- No requiere combustión, es decir que no genera emisiones de dióxido de carbono, por lo que no contribuye al incremento del efecto invernadero ni al cambio climático.
- Puede instalarse en espacios no aptos para otros fines, por ejemplo, en zonas desérticas, próximas a la costa, en zonas áridas y muy empinadas para ser cultivables.
- Puede convivir con otros usos del suelo, como por ejemplo cosechas o tierras donde se lleve a cabo la actividad ganadera.
- Su utilización combinada con otros tipos de energía, habitualmente la solar, permite la auto alimentación de viviendas, terminando así con la necesidad de conectarse a la red eléctrica, pudiendo lograr autonomía.

### 2.1.2 Desventajas de la energía eólica

- El ruido producido por el giro del rotor o el roce de las aspas con el aire puede generar contaminación acústica, produciendo un impacto negativo en el contexto. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el ruido es proporcional al tamaño del aerogenerador, por lo que un generador de baja potencia no producirá cambios notables. Además, cabe recordar que dicho artefacto se ubica a una distancia prudencial de la vivienda a alimentar (aproximadamente 200 metros) lo que disminuye aún más la posibilidad de generar un impacto negativo en los usuarios.
- Comparada con las fuentes convencionales de energía, principalmente con la conexión a red, la eólica presenta costos elevados, sobre todo si se tiene en cuenta la inversión inicial.
- Al utilizar como recurso energético el viento, se debe considerar que éste no es constante, por lo que no es recomendable utilizarla como única fuente de energía. A

---

pesar de ello, gracias a los bancos de baterías desarrollados recientemente, la autonomía de los equipos eólicos domésticos ha aumentado en gran medida.[19]

## 2.2 Aerogeneradores

Los aerogeneradores son equipos que transforman la energía cinética del viento, en energía eléctrica. Pueden tener infinitas aplicaciones, siempre que se instalen en zonas ventosas. Uno de estos puede proporcionar mucha más energía que la mayoría de las células fotovoltaicas, sin embargo, el viento es un fenómeno aún más irregular que la radiación solar, y por lo tanto existen más dificultades en el tratamiento de la energía generada.

Generalmente las potencias nominales de los aerogeneradores se dan para unos vientos de 10-12 m/s. Como el viento no se da de manera continuada, es necesaria la instalación de baterías que almacenen la energía que se va produciendo cuando sopla el viento, para poder utilizarla en cualquier momento.[20]

### 2.2.1 Tipologías existentes

Existe una gran cantidad de variables utilizadas mediante las cuales es posible hacer una clasificación de los aerogeneradores. Sin embargo, dos de ellas resultan las más apropiadas.

La primera consiste en clasificarlos según la potencia que generan, medida en watts o vatios. De esta manera, se obtienen tres categorías perfectamente diferenciadas:

- **Aerogeneradores de potencia baja:** son aquellos que entregan una potencia de hasta 100 KW. Se utilizan principalmente para abastecer viviendas, así como establecimientos de pequeño tamaño, reservándose casi exclusivamente al ámbito privado. Se encuentran ubicados de manera dispersa alrededor del país.
- **Aerogeneradores de potencia media:** poseen una potencia de salida entre 100 KW y 30 MW, su aplicación se da generalmente en pequeños desarrollos comunitarios.
- **Aerogeneradores de potencia alta:** son aquellos capaces de generar más de 30 MW. Son utilizados para proveer electricidad a la red nacional, por ello se encuentran comúnmente en zonas con gran potencial eólico. En general, se instalan varios generadores juntos, formando un parque eólico.

El tamaño del aerogenerador está directamente ligado a la potencia que posee el mismo. Por lo tanto, un generador de baja potencia será considerablemente más pequeño que uno de alta potencia.



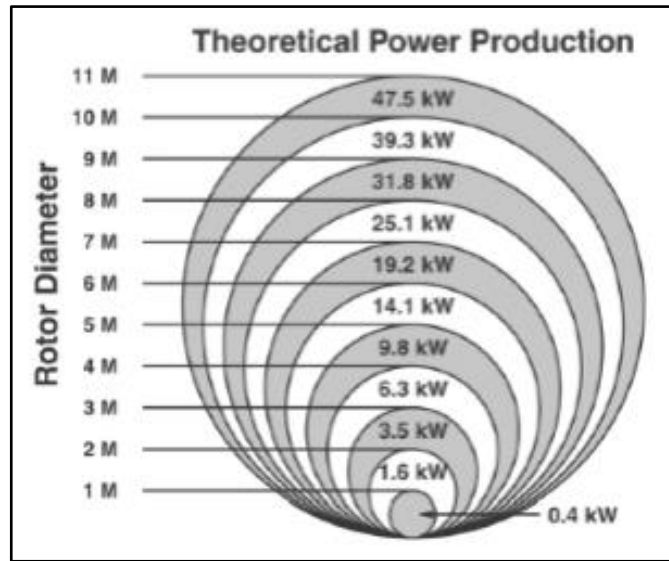


Figura 5 Relación entre diámetro del rotor y potencia producida.

La segunda manera de clasificar los aerogeneradores utiliza la posición del eje como elemento diferenciador, obteniéndose dos categorías:

- De eje horizontal.
- De eje vertical.

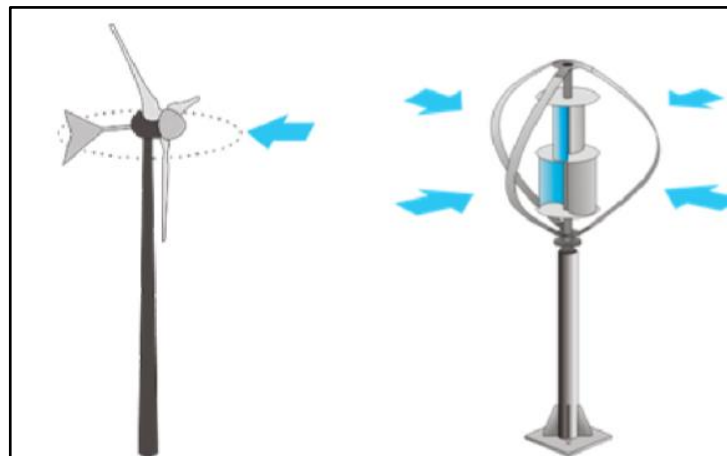


Figura 6 Tipos de aerogeneradores: Eje Horizontal / Eje Vertical.

---

### **2.2.1.1 Aerogeneradores de eje vertical**

Como su nombre lo indica, en este tipo de turbina eólica el eje de rotación del rotor se ubica perpendicularmente a la dirección del viento, por lo tanto, funcionan por el principio de arrastre. Posee la ventaja de no necesitar orientarse respecto a la dirección donde sopla el viento, aprovechando eficientemente la fuerza directa del viento sin desperdiciar parte de esta.

Otra de las ventajas que posee es que los equipos de generación y control se encuentran en el pie de la estructura, a nivel del suelo, lo cual simplifica y abarata considerablemente las operaciones de mantenimiento. Este beneficio también trae consigo una desventaja, ya que al encontrarse a menor altura tiene una menor actuación aerodinámica. Otra de las desventajas de esta tipología de aerogenerador es que la eficiencia de conversión energética es menor que los aerogeneradores de eje horizontal.

Son especialmente útiles en zonas de vientos arrachados y de direcciones cambiarias, gracias a su robustez y gran resistencia. Además, su fabricación requiere generalmente una menor inversión que la necesaria para un aerogenerador de eje horizontal de las mismas prestaciones

#### **Ventajas**

- Puede situar el generador, el multiplicador, etc. en el suelo, y puede no tener que necesitar una torre para la máquina.
- No necesita un mecanismo de orientación para girar el rotor en contra del viento.

#### **Desventajas**

- Las velocidades del viento cerca del nivel del suelo son muy bajas, por lo que a pesar de que puede ahorrarse la torre, sus velocidades de viento serán muy bajas en la parte más inferior de su rotor.
- La eficiencia promedio de las máquinas de eje vertical no es impresionante.
- La máquina no es de arranque automático, es decir necesitará un "empuje" antes de arrancar. Sin embargo, esto es sólo un inconveniente sin importancia, ya que puede utilizar el generador como motor absorbiendo corriente de red para arrancar la máquina.
- La máquina puede necesitar cables tensores que la sujeten, aunque esta solución no es practicable en áreas muy cultivadas.

### **2.2.1.2 Aerogeneradores de eje horizontal**

En este caso, el eje de rotación es perpendicular a la dirección del viento, funcionando bajo el principio de desplazamiento transversal. Una de las consecuencias inmediatas de esta característica es que es necesario el uso de un dispositivo para orientar la posición del rotor. En generadores pequeños, de baja potencia, dichos dispositivos resultan sencillos, pero a medida que aumenta el tamaño aumenta la complejidad. Una alternativa es la utilización de rotores a sotavento, en los que el viento incide en sentido contrario a los de barlovento. De esta manera,

---

el rotor se encarga de la orientación. La desventaja es que la torre hace sombra a las aspas, pudiendo dañar el rotor.

Esta tipología permite barrer mayores superficies que las de eje vertical, por lo que alcanzan potencias mayores y en cuanto a su altura se puede decir que se aprovecha beneficiosamente el aumento de la velocidad del viento con respecto a la distancia con el suelo.

Los rotores de eje horizontal pueden estar compuestos por una pala (monopala), dos palas (bipala) o tres palas (tripala). A medida que aumenta este número, disminuye la velocidad de rotación ya que cada aspa genera una estela que afecta el rendimiento de la que le sigue. Para la generación de energía eléctrica son necesarias grandes velocidades de rotación, por lo tanto, es preferible un menor número de aspas. Además, estas, debido al desarrollo del perfil aerodinámico que poseen, pueden ser muy costosas. Sin embargo, los rotores monopala o bipala generalmente poseen problemas de balanceo, afectando en gran medida su rendimiento y dañando a la vez el rotor. Por ello, los rotores tripala son los más utilizados en la actualidad, al punto que se han convertido en el sistema más reconocible de aerogeneradores.[21]

## **2.3 Energía Solar**

Es aquella que aprovecha la energía del sol que llega a la tierra, en forma de rayos. Se la puede considerar como energía primaria y todas las demás; es decir, la energía hidráulica, viento, carbón, combustibles, etc. son producto de ella.[22]

### **2.3.1 Celdas Solares**

Una celda solar es un dispositivo que representa la unidad fundamental de un sistema fotovoltaico. Típicamente, genera un voltaje de entre 0.5 y 0.8 V dependiendo del semiconductor utilizado y la tecnología con la que fue fabricado. Un panel solar es el conjunto de un determinado número de celdas solares (entre 36 y 72) conectadas en serie-paralelo y montadas sobre una placa metálica encapsulada por un aislante térmico. Un arreglo fotovoltaico es el conjunto de un determinado número de paneles solares conectados en serie-paralelo para la generación de una cantidad determinada de energía.

La generación de energía de una celda solar se ve afectada principalmente por la variación en la radiación solar incidente y en la temperatura de la celda. Al acoplar un conjunto de celdas solares, la energía generada aumenta linealmente debido a la variación incremental del voltaje y de corriente gracias a la configuración serie-paralelo. Una configuración en serie permitirá que el voltaje del conjunto incremente, manteniendo constante el flujo de la corriente. Por otro lado, una configuración en paralelo mantendrá un nivel de voltaje constante, incrementando el flujo de la corriente.[23]

---

### 2.3.2 Energía fotovoltaica

La conversión directa de la energía solar en energía eléctrica se debe al fenómeno físico de la interacción de la radiación luminosa con los electrones en los materiales semiconductores, fenómeno conocido como efecto fotovoltaico, este fenómeno tiene lugar en la célula solar.

### 2.3.3 Sistemas Fotovoltaicos

Se define como sistema fotovoltaico el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que captan y transforman la energía solar disponible, en energía eléctrica utilizable.

Estos sistemas, independientemente de su utilización y del tamaño de potencia, se pueden dividir en dos categorías:

- Sistemas aislados.
- Sistemas conectados a la red
- 

### 2.3.4 Estructura de un módulo

Los módulos fotovoltaicos tienen estructuras y formas muy variadas, según los diferentes fabricantes. En forma general un módulo solar puede estar formado por: Cubierta exterior, Capa encapsulante anterior, Células fotovoltaicas, Capa encapsulante posterior, Protección posterior, Marco soporte, Contactos eléctricos de salida.[24]

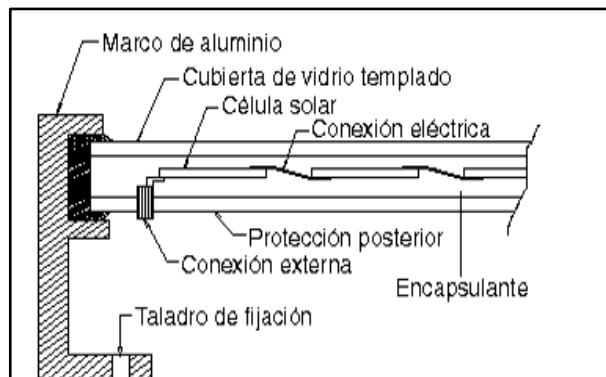


Figura 7 Corte transversal de un panel fotovoltaico.

---

## 2.4 Generador eléctrico

Se distinguen tres tipos de generadores eléctricos, que son los más usados en los aerogeneradores, cuyas características y aplicaciones son muy diferentes. En los aerogeneradores son utilizados frecuentemente los generadores de imanes permanentes, por su parte, para los de potencia los síncronos y asíncronos son los más adecuados.

La generación es trifásica por razones de rendimiento. Sin embargo, en las turbinas es conveniente rectificarla y suministrarla en corriente continua con los valores típicos de 12 y 24 voltios[25]

### 2.4.1 Devanados y campos en el generador

Para generar electricidad se debe empezar con un campo magnético principal, este se puede producir por un imán permanente que puede ser parte del estator, o bien, puede ser del rotor como se muestra en la siguiente figura:

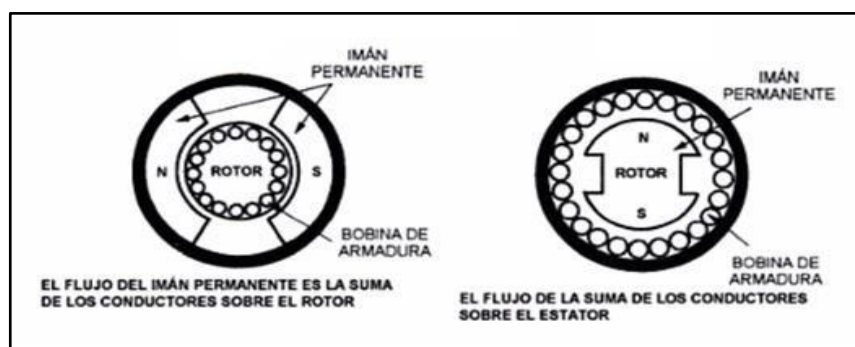


Figura 8 Devanados Y Campos Generadores.

Los conductores en los que se induce la electricidad forman el devanado de armadura. En los generadores de corriente alterna para ciertas aplicaciones, el devanado de armadura está en el estator. La electricidad se genera combinando la suma de movimientos de los flujos.[26]

### 2.4.2 Alternador de imanes permanentes

En un alternador de imanes permanentes (PMA), los imanes están montados en el rotor o también llamada armadura. No hay ninguna conexión eléctrica a la armadura, mueve los imanes simplemente. Cada imán tiene dos polos, norte (N) y sur (S). Los imanes se orientan en el rotor para que los polos queden alternando N-S-N-S.

El estator es la otra parte que se encuentra estática. Consiste en una serie de bobinas; sobre el estator se alternan en la dirección en la que se enrollan, en el sentido de las agujas del reloj y contrario al sentido de las agujas del reloj. Las bobinas e imanes se encuentran espaciadas uniformemente entre sí.[27]

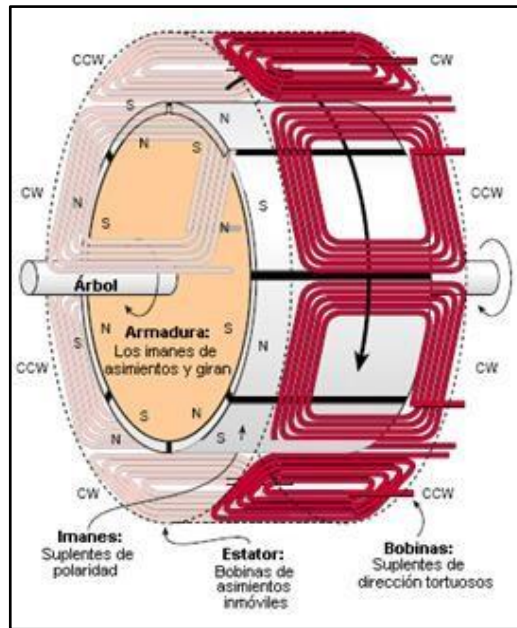


Figura 9 Alternador de Imanes Permanentes.

## 2.6 Tipo de transmisión

Las correas son elementos de transmisión de potencia, basan su funcionamiento en las fuerzas de fricción. Este sistema es un conjunto de dos poleas, situadas a cierta distancia, acopladas por medio de una correa. Según el tamaño de las poleas existen dos tipos: Sistema reductor de velocidad y sistema multiplicador de velocidad.

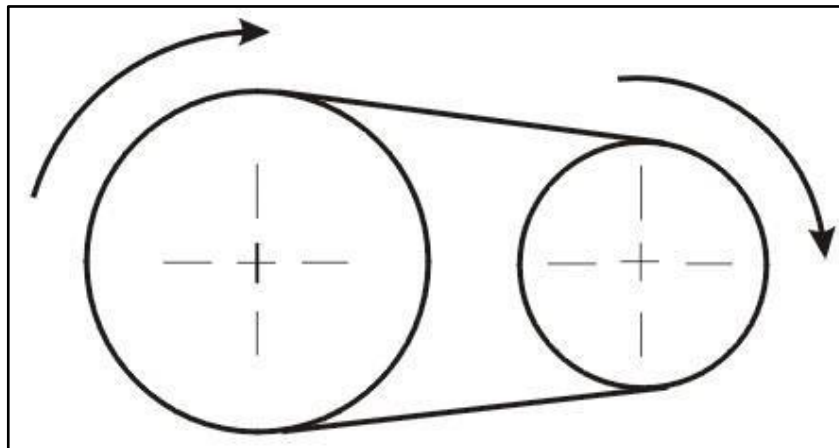


Figura 10 Sistema de Poleas.

Para el aerogenerador se utiliza un sistema multiplicador de velocidad, en el cual la polea de salida (conducida) gira a mayor velocidad que la polea de entrada (motriz).

---

La relación entre ambas poleas se define de la siguiente manera: [28]

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{D_1}{D_2}$$

- $n_2$ : velocidad de la polea conducida
- $n_1$ : velocidad de la polea motriz
- $D_1$ : diámetro de la polea motriz
- $D_2$ : diámetro de la polea conducida

---

## CAPÍTULO 3 DISEÑO DEL GENERADOR HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR DE BAJA POTENCIA

Este apartado se muestra el diseño realizado el cual permite la manufactura de nuestro generador. Se analizará el diseño desde un concepto general permitiéndonos la identificación de cada uno de los elementos del sistema para conseguir el diseño general del generador híbrido.

### 3.1 Diseño del sistema

El diseño del generador híbrido eólico-solar de baja potencia se dividió en 2 bloques: el Diseño mecánico y el Diseño eléctrico; por su parte el diseño eléctrico se subdivide en la parte de generación eléctrica eólica y la generación eléctrica solar. La unión de estos bloques constituye el sistema completo. A continuación, se definen cada uno de los bloques y actividades a realizar para la conclusión de la metodología.

#### 3.1.1 Diseño Mecánico

Dentro de este primer bloque, se realizó un estudio acerca del aprovechamiento y la viabilidad en cuanto al posicionamiento e instalación del Generador eléctrico desde una perspectiva mecánica y no eléctrica dentro del aerogenerador.

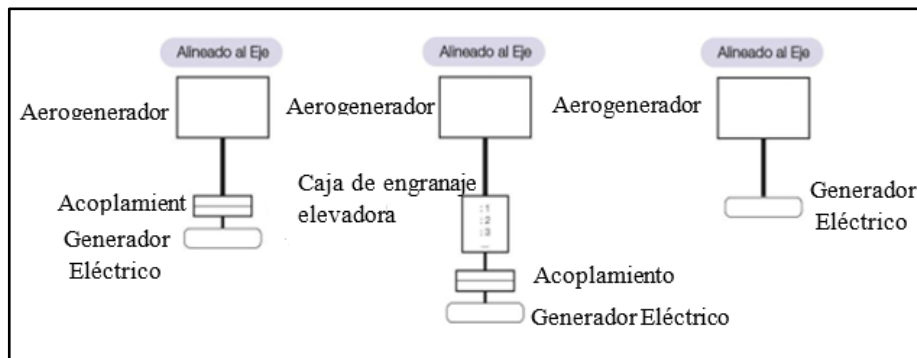


Figura 11: Acoplamientos mecánicos alineados al eje.

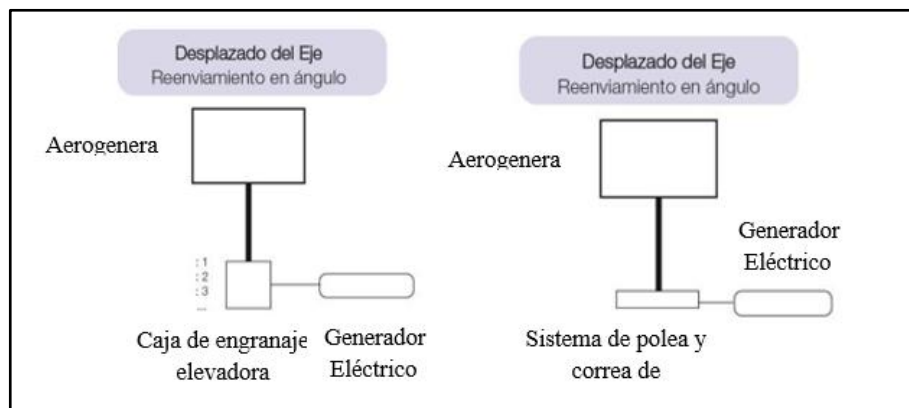


Figura 12: Acoplamientos mecánicos desplazados al eje.



---

De acuerdo con la investigación de distintos artículos y hojas de especificaciones sobre acoplamientos mecánicos de generadores eléctricos, se realizaron pruebas con un acoplamiento desplazado al eje del generador eólico, que incluye una caja de engranaje elevadora que permitió alcanzar las RPM'S necesarias para un buen funcionamiento del generador eléctrico.

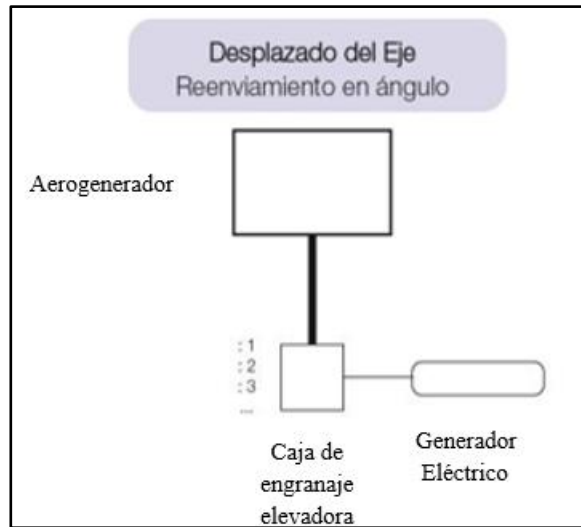


Figura 13 Acoplamiento seleccionado para el generador eléctrico.

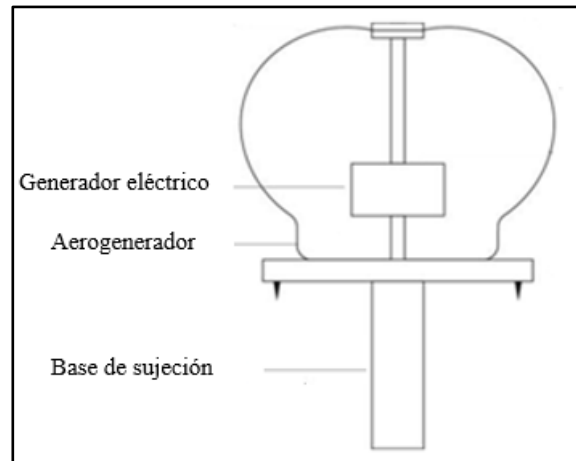
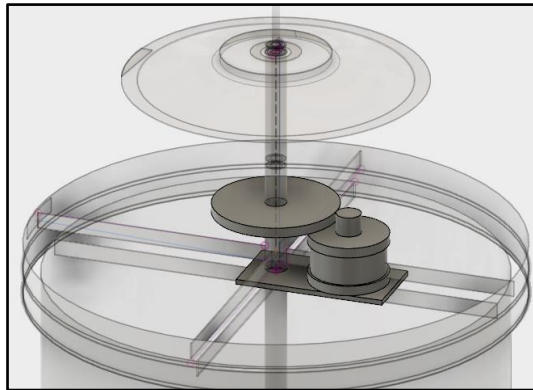
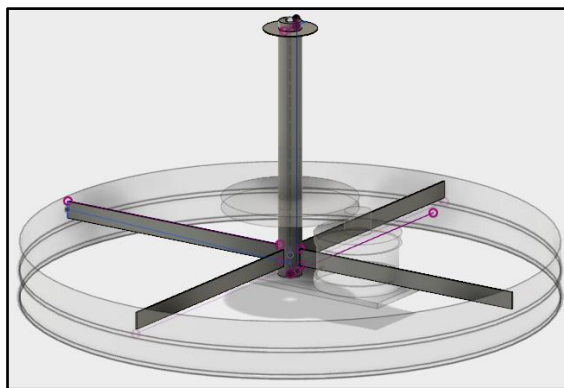


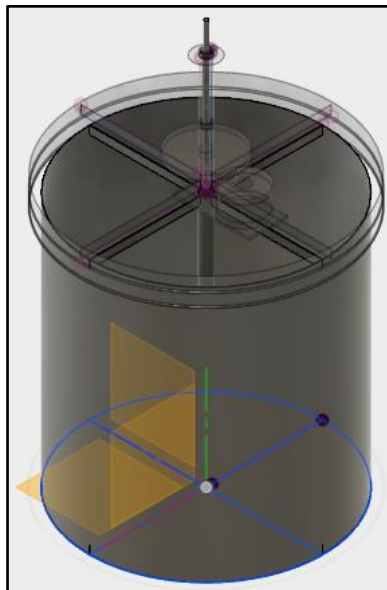
Figura 14 Diseño estructural del sistema de generación de energía eólica.



**Figura 15** Diseño del Sistema de transmisión, rotor y generador en FUSION 360.



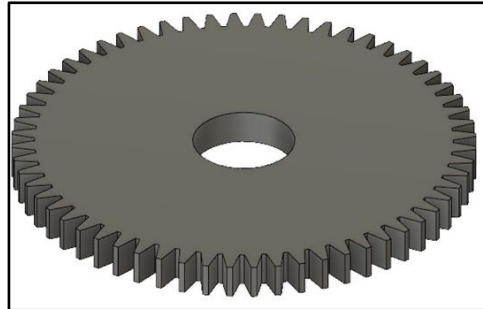
**Figura 16** Diseño de Adaptador y eje en FUSION 360.



**Figura 17** Diseño de la Base y soporte del aerogenerador en FUSION 360

---

A causa de factores limitantes para la manufactura del engrane motriz, se tomó la decisión de utilizar un volante inercial automotriz en el proyecto dado que sus características son muy similares a las que se necesitaban. La siguiente figura presenta el diseño final del engrane motriz.



**Figura 18** Diseño final de engrane motriz.

### **3.1.2 Diseño Eléctrico**

En este apartado se mencionan cada parte y dispositivo eléctrico con el que cuenta nuestro generador híbrido eólico-solar de baja potencia, esto considerando las necesidades propias del proyecto.

#### **3.1.2.1 Generador Eléctrico**

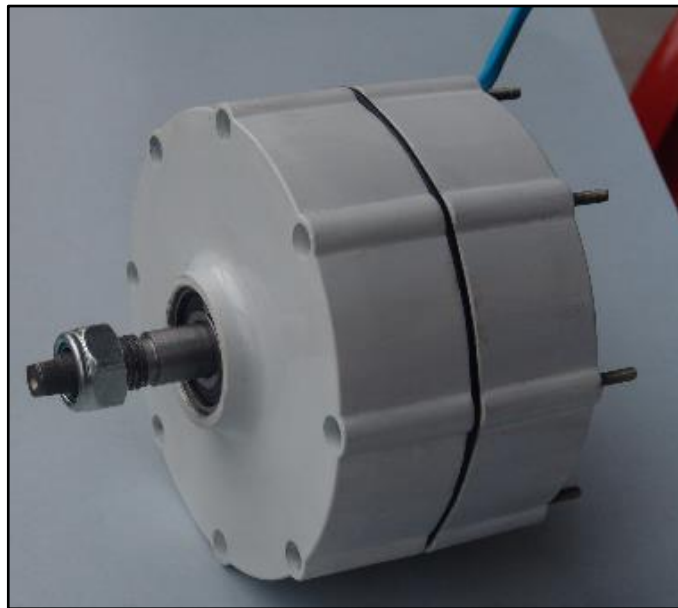
Para la parte de diseño eléctrico se utilizó un generador eléctrico de imanes permanentes NE-500M2 de 3 fases que entrega 12/24V dependiendo del arreglo eléctrico y el regulador de voltaje con el que se conecte. Este tipo de generador eléctrico es ideal dado su diseño y practicidad ya que funciona a bajas rpm.



**Figura 19** Generador eléctrico NE-500M2 de bajas RPM



**Figura 20** Generador eléctrico NE-500M2 de bajas RPM



**Figura 21** Generador eléctrico NE-500M2 de bajas RPM

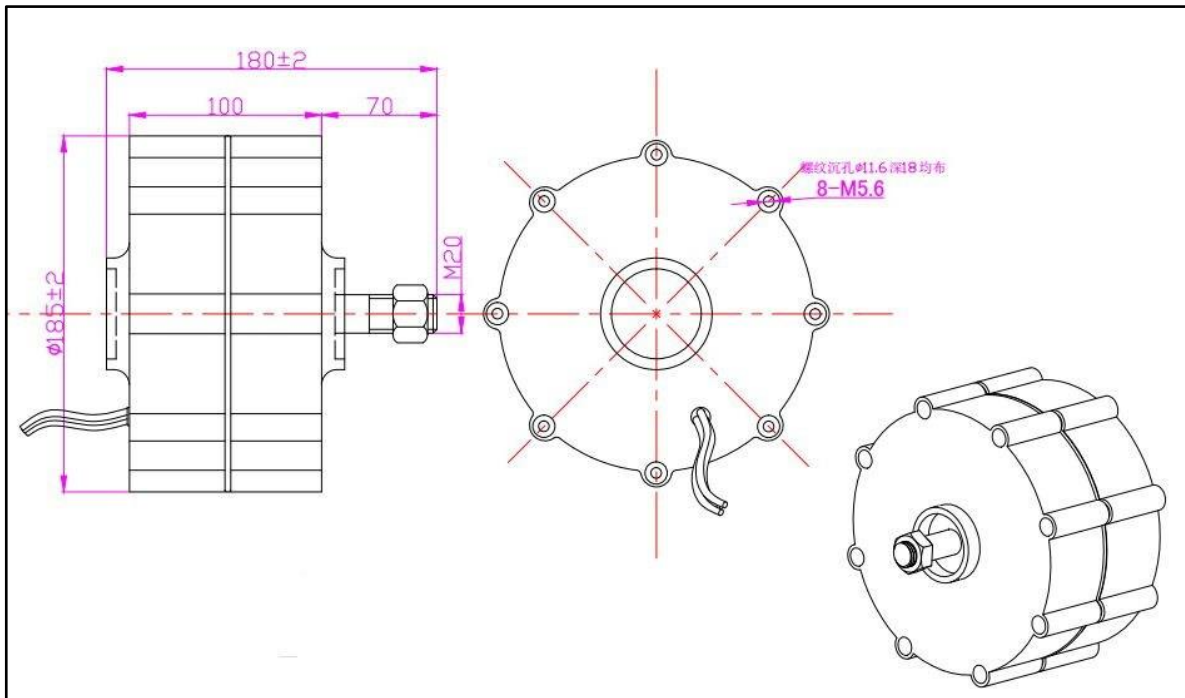


Figura 22 Dibujo técnico del generador eléctrico NE-500M2

<b>Datos Técnicos</b>	
Modelo	NE-500M2
Potencia nominal (W)	500 W
Potencia máxima (W)	536 W
Tensión nominal (V)	12/24/48 V
Velocidad de rotación nominal (R/M)	600r/m
Peso neto superior (kg)	7.2
Corriente de salida	AC
Generador	Generador síncrono de imán permanente de 3 fases
Clase de aislamiento:	F
Rodamiento	HRB
Material del eje	Acero inoxidable
Carcaza	Aleación de aluminio
Material de imán permanente	Tierra rara <u>NdFeB</u>
Grado de protección	IP54
Lubricación	Grasa de lubricación

Tabla 1: Datos técnicos del generador eléctrico NE-500M2

---

### 3.1.2.2 Regulador de voltaje eólico

Para regular el voltaje del generador eólico se ocupó un regulador trifásico, que transforma la corriente alterna producida por el aerogenerador en corriente continua para cargar las baterías. Como se ocupó un generador eólico de 200W el regulador debe ser apto para el rango de aplicación. Este controlador evita problemas de sobrecarga en las baterías ya que contiene un control de frenado automático para el generador eólico, una vez que el voltaje de la batería sea menor al voltaje nominal reinicia la carga.

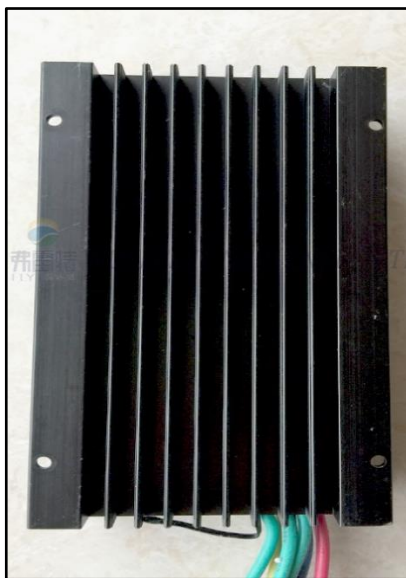


Figura 23 Regulador de voltaje para generador eólico FWS02-12

Modelo	FWS02-12
Voltaje nominal de la batería	12V
Energía nominal del viento	200W
Voltaje de frenado	15V
Voltaje de retorno del freno	13.5V
Corriente de freno	30A
Modo de visualización	LED
Temperatura de trabajo	-35°C+75°C
Medidas	100mm×87mm×28mm
Corriente quieta	≤20 mA
Clase impermeable	IP67

Tabla 2: Especificaciones del regulador FWS02-12

---

### 3.1.2.3 Celdas fotovoltaicas

Para el sistema solar, las celdas fotovoltaicas son las encargadas de captar la radiación solar y transformarla en electricidad. Estas celdas solares se integraron en un panel diseñado para albergar los arreglos en serie y paralelo y así lograr obtener una corriente eléctrica suficiente para cargar un banco de baterías.

Se usaron celdas fotovoltaicas policristalinas ya que tienen una mayor resistencia al sobrecalentamiento y su funcionamiento es óptimo en climas habitualmente cálidos, pues absorben el calor a mayor velocidad que las celdas fotovoltaicas monocristalinas y cuentan con una mayor resistencia ante el sobrecalentamiento además de su bajo costo para el diseño y uso en el desarrollo de nuevos paneles solares.

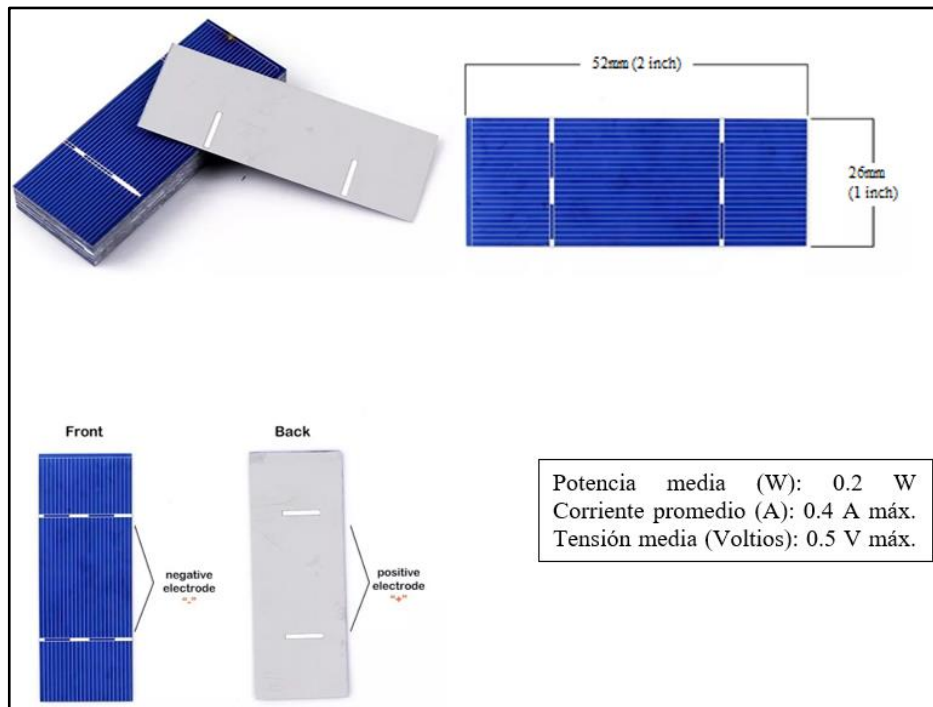


Figura 24: Celdas fotovoltaicas de 0.2W

Para el diseño del panel solar se acoplaron en una base pentadecágona un total de 225 celdas fotovoltaicas de 0.5V y 0.5A divididas en 45 grupos de 5 celdas en paralelo, posteriormente se conectaron 3 grupos de estos en serie para obtener un conjunto de 15 celdas principales las cuales generan 1.5V. Por último, se conectaron los 15 conjuntos de 15 celdas en serie con lo cual se obtienen 22.5V y 1.5A.

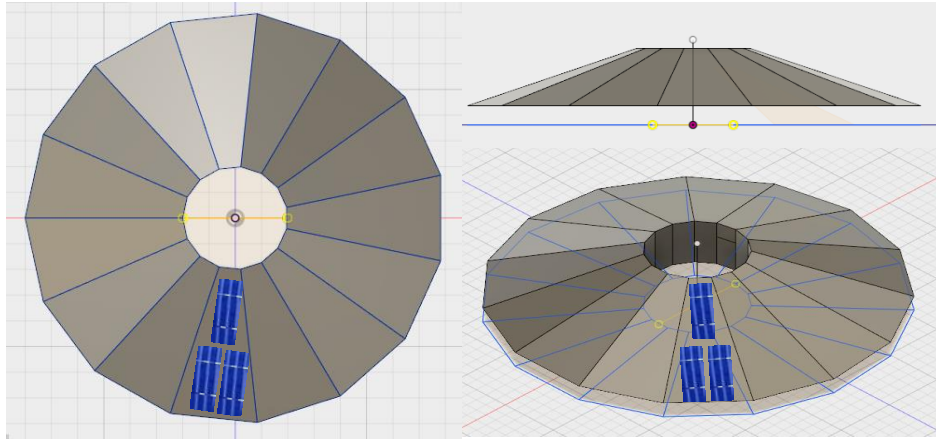


Figura 25: Diseño de base para celdas fotovoltaicas en FUSION 360.

#### 3.1.2.4 Regulador de voltaje solar

El regulador de voltaje solar o regulador de carga es un dispositivo necesario en la generación de energía solar ya que se encarga de controlar la entrada a las baterías de la energía generada en las celdas fotovoltaicas. El regulador permite, por un lado, alargar la vida de la batería y por el otro, obtener información y parámetros del buen funcionamiento del sistema.

Permite el paso de la electricidad según el estado de carga en que se encuentre la batería. Si se encuentra completamente cargada, cortará el paso de corriente para evitar sobrecargas o un sobrecalentamiento.

Existen 2 tipos de reguladores de carga, el PWM, y el MPPT o maximizador. El uso de uno u otro depende del número de celdas fotovoltaicas con el que cuente el panel solar. Si se tratan de placas solares de 36-72 celdas o bien paneles de hasta 200W será suficiente usar un regulador PWM.



Figura 26 Regulador de carga solar PWM de 360W



<b>Controlador PWM RBL-30A</b>	
Voltaje de la batería	12 V/24 V auto
Corriente de carga	30A
Corriente de descarga	30A
Entrada solar máximo	25 V (para batería 12V)
Ecuación	14.4V (sellado) 14.2 V (gel) 14.6 V (inundación)
Flotador	13.7V (por defecto, ajustable)
Cierre de descarga	10.7V (por defecto, ajustable)
Descarga reconexión	12.6V (por defecto, ajustable)
Descarga reconexión	12.6V (por defecto, ajustable)
Salida USB	5V/3 <sup>a</sup>
Auto-consumir	<10mA
Temperatura de funcionamiento	-35 °C ~ + 60 z°C

**Tabla 3 Especificaciones del controlador PWM RBL-30A**

Este capítulo mostró el diseño de cada uno de los elementos considerados para el desarrollo general de nuestro generador híbrido eólico-solar, el considerar cada uno de los elementos y abordar su diseño, facilita la integración tras la manufactura de estos elementos. El siguiente apartado muestra la manufactura y la integración final del prototipo funcional del generador híbrido.

---

## **CAPÍTULO 4 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO Y DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL GENERADOR HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR**

En el capítulo anterior se mostró el diseño de cada uno de los subsistemas que componen nuestro generador híbrido eólico-solar de baja potencia. Así como su funcionamiento y la distribución de dichos subsistemas, permitiendo la integración final y desarrollo de nuestro trabajo.

Por lo tanto, en este capítulo se presenta la fabricación de los diseños mencionados anteriormente y su integración. Así mismo se presentan los resultados obtenidos de la medición de generación eléctrica eólica y solar.

### **4.1.1 Construcción del sistema de transmisión.**

La construcción del sistema de transmisión se realizó de manera que permitiera multiplicar la velocidad del engrane motriz, con una relación de vueltas 1:18 al engrane conducido, esto para satisfacer los requerimientos del generador de imanes permanentes, que necesita 600 RPM para su pleno funcionamiento.

#### **4.1.1.1 Fabricación del engrane conducido.**

El engrane conducido, se fabricó en acero como se muestra en la figura siguiente.



**Figura 27 Engrane conducido**

La Figura 27 muestra el engrane conducido de 9 dientes rectos soldado a una tuerca hexagonal autoblocante la cual se acopla al generador eléctrico NE-200M2.

---

#### 4.1.1.2 Fabricación del engrane motriz.

Con respecto al engrane motriz, tal como se mencionó en el capítulo anterior, se utilizó y modificó un engrane comercial.



**Figura 28 Engrane motriz**

La Figura 29 muestra el engrane motriz de 162 dientes rectos, el cual tuvo algunas modificaciones, tales como la remoción de sus componentes de sujeción, el acoplamiento y soldado al eje motriz del aerogenerador.

En la Figura 29 se muestra el eje del aerogenerador en el cual se acoplo y soldó el eje motriz.



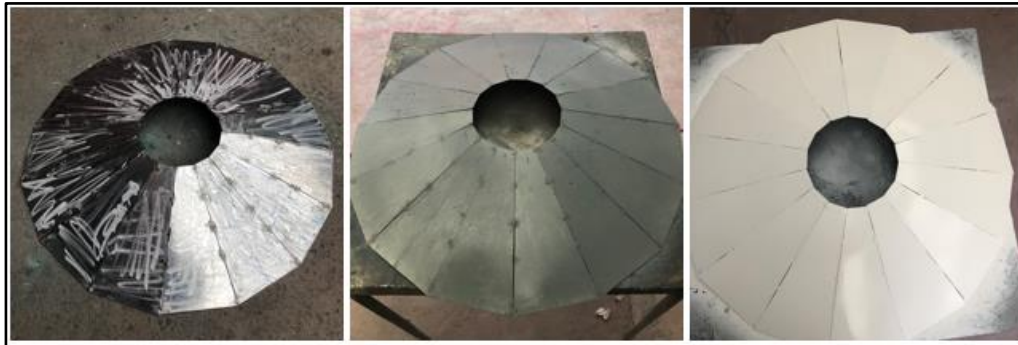
**Figura 29 Vista inferior del Aerogenerador y eje motriz**

---

#### 4.1.2 Construcción del panel solar pentadecágono.

Con el diseño presentado en el capítulo anterior, se procedió a la fabricación del panel solar pentadecágono.

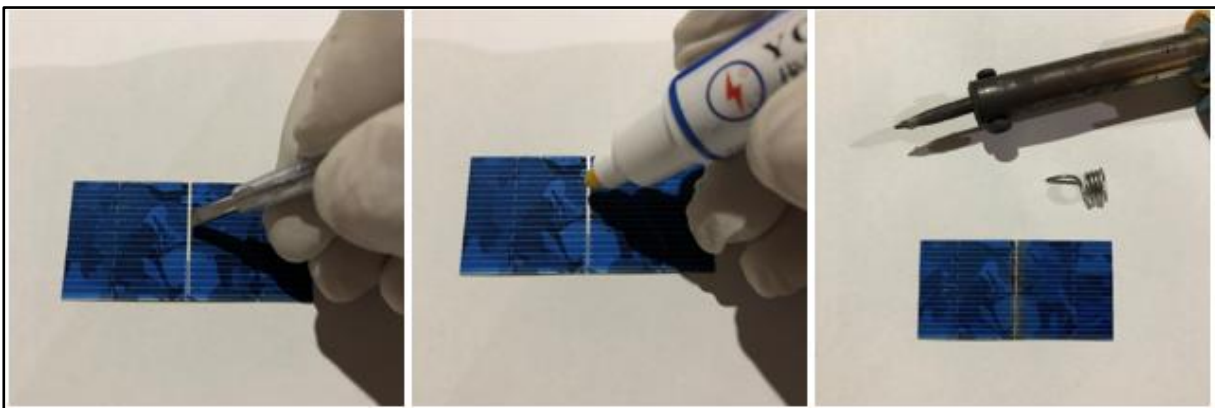
Las siguientes figuras muestran una serie de pasos para la fabricación la base del panel solar pentadecágono fabricada en lámina galvanizada calibre 16.



**Figura 30: Base del panel solar pentadecágono.**

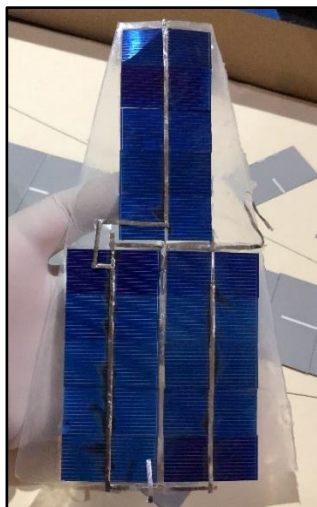
En la figura 32 se pueden observar los procesos de soldado, emprimado y pintado para la fabricación de la base del panel solar.

Posteriormente se fabricaron los conjuntos de celdas en base a la determinación de celdas por sección analizadas en el apartado anterior, dicho proceso de manufactura se muestra en la figura 33.



**Figura 31: Proceso de soldado de celdas solares.**

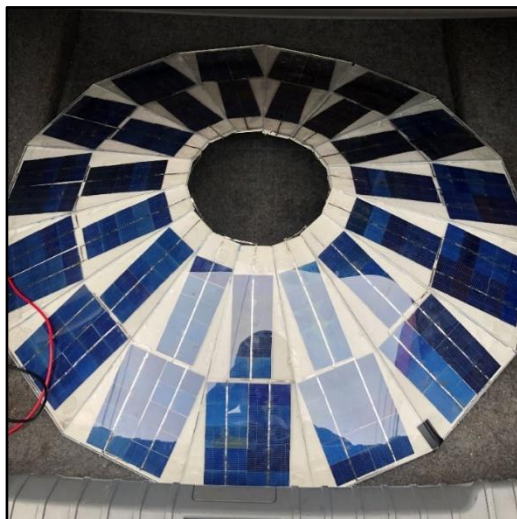
El proceso de soldado que se muestra en la figura 33 se aplicó en cada una de las 225 celdas solares que conforman el panel solar pentadecágono, y consistió en remover la capa protectora de las pistas, la aplicación de Flux y la aplicación de soldadura en las pistas. Todo esto para agruparlas como se muestra en la figura 34.



**Figura 32: Agrupación de celdas solares**

Cada una de las caras del panel solar alberga 15 celdas solares distribuidas en grupos de 5 celdas conectadas en paralelo como se muestra en la figura 34, estos 3 grupos se conectan en serie para obtener un total de 1.5VCD como fue planteado en el diseño del capítulo anterior.

La Figura 33 muestra el panel solar pentadecágono cada una de sus caras está recubierta de EVA (ethylene vinyl acetate) Film y de acrílico transparente de 6 mm para su protección final con el exterior, integrado con cada uno de los 15 conjuntos de celdas solares manufacturadas.



**Figura 33 Vista superior del panel solar pentadecágono.**

#### **4.2 Pruebas experimentales por módulo.**

Se realizaron un conjunto de pruebas para validar el funcionamiento de nuestro sistema, además de corroborar individualmente los elementos que lo conforman para cerciorarnos de que cada elemento por si mismo trabajara de acuerdo a lo esperado. A continuación, en los siguientes puntos se analizarán de manera individual cada sección del generador híbrido.

---

### 4.2.1 Prueba de Generación de energía eólica.

Para el caso de generación de energía eólica se realizaron pruebas al generador eléctrico de imanes permanentes NE-200M2 de bajas RPM y 3 fases, conectado al regulador de voltaje FWS02-12.



Figura 34 Prueba al generador eléctrico NE-200M2

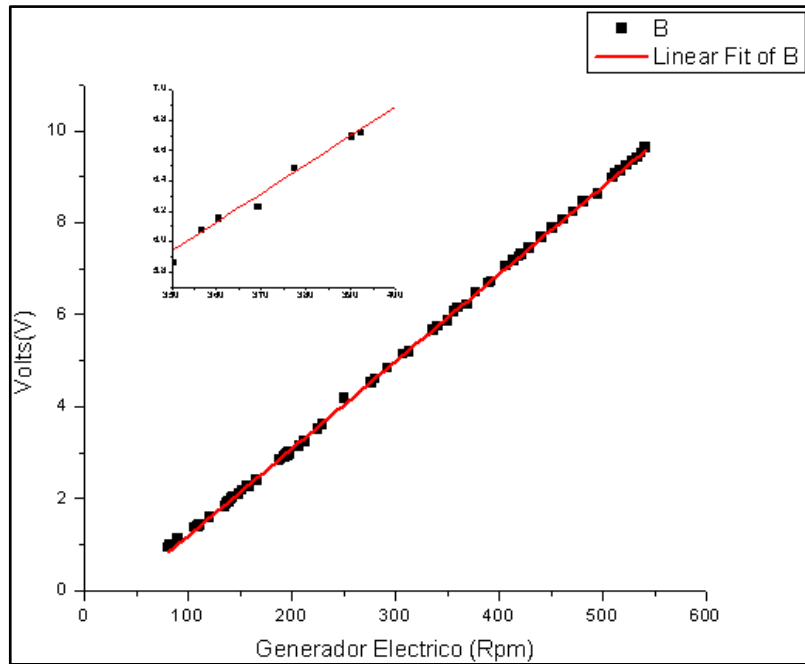
En la figura 36 se muestra al generador eléctrico NE-200M2 conectado al regulador de voltaje FWS02-12. Para poder medir su desempeño, se acoplo un taladro eléctrico para poder mover el a 600 RPM.

Para la siguiente prueba se hizo uso de un tacómetro digital MASTECH MS6208B y un multímetro digital para medir las revoluciones y el voltaje generado.



Figura 35: Tacómetro y multímetro digital.

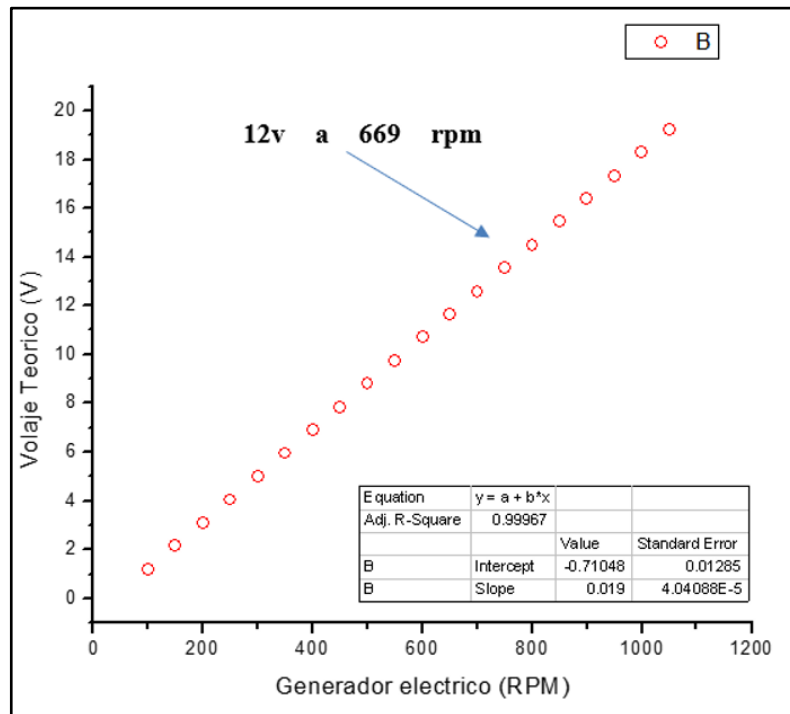
En la Figura 35 se muestran los instrumentos de medición que se ocuparon para la obtención de datos necesarios para graficar la relación de voltaje con respecto a las RPM aplicadas al generador eléctrico. La Gráfica 1 muestra el voltaje generado en un rango de 80-540 rpm.



Gráfica 1: Generación eléctrica y obtención del modelo matemático del sistema.

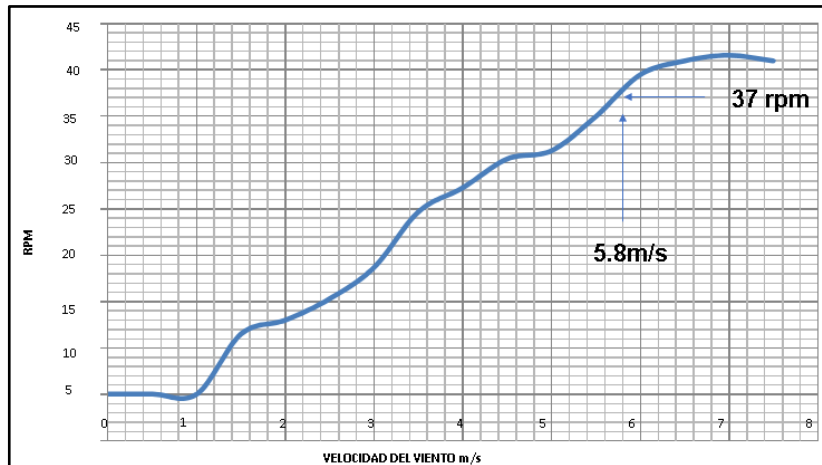
La siguiente grafica se obtuvo mediante el uso del modelo matemático:

$$X = (12 + 0.71048 / 0.019)$$



Gráfica 2: Calculo de rpm necesarias para el generador eléctrico NE-200M2.

En la Gráfica 2 se observa el comportamiento teórico resultante del generador eléctrico mediante el uso del modelo matemático, este fue necesario dado que las RPM del taladro eléctrico empleado en la prueba solo alcanzaba 540 RPM como se analizó en la gráfica 1. En base al modelo matemático se estimó que son necesarias 669 RPM para la obtención de los 12V ideales para la generación eléctrica y carga de las baterías.



Gráfica 3: Prueba de RPM del aerogenerador en relación a la velocidad de viento.

Para la prueba de velocidad de viento se utilizaron compresores de aire a una distancia de 0.5m simulando condiciones de viento entre 0-8 m/s, verificando los datos mediante un anemómetro y tacómetro digital.

Debido a la relación de vueltas 1:18 diseñadas previamente entre el número de RPM necesarias para la generación de 12 VCD, son necesarias rachas de viento de 5.8m/s, otorgando al generador las 669 RPM gracias al sistema de engranaje multiplicador diseñado.

#### 4.2.2 Prueba de eficiencia de panel solar.

Se realizaron varias pruebas en días soleados y en nublados a las celdas solares tanto individualmente como al panel solar terminado, en ambos casos, se midió el flujo luminoso mediante un luxómetro digital TACK LIFE LM01, para tener un referente del cambio de la iluminancia. Se midieron los voltajes y corrientes de cortocircuito.



Figura 36 Prueba individual a celda solar.



---

En la Figura 1 se muestra el voltaje y corriente de cortocircuito generado por una celda solar, a una iluminancia de 16,370 lumen/m<sup>2</sup>. Cada una de las 225 celdas solares fue probada individualmente. Tras la comprobación individual se prosiguió a corroborar el funcionamiento del conjunto de 15 celdas como se muestra en la figura siguiente.



**Figura 37 Prueba de celdas solares agrupadas.**

La Figura 37 muestra uno de los resultados obtenidos en las pruebas que se realizaron a cada uno de los conjuntos de 15 celdas solares que constituyen el panel solar pentadecágono. En este caso se puede apreciar que el conjunto genera 1.584 VCD como se previó en el diseño del capítulo anterior. Por lo que se prosiguió al armado del panel solar como lo muestra la Figura 38.



**Figura 38 Panel solar pentadecágono.**

Una vez terminado de armar el panel solar pentadecágono como lo muestra en Figura 38 se realizaron pruebas de funcionamiento midiendo el voltaje y la corriente generada por el mismo.



**Figura 39 Salida del generador.**

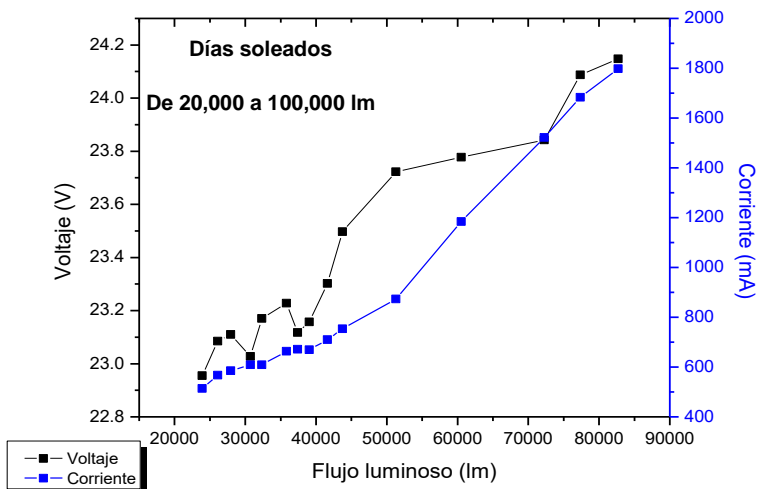
En la Figura 39 se muestra al panel solar pentadecágono generando 23.03V, a una iluminancia de 23,460 lumen/m<sup>2</sup>. En este caso el controlador de carga solar PWM RBL-30, regula el voltaje de salida a 13.7V y estabiliza la carga de la batería a 12.84V como se puede observar en Figura 40.



**Figura 40: Controlador regulando el voltaje hacia la batería.**

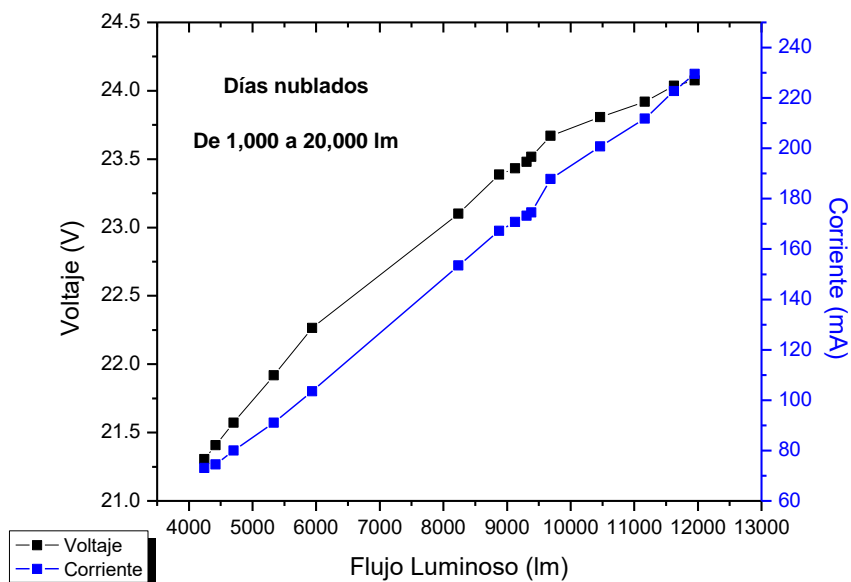
Los resultados obtenidos del panel solar en días soleados y nublados se muestran en las gráficas siguientes:

La Gráfica 4 muestra las pruebas realizadas en las coordenadas latitud:18.8559041 y longitud: -97.0968712 en días con poca nubosidad, soleado el mes de enero. Con una temperatura promedio de 21.6°C sobre el panel solar. Se puede observar que la corriente es proporcional al flujo luminoso y su desempeño no se ve críticamente afectado por la densidad brumosa, a diferencia del voltaje en el cual sufre caídas.



Gráfica 4: Prueba de generación solar en días soleados.

En la Gráfica 5 se muestran las pruebas realizadas en la misma coordenada anterior en días con densidad nubosa alta, el mes de enero con una temperatura promedio de 16.7°C sobre el panel solar. El comportamiento del voltaje y de la corriente cuando la densidad de las nubes es alta, es muy similar para ambos casos, y solo varía muy ligeramente cuando se despeja.



Gráfica 5: Prueba de generación solar en días nublados.

---

### 4.3 Integración del aerogenerador híbrido eólico-solar

Anteriormente se vio la manufactura de cada uno de subsistemas en el que se dividió el sistema, así como las pruebas experimentales por módulo, a continuación, mostraremos la integración completa del generador híbrido eólico-solar de baja potencia. Donde la figura 42 muestra la integración final de todos los elementos que conforman al generador híbrido eólico-solar.

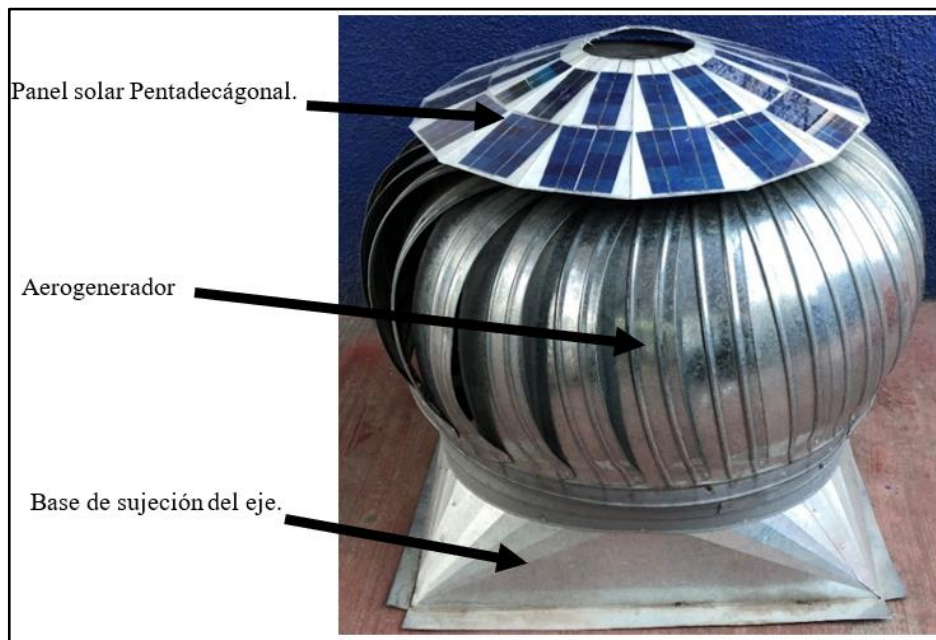


Figura 41: Prototipo del generador híbrido eólico-solar de baja potencia.

Cada uno de los elementos del sistema se muestra en la Figura 41. En la parte superior, se puede observar el panel solar pentadecágono sujeto del eje central. Por otro lado, en el centro podemos observar el aerogenerador el cual gira sobre el eje central mediante dos rodamientos y en la parte inferior se encuentra la base de sujeción del eje.

La Figura 42 presenta la integración del generador eléctrico NE-200M2 con el sistema de transmisión.

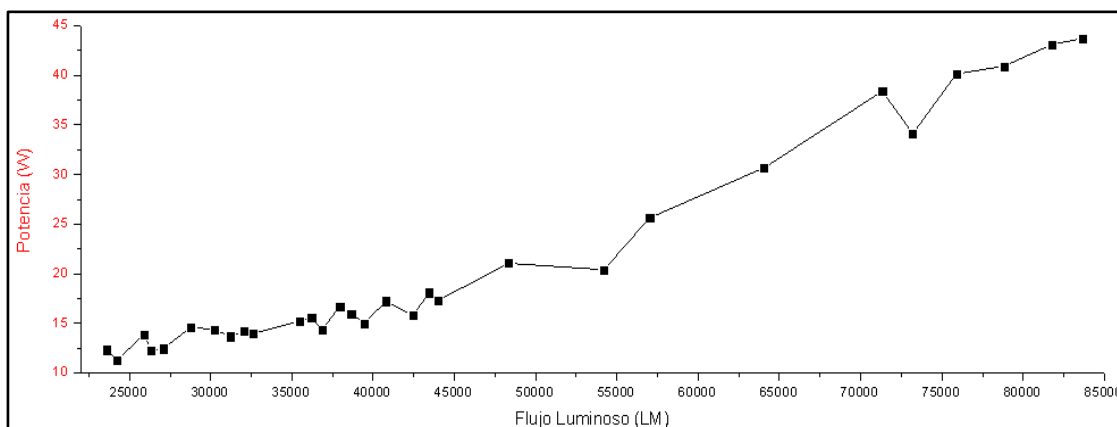


Figura 42: Sistema de transmisión del generador eléctrico NE-200M2.

Como se puede observar en la Figura 42, el generador eléctrico NE-200M2 se encuentra en el interior de la base del aerogenerador, este está sujeto por medio de 4 tornillos los cuales calibra la distancia entre dientes del engrane motriz y el engrane conducido.

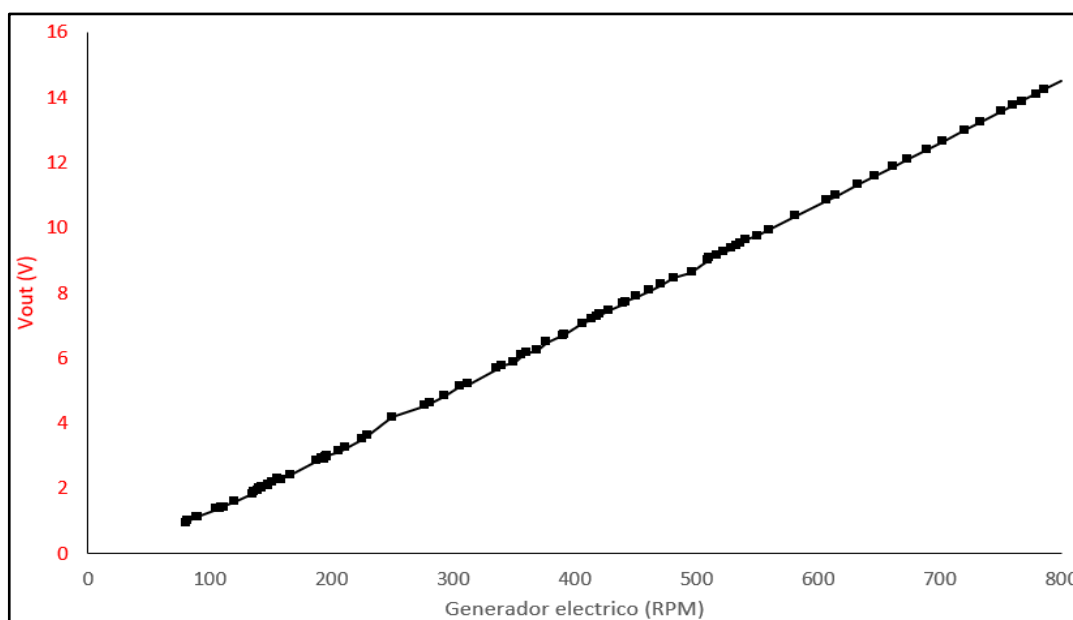
#### 4.4 Análisis de resultados

Con los resultados obtenidos en la experimentación descrita previamente se pudo obtener la relación entre el flujo luminoso con respecto a la potencia obtenida por el sistema. Esta relación se observa de manera más detallada en la Gráfica 6.

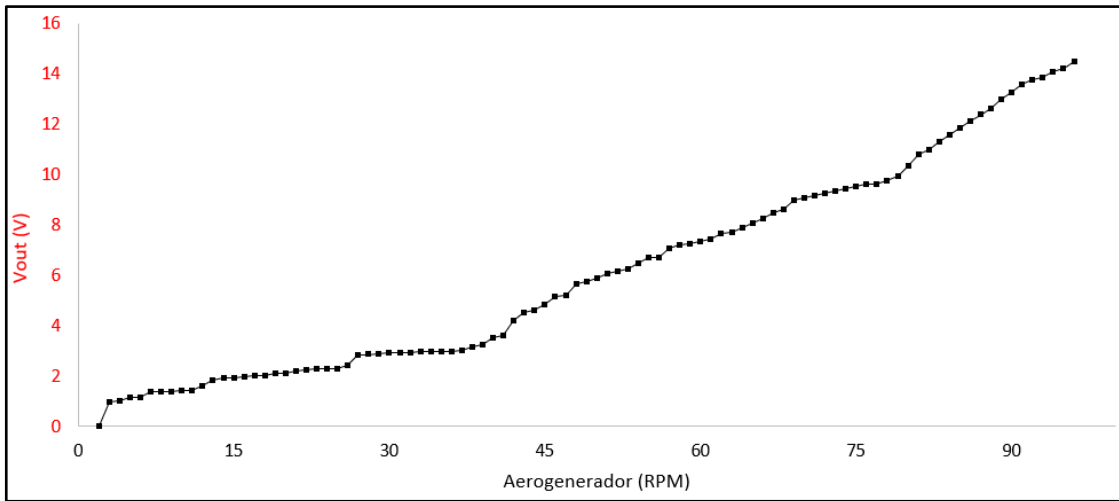


Gráfica 6: Relación flujo luminoso/potencia.

De igual manera, se realizó la experimentación para poder obtener el comportamiento del voltaje de salida en relación con las RPM del aerogenerador (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y el voltaje de salida en relación con las RPM del generador eléctrico (Gráfica 8) después de pasar por la relación de engranajes.



Gráfica 7: Relación de voltaje de salida con respecto a las revoluciones del generador.



**Gráfica 8: Relación de voltaje de salida con respecto a las revoluciones de**

---

## CONCLUSIONES

### **Conclusiones generales**

Se diseñaron los sistemas del generador híbrido eólico-solar, esto con el fin de corroborar su funcionamiento. Además de analizar el funcionamiento individual, el desarrollo de cada elemento permitió una fácil integración final dando como producto nuestro generador híbrido. El estudio de la estructura e integración del generador dio pauta a incorporar dos ERNC considerando ciertas restricciones físicas y consideraciones de acuerdo con su aplicación final.

### **Trabajo futuro**

La implementación de celdas solares de mejor calidad o incluso realizar pruebas con pinturas fotovoltaicas, las cuales mantendrían el desempeño aerodinámico del aerogenerador óptimo, son opciones que se pudieron observar durante la experimentación para obtener un mejor desempeño del sistema.

Realizar prototipos de menor tamaño para analizar el desempeño con el mayor ahorro de material sin sacrificar funcionalidad.

---

## BIBLIOGRAFÍA

- 
- [1] E. T. Chicua, “Tipos de energías renovables no convencionales,” *Erenovable*, pp. 2–2, 2012.
- [2] P. Gómez V., “Energías renovables: la necesidad de un cambio energético,” *Sumuntán*, vol. 23, pp. 9–18, 2006.
- [3] H. Altomonte, W. F. Lutz, and M. Coviello, “Energías renovables y eficiencia energética en América Latina y el Caribe. Restricciones y perspectivas,” *CEPAL*, 2003.
- [4] A. Almonacid and L. Nahuelhual, “Estimación del potencial eólico y costo de producción de energía eólica en la costa de Valdivia, sur de Chile,” *Agro Sur*, vol. 37, no. 2, pp. 103–109, 2009.
- [5] P. L. y K. W. Labandeira, Xavier, “Energías renovables y cambio climático,” *Cuad. Económicos ICE N.º 83*, pp. 37–59, 2011.
- [6] Prensa, “Nuevo record mundial de capacidad instalada en Energía Eólica : Capacidad eólica mundial,” 2010.
- [7] E. Sesto, “Wind energy in the world: Reality and prospects,” *Renew. Energy*, vol. 16, no. 1–4, pp. 888–893, 1999.
- [8] CFE, “Programa de obras e inversiones del sector eléctrico 2007-2016,” *Com. Fed. Electr.*, pp. 1–196, 2008.
- [9] A. Acosta, “Potencial eólico estimado en la República Mexicana,” *CONAE*, 2008.
- [10] A. A. D. y E. L. U. Manuel Leal Rubio, Aitor Domínguez Martín, Álvaro león Reneses, Agustín Marcos Barrio, “Diseño de aerogeneradores,” *ETSII*, vol. Maquinas H.
- [11] J. L. Tangler, “The Evolution of Rotor and Blade Design,” *Natl. Renew. Energy Lab.*, 2000.
- [12] B. Sanderse, “Aerodynamics of wind turbine wakes: Literature review,” *Energy Res. Cent. Netherlands*, pp. 1–46, 2009.
- [13] C. Colosqui, S. Delnero, J. Marañón Di Leo, J. Colman, and U. Boldes, “Cálculo De Coeficientes Aerodinámicos De Perfiles De Bajo Reynolds Mediante El Metodo De Elementos Finitos,” *Mecánica Fluidos Comput.*, vol. 22, pp. 72–86, 2003.
- [14] E. Y. F. Wong and S. J. Rigo, “Estudio aerodinámico de los coeficientes de sustentación y arrastre para pequeños aerogeneradores. (Spanish),” *Aerodyn. study sustentation drag coefficients small Wind turbines.*, vol. 38, no. 4, pp. 42–46, 2011.
- [15] P. Wannakarn, T. Tanmaneeprasert, N. Rugthaicharoencheep, and S. Nedphograw, “Design and construction of axial flux permanent magnet generator for wind turbine generated DC voltage at rated power 1500 W,” in *DRPT 2011 - 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 2011, pp. 763–766.
- [16] H. Polinder, D.-J. Bang, H. Li, Z. Chen, M. Mueller, and A. McDonald, “Concept Report on Generator Topologies, Mechanical & Electromagnetic Optimization,” *Optimization*, p. 79, 2007.
- [17] B. J. Chalmers, W. Wu, and E. Spooner, “An axial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 14, no. 2, pp. 251–256, 1999.
- [18] S. C.-M. Héctor M. Poggi-Varaldo, Alfonso Martínez Reyes, José A. Pineda-Cruz, *Libro de Ciencia y Tecnología*, No. 2. 2009.
-



- 
- [19] ISSN61961993, “Ventajas y desventajas de la Energía Eólica,” *Revista Futuros*, 2006. [Online]. Available: [http://www.revistafuturos.info/futuros14/energia\\_eolica.htm](http://www.revistafuturos.info/futuros14/energia_eolica.htm).
- [20] Cuytronic, “Energía eólica: los aerogeneradores,” *Electricidad gratuita*. 2012.
- [21] Opexenergy, “Tipos de Aerogeneradores,” *Eolica*, 2013. [Online]. Available: [http://opex-energy.com/eolica/tipos\\_aerogeneradores.html#2.\\_SEGUN\\_POTENCIA\\_SUMINISTRADA](http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html#2._SEGUN_POTENCIA_SUMINISTRADA).
- [22] S. Fernandez and O. Uriarte, *energias renovables, energia eólica, energia solar, energia renovable*. 2017.
- [23] L. Manuel Hernández García, “Energía, Energía Fotovoltaica y Celdas Solares de Alta Eficiencia,” *Rev. Digit. Univ.*, vol. 8, no. 12, pp. 1067–6079, 2007.
- [24] C. T. ; Machado and F. S. Miranda, “Energía solar fotovoltaica,” *Rev. Virtual Quim*, vol. 7, pp. 126–143, 2015.
- [25] G. Fredy, “Diseño y construcción de un generador eléctrico para un aerogenerador de baja potencia,” *Univ. Michoacana San Nicolás Hidalgo*, p. 84, 2010.
- [26] E. Yoel, F. Wong, I. Abdel, and J. Bermúdez, “Generador de imanes permanentes en la generación eléctrica,” *Tech. Artic.*, pp. 12–13, 1995.
- [27] G. A. Pérez- Alcázar, “Imanes permanentes: características, aplicaciones y futuro,” *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 40, no. 155, p. 221, 2016.
- [28] [Http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1101/html/3\\_transmision\\_por\\_poleas\\_y\\_correas\\_o\\_cadenas.html](http://e-educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1101/html/3_transmision_por_poleas_y_correas_o_cadenas.html), “Transmision por poleas y correas o cadenas.” .