



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE PUEBLA



Programa Académico de Maestría en Ingeniería en,
Automatización de procesos industriales PNPC-CONACYT

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
AEROGENERADOR DE BAJA
POTENCIA PARA IMPULSO DE UN
MOTOR DE TIPO JAULA DE ARDILLA**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

JESÚS BALAM MARCOS JIMÉNEZ

DIRECTOR

M.C. FERNANDO OSVALDO GONZÁLEZ
MANZANILLA

Juan C. Bonilla, Puebla, México.

Febrero 2014

AGRADECIMIENTOS

DIOS

Por haberme dado un gran tesoro: Mis Padres

y permitirme estar aún a su lado.

Por haberme dado una dicha: mis hermanos

y compartir mis sentimientos con ellos.

Por haberme dado un sentimiento: el amor

y disfrutarlo con esa persona especial.

Por haberme dado la vida

y permitirme lograr una meta más.

Gracias porque todo lo que me ha sucedido

es porque así lo has querido.

A mis Padres

Sr. Maximino

Sra. Tarsila

Gracias por la confianza que me han tenido,
por el apoyo incondicional que me brindan,
por los grandes sacrificios que hicieron sin reservas

Por ustedes he podido llegar a este momento
tan importante para mí.

Que Dios los bendiga siempre.

A mis Hermanos

Karla Fernanda, Maximino,

Ma. Del Rosario

Por compartir una infancia inolvidable
y apoyarme en todo momento.

A Ti

Por haber formado parte importante de mi vida,
por estar conmigo y acompañarme en todo
momento y hasta el fin, siempre lo agradeceré
y tendré presente.

A mis amigos y familiares

Por motivarme a seguir adelante
Por ayudarme y pasar buenos y malos ratos.

A mi Asesor

Mc. Fernando O. González Manzanilla

Con respeto y agradecimiento por su valiosa
colaboración y labor desinteresada para la
elaboración de este trabajo.

Gracias a todos.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	1
ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	6
RESUMEN.....	10
CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	12
1.1 Introducción	12
1.2 Objetivo general.....	13
1.3 Objetivos específicos.....	13
1.4 Justificación	14
1.5 Alcances y limitaciones.....	14
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	15
2.1 El Viento	15
2.1.1 Antecedentes del viento	15
2.1.2 Tipos de viento	16
2.1.3 Estimación del recurso del viento	19
2.1.4 Potencial eólico	21
2.1.5 Ventajas y desventajas de la energía eólica.....	23
2.2 Aerogeneradores.....	23
2.2.1 Antecedentes de los aerogeneradores	23
2.2.2 Principio de operación	25
2.2.3 Rendimiento del aerogenerador	26
2.2.4 Tipos de aerogeneradores.....	28
2.2.5 Elementos principales de un aerogenerador	32
2.3 Generador eléctrico	34
2.3.1 Tipos de generadores	34
2.3.2 Funcionamiento	36
2.3.3 Características	37
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	39

3.1 Caracterización del recurso eólico	39
3.1.1 Delimitación de la zona	39
3.1.2 Equipo.....	40
3.1.3 Factores del potencial eólico.....	41
3.1.4 Exponencial de Hellmann	41
3.1.5 Densidad de potencial eólico y potencial eólico máximo	42
3.1.6 Análisis de datos.....	42
3.2 Diseño y construcción del generador eléctrico.....	43
3.2.1 Imanes permanentes.....	43
3.2.3 Diseño de rotor.....	46
3.3 Álabes del aerogenerador	49
3.3.1 Selección de las palas del aerogenerador	49
3.3.2 Desarrollo del álabes Savonius helicoidal.....	52
3.4 Base del aerogenerador, ensamble de piezas y conexión del generador eléctrico.....	55
3.4.1 Base del aerogenerador.	55
3.4.2 Ensamble de piezas.	56
3.4.3 Conexión del generador eléctrico.	57
CAPITULO 4 RESULTADOS	61
4.1 Valoración del recurso eólico.....	61
4.1.1 Velocidad del viento.....	61
4.1.2 Ley de Hellmman y la velocidad del viento	63
4.1.3 Densidad de potencial eólico en la zona y potencia máxima del aerogenerador.....	64
4.1.4 Dirección del flujo eólico y su temperatura	65
4.2 El generador eléctrico	67
4.2.1 Estator	67
4.2.2 Rotor.....	68
4.2.3 Ensamble	68
4.3 EL ÁLABE.....	71
4.4 MODELO TEÓRICO.....	74
4.5 RESULTADOS DEL PROYECTO COMPARADO CON EL MODELO TEÓRICO	77
CAPITULO 5 CONCLUSIONES.....	80
BIBLIOGRAFÍA.....	81

ANEXOS..... 84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores del exponente Hellmann en función de la rugosidad del terreno.	22
Tabla 2. Características y rendimiento de varios rotores eólicos.	27
Tabla 3. Tabla de comparación de varios tipos de aerogeneradores.	32
Tabla 4. Clasificación de aerogenerador por potencial eólico.	32
Tabla 5. Coordenadas de la estación meteorológica UPPue # 1.	39
Tabla 6. Especificaciones técnicas de aerogeneradores comerciales.	41
Tabla 7. Características de elección de imán permanente	44
Tabla 8. Características del alambre magneto.	45
Tabla 9. Valores promedio del análisis de datos en la zona de estudio.	61
Tabla 10. Detalle de cada una de las bobinas del estator.	68
Tabla 11. Pruebas del aerogenerador.	69
Tabla 12. Datos que intervienen en la simulación de la aspa.	71
Tabla 13. Datos de propiedades y componentes de la simulación de la aspa.	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Corrientes de aire en el planeta.....	16
Figura 2. Vientos Alisios.	16
Figura 3. Esquema general de un viento particular tierra-mar y viceversa (brisas).	17
Figura 4. Brisas de mar.....	17
Figura 5. Vientos de valles y montañas.....	18
Figura 6. Viento Catabático.....	18
Figura 7. Viento <i>Föhn</i>	19
Figura 9. Mapa eólico mundial: velocidad media del viento en m/s a 10 m de altura.....	19
Figura 10. Mapa del recurso eólico en México.	20
Figura 11. Estados de México con potencial eólico estimado por la CRE.....	21
Figura 12. Clasificación de energía eólica en el estado de Oaxaca.	21
Figura 13. Variación de la velocidad del viento (capa limite) con la altura sobre el terreno.	23
Figura 14. a) panémona, b) molino de viento griego y holandés.	24
Figura 15. Evolución de los aerogeneradores.....	24
Figura 16. Principio de sustentación aerodinámica.....	25
Figura 17. Forma de la curva de relación C_p respecto de TSR de diferentes aerogeneradores.....	28
Figura 18. Coeficientes de la eficiencia del rotor con base en relación de velocidad periférica.....	28
Figura 19. a) Barlovento con alta direccional. b) Sotavento sin alta direccionalidad.	29
Figura 20. Central eoloelectrica de La Venta II.	30
Figura 21. Aerogenerador de 2 aspas.	30
Figura 22. Aerogenerador de una sola aspa.	30
Figura 23. Aerogenerador tipo Savonius.....	31
Figura 24. Aerogenerador Darrieus.	31
Figura 25. Aerogenerador hibrido o giromil.	31
Figura 26. Elementos de un aerogenerador.	33
Figura 27. Generador de Corriente Continua.	34
Figura 28. Alternador de imanes permanentes.	35
Figura 29. Estator y rotor de un motor eléctrico.	35
Figura 30. Generador axial de imanes permanentes.....	37
Figura 31. Circuito equivalente de la máquina de inducción.....	38
Figura 32. Ubicación geográfica de la Universidad Politécnica de Puebla.....	40

Figura 33. Estación meteorológica de la UPPue.	40
Figura 34. Generador eléctrico	43
Figura 35. Distribución de imanes en placa de metal.	43
Figura 36. Diferentes tipos de imanes permanentes.	44
Figura 37. Bobinas colocadas en el estator.	44
Figura 38. Núcleos de hierro para las bobinas.	45
Figura 39. Taladro de banco y enrollamiento de la bobina.	46
Figura 40. Conexión de bobinas en serie. 3 grupos de 4 bobinas interconectadas. Plantilla y molde para colocación de bobinas.	46
Figura 41. Pieza realizada en solidworks.	47
Figura 42. Discos rectificados en torno.	47
Figura 43. Molde para distribución uniforme de los imanes permanentes de neodimio.	47
Figura 44. Medición del campo magnético del imán polo sur “S” y polo norte “N”.	48
Figura 45. Rotores con molde para recubrimiento de los imanes permanentes.	48
Figura 46. Colocación de resina en el molde para recubrimiento de imanes del rotor.	48
Figura 47. a) barrenos del disco, b) corte del espárrago.	49
Figura 48. Espárragos en discos para fijación.	49
Figura 49. Estator sin fricción con los espárragos y ensamble del generador.	49
Figura 50. Álabes tipo vertical a) Savonius, b) Savonius helicoidal, c) Darrieus helicoidal.	50
Figura 51. Diseño del rotor Savonius en solidworks.	50
Figura 52. Rotor Savonius fabricado.	50
Figura 53. Rotor tipo Darrieus helicoidal en solidworks.	51
Figura 54. Grado de desplazamiento de la parte superior respecto de la inferior, prototipo elaborado.	51
Figura 55. Diseño del rotor Savonius helicoidal en solidworks.	52
Figura 56. Diseño de pieza para molde del rotor Savonius helicoidal.	52
Figura 57. Secciones de la pieza del álabe para maquinar en CNC.	52
Figura 58. a) Fabricación de las piezas en la fresadora automática. b) Unión de piezas.	53
Figura 59. Aspas de madera y placas de unigel para hacer duplicados.	53
Figura 60. Aspas fabricadas en unigel y forma del álabe helicoidal.	54
Figura 61. Recubrimiento del aspa con cinta canela.	54
Figura 62. Aspa Savonius helicoidal fabricada en fibra de vidrio.	55

Figura 63. Aspa finalizada con capa de pintura.	55
Figura 64. Base del aerogenerador con generador eléctrico montado.	56
Figura 65. Postes y travesaño de la base del aerogenerador.	56
Figura 66. Aplicación de base de pintura en la base de acero.	56
Figura 67. Ensamble de cada sección y aerogenerador detallado.	57
Figura 68. Conexión de bobinas del estator para obtención de tres fases.	57
Figura 69. a) Diagrama fasorial y, b) conexión de bobinas en configuración estrella.	58
Figura 70. Medición de tensiones entre las bobinas en conexión estrella.	58
Figura 71. a) Diagrama fasorial y, b) conexión de bobinas en configuración estrella.	58
Figura 72. Medición de tensiones entre las bobinas en conexión delta.	59
Figura 73. Conexión Delta – Estrella a) diagrama fasorial, b) conexión de bobinas.	59
Figura 74. Medición de tensión en la parte primaria y secundaria (D–Y).	60
Figura 75. Conexión estrella del estator con estrella del grupo de bobinas.	60
Figura 76. Conexión física del estator hacia los transformadores.	60
Figura 77. Velocidad del viento durante el año 2011.	62
Figura 78. Velocidad del viento durante el periodo Enero – Septiembre de 2012.	62
Figura 79. Gráfica de promedio de la velocidad del viento del año 2011 y 2012.	63
Figura 80. Variación de la densidad de potencial eólico del año 2011 y periodo enero a septiembre de 2012.	64
Figura 81. Rosa de los vientos. Frecuencia de la dirección del viento.	65
Figura 82. Frecuencia del viento y su dirección de flujo a) 2011, periodo de 2012 b).	66
Figura 83. Promedio de la temperatura durante el día.	67
Figura 84. Promedio de la temperatura durante el año 2011 y enero – septiembre de 2012.	67
Figura 85. Rotores terminados con imanes permanentes.	68
Figura 86. Medición de voltaje y forma de onda a la salida del estator.	69
Figura 87 – 90. Ondas obtenidas con osciloscopio Tektronix DPO 4054.	70
Figura 91. Conexión de diodos para etapa de rectificación de la señal.	71
Figura 92. Resultado de la simulación del Estrés.	72
Figura 93. Resultado de la simulación en cuando a Desplazamiento.	73
Figura 94. Resultado de la simulación en estudio de Tensión.	73

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con la final de investigar que la energía eólica ofrece beneficios como lo es el impulsar un motor de tipo jaula de ardilla. En sus primeras etapas se centra al análisis del recurso eólico que está presente en la periferia de la Universidad Politécnica de Puebla, el análisis se obtuvo de los datos de la estación meteorológica de dicha universidad, además fue de vital importancia establecer cuál es la densidad del aire de la zona con el fin de establecer la densidad de potencial eólico que está presente la que llegamos a obtener de 9.9 W/m^2 . Para realizar una comparación se utilizaron software como Excel, Matlab y Windographer, que ayudaron a observar de manera gráfica el comportamiento del viento, su temperatura y su dirección. Posteriormente se seleccionó un modelo de aspa dentro de tres que se tenían, el modelo seleccionado fue tomando en cuenta que la velocidad del viento de la zona es muy bajo por lo que se requiere de un aerogenerador de tipo vertical que emplea una fuerza de empuje o arrastre en comparación con los aerogeneradores horizontales que necesitan vientos más fuertes para poder usar la fuerza de sustentación y realizar su movimiento giratorio. Continuando se diseñó y desarrolla el generador eléctrico que es trifásico, cuenta con un estator y un rotor que contiene imanes permanentes que ofrecen un mayor campo magnético y que es aprovechado por las bobinas de tal forma que nos brinde mayor intensidad a pocas revoluciones, se obtuvo mediciones de aproximadamente 2.6 V por fase. La siguiente etapa que se desarrolló fue el acoplamiento de conexión del generador y de los transformadores, en la parte del generador se tiene una conexión estrella que ayuda a obtener más voltaje a menor revoluciones de giro, posteriormente, se hace una conexión estrella – estrella del generador a los transformadores monofásicos, los transformadores se conectan en triángulo o delta para obtener un transformador trifásico e incrementar el voltaje que proviene del generador en una relación de 1:6. Cabe mencionar que debido a la primera ley de la termodinámica que solo podemos transformar esa energía mas no la podemos crear, existen pérdidas por consecuencia de acciones mecánicas y de calor. Así que en este trabajo se encontró que el viento es capaz de generar electricidad para poder accionar un motor de tipo jaula de ardilla el cual consume una potencia de aproximadamente 300 watts.

CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO **DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

1.1 Introducción

La energía eólica se está volviendo más popular en la actualidad, al haber demostrado la viabilidad industrial. Nació como búsqueda de una diversificación en el abanico de generación eléctrica ante un crecimiento de la demanda y una situación geopolítica cada vez más complicada en el ámbito de los combustibles tradicionales.

Esta energía es inagotable, no contamina y, aunque la instalación de uno de estos aparatos es relativamente costosa, a la larga se sentirán los resultados positivos, especialmente en el campo económico [1].

Un aerogenerador es un generador eléctrico impulsado por una turbina eólica accionada por el viento [2]. Sus precedentes directos son los molinos de viento que existían en la más remota antigüedad como Persia, Irak, Egipto, Babilonia y China, se empleaban para la molienda y obtención de harina, además del bombeo de agua. En estos casos, la energía eólica, es en realidad la energía cinética del aire en movimiento, la cual proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en *energía eléctrica* [3], [4].

Existen diferentes tipos de aerogeneradores, dependiendo de su potencia, la disposición de su eje de rotación, numero de palas, verticales y horizontales o bien según aplicaciones [5].

Los aerogeneradores pueden trabajar de manera aislada o agrupados, en parques eólicos o plantas de generación eólica, distanciados unos de otros en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de las palas [6].

Para aportar energía a la red eléctrica, los aerogeneradores deben estar dotados de un sistema de sincronización para que la frecuencia de la corriente generada se mantenga perfectamente sincronizada con la frecuencia de la red.

En este trabajo se reportará el aprovechamiento de esta energía además de la construcción de un aerogenerador para poder suministrar energía eléctrica a una carga, en este caso es un motor de tipo jaula de ardilla. [7].

1.2 Objetivo general

- Diseñar y construir un aerogenerador de baja potencia que para accionar un motor de tipo jaula de ardilla.

1.3 Objetivos específicos

- Realizar una revisión sobre los datos del viento proporcionados por la estación meteorológica de la Universidad para determinar la ubicación del aerogenerador.
- Seleccionar y desarrollar las aspas apropiadas para el aerogenerador.
- Diseñar y construir el generador para el aerogenerador.
- Ensamblar los elementos de: aspas, generador y acoplamiento en el motor para realizar pruebas del sistema.

1.4 Justificación

El prototipo de aerogenerador que se diseñará realizará las operaciones necesarias para aprovechar y transformar la energía eólica. Además, tendrá un diseño con materiales de calidad y de bajo presupuesto en comparación con los que se encuentran en el mercado para la aplicación deseada, ya que existen en el mercado aerogeneradores con la capacidad similar al que se está proponiendo en este protocolo, pero no hay demasiado desarrollo tecnológico en el país y la dependencia tecnológica prevalece. Se intenta a través del desarrollo de prototipos, motivar el desarrollo de tecnología propia y crear la cultura de desarrollar ideas buscando no exceda el costo de un equipo existente de origen extranjero, particularmente estadounidense o español, por ejemplo el costo de un equipo de características similares oscila desde los 35 a 45 mil pesos más instalación, lo cual resulta costoso por la selección de materiales y el precio de estos.

En particular, Se pretende resolver las necesidades de energía eléctrica que demanda un motor de tipo jaula de ardilla mediante el desarrollo de un aerogenerador para aprovechar la energía del viento y producir electricidad para uso industriales, pues una de las inquietudes se da porque la mayoría de las máquinas de uso industrial y agrícola son impulsadas por motores de tipo jaula de ardilla, por lo cual tiene aplicaciones importantes.

1.5 Alcances y limitaciones

- ❖ El alcance de este proyecto es acoplar cada uno de los módulos que conforman el aerogenerador de forma satisfactoria de acuerdo al diseño propuesto e implementarlo en un motor para las diversas tareas y necesidades que se demanden.

- ❖ Las limitaciones que presenta el proyecto son el presupuesto que se le asigne para su fabricación, ya que si se cuenta con el apoyo de patrocinio se puede desarrollar un prototipo de más capacidad de potencia, los materiales adecuados y adquisición de ellos para el diseño de las aspas y generador para trabajar, el recurso (viento) para realizar estudios, pruebas y análisis del mismo.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 El Viento

En años futuros la humanidad tendrá que enfrentarse, desde un punto de vista energético, a un problema muy serio que es la falta de petróleo, ya que con esta fuente da movimiento al mundo en el que vivimos y sin él, como se ha venido pronosticando debido al aumento de la población que demanda cada vez más energía, será catastrófico.

Es por eso que en la actualidad se están buscando nuevas opciones para contrarrestar la falta del combustible fósil y entre las fuentes de energías alternativas renovables, una de las que más se emplea, es la eólica debido a que es competitiva desde el punto de vista de los costos y en general los permisos para la construcción de aerogeneradores se obtienen fácilmente.

2.1.1 Antecedentes del viento

El viento es toda masa de aire en movimiento en la atmosfera, que surge como consecuencia de la diferencia del calentamiento de la superficie terrestre, siendo la fuente de energía eólica, o mejor dicho, la energía mecánica que en forma de energía cinética transporta el aire en movimiento [4].

Debido a que el sol irradia calor, la tierra absorbe una parte de esta energía para poder mantener una temperatura equilibrada y que se desarrolle la vida en este planeta. Además, puesto que la tierra se encuentra inclinada aproximadamente dos grados, existe mayor absorción de radiación solar en las regiones ecuatoriales que en las regiones polares y por

ende se producen las corrientes de aire que se distribuyen a lo largo del planeta como se ve en la **Figura 1**.

El aire caliente que se eleva en los trópicos, es remplazado por las masas de aire fresco superficiales que provienen de los polos. El ciclo se cierra con el desplazamiento, por la alta atmósfera, del aire caliente hacia los polos, es por eso que se observa a la tierra como una maquina térmica que transforma parte de ese calor absorbido del sol.

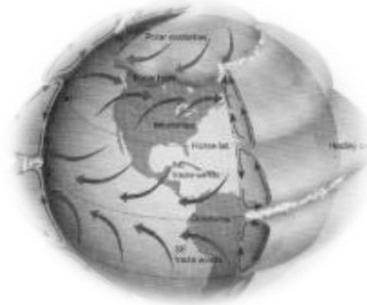


Figura 1. Corrientes de aire en el planeta.

Fuente: [8]

Cabe mencionar que las principales causas de originarse el viento son:

- *La radiación solar que es más destacada en el Ecuador que en los Polos.*
- *La rotación de la Tierra que provoca desviaciones hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur.*
- *Las perturbaciones atmosféricas por irregularidades de la superficie terrestre.*

2.1.2 Tipos de viento

El conocimiento de los vientos generales, no es suficiente para una correcta utilización y ubicación de máquinas accionadas por el viento. Existen factores que modifican el régimen general y que deben ser conocidos y tomados en cuenta a la hora de realizar un proyecto eólico, por tal motivo debemos de tener en consideración los tipos de vientos específicos en determinadas zonas geográficas, a continuación se presenta de manera breve una explicación de varios tipos de vientos.

Alisios

El Ecuador, al estar geográficamente en el cinturón ecuatorial se encuentra bajo la acción de los vientos alisios del Noreste y Sureste, los cuales confluyen en esta zona. En la **Figura 2** se observa la imagen de esta descripción.

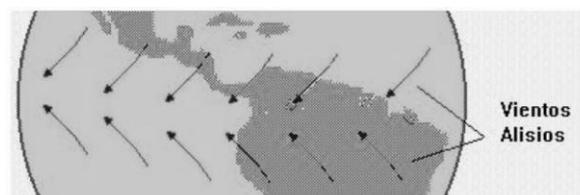


Figura 2. Vientos Alisios.

Fuente: [9]

Brisas

Es el movimiento del aire en dirección *tierra-mar* en las costas, o *tierra-agua* en los lagos durante el día y la noche; en las faldas de las montañas el aire se calienta durante el día y se va hacia las alturas, mientras que en la noche el aire frío, pesado, baja hacia los valles como se observa en la **Figura 3**.

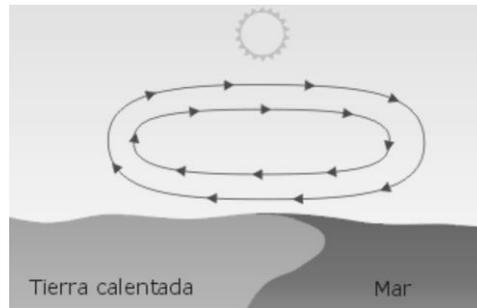


Figura 3. Esquema general de un viento particular tierra-mar y viceversa (brisas).
Fuente: [10]

Las brisas se originan debido al movimiento del aire en las costas o lagos durante el día. En la **Figura 4**, se observa que el viento diurno o brisa marina, es debido a un descenso hacia la tierra del gradiente de presión barométrica, como consecuencia del calentamiento diurno de la capa inferior del aire que está en contacto con la tierra; como la superficie del mar adyacente no se calienta con tanta intensidad, permanece relativamente más fría. En respuesta al gradiente de presión local, el aire se dirige hacia la tierra a baja altura. La brisa marina es relativamente fría y proporciona un agradable alivio en una estrecha franja de la zona costera en las calurosas tardes del verano.

Por la noche se invierte el gradiente de temperatura debido al rápido enfriamiento de la superficie del terreno; el gradiente de presión es ahora de la tierra hacia el mar, motivando un flujo de aire hacia el océano (la brisa terrestre). Las condiciones locales influyen considerablemente en el potencial eólico de una zona y puede suceder que dos lugares muy próximos tengan una gran diferencia de condiciones eólicas.

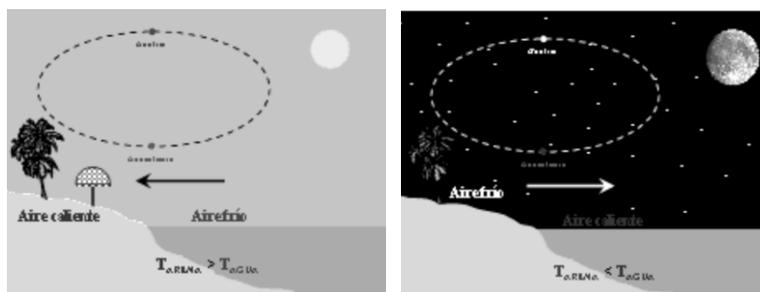


Figura 4. Brisas de mar.
Fuente: [11]

Los valles y las zonas entre dos montañas afectan enormemente al citado potencial al aumentar considerablemente la acción del viento, que varía notablemente con la altura. Esta

variación es consecuencia de la capa límite que se produce en el contacto de los fluidos viscosos con las superficies (aire y tierra) como se aprecia en la **Figura 5**.

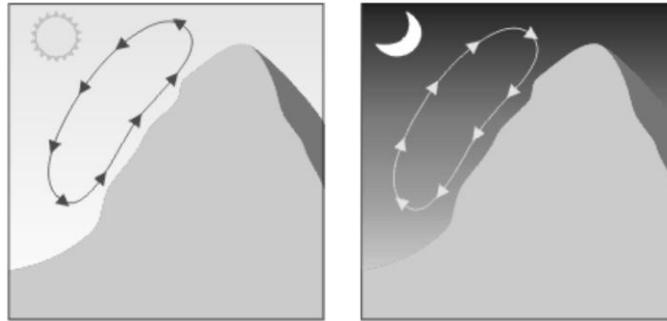


Figura 5. Vientos de valles y montañas.

Fuente: [10]

Vientos Catabáticos y Anabáticos

El viento *catabático*, es el producido por el descenso de aire fresco desde regiones elevadas a otras más bajas, en forma de brisas, a través de laderas y valles, se puede observar de forma gráfica en la **Figura 6**.

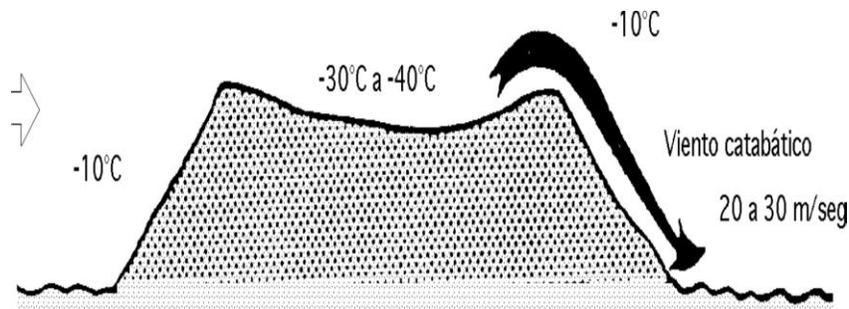


Figura 6. Viento Catabático.

Fuente: [4]

Este tipo de viento presenta poca relación con las isobaras, puesto que viene regido principalmente por la dirección de los valles a través de los cuales desciende. El viento *anabático* es el que presenta una componente vertical ascendente, siendo el término opuesto a catabático.

Föhn

Viento fuerte, seco y cálido, en ocasiones se produce en la ladera de sotavento (contraria a la que sopla el viento) de sistemas montañosos, un föhn fuerte se presenta precedido por un sistema de bajas presiones que avanza causando fuertes vientos en la troposfera media y alta. Cuando este sistema se acerca a una montaña, el aire sube por la ladera de barlovento, enfriándose por debajo de la temperatura de condensación y forma nubes que se mantienen adosadas a las cimas de las montañas que provocan precipitaciones, por lo que el contenido de humedad del aire baja y así el aire que desciende por sotavento es seco, calentándose en el descenso a razón de 10°C por km. ver **Figura 7**.

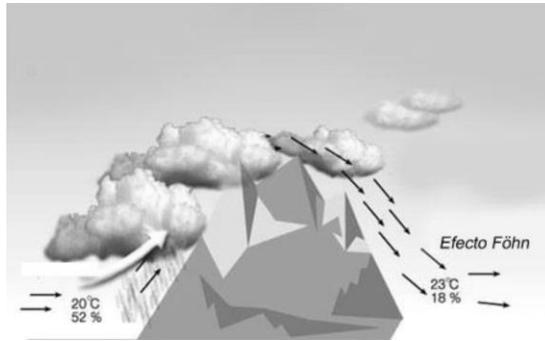


Figura 7. Viento Föhn.
Fuente: [12]

Además influye considerablemente en la velocidad del viento la forma del relieve de la superficie de la tierra por donde circula la corriente, como se ve en la **Figura 8**. Superficies de pendientes suaves y desnudas de obstáculos son los mejores lugares de potencial eólico, puesto que se van juntando las líneas de corriente del fluido y hacen que su velocidad aumente [4].

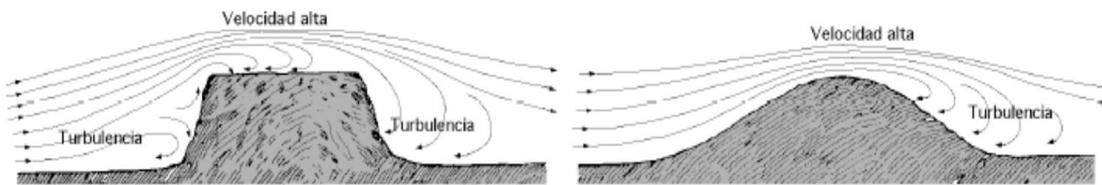


Figura 8. Influencia de obstáculos topográficos sobre la velocidad del viento.
Fuente: [4]

2.1.3 Estimación del recurso del viento

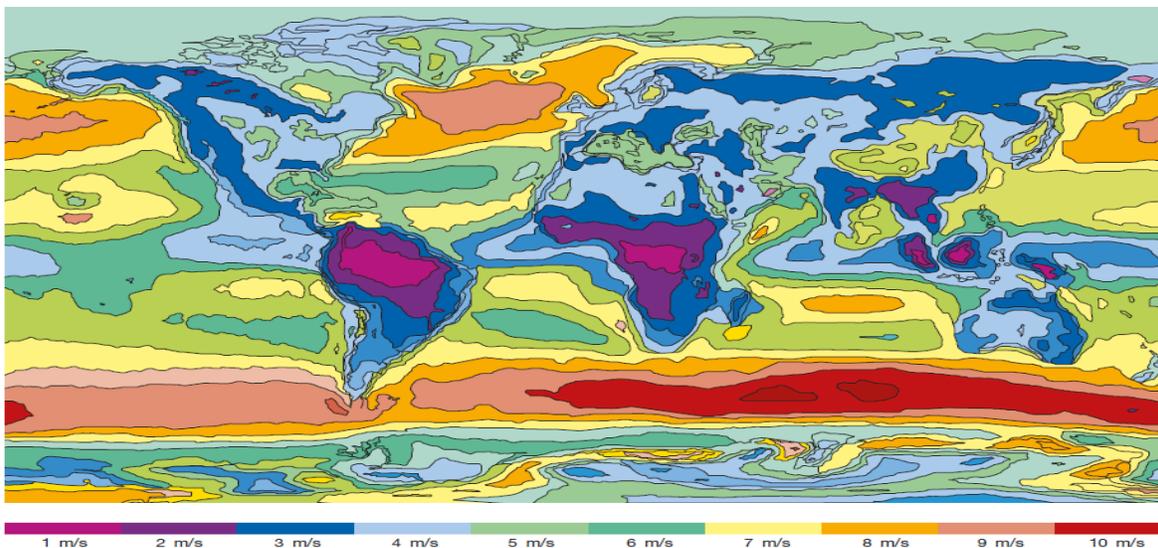


Figura 9. Mapa eólico mundial: velocidad media del viento en m/s a 10 m de altura.
Fuente: [13]

La fuerza del viento cambia en cuestión de días, horas o minutos, en función de las condiciones meteorológicas. Además, la dirección y la intensidad del viento, que fluctúan rápidamente son una característica del viento para determinar el sitio de instalación de máquinas eólicas para su mejor aprovechamiento del recurso, es por ello que para llevar a cabo esto se debe de apoyar con las estaciones anemométricas que nos brindan datos sobre el viento además de los mapas eólicos como se observa en la anterior, **Figura 9** [13].

Existen tres componentes del viento que determinan la potencia disponible de un sistema de conversión de energía eólica:

- Velocidad del viento: es un parámetro crítico, ya que la potencia varía según el cubo de la velocidad del viento. Las turbinas eólicas requieren una velocidad de viento mínima para comenzar a generar energía, para pequeñas turbinas esta velocidad es de aproximadamente 3.5 m/s.
- Características del viento (turbulencia): mientras que los modelos de viento globales ponen el aire en movimiento y determinan el recurso del viento en una región, rasgos topográficos locales, que incluyen formaciones geográficas, flora y estructuras artificiales, pueden mostrar la diferencia entre un recurso eólico utilizable y uno que no lo es.
- Densidad del aire: temperaturas bajas producen una densidad de aire más alta. Mayor densidad del aire significa mejor fluidez de las moléculas sobre una pala de la turbina, produciendo un rendimiento más alto de la potencia para la una velocidad del viento dada [14].

De manera específica, México ofrece un gran potencial para el desarrollo de la energía eólica con condiciones de recurso consideradas como las mejores de Latinoamérica. A pesar de esto, el despegue del sector eólico en México comienza relativamente tarde, en el año 2007. En la actualidad, el mercado está creciendo rápidamente, aunque el contexto de la crisis financiera global ha ralentizado el desarrollo del sector, ya que ha llegado en los años en que los proyectos de parques eólicos estaban en sus fases iniciales y la falta de financiación les ha perjudicado. En la **Figura 10**, se aprecia el potencial eólico de la república mexicana, en el que se describe la clasificación de energía eólica por aplicaciones de energía rural y superficie en que se aprovecha la energía eólica respectivamente.

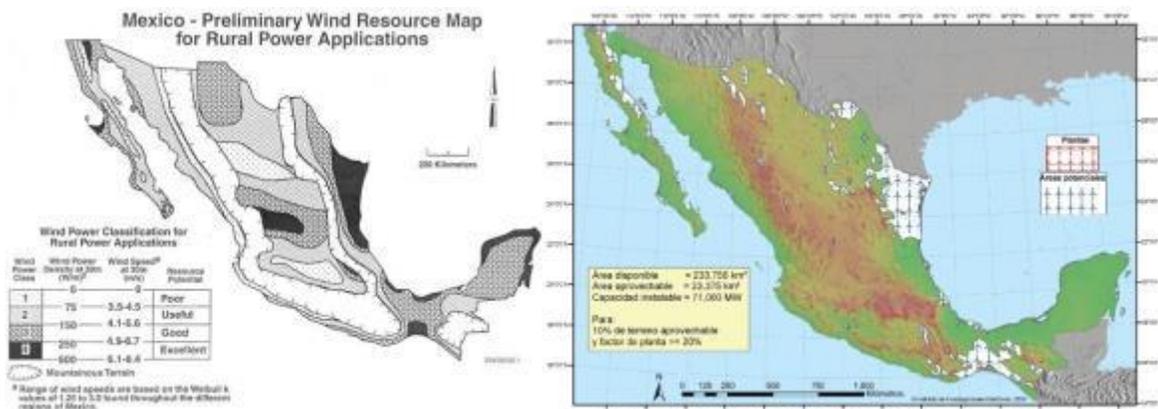


Figura 10. Mapa del recurso eólico en México.

Fuente: [15]

Cabe mencionar que el potencial eólico del país no ha sido evaluado de manera exhaustiva, sin embargo se encuentra en varios estados y aun con más intensidad en el estado de Oaxaca como se muestra en la **Figura 11** y **Figura 12** respectivamente [16].

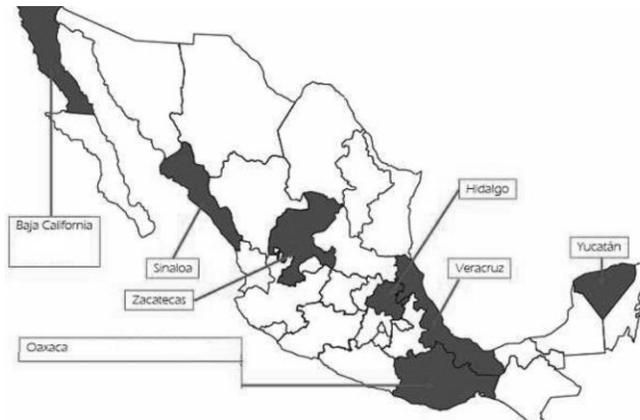


Figura 11. Estados de México con potencial eólico estimado por la CRE.
Fuente: [17]

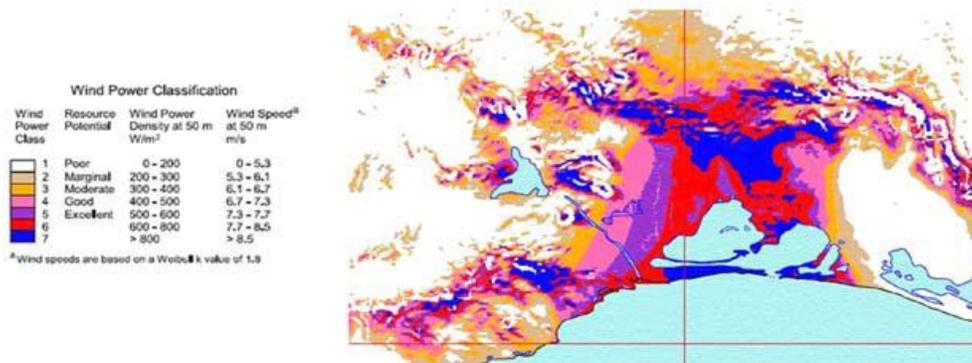


Figura 12. Clasificación de energía eólica en el estado de Oaxaca.
Fuente: [18]

2.1.4 Potencial eólico

Para obtener el potencial eólico de un área circular en específico es necesario el conocimiento de tres factores sustanciales:

- Velocidad
- Densidad
- Tamaño del rotor

Como la fuente de energía es el viento y este es aire en movimiento, la energía que se puede aprovechar de él es la energía cinética y cuya masa del aire es m con movimiento uniforme y de velocidad V esta dada por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{1}{2}mV^2 \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

m = flujo de aire [kg/s]

V = velocidad del viento [m/s]

Por otra parte, el flujo másico (masa de aire que atraviesa a la pala) m con la densidad ρ , a través de una superficie de control estacionaria (área de captación) con sección frontal A , se puede expresar de la siguiente forma:

$$m = \rho AV \quad \text{Ec (2)}$$

Siendo

ρ = densidad del aire [kg/m³] = 1.225 kg/m³

A = área de captación [m²]

Luego entonces, la potencia eólica teórica disponible que se puede extraer de la corriente del viento a través del área A , se describirá de la siguiente forma:

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad \text{Ec (3)}$$

Esta potencia obtenida se denomina potencia meteorológica y esta expresada en [W] [19]. Cabe mencionar que la velocidad del viento varía con la altura es por ello debemos de tomar en cuenta la ley exponencial de Hellmann siguiendo la siguiente ecuación estadística.

$$\frac{V_{h1}}{V_{h2}} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^\alpha \quad \text{Ec. (4)}$$

Dónde:

V_{h1} , V_{h2} = velocidad del viento a la altura h_1 y h_2 respectivamente.

h_1 y h_2 = altura

α = exponente de Hellmann

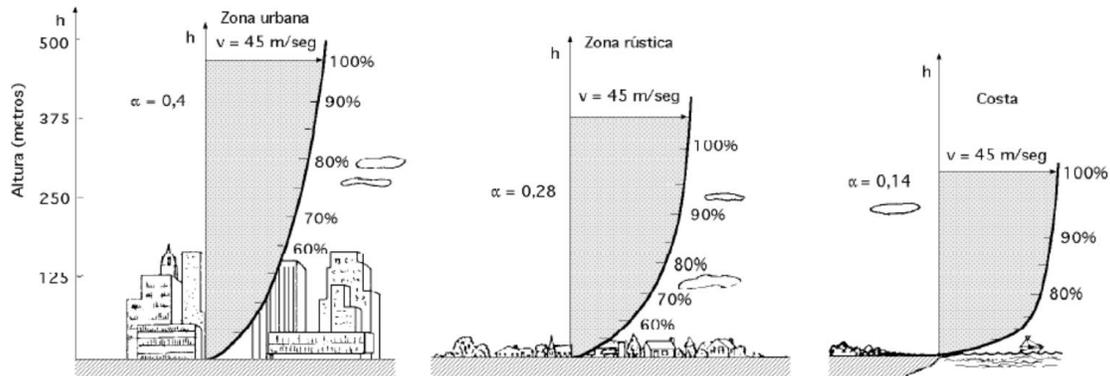
A continuación se presenta en la **Tabla 1**, los valores del exponente de Hellmann, los cuales dependen del tipo de terreno [4].

Tabla 1. Valores del exponente Hellmann en función de la rugosidad del terreno.

TIPO DE TERRENO	COEFICIENTE DE HELLMANN
Lugares llanos con hielo o hierba	$\alpha = 0,08 - 0,12$
Lugares llanos (mar, costa)	$\alpha = 0,14$
Terrenos poco accidentados	$\alpha = 0,13 - 0,16$
Zonas rústicas	$\alpha = 0,2$
Terrenos accidentados o bosques	$\alpha = 0,2 - 0,26$
Terrenos muy accidentados o ciudades	$\alpha = 0,25 - 0,4$

Fuente: [20]

En la **Figura 13**, se muestra la velocidad del viento respecto de la altura.



2.1.5 Ventajas y desventajas de la energía eólica

Ventajas

- Tiene un impacto ambiental mínimo ya que no hay emisión de sustancias o gases para la producción de energía.
- El viento es una fuente de energía inagotable.
- Los costos de operación y mantenimiento son bajos.
- Los proyectos de energía eólica se pueden construir en periodos pequeños.

Desventajas

- Dependen de la variabilidad del viento así como de su velocidad.
- Costo inicial alto comparado con tecnologías que emplean fuentes de energía no renovables.
- Impacto visual.

2.2 Aerogeneradores

Un generador eólico es una máquina capaz de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica que a su vez esta energía puede ser utilizada para accionar un generador eléctrico y así poder generar electricidad, otro uso es que esa energía mecánica se utilice directamente para el accionamiento de otra máquina, este es el caso de los aeromotores [21]. Sin embargo, la generación de energía eléctrica, es el uso más importante hoy en día de la energía eólica.

2.2.1 Antecedentes de los aerogeneradores

El recurso del viento se ha utilizado desde tiempos remotos, las aplicaciones eran principalmente para: la navegación a vela y los molinos de viento. Para el primer caso se han encontrado registros en dibujos egipcios datados de hace más de 5000 años de antigüedad, los cuales muestran pequeñas naves y embarcaciones con velas para trasladarse

a lo largo del río Nilo. Posteriormente al paso de los años se fueron perfeccionando las naves para una mejor captura del recurso del viento y poder desplazarse a distancias más grandes en tiempos más cortos.

Los molinos de viento se utilizaban prácticamente para la molienda de granos y bombeo de agua, además se ha hallado documentación que data del siglo VI D.C. de las primeras máquinas eólicas localizadas en Sijistan catalogadas en el tipo de eje vertical llamadas panémonas que se observa en la **Figura 14 a)**. Con posterioridad, se dio el desarrollo de las máquinas de eje horizontal en: El Mediterráneo, Holanda, Francia e Inglaterra, entre los siglos VII y XII fabricados de madera y cierto número de aspas que eran cubiertas con tela, como se ve en la **Figura 14 b)** [5].

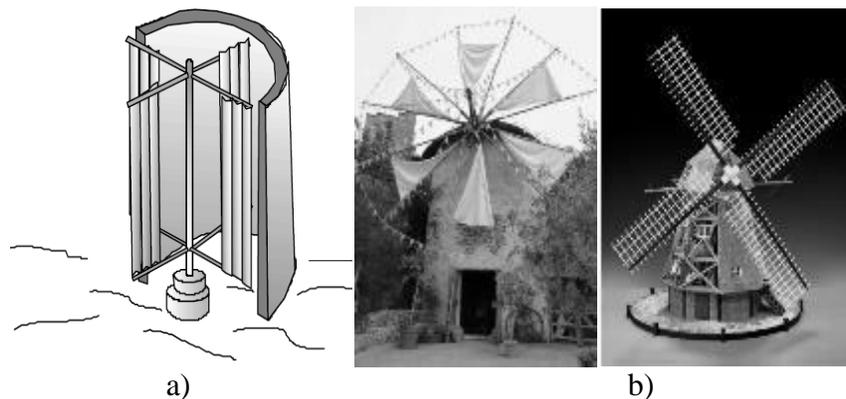


Figura 14. a) panémona, b) molino de viento griego y holandés.
Fuente: [5].

El uso de la energía del viento ha evolucionado, gracias a los esfuerzos humanos. Han pasado de máquinas bastante rudimentarias: molinos de eje vertical fabricados de madera con cierto número de aspas cubiertas con telas, hasta los aerogeneradores que utilizan una tecnología muy sofisticada. Por otro lado tenemos la evolución de las panémonas, molinos mediterráneos, tipo Holandés, multipala americano hasta los de hoy en día que proporcionan mucha mayor potencia y que son desarrollados por grandes compañías de la industria aeronáutica, como ejemplos se observan en la **Figura 15** [22].

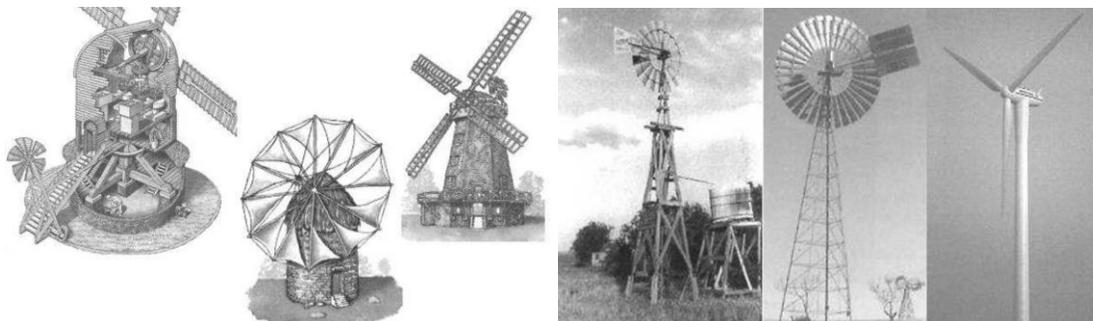


Figura 15. Evolución de los aerogeneradores.
Fuente: [22]

2.2.2 Principio de operación

Como se ha mencionado, la energía mecánica de rotación es el intermedio de conversión de la energía cinética en energía eléctrica sin el uso de combustible a través de las palas del aerogenerador.

Cabe mencionar que los aerogeneradores pueden ser de sustentación o de resistencia de acuerdo a las fuerzas del viento que se usan como fuerza motriz, para una mejor explicación, refirámonos a turbinas de uso más común en la actualidad que son las de sustentación, en esta clase de turbinas el viento circula por los dos lados de las palas, además, sus perfiles de geometría son distintos, por lo que crean presiones distintas y estas a su vez producen una fuerza de sustentación llamada sustentación aerodinámica que es similar a lo que sucede con las alas de los aviones como se ve en la **Figura 16**.

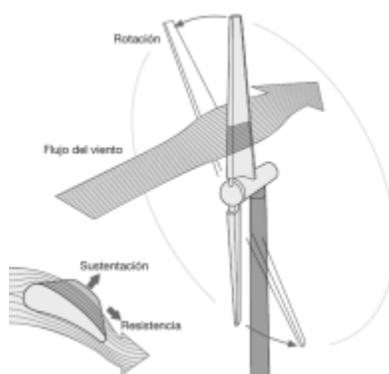


Figura 16. Principio de sustentación aerodinámica.

Fuente: [13]

En las alas del avión, la sustentación es la encargada de levantarlo y mantenerlo volando, mientras que en un aerogenerador, debido a que las aspas se encuentran fijas lo que origina es que solo rote alrededor de su eje. En los aerogeneradores que son diseñados adecuadamente por las grandes compañías, la relación sustentación/resistencia es grande dentro del rango normal de operación.

En un aerogenerador es necesaria una velocidad de viento mínima (velocidad de acoplamiento) de 3 a 5 m/s y entrega la potencia nominal a una velocidad de 12 a 14 m/s. El sistema de frenado para la turbina se considera por razones de seguridad, a velocidades elevadas por lo general superiores a 25 m/s (velocidad de desconexión), son diseñados los aerogeneradores.

El bloqueo de los aerogeneradores puede efectuarse por medio de frenos mecánicos que detienen el rotor o, en el caso de palas de inclinación variable, “escondiéndolas” del viento al ponerlas en la posición conocida como “bandera”, que no es más que la aspa se encuentra paralela al eje del rotor y su borde de ataque de esta se encuentra en dirección al viento, en esta posición la carga sobre las palas se reduce al mínimo.

2.2.3 Rendimiento del aerogenerador

Para obtener el rendimiento del aerogenerador es necesario hacer uso de la ecuación utilizada para la obtención de potencial eólico, y haciendo uso del coeficiente de potencia que es la relación entre la potencia extraída y la potencia disponible del viento.

De forma general la potencia activa producida por una turbina se expresa por la siguiente ecuación: [23], [24], [25].

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad \text{Ec. (5)}$$

Dónde:

C_p = coeficiente de potencia o eficiencia del rotor, el cual está en función de β y λ ,

β = ángulo de paso

λ = relación de velocidad periférica (TSR) [26], [27] y se representa por la ecuación:

$$\lambda = TSR = \frac{\text{velocidad periférica de la pala}}{\text{velocidad del viento}} = \frac{W_t R}{V} \quad \text{Ec. (6)}$$

Dónde:

W_t = velocidad de la turbina [rad/s]

R = radio de la turbina [m]

V = velocidad del viento [m/s]

Esta ecuación fue establecida por el señor Albert Betz quien fue un destacado investigador de aeronáutica. En su fórmula también conocida como límite de Betz demostró que la máxima energía recuperable por un aerogenerador ideal es igual a $\frac{16}{27}$ de la energía total de viento, este es el coeficiente de potencia máximo dado por la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{2\rho A V^3 a(1-a)^2}{\frac{1}{2}\rho A V^3} = 4a(1-a)^2 \quad \text{Ec. (7)}$$

Lo que resalta a primer avista es que la potencia aumenta con el cubo de la velocidad del viento, es decir, que a mucho más viento, obtendremos mayor energía, teniendo en cuenta el rendimiento η de cada tipo de aerogenerador (**Tabla 2**), de acuerdo a esto la fórmula del señor Betz y tomando en cuenta que ningún rotor es ideal podemos expresarlo de la siguiente manera [5]:

$$P = \eta \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad \text{Ec. (8)}$$

Tabla 2. Características y rendimiento de varios rotores eólicos.

Eje	Tipo de Rotor	Rendimiento Máximo η	Características
HORIZONTAL	Holandés	0.17	<ul style="list-style-type: none"> ○ 30 – 60 KW ○ Alto par de arranque ○ Velocidades medias ○ Diseño ineficiente de las palas ○ 4 palas
	Multipala americano	0.15	<ul style="list-style-type: none"> ○ 0.4 – 6 KW ○ Alto par de arranque ○ Bajas velocidades ○ Muchas pérdidas ○ 12 – 15 palas
	Perfil aerodinámico (hélices)	0.47	<ul style="list-style-type: none"> ○ 0.5 – 3.200 KW ○ Bajo par de arranque ○ Altas velocidades ○ Alto rendimiento ○ 1 – 3 palas
VERTICAL	Savonius	0.30	<ul style="list-style-type: none"> ○ 0 – 1.5 KW ○ No requiere orientación ○ Alto par de arranque ○ Bajas velocidades ○ 2 – 4 palas
	Darrieus	0.35	<ul style="list-style-type: none"> ○ 5 – 500 KW ○ No requiere orientación ○ No arranca solo ○ Altas velocidades ○ Buen rendimiento ○ 2 – 3 palas

Fuente. [28]

En la **Figura 17** y **Figura 18** se puede apreciar la variación del C_p para distintos tipos de aerogeneradores y gracias a ellas podemos determinar la calidad del aerogenerador considerando dicha curva.

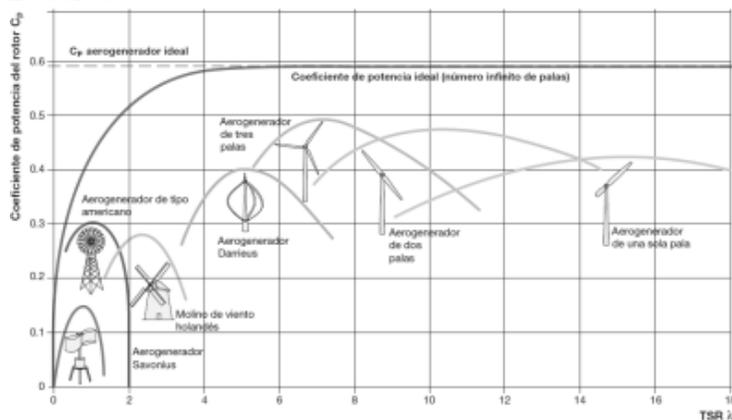


Figura 17. Forma de la curva de relación C_p respecto de TSR de diferentes aerogeneradores.

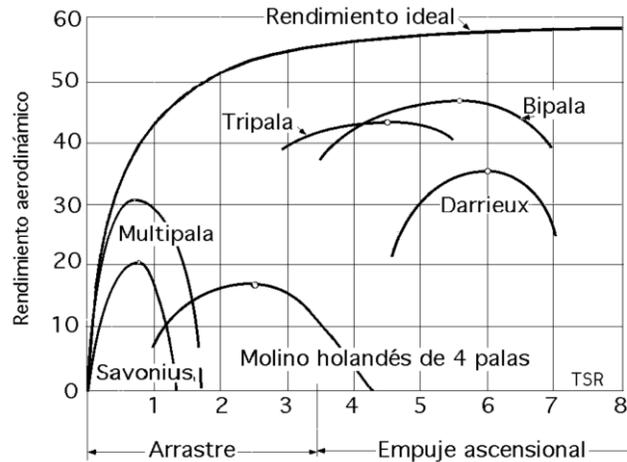


Figura 18. Coeficientes de la eficiencia del rotor con base en relación de velocidad periférica.

La velocidad de giro de una eólica se puede obtener utilizando la siguiente fórmula:

$$n = \frac{60\gamma V}{\pi D} \quad \text{Ec. (9)}$$

Dónde:

n = número de revoluciones por minuto [rpm]

V = velocidad del viento en metros por segundo [m/s].

D = diámetro de la eólica en metros [m].

El factor γ se llama velocidad específica del rotor eólico y este depende de la anchura y del ángulo de calado de las palas. Este factor tiene un valor nominal comprendido entre aproximadamente 1 y 14. En el rotor Savonius que se utilizará tiene un valor comprendido entre 0.9 y 1.1.

De acuerdo a las gráficas presentadas anteriormente se puede definir como aerogeneradores rápidos a aquellos que poseen una TSR óptima alta, en tanto que los aerogeneradores lentos tiene una TSR óptima baja.

Además, el coeficiente de potencia (C_p) debe de estar y permanecer en su valor máximo tanto tiempo posible, esto aun con la velocidad del viento variable, esto con el fin de maximizar la energía que es producida anualmente con el funcionamiento del aerogenerador.

2.2.4 Tipos de aerogeneradores

En la actualidad se pueden hallar varios dispositivos que permiten el aprovechamiento de la energía eólica, del cual, se puede realizar una clasificación de estos dependiendo de la posición de su eje de giro respecto a la dirección del viento. Estas máquinas pueden ser de dos tipos:

- Aerogeneradores de eje horizontal – HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine).
- Aerogeneradores de eje vertical – VAWT (Vertical Axis Wind Turbine);

De los cuales, los aerogeneradores HAWT representan el 99% del total utilizado en el mundo y que a su vez se subdividen en:

- Aerogeneradores a barlovento (upwind);
- Aerogeneradores a sotavento (downwind).

Del total de estos aerogeneradores, el 99% utilizan tres aspas y el resto son solo de dos aspas.

Mientras tanto, los aerogeneradores VAWT solo representan el 1% a nivel mundial, estos también se subdividen en:

- Aerogeneradores del tipo Savonius;
- Aerogeneradores del tipo Darrieus;
- Aerogeneradores híbridos Darrieus-Savonius.

A continuación se describirá de manera breve estos dos tipos de aerogeneradores (HAWT y VAWT).

Se llaman aerogeneradores de eje horizontal a barlovento porque, el factor importante que es el viento encuentra antes el rotor que la torre del aerogenerador, este tipo tiene una buena eficiencia en comparación que los aerogeneradores a sotavento, pues no muestran interferencias aerodinámicas con la torre, el único detalle que muestra los aerogeneradores a barlovento es que no se puede alinear de manera autónoma en relación con el viento por lo que es necesario en su diseño que se dote de una aleta que brinde dirección o sistema de orientación al rotor, cosa contraria lo que sucede con los aerogeneradores horizontales a sotavento, pues estos se pueden alinear autónomamente y pueden, además, utilizar un rotor flexible para que pueda resistir vientos muy fuertes, estos aerogeneradores se observan en la **Figura 19**.

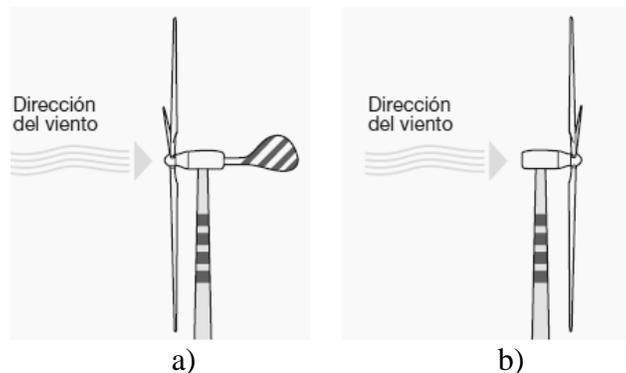


Figura 19. a) Barlovento con alta direccional. b) Sotavento sin alta direccionalidad.

Fuente: [13]

Existe otra clasificación, esta depende de la relación de velocidad periférica (TSR) por sus siglas en inglés, lo que nos indica que la periferia de la aspa circula a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad del viento.

Como ejemplo tenemos que las turbinas eólicas rápidas tiene un TSR alto y que su número de aspas es menor, estas suelen ser de 3 aspas con un $TSR=4$ como se ve en la **Figura 20**, de 2 aspas con un $TSR=8$ mostradas en la **Figura 21** e incluso las que cuentan con una sola aspa como lo son los de la **Figura 22**.



Figura 20. Central eoloeléctrica de La Venta II.
Fuente: [16]



Figura 21. Aerogenerador de 2 aspas.
Fuente: [29]



Figura 22. Aerogenerador de una sola aspa.
Fuente: [30]

El funcionamiento de estas máquinas es diferente, pues en las máquinas lentas la fuerza de arrastre es mucho más importante que la de sustentación, mientras que en las máquinas rápidas la componente de sustentación debe ser mayor que la de arrastre.

Además, el número de palas influye en el par de arranque del aerogenerador, de forma que un aerogenerador con un rotor con gran número de aspas requiere un par de arranque mucho mayor.

Los aerogeneradores de eje vertical, pueden ser sometidos a direcciones y velocidades variables por lo que el flujo aerodinámico resulta ser algo complicado. A continuación se hace una descripción de cada tipo.

El aerogenerador Savonius inventado por el finlandés de igual nombre en 1924, es el más simple aerogenerador que consta de dos cilindros de mismo diámetro acoplados al eje de

giro y separados a una distancia. Este aerogenerador puede arrancar con poco viento por lo que es impulsado por presentar resistencia al aire, debido a esto se le conoce también como aerogenerador de resistencia, presenta también una velocidad de giro muy pequeña y su rendimiento es relativamente bajo, la ventaja de este tipo es que no necesita demasiado mantenimiento, el generador se aprecia en la **Figura 23**.

El aerogenerador Darrieus es un tipo de aerogenerador de eje vertical y de sustentación pues su superficie presenta un perfil de ala que genera una distribución de la presión a lo largo de la pala, además para su correcto funcionamiento requiere de vientos de 4 a 5 m/s como mínimo y en comparación con los aerogeneradores de resistencia el Darrieus presenta mayor eficiencia al tener menos pérdidas por fricción, el aerogenerador Darrieus se muestra en la **Figura 24**.

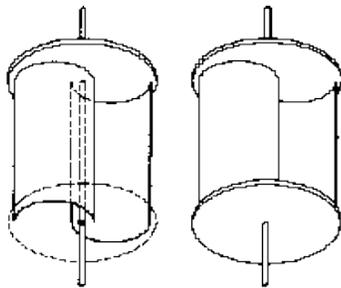


Figura 23. Aerogenerador tipo Savonius.



Figura 24. Aerogenerador Darrieus.

El aerogenerador híbrido o conocido también como giromil, mostrado en la **Figura 25**, es una combinación de los dos aerogeneradores mencionados anteriormente, ya que por una parte, el Savonius coloca en funcionamiento este aerogenerador con una velocidad de viento muy pobre y el Darrieus es el que genera la energía para mayores velocidades del viento.

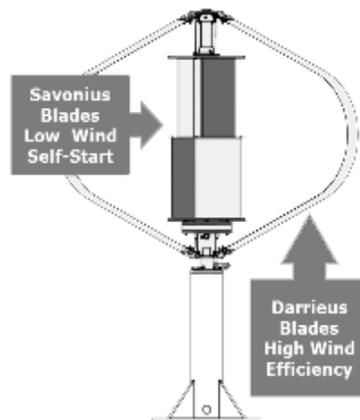


Figura 25. Aerogenerador híbrido o giromil.

En la **Tabla 3** se muestra una comparativa de diferentes tipos de aerogeneradores con varios parámetros de evaluación.

Tabla 3. Tabla de comparación de varios tipos de aerogeneradores.

TIPOS DE AEROGENERADORES	FACTORES COMPARATIVOS									
AEROGENERADORES HORIZONTALES	Capacidad de Generación KW	Dificultad de operación	Complejidad Fabricación	Complejidad Montaje	Necesidad Mantenimiento	Monto Inversión	Seguridad Necesaria	Velocidad Viento	Nivel de Ruido	Observaciones
HELICE MULTIPALA	0 - 5	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Media	Baja	Altas pérdidas
HELICE DE PAÑAS PIVOTANTES	30 - 50	Media	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Media - Alta	Media - Alta	Diseño ineficiente de palas
HELICE DE PARAS ALABEADAS	0.5 - 3600	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alto rendimiento
AEROGENERADORES VERTICALES	Capacidad de Generación KW	Dificultad de operación	Complejidad Fabricación	Complejidad Montaje	Necesidad Mantenimiento	Monto Inversión	Seguridad Necesaria	Velocidad Viento	Nivel de Ruido	Observaciones
AEROGENERADOR SAVONIUS	0 - 2	Baja	Simple	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Trabaja a bajas velocidades
AEROGENERADOR DARRIEUS	5 - 500	Media	Media	Media	Alta	Media	Media	Media	Media - Alta	No arranca solo
HELICE DE PALAS TIPO GROMIL	2 - 300	Media	Media	Media	Baja	Media	Media	Media	Media - Alta	Puede tener 3 o 4 palas

Otra forma de clasificar a los aerogeneradores es por su producción eléctrica en función del potencial eólico como se muestra en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Clasificación de aerogenerador por potencial eólico.

DENOMINACIÓN	KW	UTILIZACIÓN
Muy Baja ¹	< 1	Embarcaiones, sistemas de comunicación, refugios de montaña, iluminación, etc.
	1 - 10	Granjas, viviendas aisladas (sistemas EO-FV), bombeo, etc.
Baja	10 - 100	Comunidades de vecinos, PYME's (sistemas mixtos de EO.Diesel), drenaje, tratamiento de
Media	100 - 1000	Parque eólicos (terreno complejo).
Alta	1000 - 10000	Parque eólicos (terreno llano, mar adentro).
Muy alto	> 10000	En fase de investigación y desarrollo, requieren nuevos diseños y materiales no

2.2.5 Elementos principales de un aerogenerador

Los aerogeneradores de baja potencia cuentan con una estructura semejante a los grandes aerogeneradores, lo que les diferencia es que los pequeños cuentan con una estructura bastante simple [31]. Enseguida se presenta los elementos que constituyen tanto a los aerogeneradores de eje horizontal como vertical.

Los componentes principales que están presentes en un aerogenerador de eje horizontal se muestran en la **Figura 26** y se describen posteriormente:

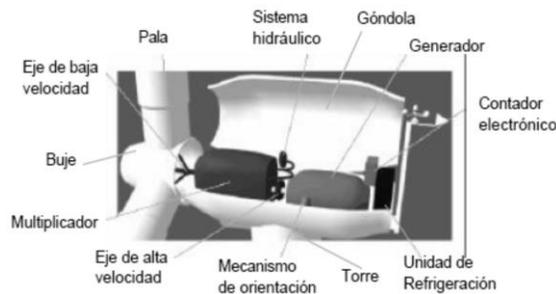


Figura 26. Elementos de un aerogenerador.

Fuente: [5]

Torre: esta estructura es construida para poder soportar el peso de las aspas del rotor así como también de soportar las fuerzas de empuje del viento. Para esta estructura se encuentran varios tipos que se mencionan a continuación:

- Torre de celosía: esta torre es construida por perfiles de acero soldados lo que permite un costo bajo aunque en la actualidad ya no son muy utilizados debido a su estética.
- Torre tubular de acero.
- Torre de mástil tensado.

Rotor: este componente ayuda a las alabas a convertir la energía cinética en movimiento mecánico y mientras el área de barrido es más grande mayor será la producción de energía. Estos rotores se dividen en rotor a barlovento y rotor a sotavento como se ha mencionado anteriormente (**Figura 19**). Además está formado por dos parte que son a) las palas y b) buje, en donde van unidas las palas y este a su vez va conectado a un multiplicador.

Góndola y tren de fuerza: la góndola es la parte donde se encuentra la turbina con todos sus sistemas como caja multiplicadora, sistema de dirección, sistema de control y está situado en la parte superior de la torre.

Caja Multiplicadora: es un multiplicador de velocidad de giro que se encuentra acoplado entre el rotor y el generador para adaptarla a sus necesidades de este mismo, además, en potencias inferiores a 10 KW no se usa, pues el rotor se encuentra conectado de forma directa al generador.

Generador: su función básicamente es transformar la energía mecánica en energía eléctrica. En el siguiente tema se centrara más en este tema para un mejor aprovechamiento.

Regulador: es el que controla la velocidad de rotación de las palas por la velocidad del viento, haciendo que el rotor se frene cuando los vientos son demasiado fuertes.

Orientador: que se encarga de orientar el aerogenerador en dirección del viento para aprovechar su máximo potencial.

Los componentes para un aerogenerador de eje vertical son similares excepto que los de este tipo no requieren un sistema de orientación para direccionar el aerogenerador en dirección del viento.

2.3 Generador eléctrico

Como se ha mencionado anteriormente, el generador es la máquina encargada de convertir la energía mecánica en energía eléctrica y para que esto pueda llevarse a cabo requiere de un procedimiento ya conocido que es el de utilizar inducción electromagnética. Además, de acuerdo al tipo de máquina que se requiera, del tipo de aerogenerador que se va a utilizar, de su modo de operación ya sea con una velocidad del rotor constante o velocidad variable, este puede entregar o generar corriente directa o corriente alterna.

Por otra parte, para la selección de un generador eléctrico se debe de considerar también el costo, las condiciones en que va a operar, las aspas y que es lo que va a alimentar o almacenar.

2.3.1 Tipos de generadores

Comencemos diciendo que hay varios tipos de generadores como se ha mencionado anteriormente y de los cuales podemos describir brevemente:

Generador de Corriente Directa

Los generadores de corriente directa son máquinas sencillas y generan corriente a bajas velocidades por lo que son utilizados en aerogeneradores de tamaño pequeño, pero requieren de un mantenimiento periódico y su costo es muy elevado, la **Figura 27** muestra el tipo de generador.

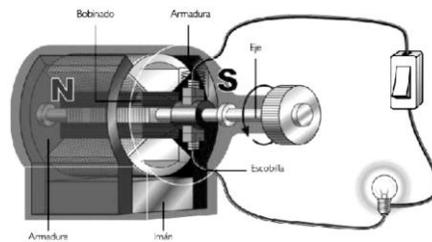


Figura 27. Generador de Corriente Continua.

Fuente: [32]

Generador de Corriente Alterna

a) Síncronos o Alternadores

De polos formados por electroimanes alimentados por corriente continua

De polos formados por imanes fijos o permanentes

b) Asíncronos o de Inducción

De jaula de ardilla

De rotor devanado

Los de tipo síncrono o alternadores están constituidos por un electroimán de corriente continua o por imanes permanentes, ver **Figura 28**, son de velocidad variable y proporcionan un gran rendimiento potencial, pero deben de operar a una velocidad constante para que pueda mantener fija la frecuencia, de no mantener la velocidad y solo suministrar corriente de frecuencias variables es necesario utilizar un convertidor de frecuencias por si se desea conectar a la red y que de este modo sea el elemento intermedio entre ambos. Este tipo de generador es utilizado en máquinas que alimentan instalaciones autónomas como: iluminación o calefacción y la mayoría utilizan alternadores de imán permanente pues es una configuración sencilla y robusta.

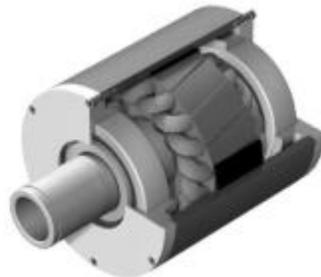


Figura 28. Alternador de imanes permanentes.

Fuente. [33]

Los asíncronos o de inducción son esencialmente motores trifásicos de inducción, pero también monofásicos, se caracterizan por una velocidad de sincronismo que depende del número de polos y de la frecuencia de la red. En la **Figura 29** se observa como están formados por un rotor que puede ser de tipo jaula de ardilla o devanado y por un estator en el que se encuentran las bobinas inductoras.



Figura 29. Estator y rotor de un motor eléctrico.

Fuente: [34]

Los de tipo jaula de ardilla su rotor está compuesto por un conjunto de barras de cobre cortocircuitadas por anillos a cada extremo del rotor. Por lo que la jaula de ardilla toma la corriente del estator que habilita posteriormente al rotor para ser usado en máquinas con diferente número de polos. El de tipo bobinado está compuesto por un enrollamiento (devanado) introducido en ranuras similares a las del estator y los extremos de cada fase se conectan a unos anillos colectores montados sobre el eje, aislados eléctricamente de él. El motor asíncrono suministra cualquier potencia hasta los límites de su capacidad de sobrecarga, es por ello el interés de un generador de este tipo [35].

2.3.2 Funcionamiento

Como se ha mencionado, las máquinas de inducción son de tipo eléctricas de corriente alterna, por lo que funcionan a base de inducción electromagnética, el campo magnético que ofrece el estator induce una corriente elevada en el rotor y esta a su vez genera su propio campo magnético el cual interactúa con el campo principal para hacer girar al rotor.

Para que funcione una máquina de inducción el rotor debe de girar a una velocidad diferente de la del campo que produce el movimiento rotatorio del estator, éste estator está hecho de bobinas devanas en tres grupos o fases las cuales son alimentadas con corriente trifásica, las bobinas se encuentran repartidas alrededor de la periferia del estator y están colocadas en muescas que presentan alta permeabilidad magnética para que de esta forma se pueda producir una intensidad de campo magnético a partir de una corriente de excitación pequeña. El rotor por el contrario está compuesto por una estructura diferente como se ha mencionado anteriormente, pero tiene un núcleo magnético [36].

De una forma general, el campo magnético del estator gira a velocidad síncrona. El voltaje inducido en cada circuito de los conductores del rotor se debe a la velocidad relativa entre el campo giratorio y el rotor, además del flujo del estator φ . La magnitud de éste voltaje está dado por la del de inducción electromagnética de Faraday, la que establece:

$$e = \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Ec(10)}$$

Dónde:

φ = flujo magnético del estator respectivo al circuito del rotor.

A su vez, el voltaje establece la corriente que va a circular por el rotor. El torque es generador por la interacción electromagnética de la corriente del rotor y el flujo del estator, su magnitud está dada por la siguiente ecuación:

$$T = K\Phi I \cos\varphi_2 \quad \text{Ec(11)}$$

Dónde:

K = Constante de proporcionalidad

Φ = Magnitud de la onda de flujo del estator

I = Magnitud de la corriente inducida en el rotor

φ_2 = Angulo de fase por el cual la corriente del rotor retrasa al voltaje del rotor

Entonces bajo este torque es como acelera el rotor. Ahora si el rotor estuviera sin fricción en su rodamiento, podría girar libremente sin ninguna resistencia, y bajo este supuesto, el rotor podría alcanzar la velocidad síncrona, es decir, alcanzar la misma velocidad que el campo del estator lo que no produciría ningún torque a esta velocidad.

Para el caso cuando se agrega una carga al rotor, lo que sucede es que irá más despacio por lo que tendrá una velocidad relativa respecto a la del estator que siempre gira a una velocidad síncrona, dando como resultado que se induzca electromagnéticamente una

corriente y un voltaje, produciendo de esta forma un torque en el rotor que ha de satisfacer la necesidad de carga. Bajo estas condiciones la maquina funciona como un motor.

Cuando se le incorpora una turbina de viento al rotor y éste gira más rápido, la corriente y torque toman una dirección contraria ocasionando que ahora la maquina trabaje como generador eléctrico.

Para el funcionamiento de un motor de inducción de jaula de ardilla como generador sucede como se ha explicado anteriormente, ahora si actúa como generador, no puede producir potencia reactiva sino que la consume por lo que requiere de una fuente externa para mantener el campo magnético del estator y también controlar el voltaje en las terminales del generador [37].

Para un generador de imanes permanentes, que se usa usualmente en turbinas de viento, son la mejor opción para los pequeños aerogeneradores. En este tipo, los imanes permanentes entregan el campo magnético descartando la necesidad de devanados o suministro de corriente al campo como el caso del motor de jaula de ardilla como generador. La potencia entregada por este generador es de voltaje variable y la frecuencia en corriente alterna, debido a esto es necesario rectificar inmediatamente a corriente continua para que pueda ser almacenada en bancos de baterías. Debido a que los imanes están integrados directamente en el rotor, la potencia es tomada directamente de la armadura inmóvil, de esta forma no hay necesidad de conmutador o escobillas.

2.3.3 Características

La utilización de imanes también la encontramos en el generado axial, ya que este tipo de generador consta de una placa circular de imanes permanentes, los cuales constituirán el rotor, para este caso de nuestro aerogenerador, y que esta acoplado a las palas, un estator con diferente número de bobinas a los imanes como se parecía en la **Figura 30**.

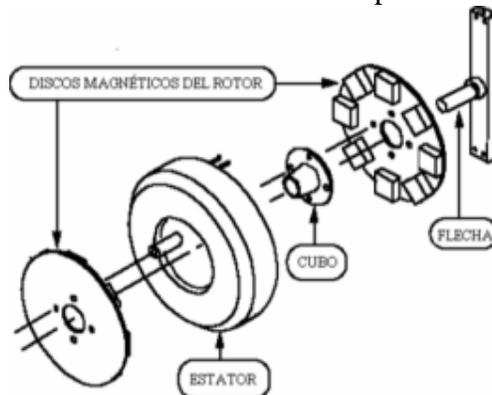


Figura 30. Generador axial de imanes permanentes.

El flujo axial se determina porque el campo magnético resultante de un generador rota paralelo al eje y concéntrico respecto a él, desde su eje, recibe un torque que hace girar los discos de imanes a cierta velocidad de giro que produce el flujo, así, el flujo que esta enlazado por las espiras del estator es senoidal con una frecuencia proporcional a la velocidad de giro y a la cantidad de polos.

Algunas ventajas que presenta el generador de flujo axial con otras máquinas de inducción o síncronas son [38]:

- Eficiencia de la maquina debido a los imanes.
- El flujo depende solo de la magnetización y velocidad de giro.
- Permite empleo de gran número de polos y por tanto un acoplamiento directo a la turbina.
- Menor peso y mayor relación de potencia/tamaño.
- Equipo robusto y confiable gracias a su menor cantidad de componentes y piezas.

Además, el circuito equivalente de la máquina de inducción que se muestra en la **Figura 31** consiste en cinco parámetros importantes que son: resistencia del estator, resistencia del rotor, inductancia del estator, inductancia del rotor y la inductancia principal del estator.

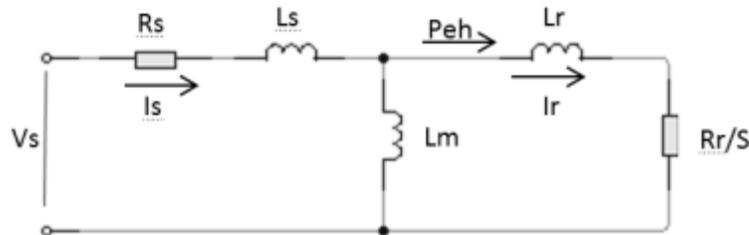


Figura 31. Circuito equivalente de la máquina de inducción.

El voltaje (V_s) y la corriente tanto del estator y del rotor (I_s, I_r) son cantidades RMS por fase.

Para calcular la energía transferida a través del entrehierro al rotor de una fase es:

$$P_{eh} = \frac{R_r}{S} I_r^2 \quad \mathbf{Ec(12)}$$

El torque hecho por esta máquina por sus tres fases se da por:

$$T_e = 3 \frac{pf}{2} \frac{R_r}{S W_s} I_r^2 \quad \mathbf{Ec(13)}$$

Dónde: $W_s = 2\pi f_s$

De esta ecuación podemos observar que el torque está en función del desplazamiento y si se grafica se puede observar que para valores de desplazamiento negativo, la máquina de inducción funciona como generador, esto debido a que como se ha explicado anteriormente, la velocidad del rotor es mayor que la velocidad del campo del estator.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Caracterización del recurso eólico

Uno de los objetivos del trabajo es realizar el análisis del recurso eólico que se encuentra en la región para establecer su posible utilización en la generación de energía eléctrica, impulsar la cultura del autoconsumo y contrarrestar los cambios efectuados por la alta contaminación debido al uso desmedido del petróleo.

3.1.1 Delimitación de la zona

Para el estudio del recurso eólico es necesario el uso de datos adquiridos mediante instrumentos como lo es la estación meteorológica que en este caso está ubicada en la parte posterior del edificio D1 y a un costado del LT1 de la Universidad Politécnica de Puebla, sus coordenadas y parámetros de lectura se muestran en la **Tabla 5**, en la **Figura 32** se observa su ubicación geográfica de la universidad.

Tabla 5. Coordenadas de la estación meteorológica UPPue # 1.

Descripción	Valor
Latitud Norte	1905'42''
Longitud Oeste	9822'04''
Altitud	2222 msnm
Inicio de operación	10 / Dic. / 2007

Fuente: Propia.



Figura 32. Ubicación geográfica de la Universidad Politécnica de Puebla.
Fuente: Propia.

3.1.2 Equipo

Para la medición de los parámetros del viento, se requiere de un equipo que esté generando datos continuos en el tiempo y de buena calidad, por ello se usa la estación meteorológica de la marca Davis y modelo Vantage Pro2 Plus [39], esta estación cuenta con un anemómetro, veleta y sensores de humedad y temperatura entre algunos y se encuentra instalada a una altura de 2 metros del nivel del suelo como se muestra en la **Figura 33**.

De la estación meteorológica destacamos dos sensores que son de utilidad para el trabajo, el anemómetro y la veleta. El anemómetro de 3 copas, el cual gira en un eje vertical quedando las copas de frente al aire y convirtiendo su fuerza de presión en un torque. Posteriormente un transductor convierte este movimiento de rotación en señales eléctricas que son almacenadas en un registrador de datos para calcular las velocidades del viento. La veleta ayuda a medir la dirección del viento, esta veleta busca constantemente la posición de equilibrio logrando siempre alinearse a la posición del viento. La estación meteorológica usa una aleta con eje de rotación vertical, la más común en el mercado. Al igual que el anemómetro, utiliza un transductor para convertir el movimiento en señal eléctrica y que es almacenada en el registrador de datos.



Figura 33. Estación meteorológica de la UPPue.
Fuente: Propia.

3.1.3 Factores del potencial eólico

Para la obtención del potencial eólico de la zona son necesarios algunos factores [40] importantes entre los cuales se destacan la velocidad del viento, la densidad del aire y el tamaño del rotor del aerogenerador [41].

Para conseguir la velocidad del viento se utiliza la base de datos que proporciona la estación meteorológica que hace una captura en función del tiempo por lo que resultan mediciones de cada 30 minutos durante el año 2011 y el periodo comprendido del 01 de enero al 30 de septiembre del año 2012, ver **Anexo 1**. Estos datos son enviados de forma inalámbrica desde la estación meteorológica a una computadora con el fin de acceder a los datos constantemente de forma remota reduciendo costos de traslado de información y de verificar la integridad de los sensores.

El factor siguiente se calcula en función de la altura de la región y del promedio de la temperatura donde se están realizando las mediciones, además se toma el valor constante de 1.225 Kg/m³ que pertenece a la presión a nivel del mar y a una temperatura de 15 °C. Para determinar cómo se manifiesta la variación de la densidad del aire consideramos la ecuación siguiente [42].

$$\rho = 1.225e^{\left[\frac{-z}{8435} - \frac{(T-15)}{288}\right]} \quad \mathbf{Ec(14)}$$

Siendo la altura de la zona medida en metros sobre el nivel del mar el valor de z , y la temperatura en grados centígrados el valor de T .

Continuando, para el tamaño del rotor se toman instrumentos comerciales con el fin de hacer un estimado de cuanta potencia eólica se halla en la zona. Para fines de cálculo se tomaran aerogeneradores comerciales, cuyas especificaciones [43] [44] [45] [46] se muestran en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Especificaciones técnicas de aerogeneradores comerciales.

	Aerogenerador Comercial				
Empresa	VESTAS	GAMESA	ACCIONA	CLIPPER	
Modelo	V 17	V 27	G-52	A-72	C-89
Potencia nominal	75 KW	225 KW	850 KW	1500 KW	2500 KW
Diámetro de rotor	17 m	27 m	52 m	72 m	89 m
Área de barrido	227 m ²	572.5 m ²	2124 m ²	4071 m ²	6221 m ²
Número de palas	3	3	3	3	3
Altura de eje	16.5 m	31.5 m	44, 55, 65 m	60, 71.5, 80 m	80 m
Viento inicial	3.5 m/s	3.5 m/s	3.5 m/s	4 m/s	4 m/s

Fuente: Propia.

3.1.4 Exponencial de Hellmann

Otros factores influyen también como lo son las estaciones del año, los cultivos, la orografía y obstáculos ya sean temporales o permanentes. Es por ello que utilizamos

expresiones teóricas para determinar perfiles de velocidad dependiendo de la altura donde se cuente con la información. La ley exponencial de Hellmann es una de estas expresiones que se usa para relacionar la velocidad del viento a distintas alturas, esta ley es expresada por la siguiente ecuación.

$$\frac{V_f}{V_o} = \left[\frac{H_f}{H_o} \right]^\alpha \quad \text{Ec(15)}$$

Donde v_o es la velocidad de referencia a una altura H_o también de referencia, y v_f es la velocidad final a calcular a una altura H_f determinada, α es el coeficiente de fricción, conocido comúnmente como exponente de Hellman, el cual depende del tipo de terreno donde se hacen las mediciones [47].

También es conveniente hacer uso de la **Tabla 1** que muestra el perfil vertical del viento según la ley de Hellman de acuerdo a la altura con el terreno [4].

3.1.5 Densidad de potencial eólico y potencial eólico máximo

La ecuación mostrada a continuación, la tomaremos en consideración ya que nos representa la densidad de potencial eólico (WPD) por sus siglas en inglés. Esta ecuación es de gran utilidad pues proporciona una indicación más correcta del potencial de energía eólica que hay en un sitio, pudiera decirse que es para determinar el mejor espacio para el desarrollo de la energía eólica de un lugar.

$$WPD = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad \text{Ec(16)}$$

Donde **WPD** es la densidad de potencial eólico que se expresa en W/m^2 , ρ es la densidad del aire en Kg/m^3 , v es el promedio de las velocidades del viento en m/s al cubo.

Ahora, para calcular la potencia máxima que puede entregar un aerogenerador utilizamos la **Ec. (3)** [23], en la que está incluida el área barrida por las alabes del equipo.

Donde **P** es la potencia que se expresa en W , ρ es la densidad del aire en Kg/m^3 de la zona a evaluar, **A** es el área del rotor expresada en m^2 y v es el promedio de las velocidades del viento en m/s al cubo.

3.1.6 Análisis de datos

El análisis de los datos se realiza utilizando el software de hoja de cálculo y/o Windographer [48], en nuestro caso, para realizar una comparación de resultados en su graficación y también para determinar cuál es la dirección del viento que presenta la región con el fin de poder generar la rosa de los vientos.

3.2 Diseño y construcción del generador eléctrico

En esta sección se describe como es diseñado y construido el generador de imanes permanentes para el funcionamiento de nuestro aerogenerador con el propósito de que pueda entregar una potencia favorable para impulso del motor de tipo jaula de ardilla. En la **Figura 34**, se aprecia su diseño el cual es un generador de imanes permanentes de tipo flujo axial.

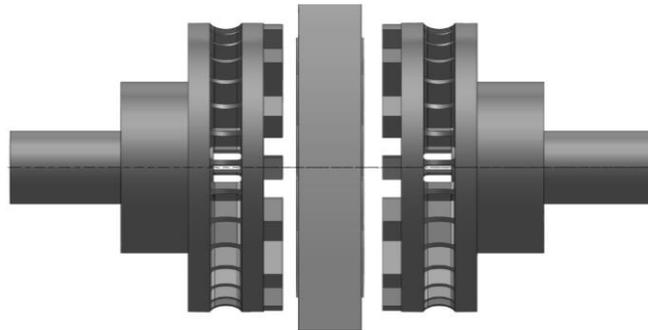


Figura 34. Generador eléctrico
Fuente: Propia.

En este tipo de generador, flujo axial, por sus siglas AFMP vienen del inglés: *Axial Flux Permanent Magnet Machine*) [49] [50], los imanes se disponen sobre un disco de hierro que gira alrededor de un eje perpendicular que pasa por su centro como se observa en la **Figura 35**. Así pues el campo magnético de los imanes es paralelo al eje de giro, y de ahí la frase “flujo axial” que realmente significa campo magnético paralelo al eje de giro.

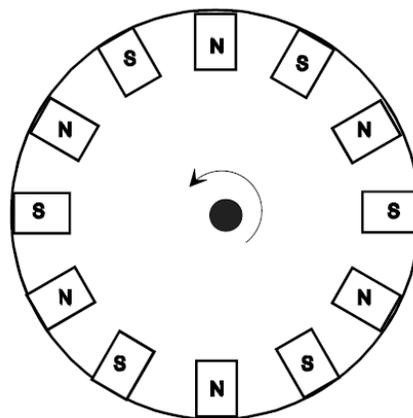


Figura 35. Distribución de imanes en placa de metal.

3.2.1 Imanes permanentes

Los imanes permanentes de Neodimio (Nd-Fe-B; Neodimio-Hierro-Boro) y Samario (Sm-Co; Samario-Cobalto) pertenecen a la categoría de imanes de tierras raras, por lo que representan la última generación en materiales magnéticos debido a que sus propiedades son muy superiores a los materiales tradicionales, un ejemplo de estos imanes se muestra en la **Figura 36**.



Figura 36. Diferentes tipos de imanes permanentes.

Estas propiedades son de gran importancia para la creación de nuevos diseños de máquinas eléctricas a consecuencia de la potencia magnética que otorgan estos imanes. Otra ventaja que proporcionan los imanes permanentes es que pueden ser fabricados de un tamaño menor y propiciar grandes cantidades de campo magnético.

Se ha seleccionado el tipo de imán permanente de Neodimio por sus siguientes atributos mostrados en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Características de elección de imán permanente

Factor de temperatura	Factor de corrosión	Precio
Soportan temperaturas de trabajo que abarcan desde los 80 °C hasta los 180 °C.	Problemas por oxidación solucionables aplicando un adecuado recubrimiento que puede ser de Níquel, resina de Zinc o Epoxi.	Alto precio a comparación con los imanes comunes (ferromagnéticos) pero menor que los de Sm-Co

3.2.2 Diseño de estator

Para el diseño del rotor se usa el software SolidWorks en el cual se realiza la construcción de un cilindro de 40 cm de diámetro y de manera interna irán colocadas 12 bobinas de 4.5 cm de diámetro y con un espesor de 2 cm. Las bobinas cuentan además con un núcleo de hierro de 2 cm de diámetro y una altura de la misma longitud. Se utilizan 12 bobinas debido a que se desarrollara un generador de tres fases. En la **Figura 37**, se ejemplifica de forma rápida el diseño del estator ya que en **Anexo 2** se observa su plano.

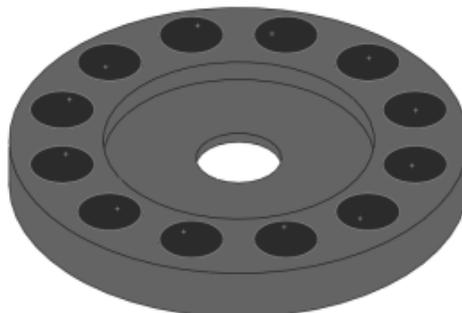


Figura 37. Bobinas colocadas en el estator.

Fuente: Propia.

Para la construcción de una bobina se utiliza el núcleo de hierro colocado en una base para que sea enrollado el alambre magneto **Figura 38**. El alambre magneto a usar es de calibre 15 AWG que cuenta con las características mostradas en la **Tabla 8**.

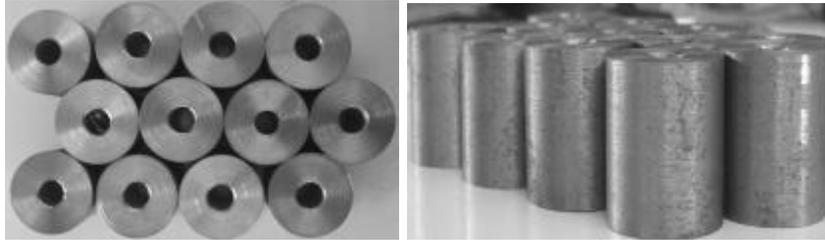


Figura 38. Núcleos de hierro para las bobinas.
Fuente: Propia.

Tabla 8. Características del alambre magneto

CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES DE ALAMBRES DESNUDOS									
Calibre	Diámetro del alambre en mm			Área de la sección transversal mm ²	Diámetro del alambre en in			Área de la sección transversal	
	Mínimo	Nominal	Máximo		Mínimo	Nominal	Máximo	Circular mils	In ²
15	1.435	1.450	1.466	1.651	0.0565	0.0571	0.0577	3259	0.00256

PESO Y RESISTENCIA ELÉCTRICA DE ALAMBRES REDONDOS DE COBRE Y ALUMINIO										
Calibre	Resistencia en cc a 20 °C 100% conductividad			Resistencia en cc a 20 °C 61.8% conductividad		Peso				
	Cobre			Aluminio		Cobre		Aluminio		
AWG	ohm/km	ohm/k	m/Dhms	ohm/km	ohm/k	kg/km	m/g	m/kg	kg/km	m/g
15	10.40	0.711	95.4	16.90	3.79	14.7	0.0681	68.26	4.46	0.224

Fuente: Propia.

Para calcular la longitud de alambre que se requiere para una bobina de 100 vueltas enrollada en el núcleo de hierro se requiere de los datos proporcionados por la tabla anterior tomando en cuenta su diámetro del alambre con la finalidad de no desperdiciar el material.

El enrollamiento del alambre se hace mediante el uso de un taladro de banco el cual nos ayuda a tener una bobina compacta y con las características de diseño. En la **Figura 39** se muestra el procedimiento de enrollamiento de esta misma, solo basta con repetir el procedimiento para completar las 12 bobinas de nuestro estator.

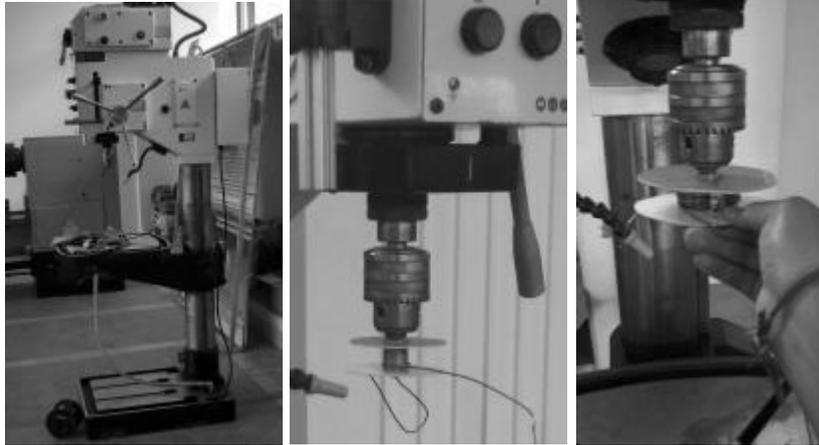


Figura 39. Taladro de banco y enrollamiento de la bobina.
Fuente: Propia.

Una vez obtenidas las 12 bobinas se procede a realizar la encapsulación con resina epóxica para poder tener de esta forma una pieza semejante a la del diseño. Para colocarlas de forma uniforme se realiza previamente una plantilla y se usa un molde para fijarlas fig. 40. Cabe destacar que las bobinas se unieron en serie para que de esta forma podamos poder tener tres fases distintas ya que se trata de un generador trifásico, además las puntas se dejan libres para poder utilizar una conexión tipo delta o estrella según sea el caso que se requiera para la carga de baterías como se observa en la **Figura 40**.

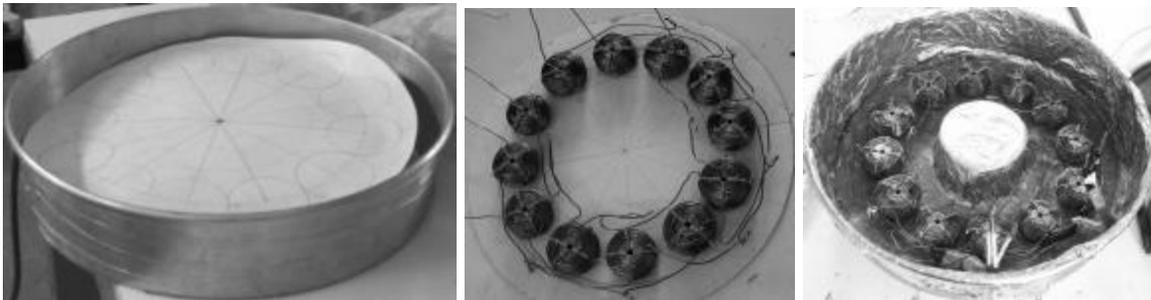


Figura 40. Conexión de bobinas en serie. 3 grupos de 4 bobinas interconectadas. Plantilla y molde para colocación de bobinas.
Fuente: Propia.

3.2.3 Diseño de rotor

El diseño del rotor se realizó de igual forma en el software de diseño asistido por computadora en el cual se toman medidas de un freno de disco de una pic-up Chevrolet s10. En el programa se dibuja esta pieza mecánica agregándole los imanes permanentes de neodimio, estos imanes tienen una dimensión de 4.7 cm de largo por 2 cm de ancho y 0.9 cm de alto. Los 14 imanes permanentes son distribuidos de manera equidistante para tener un mejor aprovechamiento de su campo magnético. La **Figura 41** muestra el bosquejo de la pieza mecanizada con los imanes. En el **Anexo 3** se aprecia el plano del rotor con los imanes permanentes.

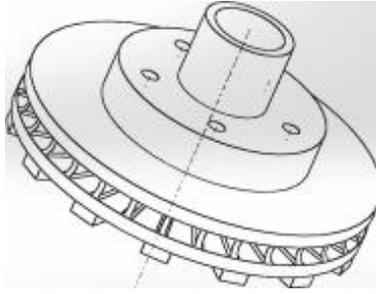


Figura 41. Pieza realizada en solidworks
Fuente: Propia.

Para la fabricación del rotor se realizan los siguientes procesos: se rectifican los discos para tener una superficie pareja para que al momento de colocar los imanes estos puedan tener una mayor área de unión, tal como se aprecia en la **Figura 42**.

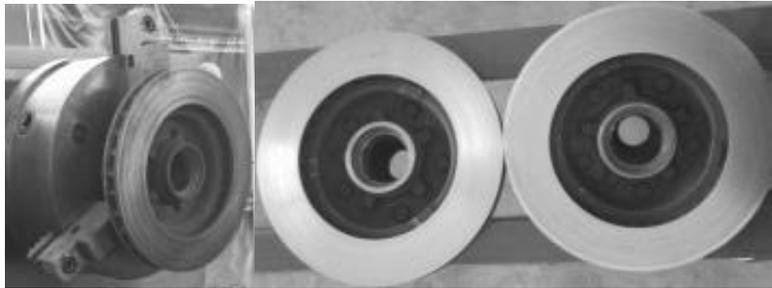


Figura 42. Discos rectificados en torno.
Fuente: Propia.

Se fabrica un molde en el cual se colocaran los imanes para que su distribución sea equidistante. Con el molde se coloca uno a uno los imanes teniendo cuidado de que estos puedan atrapar los dedos o parte de la mano al manipularlos, se fijan con ayuda de pegamento (kola-loka). Se repite el procedimiento hasta fijar los 14 imanes de neodimio como observamos en la **Figura 43**.

Cabe señalar que la orientación de cada imán permanente debe ser la siguiente, una cara debe ser el polo N (norte) el siguiente imán debe de tener colocada la cara superior en polo S (sur).

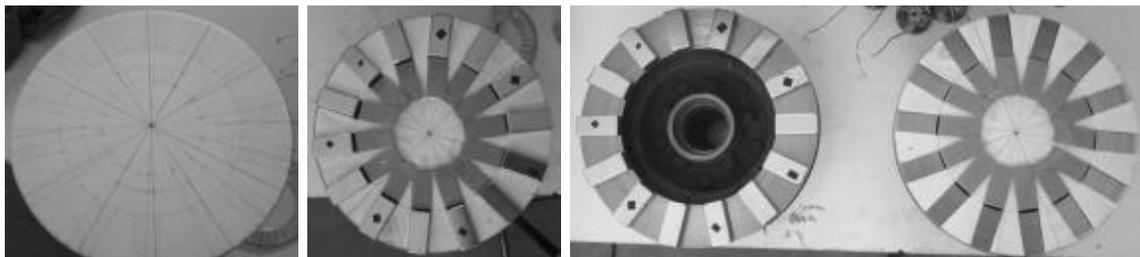


Figura 43. Molde para distribución uniforme de los imanes permanentes de neodimio.
Fuente: Propia.

Para identificar los polos de un imán es necesario utilizar una brújula como se aprecia en la **Figura 44**, la cual al colocarla cerca del imán se observa su dirección de la aguja. Si la aguja de la brújula marca hacia el imán esto quiere decir que el imán tiene polo sur, esto debido a que polos opuestos se atraen. Por el contrario si la aguja de la brújula marca hacia uno mismo, quiere decir que el polo del imán es norte porque presentan igual polaridad tanto el imán como la aguja.



Figura 44. Medición del campo magnético del imán polo sur “S” y polo norte “N”.
Fuente: Propia.

Una vez ya colocados los imanes se continúa con el encapsulamiento para proteger a los imanes de los cambios de clima y brindarles un mayor tiempo de vida, para ello se construye un pequeño molde como el de la **Figura 45** para que en la resina pueda tomar la forma de los discos cuando sea vertida en ellos, como podemos observar en la **Figura 46**.

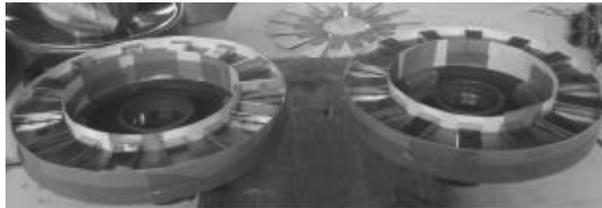


Figura 45. Rotores con molde para recubrimiento de los imanes permanentes.
Fuente: Propia.



Figura 46. Colocación de resina en el molde para recubrimiento de imanes del rotor.
Fuente: Propia.

Con las partes fabricadas por separado, estator y rotor, se procede a realizar el ensamble de estos para tener de forma definitiva el generador eléctrico que nos proporcionara energía para cubrir nuestras necesidades. En primer lugar se procede a realizar los barrenos a los discos tal como lo muestra la **Figura 47 a)** para poder introducir en ellos los espárragos ya cortados, apreciados en la **Figura 47 b)**, a la medida que ayudaran a la sujeción de los rotors a determinada altura para que puedan girar libremente sin friccionar con el estator.

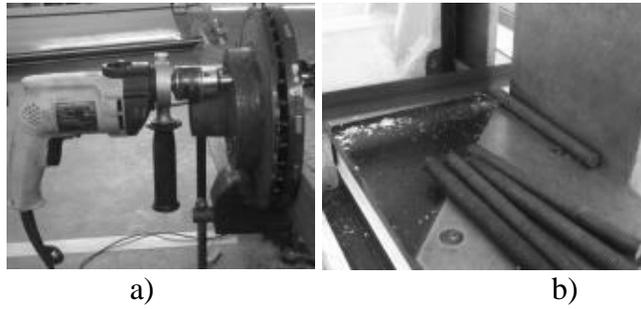


Figura 47. a) barrenos del disco, b) corte del espárrago.
Fuente: Propia.

Por otra parte, se procede a colocar los espárragos en el disco para poder fijar la medida y tomando en consideración el espesor del estator, ver la **Figura 48**.



Figura 48. Espárragos en discos para fijación.
Fuente: Propia.

Enseguida se procede a colocar el estator para verificar que no haya roce con los espárragos, en la **Figura 49** se observa el estator colocado entre los espárragos y el ensamble del segundo rotor de imanes permanente dando origen al generador eléctrico.



Figura 49. Estator sin fricción con los espárragos y ensamble del generador.
Fuente: Propia.

3.3 Álabes del aerogenerador

3.3.1 Selección de las palas del aerogenerador

En este tema se realiza trabajo de búsqueda de acuerdo a los tipos de palas que hay en la actualidad de tipo vertical como se ha mostrado en la sección 2.2.4, con la finalidad de adecuar el tipo de pala a la región con el estudio del viento previamente realizado. Los modelos de pala que se toman en cuenta son los de tipo Savonius, Savonius helicoidal y Darrieus helicoidal **Figura 50**.

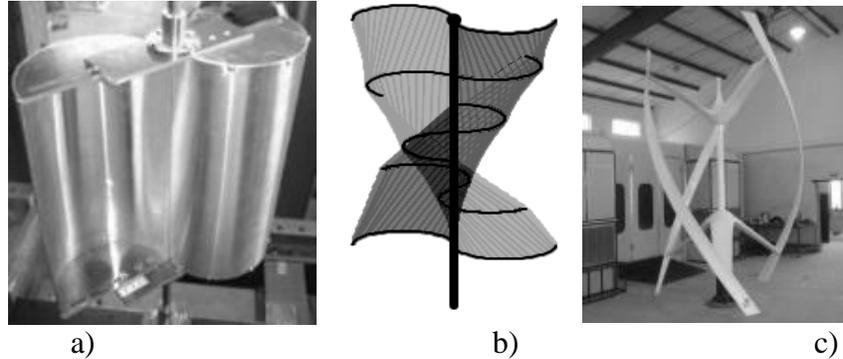


Figura 50. Álabes tipo vertical a) Savonius, b) Savonius helicoidal, c) Darrieus helicoidal.

De estos tres modelos se ha de seleccionar uno que interactúe mejor con el flujo del viento, para ello se hace uso del análisis de la estación meteorología de la universidad, además se debe de tomar en cuenta el material para su fabricación de uno de ellos, es por eso que también se realiza una simulación correspondiente de estos tipos de álabes.

Para el tipo Savonius se hace en primera parte su diseño en CAD visto en la **Figura 51**, para que posteriormente se fabrique sencilla empleando un tambo o tonel de 200 Lt., en la **Figura 52** se muestra seccionado por la mitad para que de esa forma pueda producir energía eléctrica a través del movimiento mecánico proporcionado por la fuerza del viento.

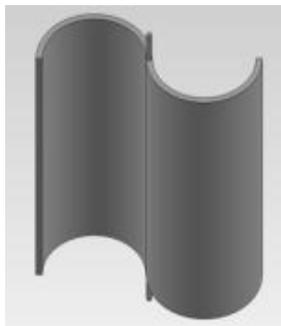


Figura 51. Diseño del rotor Savonius en solidworks.
Fuente: Propia.



Figura 52. Rotor Savonius fabricado.
Fuente: Propia.

Para la pala de tipo Darrieus helicoidal se realiza el diseño en solidworks para tener una visualización de cómo va a quedar la pieza antes de realizar pequeños prototipos para realizar sus pruebas de movimiento en un túnel de viento. En la **Figura 53**. Se presenta el bosquejo de este tipo de aspa en el software de CAD. El plano de esta pala se muestra en el **Anexo 4**.



Figura 53. Rotor tipo Darrieus helicoidal en solidworks.
Fuente: Propia.

Para este tipo de rotor se debe de tener en consideración el ángulo en que se debe de colocar los tres soportes que sostendrán a las palas tanto en la parte superior como en la parte inferior con el fin de proporcionar a l rotor un mejor rendimiento. Tomar en cuenta también el diseño de las palas para que de esta forma pueda girar sin ningún problema. En la **Figura 54** se muestra el ángulo que debe de presentar los soportes superiores respecto a los inferiores y el prototipo fabricado.

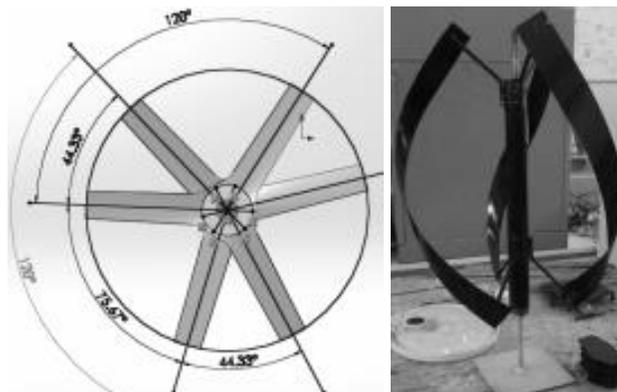


Figura 54. Grado de desplazamiento de la parte superior respecto de la inferior, prototipo elaborado.
Fuente: Propia.

Para el rotor Savonius helicoidal se realiza también previamente a su construcción el diseño en el programa de CAD, ver la figura **Figura 55**, con la finalidad de poder maquinar las piezas en una fresadora automática (CNC). Este tipo de rotor es una variante del rotor Savonius el cual permite tener una superficie en mayor contacto con el flujo del viento para provocar de esta forma el arrastre de la aspa y por consiguiente producir movimiento mecánico que pueda transformar ese movimiento en energía.

Debido a que es complicado la fabricación del rotor savonius helicodal de una sola pieza se dio solución a través de construir una base del tipo Savonius para que de esa forma se puedan reproducir más piezas de esa forma con la finalidad de ir ensamblando cada una de

ellas y desplazándolas aproximadamente 5.6 grados una respecto de otra para llegar a la forma helicoidal de media revolución. La **Figura 56** muestra el diseño de la pieza a fabricar, en el **Anexo 5** se muestra su plano.

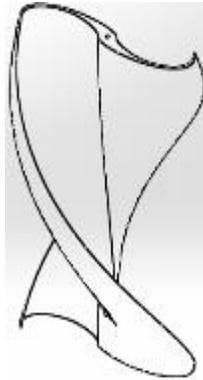


Figura 55. Diseño del rotor Savonius helicoidal en solidworks.
Fuente: Propia.

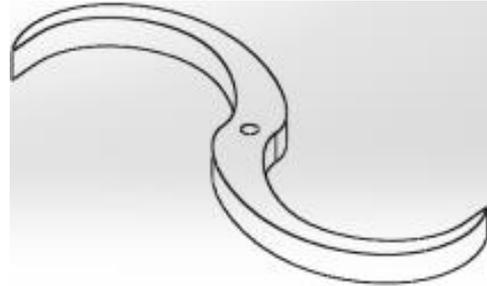


Figura 56. Diseño de pieza para molde del rotor Savonius helicoidal.
Fuente: Propia.

De estos tres ejemplares se ha seleccionado el rotor tipo Savonius helicoidal porque se pretende realizar una comparación y sobre todo verificar si el tipo helicoidal presenta una mayor eficiencia en comparación con el rotor Savonius.

3.3.2 Desarrollo del álabe Savonius helicoidal

Antes de proceder a la fabricación del álabe se realiza un estudio de toda la estructura mediante una simulación en solidworks, específicamente de la deformación que puede tener la pala cuando se encuentra girando a una velocidad de 40 RPM y en el cual también actúa sobre la fuerza de la gravedad, para la simulación se utiliza el material de resina epóxica y la flecha de acero. Los resultados de esta simulación se encuentran en el Capítulo IV RESULTADOS.

El diseño anterior (Savonius helicoidal) es ocupado para maquinar la pieza en la fresadora automática, el modelo es seccionado en tres partes apreciadas en la **Figura 57** ya que la fresadora no cuenta con la longitud requerida de la aspa, pues su área de trabajo es de aproximadamente de 41 cm X 35 cm.

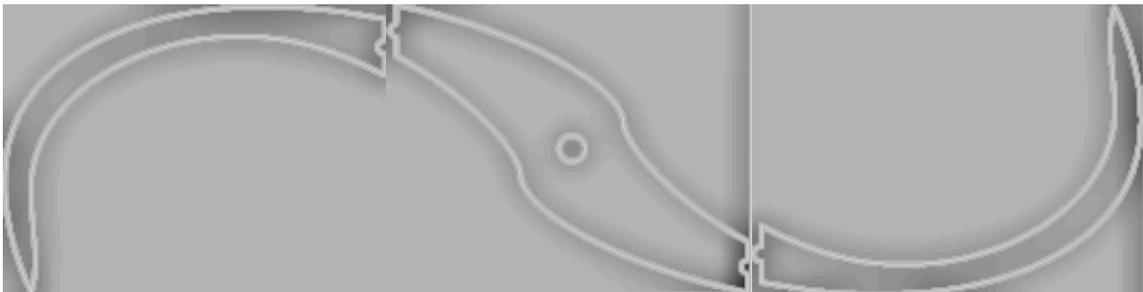


Figura 57. Secciones de la pieza del álabe para maquinar en CNC.
Fuente: Propia.

Con las secciones de la pieza es más fácil trabajarlas en la fresadora pues ahora solo se tiene que ensamblar como un rompecabezas a modo de que quede la forma que necesitamos. En la **Figura 58 a)** se muestran las piezas realizadas en la fresadora automática y en la **Figura 58 b)**, la unión de estas partes. El material para la creación de las piezas es madera de aproximadamente 2 cm de espesor.

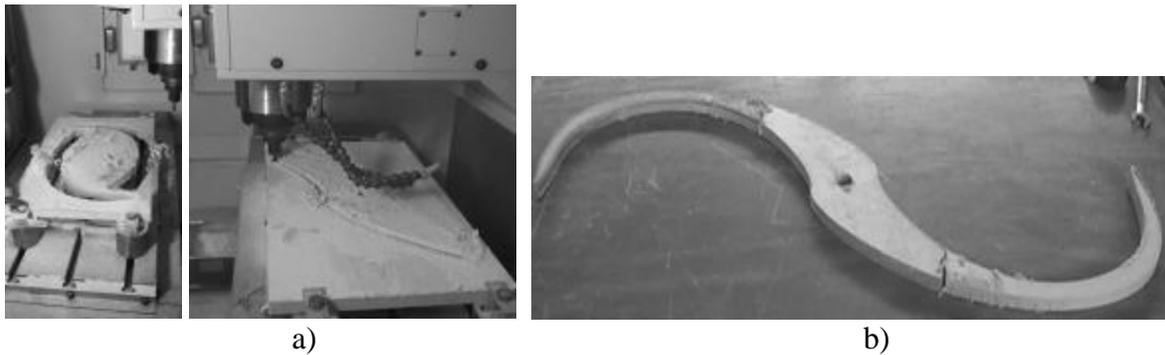


Figura 58. a) Fabricación de las piezas en la fresadora automática. b) Unión de piezas.
Fuente: Propia.

Con la pieza molde se continúa produciendo más de estas piezas para lograr la forma que necesitamos para el aspa. Se fabrican 10 piezas más de madera a fin de proporcionar a la pala fuerza y resistencia. Posteriormente, en la **Figura 59** se aprecian los trazos de estas piezas en placas de unigel para poder reproducir más partes y así llegar a la altura deseada de aproximadamente 112 cm, estas partes se van ensamblando una sobre otra con aproximadamente 5.6° de desplazamiento para formar la hélice.



Figura 59. Aspas de madera y placas de unigel para hacer duplicados.
Fuente: Propia.

Con las placas de unigel ya marcadas, se sigue a cortar estas piezas para que después se vaya formando el aspa Savonius helicoidal, el unigel proporciona también que el peso de la estructura no sea elevado y de esta forma sea ligera. La **Figura 60** muestra las partes realizadas y la forma del aspa diseñada que se desarrolló acoplando cada pieza y fijándola con pegamento.



Figura 60. Aspas fabricadas en unicele y forma del álabe helicoidal.
Fuente: Propia.

Con la forma del aspa ensamblada se procede a recubrirla con fibra de vidrio y resina epóxica, esto con la finalidad de proporcionar al aspa una capa protectora ante los cambios climáticos, además de brindar fuerza evitando así que el unicele pueda trozarse con la fuerza del viento. Antes de realizar la colocación de la resina y la fibra se debe de recubrir el molde con cinta diurex o cinta canela evitando que el unicele se deshaga por la reacción que tiene la resina con el catalizador, en la **Figura 61** se aprecia el recubrimiento con cinta del aspa.



Figura 61. Recubrimiento del aspa con cinta canela.
Fuente: Propia.

Para cubrir el aspa son necesarios 3 Kg. de fibra de vidrio, 12 Kg. de resina epóxica y 120 gr. De catalizador, además el proceso de colocación debe manejarse con cuidado pues la resina es una sustancia tóxica y en contacto con el catalizador puede provocar quemaduras, además, la manipulación de la fibra requiere uso de guantes especiales, ya que puede provocar erupciones en la piel si no se maneja correctamente. El equipo de trabajo es: lentes de protección, mascarilla con filtro y una bata como una medida mínima de seguridad. En la **Figura 62** se muestra ya el rotor Savonius helicoidal, cubierto con una capa de fibra de vidrio y resina epóxica, seguido de un proceso de lijado para desvanecer asperezas brindando una superficie lisa.



Figura 62. Aspa Savonius helicoidal fabricada en fibra de vidrio.
Fuente: Propia.

Para finalizar se le aplica una capa de pintura, con el objetivo de prolongar más la existencia de la hélice, además de que es una protección adicional contra cambios bruscos de clima. En la **Figura 63** se muestra el aspa detallada.



Figura 63. Aspa finalizada con capa de pintura.
Fuente: Propia.

3.4 Base del aerogenerador, ensamble de piezas y conexión del generador eléctrico.

3.4.1 Base del aerogenerador.

La base del aerogenerador está fabricada de perfiles y aceros principalmente de ángulos, el cual brinda una mayor resistencia y fuerza impidiendo que pueda sufrir alguna deformación. En la **Figura 64**, se muestra que en la base es colocado el generador eléctrico con una flecha de esparrago de una pulgada, la separación entre los dos rotores y el estator es de aproximadamente 3 mm.



Figura 64. Base del aerogenerador con generador eléctrico montado.
Fuente: Propia.

Continuando con la construcción de una base firme y fuerte se le añaden postes y travesaño que ofrecerán una mejor solidez para mantener el aspa fija y sin desbalance, el travesaño es desmontable para que de esta forma sea sencilla la colocación del álabe y también sea más fácil el mantenimiento que se tenga que dar al aerogenerador, ver la **Figura 65**.

Para ofrecer protección a los aceros se aplica una capa de pintura, ver **Figura 66**, para evitar oxidación y prevenir futuros daños como formación de orificios en las placas de metal.



Figura 65. Postes y travesaño de la base del aerogenerador.
Fuente: Propia.



Figura 66. Aplicación de base de pintura en la base de acero.
Fuente: Propia.

3.4.2 Ensamble de piezas.

Por último solo basta colocar el aspa Savonius helicoidal para que pueda ser fijada a la flecha y de esta forma puedan girar los rotores y producir electricidad al momento de interactuar con las bobinas del estator. La **Figura 67** muestra el ensamble final de las partes

mencionadas anteriormente y el aerogenerador detallado, solo resta realizar las pruebas necesarias para caracterizar el aerogenerador y verificar cual es la velocidad mínima con la que comienza a girar la pala y también cual es el voltaje producido con ese viento a esa velocidad mínima.



Figura 67. Ensamble de cada sección y aerogenerador detallado.
Fuente: Propia.

Una vez obtenido el aerogenerador fabricado y ensamblado se continua con la realización de pruebas para poder tener una caracterización del aerogenerador, es decir debemos de conocer cuál es la velocidad mínima con la que el aspa comienza a girar y mediante esto, saber cuál es el voltaje que se genera a esa velocidad, de igual forma para cuando haya un viento de mayor velocidad.

3.4.3 Conexión del generador eléctrico.

En esta parte se muestra la forma de conexión del generador eléctrico el cual nos producirá la tensión y corriente adecuada para accionar el motor tipo jaula de ardilla. En la **Figura 68** se muestra la conexión del bobinado del estator para poder obtener las tres fases deseadas.

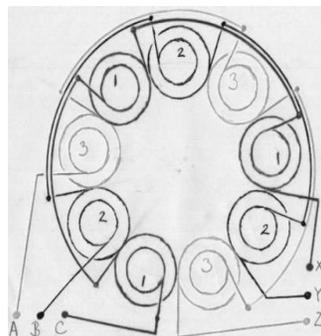


Figura 68. Conexión de bobinas del estator para obtención de tres fases.

Ya con la conexión de las bobinas, se enlazan en configuración estrella con un neutro como detalla la **Figura 69**, lo cual ayuda a obtener voltaje a bajas revoluciones, además proporciona una diferencia de fase entre las tensiones primarias y secundarias.

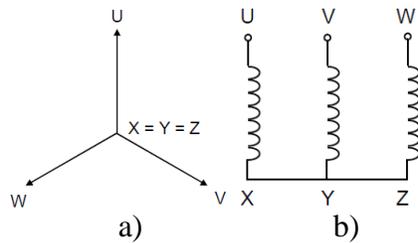


Figura 69. a) Diagrama fasorial y, b) conexión de bobinas en configuración estrella.

En la configuración estrella se realizan mediciones de las tensiones entre el embobinado U y V, entre el embobinado V y W y finalmente entre las bobinas U y V observada en la **Figura 70**. Donde podemos calcular la tensión, la corriente de fase y la potencia total que puede entregar a la carga a partir de las siguientes formulas.

$$I_{fase} = I_{linea} \quad \text{Ec(17)}$$

$$V_{fase} = \frac{V_{linea}}{\sqrt{3}} \quad \text{Ec(18)}$$

$$P_T = \sqrt{3} * I_{linea} * V_{linea} \quad \text{Ec(19)}$$

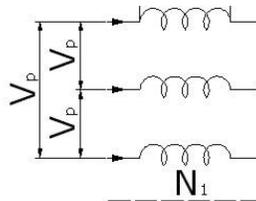


Figura 70. Medición de tensiones entre las bobinas en conexión estrella.

Se hace uso también de la configuración delta (triangulo) ya que posteriormente se realizará una conexión básica para un transformador trifásico. En la **Figura 71** se muestra el diagrama fasorial y la conexión de las bobinas.

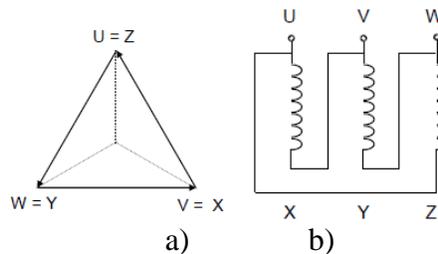


Figura 71. a) Diagrama fasorial y, b) conexión de bobinas en configuración estrella.

Podemos realizar mediciones como lo hicimos en la configuración estrella y que observamos en la **Figura 72**, además, es posible obtener su tensión, corriente y potencia a partir de las siguientes ecuaciones.

$$V_{fase} = V_{linea} \quad \text{Ec(20)}$$

$$I_{fase} = \frac{I_{linea}}{\sqrt{3}} \quad Ec(21)$$

$$P_T = \sqrt{3} * I_{linea} * V_{linea} \quad Ec(22)$$

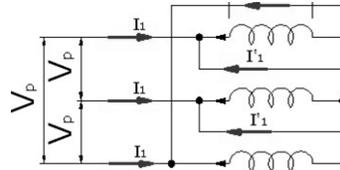


Figura 72. Medición de tensiones entre las bobinas en conexión delta.

Una vez conectado el estator del generador, se utilizan transformadores monofásicos para realizar la conexión trifásica en configuración Delta – Estrella (triángulo – y), en esta Delta estará en el lado de alta tensión (primario), mientras que estrella del lado de la baja (secundario), ver **Figura 73**.

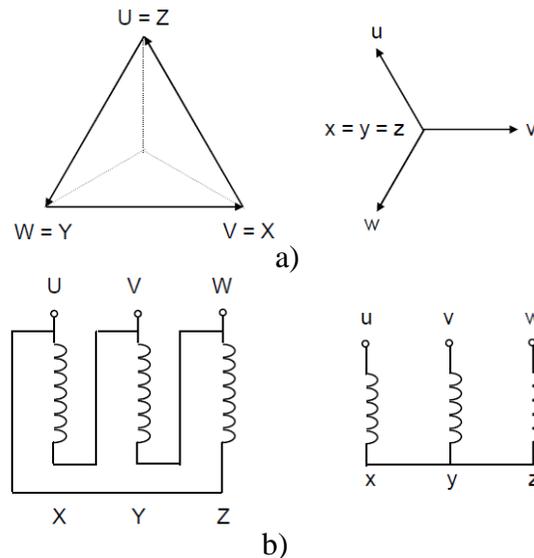


Figura 73. Conexión Delta – Estrella a) diagrama fasorial, b) conexión de bobinas.

Este tipo de conexión se utiliza para elevar el voltaje a un valor alto debido a que el voltaje de línea del secundario es igual al voltaje de línea del primario multiplicado por un factor de raíz de tres.

Esta configuración es usada mucho en transformadores de distribución lo cual permite alimentar cargas trifásicas y monofásicas entre fase y neutro.

La medición que se realiza en esta conexión se hace en la tensión baja correspondiente a la estrella y de igual forma para la parte de alta tensión que corresponde a la conexión delta. La **Figura 74** muestra los puntos donde se debe de realizar las mediciones.

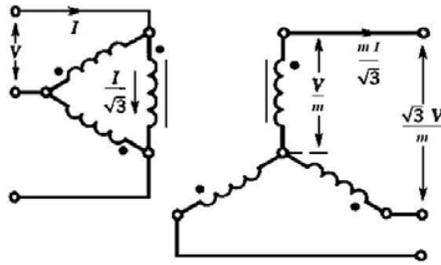


Figura 74. Medición de tensión en la parte primaria y secundaria (D-Y).

De esta forma, con las conexiones del generador y del grupo de bobinas se procede a realizar una conexión eléctrica en la parte de las estrellas (generador y de los transformadores) de acuerdo con la **Figura 75**.



Figura 75. Conexión estrella del estator con estrella del grupo de bobinas.

En la **Figura 76** se muestra la imagen de la conexión física del generador en conexión de estrella con la parte secundaria de los transformadores conectado también en estrella, para la parte primaria en conexión delta.



Figura 76. Conexión física del estator hacia los transformadores.

Fuente: Propia.

CAPITULO 4 RESULTADOS

4.1 Valoración del recurso eólico

4.1.1 Velocidad del viento

Los datos que se presentan en la **Tabla 9** son los promedios del análisis de los datos de la velocidad del viento y de la temperatura proporcionados por la estación meteorológica durante el año 2011 y el periodo comprendido de enero a septiembre de 2012.

Tabla 9. Valores promedio del análisis de datos en la zona de estudio.

Parámetro	Promedio
Velocidad del viento m/s (2011 / periodo 2012)	3.3 / 2.8
Temperatura °C	17
Humedad relativa %	59

En seguida se presenta la gráfica que se obtuvo del análisis de la base de datos proporcionados por la estación meteorológica durante el año 2011 y el periodo de evaluación 2012 **Figura 77** y **Figura 78** correspondiente

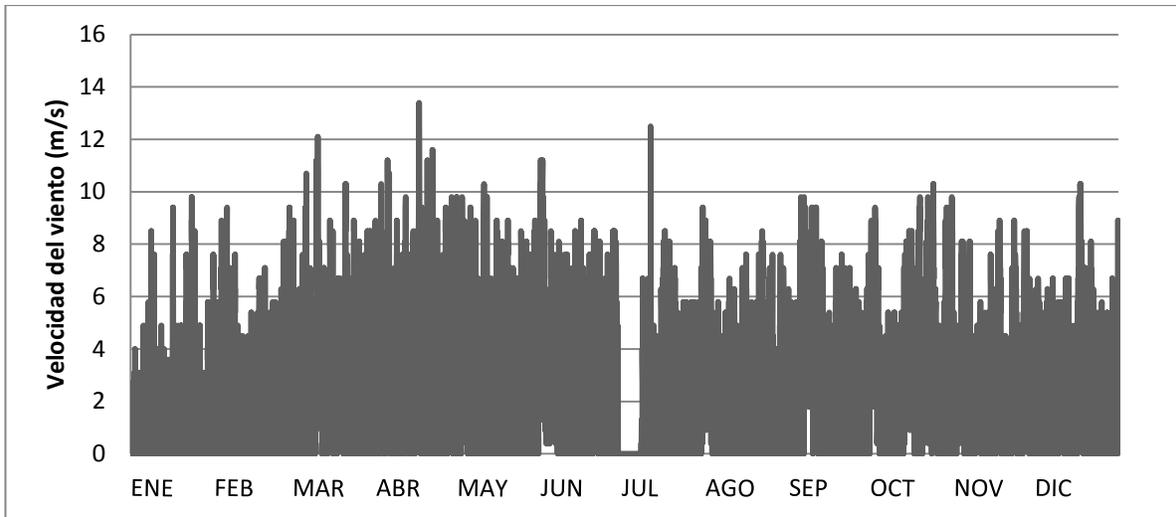


Figura 77. Velocidad del viento durante el año 2011.
Fuente: Propia.

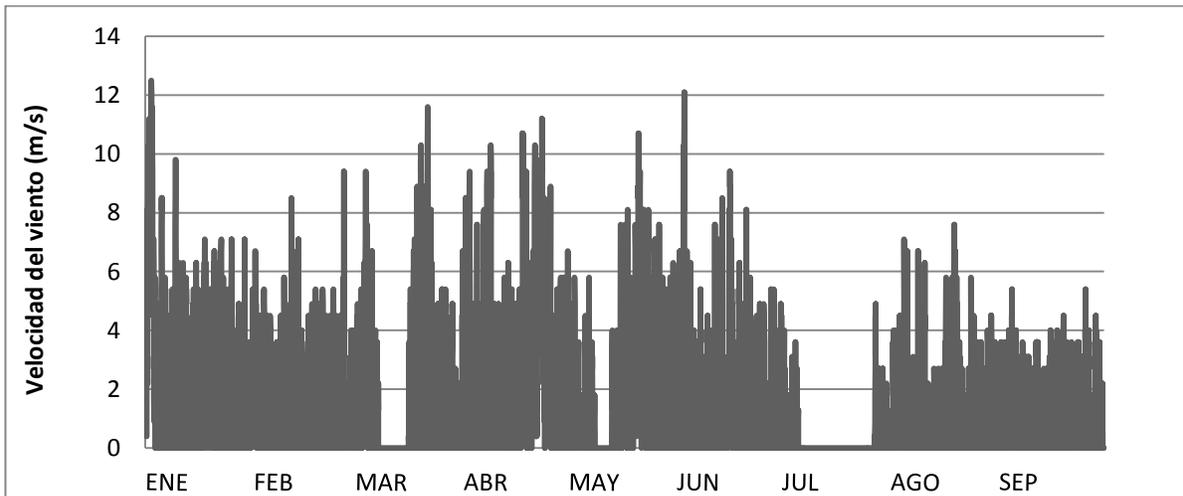


Figura 78. Velocidad del viento durante el periodo Enero – Septiembre de 2012.
Fuente: Propia.

Se puede apreciar de igual manera que, la velocidad máxima que se obtuvo en la región para el año 2011 fue de 13.5 m/s y para el periodo enero – septiembre fue de 12.5 m/s. de forma detallada se puede apreciar las gráficas por meses durante estos años en **Anexo 6**.

En la **Figura 79** se muestran los promedios a lo largo de este tiempo de evaluación tanto para el año 2011 como para el periodo de 2012.

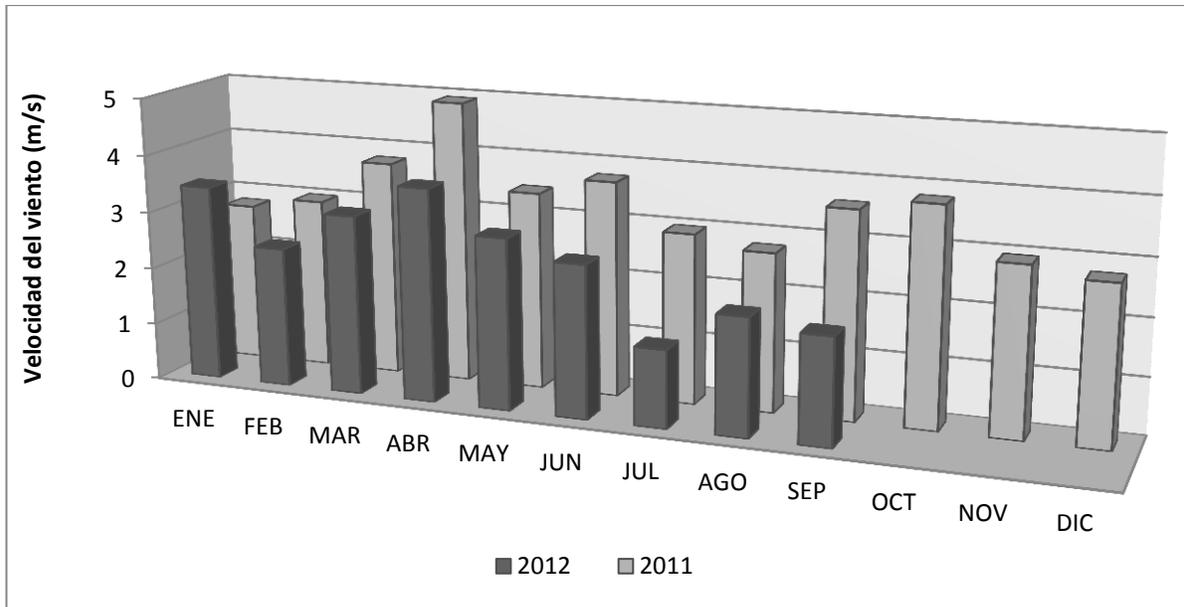


Figura 79. Gráfica de promedio de la velocidad del viento del año 2011 y 2012
Fuente: Propia.

De acuerdo a las gráficas anteriores, se pudo calcular el promedio de la velocidad del viento durante el año 2011 es de 3.3 m/s, mientras que a lo largo del periodo evaluado de 2012 es de 2.8 m/s.

4.1.2 Ley de Hellmman y la velocidad del viento

Además, debido a que la estación meteorológica se encuentra a solo 2 metros de altura, provee de datos del viento con turbulencia debido a la superficie que presenta el terreno y a los obstáculos que impiden un flujo constante del viento, es por ello que se utilizó la ley de Hellman (ecuación de la sección 3.1.4) con un $\alpha = 0.16$ que representa a terrenos poco accidentados, donde se sustituyeron los valores para determinar cuál es la velocidad del viento a una altura de **40 metros**.

$$v_f = 3.3 \left[\frac{40}{2} \right]^{0.16} = 5.3 \text{ m/s} \quad \text{Ec(23)}$$

$$v_f = 2.8 \left[\frac{40}{2} \right]^{0.16} = 4.5 \text{ m/s} \quad \text{Ec(24)}$$

Obteniendo un valor de **5.3 m/s** para el promedio de la velocidad del año 2011 y de **4.5 m/s** para el promedio de la velocidad durante el periodo de evaluación del año 2012 a dicha altura.

Para la densidad del aire hacemos uso de la ecuación expuesta en la sección 3.1.3, donde se sustituyen los valores de la temperatura promedio ($T= 17 \text{ }^\circ\text{C}$) y la altitud de la zona ($z= 2222 \text{ msnm}$) dando como resultado:

$$\rho = 1.225e^{\left[\frac{-2222}{8435} \frac{(17-15)}{288}\right]} = 0.9029 \text{ Kg}/\text{m}^3 \quad \text{Ec(25)}$$

4.1.3 Densidad de potencial eólico en la zona y potencia máxima del aerogenerador

Con el valor del área barrida calculada del aerogenerador, el promedio de las velocidades del viento durante el periodo de estudio y la densidad del aire, se logró calcular la densidad de potencial eólico con la ecuación de la sección 3.1.5 de la cual tenemos un resultado de **16.2 W/m²** para 2011 y **9.9 W/m²** para el periodo enero – septiembre de 2012, de forma gráfica la podemos observar en la **Figura 80**.

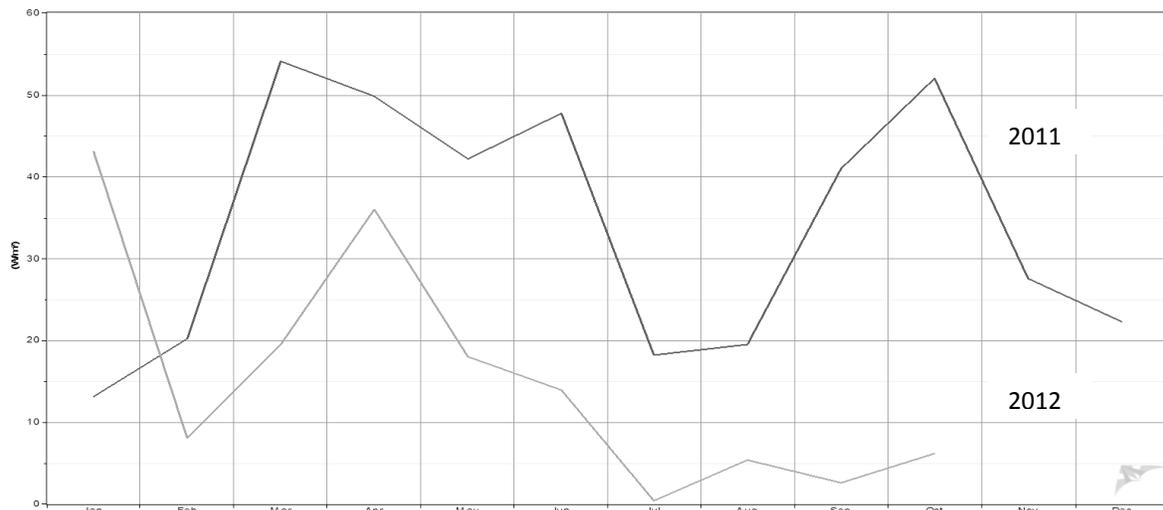


Figura 80. Variación de la densidad de potencial eólico del año 2011 y periodo enero a septiembre de 2012.

Fuente: Propia.

Por otra parte, con ayuda de la ecuación de la sección 3.1.5, también se obtuvo la potencia eólica máxima que pueden entregar los aerogeneradores comerciales Vestas V17 y V27 (4, 5), Gamesa G-52 ecuación (6), Acciona A-72 ecuación (7) y Clipper C-89 ecuación (8), los cuales brindan un potencial aproximado de:

$$P = \left(\frac{1}{2}\right) \left(0.9029 \text{ Kg}/\text{m}^3\right) (227 \text{ m}^2) (2.8 \text{ m}/\text{s})^3 = 2250 \text{ W} \quad \text{(Ec. 26)}$$

$$P = \left(\frac{1}{2}\right) \left(0.9029 \text{ Kg}/\text{m}^3\right) (572.5 \text{ m}^2) (2.8 \text{ m}/\text{s})^3 = 5673.6 \text{ W} \quad \text{(Ec. 27)}$$

$$P = \left(\frac{1}{2}\right) \left(0.9029 \text{ Kg}/\text{m}^3\right) (2123.7 \text{ m}^2) (2.8 \text{ m}/\text{s})^3 = 21046 \text{ W} \quad \text{(Ec. 28)}$$

$$P = \left(\frac{1}{2}\right) \left(0.9029 \text{ Kg}/\text{m}^3\right) (4071.5 \text{ m}^2) (2.8 \text{ m}/\text{s})^3 = 40349 \text{ W} \quad \text{(Ec. 29)}$$

$$P = \left(\frac{1}{2}\right) \left(0.9029 \text{ Kg}/\text{m}^3\right) (6221 \text{ m}^2)(2.8 \text{ m}/\text{s})^3 = 61652 \text{ W} \quad (\text{Ec. 30})$$

Correspondiente a cada uno de los aerogeneradores ya mencionados y teniendo en cuenta que estos aerogeneradores trabajan a su máxima capacidad las 24 horas. Durante los 365 días.

4.1.4 Dirección del flujo eólico y su temperatura

La base datos de la estación proporciona información sobre la dirección en la que el viento fluye es por ello el uso del software Windographer para presentar de forma gráfica hacia donde se dirige el viento **Figura 81**.

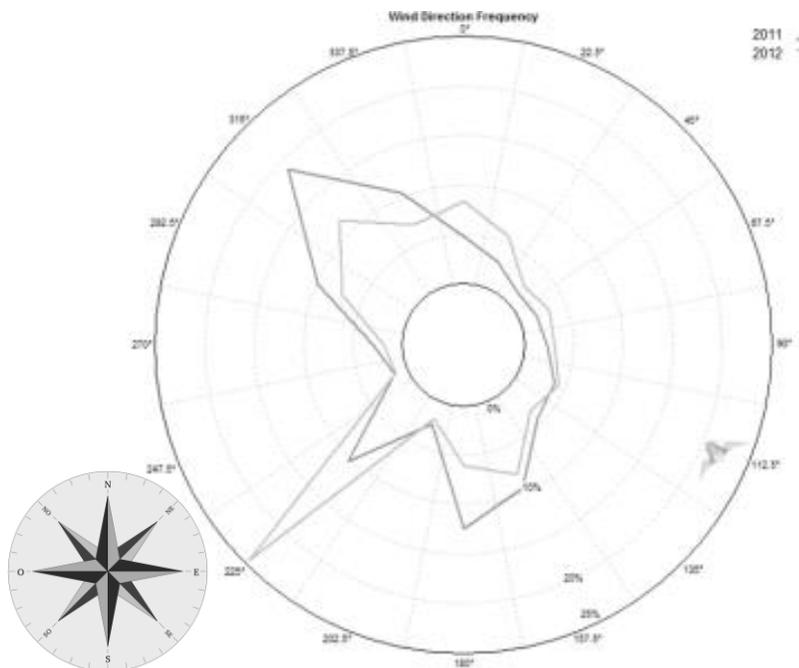


Figura 81. Rosa de los vientos. Frecuencia de la dirección del viento.
Fuente: Propia.

La **Figura 82** muestra la velocidad del viento y la dirección vs frecuencia donde se observa por color donde ocurre más viento con mayor frecuencia y también a que dirección apunta para el año 2011 y el periodo del 2012.

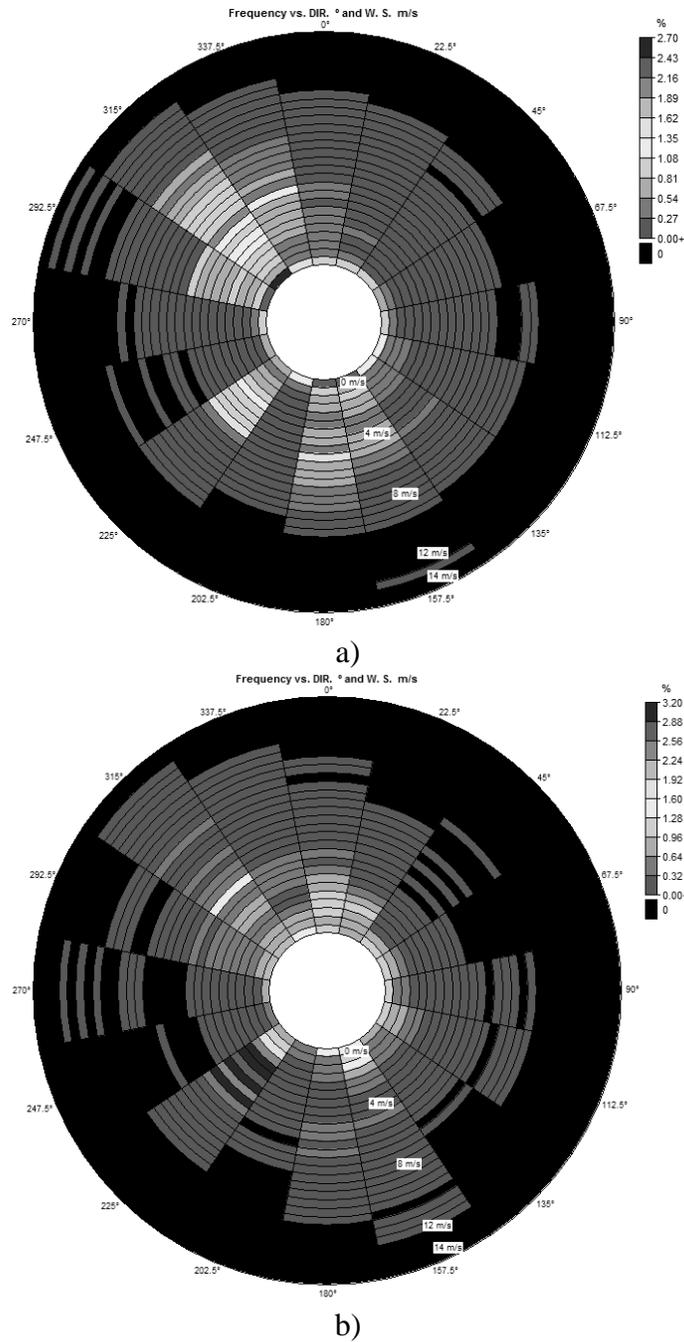


Figura 82. Frecuencia del viento y su dirección de flujo a) 2011, periodo de 2012 b).
Fuente: Propia.

De igual forma con el programa podemos realizar las gráficas del comportamiento de la temperatura a lo largo del día para tomar en cuenta como varía la velocidad del viento respecto a la temperatura que se mide, de la base de datos se obtuvo su promedio que es de 17 °C, ver **Figura 83**. La **Figura 84** muestra los promedios de las temperaturas en el tiempo evaluado.

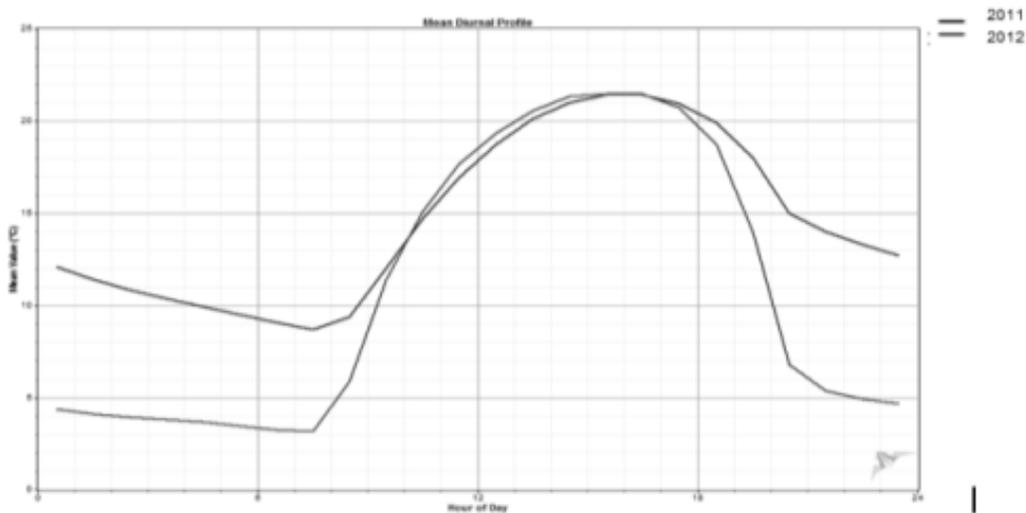


Figura 83. Promedio de la temperatura durante el día.
Fuente: Propia.

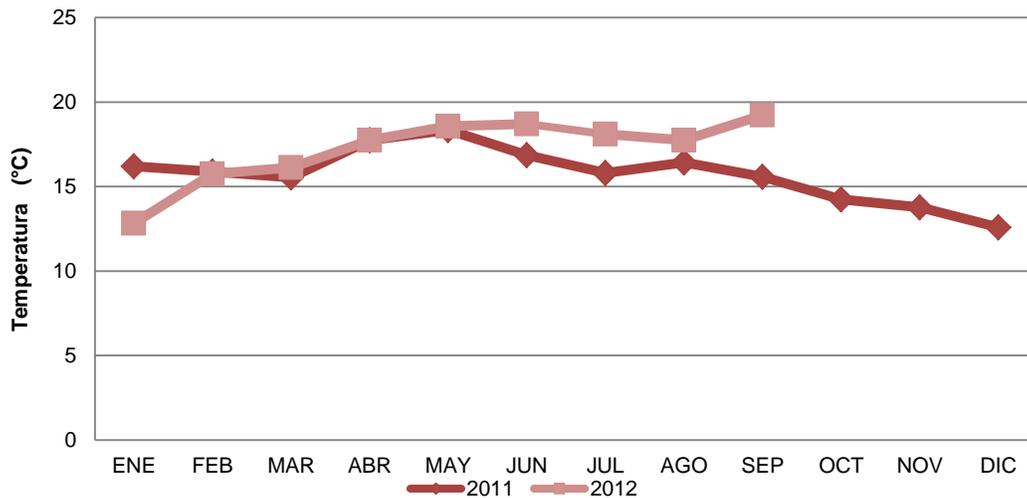


Figura 84. Promedio de la temperatura durante el año 2011 y enero – septiembre de 2012.
Fuente: Propia.

4.2 El generador eléctrico

4.2.1 Estator

Como se ha mencionado en el capítulo 3, se construyeron 12 bobinas para formar el estator con el fin de obtener tres fases ya que el generador será tipo trifásico, cada bobina fue estudiada de los cuales podemos mencionar que: el peso del núcleo en promedio es de 43 gramos, fueron también requeridos aproximadamente 176 gramos de alambre magneto calibre 15 AWG para crear la bobina de 100 espiras, de esta forma tenemos un embobinado cerca de 204 gramos. De forma más detallada se pueden observar cada uno de estos resultados en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Detalle de cada una de las bobinas del estator.

BOBINA No.	No. DE VUELTAS	NUCLEO (DxH) (cm)	DIAMETRO BOBINA (cm)	PESO (gr)	RESISTENCIA (Ω)
1	100	2x2	4.8	210.87	0.4
2	100	2x2	4.6	193.74	0.4
3	100	2x2	4.8	203.75	0.4
4	100	2x2	4.6	196.61	0.4
5	100	2x2	4.6	203.01	0.4
6	100	2x2	4.8	197.86	0.4
7	100	2x2	4.8	202.72	0.4
8	100	2x2	4.5	198.29	0.4
9	100	2x2	4.8	202.05	0.4
10	100	2x2	4.6	199.84	0.4
11	100	2x2	4.6	201.90	0.4
12	100	2x2	4.4	172.75	0.4

Fuente: Propia.

Por otra parte, la cantidad de resina que se utilizó para cubrir nuestro estator es de aproximadamente 1,813.85 cm³., de acuerdo al cálculo de áreas de las bobinas y del molde por las siguientes formulas.

$$\frac{\pi * D^2}{4} \quad Ec(31)$$

4.2.2 Rotor

Para la parte de los rotores como se ha descrito en la metodología se realizó el proceso se fijación de los imanes dando como resultado final de este apartado la **Figura 85**.



Figura 85. Rotores terminados con imanes permanentes.

Fuente: Propia.

4.2.3 Ensamble

El ensamble, visto el procedimiento en la sección de metodología muestra una base que sirve de apoyo para que pueda girar libremente el álabe y que este a su vez transmita el movimiento mecánico hacia los rotores produciendo de esta manera energía. Con las partes adecuadamente instaladas se procedió a realizar pruebas para determinar cuál es el voltaje que proporciona, observar cual es la frecuencia de esos voltajes a través de la obtención de las señales producidas por los imanes y las bobinas, así mismo, determinar la velocidad de la pala la cual puede suministrar ese voltaje.

En la **Tabla 11**. Se muestran 5 pruebas realizadas al aerogenerador ya ensamblado, además, en la **Figura 86** se observa la forma de onda medida a la salida del estator con el osciloscopio OWON HD S2062M y su voltaje obtenido mediante multímetro EXTECH. En esta imagen muestra la medición de dos fases la cual podemos observar que se encuentra desfasada una respecto de la otra. si los transformadores conectados en configuración delta.

Tabla 11. Pruebas del aerogenerador

Velocidad Aspa (RPM)	Voltaje salida Transformadores (VAC)	Voltaje salida Diodos (VDC)	Frecuencia (Hz)
49	6.3	12.00	4.7
49	6.3	13.03	5.7
58	9.1	15.17	6.1
60	9.4	16.03	6.3
62	9.6	16.20	6.7

Fuente: Propia.

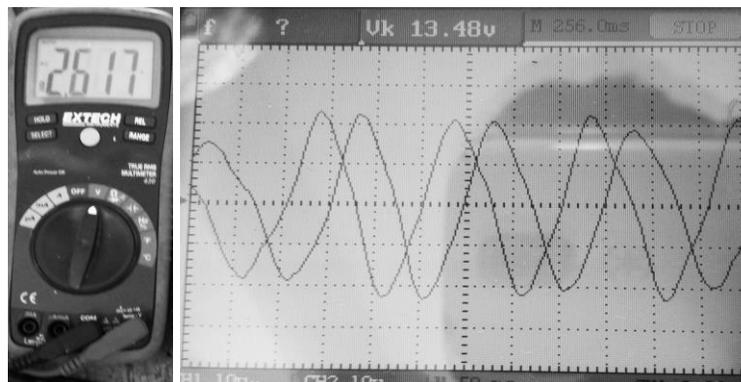
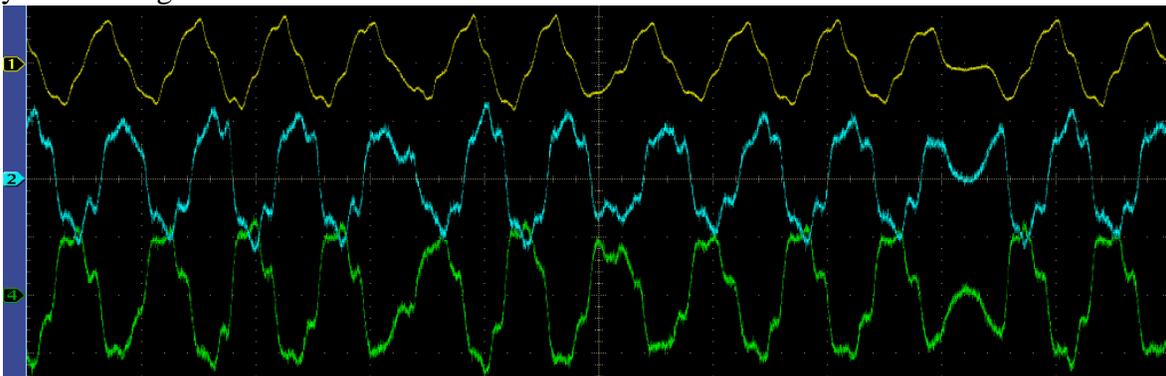


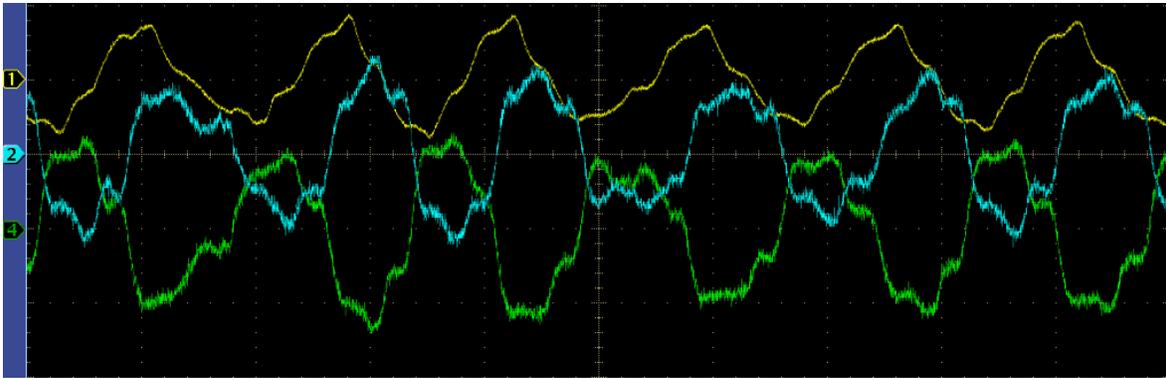
Figura 86. Medición de voltaje y forma de onda a la salida del estator.

Fuente: Propia.

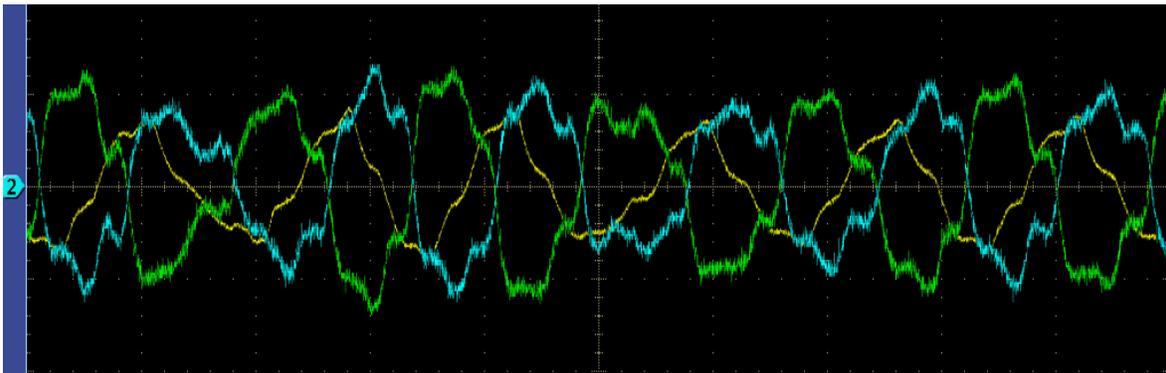
De la **Figura 87 – 90** se observa la forma de onda de las tres fases del estator, esto con la ayuda de un osciloscopio **Tektronix DPO 4054** que nos facilitó las mediciones requeridas. Con el osciloscopio podemos observar como es el comportamiento de cada una de las fases y visualizar gráficamente si estas se encuentran con su desfase.



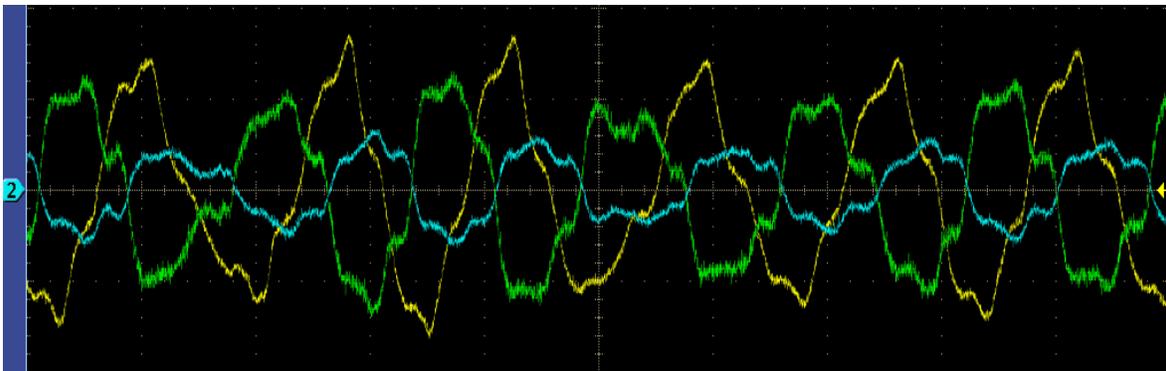
87



88



89



90

Figura 87 – 90. Ondas obtenidas con osciloscopio Tektronix DPO 4054
Fuente: Propia.

Una vez que se obtienen las formas de ondas correspondientes a cada fase se procedió a realizar la conexión después de los transformadores hacia la etapa de rectificación, esto a partir de 6 diodos mostrados en la **Figura 91**, que rectificaran estas tres fases con el fin de obtener un voltaje directo.

Cabe mencionar que solamente se rectificara la señal pues aún tendrá que pasar por una etapa de filtrado con ayuda de los capacitores, esto con el fin de obtener una señal directa más fina y sin picos de subida y bajada.

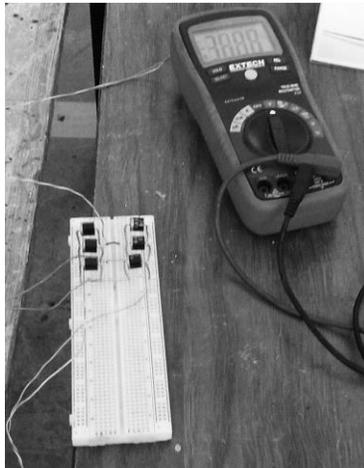


Figura 91. Conexión de diodos para etapa de rectificación de la señal.
Fuente: Propia.

4.3 EL ÁLABE

Para los resultados de la pala se realizó un estudio de su simulación en el software SOLIDWORKS, el programa brinda una herramienta que es de gran ayuda para la generación de los reporte de las simulación, solo basta anotar en la simulación las unidades y los elementos que intervendrán en nuestro objeto para poder llevar a cabo esa simulación.

De forma general se muestra en la **Tabla 12** y **Tabla 13**, datos requeridos para la simulación de la aspa.

Tabla 12. Datos que intervienen en la simulación de la aspa.

Study name	Study 1
Analysis type	Static
Mesh type	Solid Mesh
Thermal Effect:	On
Thermal option	Include temperature loads
Zero strain temperature	298 Kelvin
Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation	Off
Solver type	FFEPlus
Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	Off
Inertial Relief:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Large displacement	Off
Compute free body forces	On
Friction	Off
Use Adaptive Method:	Off

Fuente: Propia.

Tabla 13. Datos de propiedades y componentes de la simulación de la aspa.

Model Reference	Properties	Components	
	Name:	Polyester Resin	
	Model type:	Linear Elastic Isotropic	
	Default failure criterion:	Unknown	
	Tensile strength:	1.9e+008 N/m ²	SolidBody 1(Barrer4)(SHelixv5.2-2)
	Compressive strength:	2.3e+008 N/m ²	
	Elastic modulus:	1.9e+010 N/m ²	
	Mass density:	1160 kg/m ³	

Fuente: Propia.

Enseguida se muestran las figuras que se generaron de dicha simulación tomando en cuenta el estrés generado por una velocidad de 40 RPM y en el cual también influye la gravedad, este análisis se muestra en la **Figura 92**, su desplazamiento se observa en la **Figura 93** y la tensión provocada por el movimiento giratorio en la **Figura 94**.

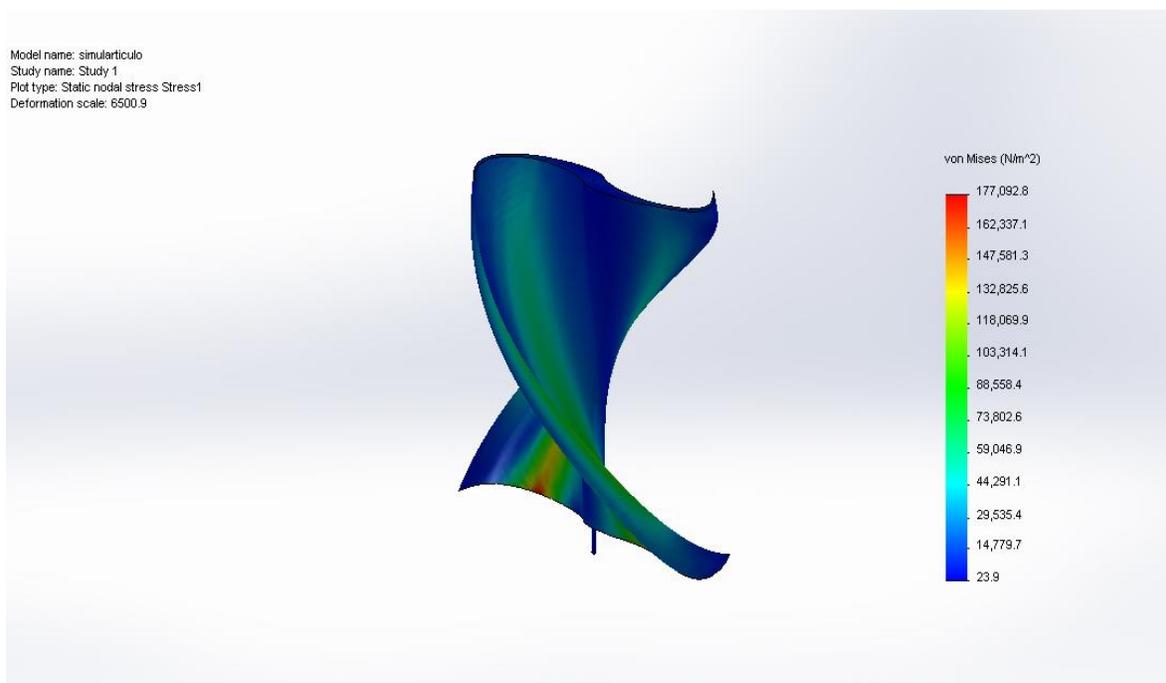


Figura 92. Resultado de la simulación del Estrés

Fuente: Propia.

Model name: simularticulo
Study name: Study 1
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 6500.9

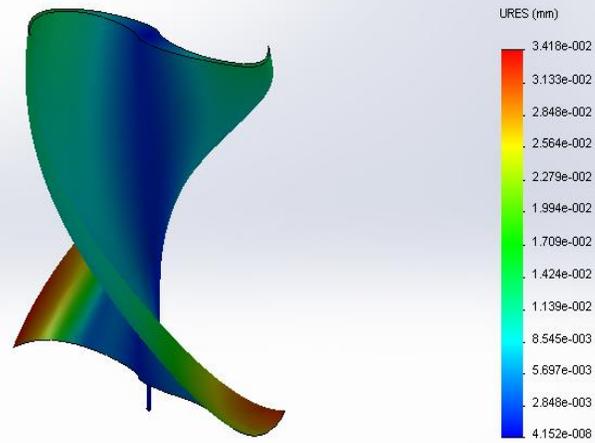


Figura 93. Resultado de la simulación en cuando a Desplazamiento
Fuente: Propia.

Model name: simularticulo
Study name: Study 1
Plot type: Static strain Strain1
Deformation scale: 6500.9

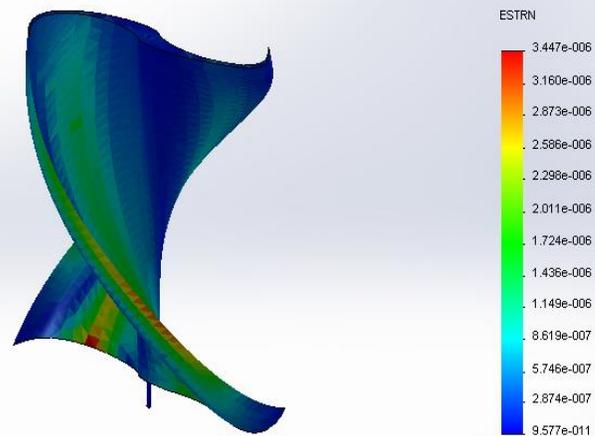


Figura 94. Resultado de la simulación en estudio de Tensión.
Fuente: Propia.

4.4 MODELO TEÓRICO

Para el modelo teórico se realizaron por etapas las cuales son:

- Potencia eólica
- Generador eólico
- Transformador

El cual se ha observado anteriormente en cada uno de los capítulos y de forma resumida los podemos observar en esta sección.

1. Modelo matemático e la potencia eólica.

Para el modelo matemático es necesario contar con los siguientes datos:

Parámetro	Símbolo	Cantidad	Unidad
Velocidad del viento medio	v	2.8	m/s
Temperatura media	T	17	° C
Altitud de la zona	z	2222	msnm
Área e captación	A	1	m ²

Los datos anteriores nos ayudan a obtener resultados como:

La densidad del aire presente en la región se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = 1.225 e^{\left[\frac{-z}{8435} \frac{(T-15)}{288} \right]}$$

Donde: ρ = densidad del aire en (Kg/m³).

z = altura de la zona medida en metros sobre el nivel del mar (msnm).

T= temperatura medida en grados centígrados (° C).

El flujo másico (masa que atraviesa la pala) lo obtenemos usando la ecuación siguiente:

$$M = \rho * A * v$$

Donde: M = flujo másico en (Kg/s)

ρ = densidad del aire (Kg/m³).

A= área de captación (m²).

v = velocidad del viento (m/s).

La densidad de potencial eólico se calcula con la siguiente ecuación:

$$WPD = \frac{1}{2} \rho v^3$$

Donde: WPD = Wind Power Density (densidad de potencial eólico) W/m²

ρ = densidad del aire (Kg/m³).

v^3 = promedio de la velocidad del viento al cubo (m/s).

La potencia teórica eólica expresada en Watts se halla utilizando la siguiente ecuación:

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

Donde: P = potencial teórico eólico (W).

ρ = densidad del aire (Kg/m^3).

A = área de captación (m^2).

v^3 = promedio de la velocidad del viento al cubo (m/s).

La potencia eólica del aerogenerador se calcula usando la ecuación:

$$P = 0.15 A v^3$$

Donde: P = potencial eólico (W).

A = área de captación (m^2).

v^3 = promedio de la velocidad del viento al cubo (m/s).

Este potencial es tomando en cuenta fricciones y desgastes de mecanismos ya que ningún rotor es ideal.

La velocidad de giro de una eólica se puede obtener utilizando la siguiente formula:

$$n = \frac{60\gamma V}{\pi D}$$

Dónde:

n = número de revoluciones por minuto (rpm).

V = velocidad del viento en metros por segundo (m/s).

D = diámetro de la eólica en metros (m).

El factor γ se llama velocidad específica del rotor eólico y este depende de la anchura y del ángulo de calado de las palas. Este factor tiene un valor nominal comprendido entre aproximadamente 1 y 14. En el rotor Savonius que se utilizará tiene un valor comprendido entre 0.9 y 1.1.

2. Modelo matemático del generador eólico.

Para poder desarrollar el generador eólico debemos tomar en cuenta algunos factores de diseño como son:

La frecuencia del generador la encontramos con la siguiente ecuación:

$$f = \frac{P * n}{120}$$

Donde: f = frecuencia del generador en HZ.

P = número de pares de polos.

n = número de revoluciones por minuto (rpm).

De esta ecuación podemos realizar varios despejes para poder hallar los polos necesarios, las revoluciones necesitan para cierta frecuencia y demás.

Para el desarrollo del estator es necesario usar la siguiente tabla con las características del alambre magneto.

CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES DE ALAMBRES DESNUDOS

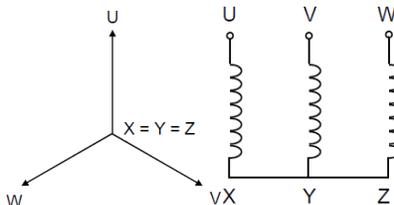
Calibre	Diámetro del alambre en mm			Área de la sección transversal mm ²	Diámetro del alambre en in			Área de la sección transversal	
	Mínimo	Nominal	Máximo		Mínimo	Nominal	Máximo	Circular mils	In ²
AWG 15	1.435	1.450	1.466	1.651	0.0565	0.0571	0.0577	3259	0.00256

PESO Y RESISTENCIA ELÉCTRICA DE ALAMBRES REDONDOS DE COBRE Y ALUMINIO

Calibre	Resistencia en cc a 20 °C 100% conductividad			Resistencia en cc a 20 °C 61.8% conductividad		Peso				
	Cobre			Aluminio		Cobre			Aluminio	
AWG	ohm/km	ohm/kg	m/Ohms	ohm/km	ohm/kg	kg/km	m/g	m/kg	kg/km	m/g
15	10.40	0.711	95.4	16.90	3.79	14.7	0.0681	68.26	4.46	0.224

Tomando estas características se construyen las bobinas para tener un diámetro de 4.5 cm. Y un espesor de 2cm., cabe mencionar que cuenta con un núcleo de hierro de aproximadamente 2 cm. de diámetro por 2 cm. De alto.

En el generador se realiza una conexión en estrella para obtener voltaje a bajas revoluciones su diagrama es el siguiente:



Configuración en estrella.

La medición de las tensiones, corrientes y potencia se realiza en cada fase de las cuales podemos calcularlas con las siguientes ecuaciones:

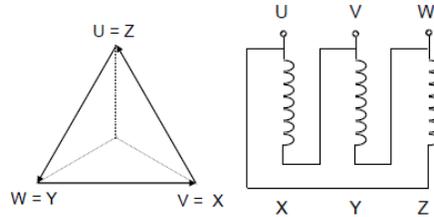
$$I_{fase} = I_{linea}$$

$$V_{fase} = \frac{V_{linea}}{\sqrt{3}}$$

$$P_T = \sqrt{3} * I_{linea} * V_{linea}$$

3. Modelo matemático del transformador.

Para el modelo matemático del transformador se utiliza una conexión delta o triángulo ya que se conectara un transformador trifásico a partir de transformadores monofásicos. Su diagrama y las conexiones para el cálculo de las tensiones, corrientes y potencia son los siguientes:



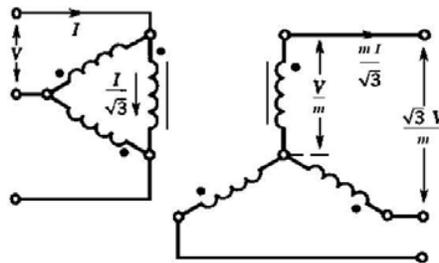
Configuración triángulo.

$$V_{fase} = V_{linea}$$

$$I_{fase} = \frac{I_{linea}}{\sqrt{3}}$$

$$P_T = \sqrt{3} * I_{linea} * V_{linea}$$

La medición que se realiza en la conexión delta – estrella se hace en la tensión baja correspondiente a la estrella y de igual forma para la parte de alta tensión que corresponde a la conexión delta.



Medición de tensión en la parte primaria y secundaria (D–Y).

4.5 RESULTADOS DEL PROYECTO COMPARADO CON EL MODELO TEÓRICO

Potencia eólica

De acuerdo a los datos mencionados en la sección anterior se tiene como resultados:

Densidad del aire según su ecuación da como resultado

$$\rho = 1.225e^{\left[\frac{-2222}{8435} - \frac{(17-15)}{288}\right]} = 0.9029 \text{ Kg/m}^3$$

La masa que atraviesa la pala es de:

$$M = 0.9029 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 1\text{m}^2 * 2.8 \text{ m/s} = 2.5 \text{ Kg/s}$$

En cuanto a la densidad de potencial eólico se halla que en la región se tiene:

$$WPD = \frac{1}{2} * 0.9029 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * (2.8 \text{ m/s})^3 = 9.9 \text{ W/m}^2$$

Esta es la potencia calculada en la región.

Siguiendo ahora para calcular la potencia teórica eólica generada por el aerogenerador es de:

$$P = \frac{1}{2} * 0.9029 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 1\text{m}^2 * (2.8 \text{ m/s})^3 = \mathbf{9.9 W}$$

Continuando, el resultado de la potencia eólica del aerogenerador tomando en cuenta que no es ideal se tiene:

$$P = 0.15 * 1\text{m}^2 * (2.8 \text{ m/s})^3 = \mathbf{3.2 W}$$

Para la velocidad del giro de una eólica se obtuvo mediante:

$$n = \frac{60 * 1 * 2.8 \text{ m/s}}{\pi * 1\text{m}} = \mathbf{53.4rpm}$$

Generador eólico

Los resultados obtenidos del generador eólico teniendo que se cuenta con 28 polos y las revoluciones de la eólica, el cual tenemos:

$$f = \frac{28 * 53.4rpm}{120} = \mathbf{12.46 Hz}$$

De aquí que si se requiere una frecuencia de 15 HZ y se cuentan con 28 polos, es necesario:

$$\frac{15 \text{ HZ} * 120}{28} = n = \mathbf{64.2 rpm}$$

Para la construcción de una bobina de calibre 15 AWG y con las especificaciones anteriormente mencionadas se tiene que:

Para una bobina de 100 vueltas fueron necesarios 10 filas y 10 columnas para tener un diámetro de 4.5 cm con una altura de 2cm, para ello se usa aproximadamente 12 m de longitud de alambre magneto y cuya resistencia del conductor para esta longitud es de 0.12 Ω .

Una vez construido el generador podemos realizar los cálculos para la medición de tensiones, corriente en configuración estrella, tomando en consideración que para una corriente de fase en corto circuito se obtuvo una medición de 0.5 A y el voltaje de fase es de 2.6 V aproximadamente a una velocidad de 62 rpm.

Entonces para la corriente de línea y el voltaje de línea se tiene que es:

$$\begin{aligned} I_{\text{linea}} &= \mathbf{0.5 A} \\ V_{\text{linea}} &= 2.6 \text{ V} * \sqrt{3} = \mathbf{4.5 V} \\ P_T &= \sqrt{3} * 4.5 \text{ V} * 0.5 \text{ A} = \mathbf{3.8 W} \end{aligned}$$

El transformador

El transformador tiene relación 1:6, es decir que va a aumentar el voltaje 6 veces por lo que el voltaje a la salida tendremos que es de 15.6 V aproximadamente. En cuanto a la corriente debido a que hay una etapa de transformación y por la primera ley de la termodinámica que establece que la energía no se crea ni destruye solo se transforma, la corriente se verá reducida teniendo 0.08 A de ahí que por la conexión delta se tiene:

$$\begin{aligned}V_{linea} &= \mathbf{15.6 V} \\I_{linea} &= 0.08 * \sqrt{3} = \mathbf{0.1 A} \\P_T &= \sqrt{3} * 0.1 A * 15.6 V = \mathbf{2.7 W}\end{aligned}$$

Delo que podemos concluir que si tenemos una potencia de entrada de 9.9 W a la salida tenemos entregado por los transformadores una potencia de 2.7 W, lo que indica que hay perdidas debido a las partes mecánicas que existen, además también en perdida de esa potencia en forma de calor que puede haber en los transformadores. También se debe a que el rendimiento que presenta el rotor savonius helicoidal es del 30%.

CAPITULO 5 CONCLUSIONES

De este trabajo se puede concluir que el recurso eólico de la región es factible para la instalación de aerogeneradores de baja potencia ya sea para que satisfagan la demanda energética de una vivienda rural o el accionar de un motor. Este trabajo también ayudara a comprender de mejor forma el comportamiento del viento en la región y que la energía eólica reduce en gran medida la dependencia del petróleo, ahorra costos y lo importante que no daña al medio ambiente para la generación eléctrica.

El aerogenerador presentado en el trabajo que corresponde al tipo de aerogeneradores de baja potencia, brinda el voltaje suficiente con pocas revoluciones de la turbina, el cual, puede ser almacenarlo en baterías, mencionemos que la carga de las baterías demoraran debido al voltaje que estará recibiendo y a la corriente que el aerogenerador otorga.

Las fases de nuestro generador eléctrico cumplen con su desplazamiento lo que nos lleva a decir que se logró un resultado aceptable.

En cuanto a la selección y desarrollo de la aspa, mencionemos que es adecuada para la región ya que se desarrolló con las condiciones y estudios del viento presentes.

El desarrollo de este trabajo presento algunos retraso y pequeñas complicaciones que al final ocasionaron descompensación en la forma de trabajo pero se logró su culminación y se obtuvo lo que se pretendía alcanzar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. O. Bouzareñs, «Energía Eólica: Origen, Realidad y Perspectiva,» *Revista Transporte, Desarrollo y Medio Ambiente*, vol. 27, pp. 12-14, 2007.
- [2] S. e. solar, «Soliclima energia solar,» [En línea]. Available: <http://www.soliclima.es/productos/6-energia-eolica.html>. [Último acceso: septiembre 2012].
- [3] S. Instituto Tecnológico de Canarias, «Instituto Tecnológico de Canaria,» [En línea]. Available: http://www.itccanarias.org/web/difusion/como_funciona/aerogenerador/index.jsp?lang=es. [Último acceso: Septiembre 2012].
- [4] P. F. Diez, *Energía Eólica*, España Cantabria, 2000.
- [5] J. Moragues y A. Rapallini, «Energía Eólica,» *Instituto Argentino de la Energía General Mosconi*, 2003.
- [6] J. Tonda, *EL ORO SOLAR Y OTRAS FUENTES DE ENERGÍA*, México, D.F: FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S.A. DE C.V., 1993.
- [7] S. J. Shapman, *Máquinas Eléctricas*, McGraw Hill, 2005.
- [8] M. Tro, «La Gota Fria. Metrologia: Los vientos y las masas de aire,» Febrero 2012. [En línea]. Available: <http://lagotafria.blogspot.com.es/2012/02/meteorologia-las-masas-de-aire.html>.
- [9] J. E. Mercano, «Glosario Meteorologico,» Febrero 2013. [En línea]. Available: http://jmarcano.topcities.com/ciencias/glosario/meteo_v.html.
- [10] O. P. d. I. Salud, «Estructura dinamica de la atmosfera,» Febrero 2013. [En línea]. Available: http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/lecc3/lecc3_7.html.
- [11] I. B. P. N., «Movimiento del aire y clima,» Febrero 2013. [En línea]. Available: <http://esiatecamachalco.foroactivo.com/t72-movimiento-del-aire-y-clima>.
- [12] I. Aventura, «Meteorología -El efecto Föhn,» Febrero 2013. [En línea]. Available: <http://www.infoaventura.com/reportaje.asp?id=636>.
- [13] ABB, «Cuaderno de Aplicaciones Técnicas. Plantas Eólicas,» *Asea Brown Boveri, S.A.*, p. 115, 2012.
- [14] S. Q. GARCÍA, ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD ECONÓMICA DE PRODUCIR ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL SECTOR RESIDENCIAL Y COMERCIAL POR MEDIO DE PANELES SOLARES Y AEROGENERADORES EN MÉXICO, México: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO, 2011.
- [15] E. Eolica, «Energia Eolica y Aerogeneradores,» Febrero 2013. [En línea]. Available: <http://aerogeneradores-energia-eolica.blogspot.mx/2011/07/mapas-de-viento.html>.
- [16] C. A. Frenk, «Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México,» *SECRETARIA DE ENERGIA (SENER)*, p. 20, 2009.
- [17] I. E. d. c. Exterior, «El mercado de la energia eolica en Mexico,» Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Monterrey, 2009.
- [18] D. Elliott, M. Schwartz, G. Scott, S. Haymes, D. Heimiller y R. George, *Wind Energy Resource Atlas of Oaxaca*, National Renewable Energy Laboratory, 2003.
- [19] J. M. Mejía., F. Chejne., R. Smith., L. F. Rodríguez., O. Fernández. y I. Dyner., «Propuesta Metodológica para el Diseño de las Aspas de Turbinas de Viento de eje Horizontal,»

- Energética. Revista del Instituto de Energía, Facultad de minas. Universidad Nacional de Colombia*, pp. 37-45, 2005.
- [20] F. M. Sotelo, «www.energiasargentinas.com.ar,» Noviembre 2012. [En línea]. Available: <http://www.energiasargentinas.com.ar/velocidad%20del%20viento.htm>.
- [21] L. F. V. Montoya, *Mantenimiento Predictivo Aplicado a Máquinas Sometidas a Velocidad y Carga Variables Mediante Análisis de ORdenes*, Valladolid: Universidad de Valladolid, 2011.
- [22] J. M. Escudero, *Manual de energía eólica*, Madrid: Mundi-Prensa, 2008.
- [23] J. M. A. Valle, *Validación Física del Modelo de Aerogeneradores por Efectos Disipativos.*, México: UNAM, 2012.
- [24] S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion system*, Wiley, 1998.
- [25] m. López y J.-C. Vannier, «Stand-Alone Wind Energy Conversion System with Maximum Power Transfer Control,» *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, pp. 329-336, 2009.
- [26] W. Acuña y Á. Costa, «Simulación y análisis del Comportamiento Dinámico de un Aerogenerador Conectado a una Red de Potencia muy Grande,» *Energética. Revista de Ingeniería Energética*, pp. 44 - 51, 2008.
- [27] O. López, D. Rojas, M. Vilaragut y Á. Costa, «Simulación de Aerogeneradores de Velocidad y Paso Variable _Utilizando Redes Neuronales Artificiales,» *Energética. Revista de Ingeniería Energética*, pp. 35 - 42, 2010.
- [28] U. D. P. M. E. UPME, «GUÍA PARA LA UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA EÓLICA PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA,» Bogota D.C., 2003.
- [29] L. Arribas, «Microgeneración y Pequeños Aerogeneradores,» *CIEMAT. España.*, 2007.
- [30] A. Universitaria, «www.actualidaduniversitaria.com,» Agosto 2012. [En línea]. Available: <http://www.actualidaduniversitaria.com/2010/08/un-novedoso-aerogenerador-de-250-kw-y-de-una-sola-pala-ha-sido-instalado-en-el-ceder-ciemat/>.
- [31] M. J. C. Sntines, M. P. Martínez y J. A. C. Jiménez, «Aerogeneradores de Potencia Inferior a 100 KW,» *Prospectiva y Vigilancia Tecnológica. CIEMAT*, 2008.
- [32] I. G. Cubero, «WIS PHYSICS,» Agosto 2012. [En línea]. Available: <http://www.wisphysics.es/2008/09/imanes-de-nuestro-dia-a-dia-ii>.
- [33] S. g. electrogenos, «Sorilux grupos electrogenos,» Agosto 2012. [En línea]. Available: http://www.sorilux.com/noticias.php?ver=noticia&n_id=27.
- [34] J. Castillo y E. Marrufo, «Instalaciones electricas basicas,» McGraw-Hill, pp. 288 - 306.
- [35] C. S. d. S. S.A., «Motores Eléctricos,» Instituto de Energía y Termodinámica UPB, 2002.
- [36] L. A. I. Martínez, *Incorporación de Modelos de Aerogeneradores al Análisis de Flujos de Potencia Dinámicos*, México: UNAM, 2012.
- [37] A. M. M. Arcedo, *Diseño y Construcción de un Aerogenerador Eléctrico para un Aerogenerador de Baja Potencia*, Morelia, Michoacan: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2010.
- [38] A. A. A. Martínez, *Aspectos de Diseño de Generadores Sincrónicos de Flujo Axial para la Aplicación en Aerogeneradores*, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2012.
- [39] V. P. P. Davis, *Estacion meteorologica # 1 de la Universidad Politécnica de Puebla*, 2007.
- [40] F. B. Ruedas, C. Á. Camacho, J. A. S. García y D. E. M. Morales, «Análisis y Validación de Metodología Usada para la Obtencion de Perfiles de Velocidad del Viento,» Reunion de verano, RVP-AI/2008, Acapulco Gro., 2008.

- [41] J. F. Manwell, J. G. Mcgowan y A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Design and Application*, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [42] J. L. F. Díaz, J. M. G. González y V. M. G. Saldívar, «Evaluation of the eolic potencial of a zone located in the state of Zacatecas, Mexico,» *Tecnología, Ciencia, Educación. Redalyc*, pp. 95 - 98, 2010.
- [43] Wind Pioneer, «Wind Pioneer LTD,» 2013. [En línea]. Available: www.windpioneer.co.uk.
- [44] C. T. S. Gamesa, «Gamesa 850 kW Fiabilidad y Experiencia,» www.gamesacorp.com, 2012. [En línea]. Available: <http://www.gamesacorp.com/recursos/doc/productos-servicios/aerogeneradores/catalogo-g5x-850-kw.pdf>. [Último acceso: 13 mayo 2013].
- [45] E. S. ACCIONA, «<http://www.acciona-energia.es>,» ACCIONA, ENERGÍA S.A., [En línea]. Available: http://www.acciona-energia.es/media/315782/Aerogenerador_AW1500.pdf. [Último acceso: 14 MAYO 2013].
- [46] W. P. Clipper, «www.Clipperwind.com,» 2006. [En línea]. Available: http://www.clipperwind.com/pdf/liberty_brochure.pdf. [Último acceso: 14 mayo 2013].
- [47] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems.*, USA: John Wiley and Sons, 2004.
- [48] Mistaya Engineering Inc, «windographer,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.windographer.com/>.
- [49] L. A. Caño, «"Generadores electricos utilizados en las turbinas eolicas",» *Energia*, 2004.
- [50] O. Krovel, R. Nilssen y A. Nysveen, «"A Study of the Research Activity in the Nordic Countries on Large Permanent Magnet Synchronous Machines",» *Department of Electrical Power Enginnerring*, 2003.
- [51] D. a. A. R. Shetty, *MECHATRONICS SYSTEM DESIGN*, Stamford: Stamford, 2011, pp. 1 - 40.
- [52] R. O. Henestroza, «Desarrollo del Proyecto Eólico en la Región del Istmo de Tehuantepec,» *Redalyc. Sistema de Información científica*, 2008.
- [53] Á. C. M. V. Mariely Francisco, «Comparación del Comportamiento en la red Eléctrica del Aerogenerador Asíncrono de Jaula de Ardilla y el Doblemente Alimentado,» *Revista de ingeniería energética. Facultad de ingeniería eléctrica, Cuba*, 2008.
- [54] J. C. E. C. F. E. L. M. M. O. C. Alfredo G.M. Gámez, «Control de 2 Sensores para Energías Eólica y Solar,» *Revista de ingeniería. Facultad de ingeniería eléctrica.*
- [55] Á. P. A. Gómez, «Aerodynamic Characteristics of Airfoils with Blunt Trailing Edge,» *Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes.*
- [56] M. Franquesa, «Como Empezar a Construir un Sencillo Generador Eólico,» *La Veritat.*
- [57] A. P. Sanchez, *Diseno y Construcción de generador eólico*, Puebla, 2010.
- [58] P. C. Garrido, *Diseño e Itegración de Instalación de un Sistema de Producción de Energía Eólica Doméstica*, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [59] M. Pasqualetti, R. Righter y P. Gipe, «History of Wind Energy,» de *Encyclopedia of Energy*, Elsevier Inc, 2004, pp. 419 - 433.

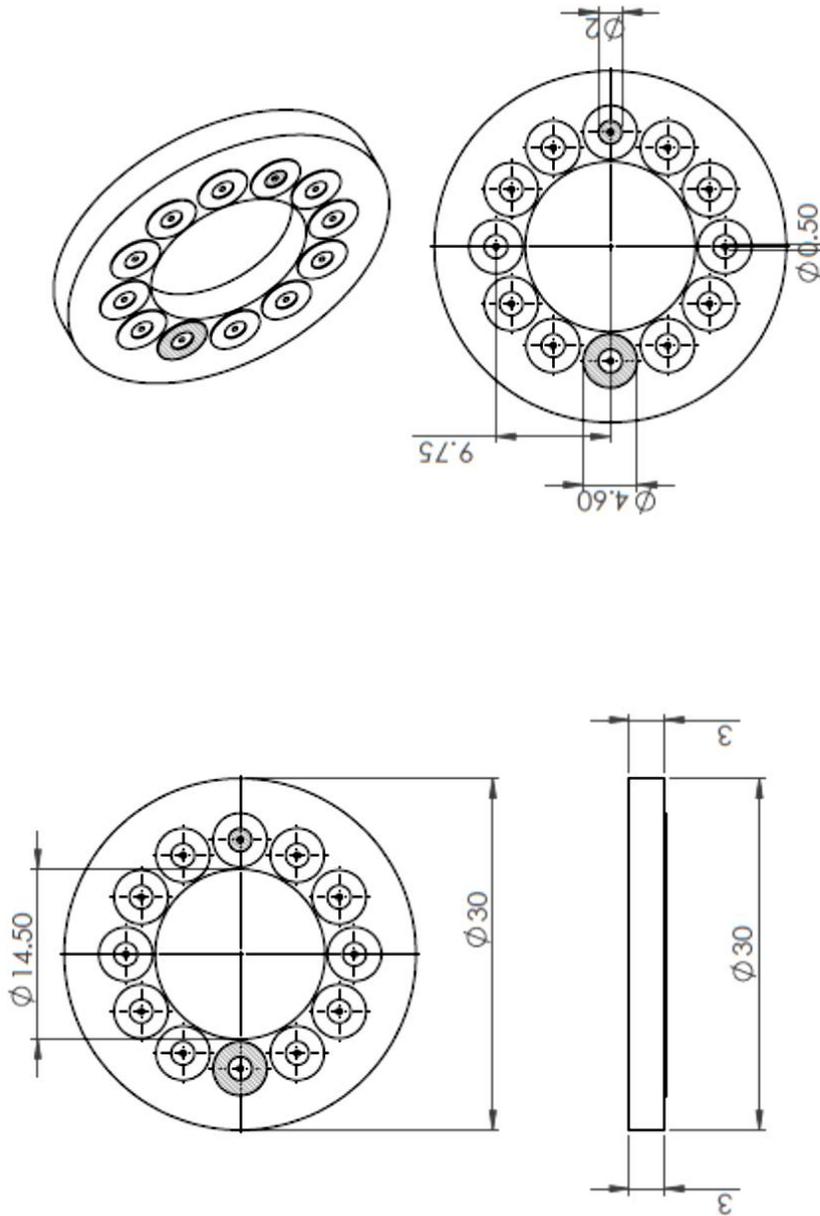
ANEXOS

ANEXO 1. BASE DE DATOS DE LA ESTACION METEOROLÓGICA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE PUEBLA
DATOS DE LA ESTACION METEOROLOGICA UPP # 1

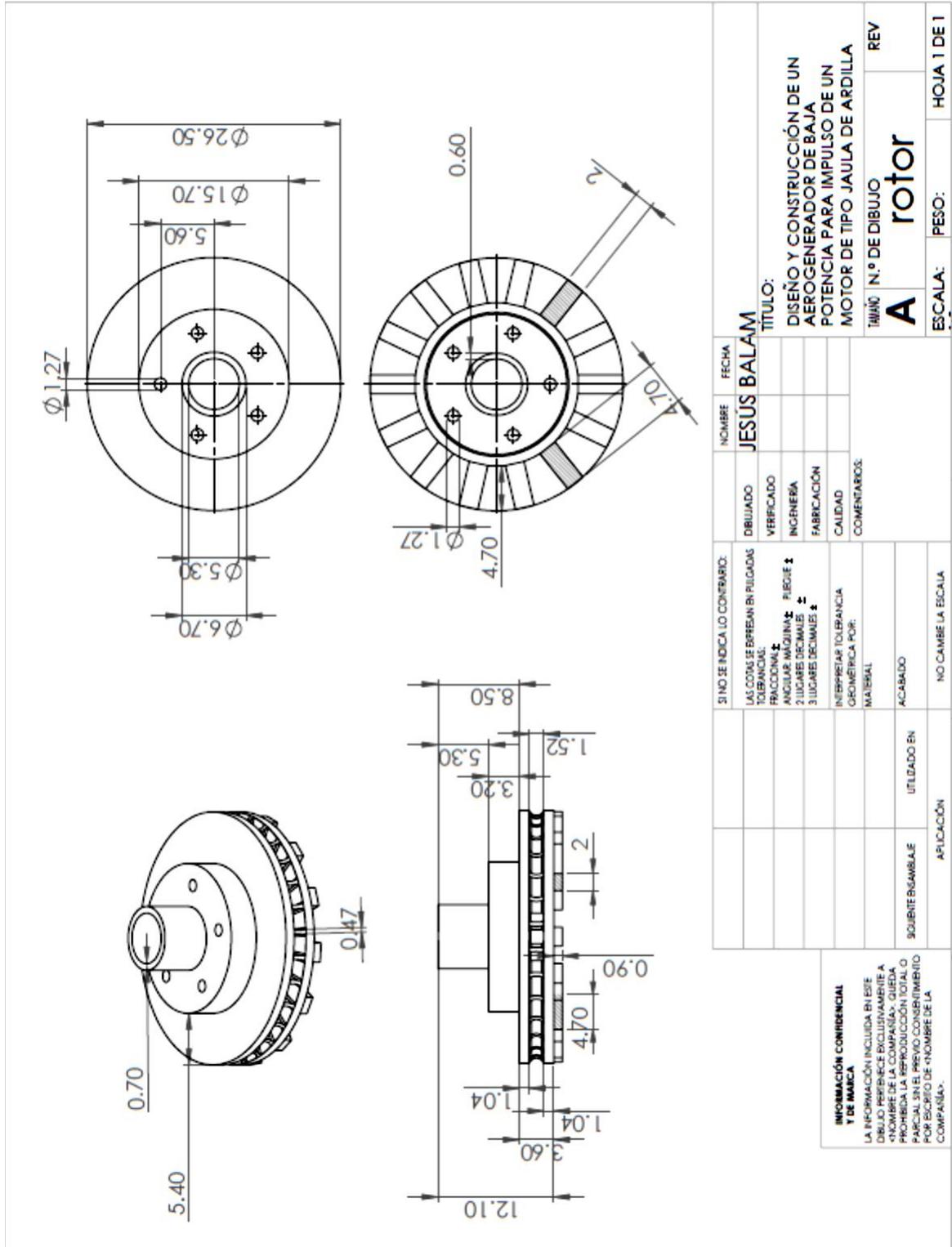
Date	Time	W. S. m/s	W. S. m/s	W. S. m/s	DIR. °	DIR. °	DIR. °	TEMP. °c	TEMP. °c	TEMP. °c
		2010	2011	2012	2010	2011	2012	2010	2011	2012
01/01/2012	00:00	0	0	3.6	FALSO	FALSO	315	---	---	9.7
01/01/2012	00:30	0	0	4.9	FALSO	FALSO	292.5	---	---	9.1
01/01/2012	01:00	0	0	5.4	FALSO	FALSO	315	---	---	9.2
01/01/2012	01:30	0	0	4.9	FALSO	FALSO	315	---	---	8.7
01/01/2012	02:00	0	0	5.4	FALSO	FALSO	315	---	---	8.4
01/01/2012	02:30	0	0	5.4	FALSO	FALSO	315	---	---	8
01/01/2012	03:00	0	0	5.4	FALSO	FALSO	315	---	---	8.2
01/01/2012	03:30	0	0	5.4	FALSO	FALSO	315	---	---	7.7
01/01/2012	04:00	0	0	5.4	FALSO	FALSO	315	---	---	7.3
01/01/2012	04:30	0	0	5.8	FALSO	FALSO	315	---	---	7
01/01/2012	05:00	0	0	4.9	FALSO	FALSO	315	---	---	7.2
01/01/2012	05:30	0	0	5.4	FALSO	FALSO	315	---	---	6.7
01/01/2012	06:00	0	0	5.8	FALSO	FALSO	315	---	---	6.8
01/01/2012	06:30	0	0	4.9	FALSO	FALSO	315	---	---	7.6
01/01/2012	07:00	0	0	4	FALSO	FALSO	337.5	---	---	6.7
01/01/2012	07:30	0	0	4.9	FALSO	FALSO	337.5	---	---	6.1
01/01/2012	08:00	0	0	3.6	FALSO	FALSO	315	---	5.3	6.2
01/01/2012	08:30	0	0.4	0.4	FALSO	337.5	337.5	---	8.2	7.8
01/01/2012	09:00	0	1.8	0.9	FALSO	0.0	337.5	---	12.3	11.1
01/01/2012	09:30	0	2.7	6.3	FALSO	0.0	315	---	15.5	15.3
01/01/2012	10:00	0	2.2	8.1	FALSO	0.0	315	---	17.1	16.9
01/01/2012	10:30	0	2.2	7.6	FALSO	0.0	315	---	17.4	17.4
01/01/2012	11:00	0	1.3	7.6	FALSO	22.5	337.5	---	17.8	18
01/01/2012	11:30	0	0.9	7.6	FALSO	22.5	337.5	---	18.1	18.6
01/01/2012	12:00	0	0.9	7.6	FALSO	0.0	0	---	18.6	19.4
01/01/2012	12:30	0	0.9	7.1	FALSO	22.5	337.5	---	18.7	20.1
01/01/2012	13:00	0	0.4	5.8	FALSO	67.5	337.5	---	19.2	20.6
01/01/2012	13:30	0	0.4	4	FALSO	67.5	337.5	---	19.8	20.8
01/01/2012	14:00	0	0.4	2.7	FALSO	22.5	45	---	20.9	21.2
01/01/2012	14:30	0	0	2.2	FALSO	315.0	45	---	21.3	21.4
01/01/2012	15:00	0	1.3	3.1	FALSO	225.0	157.5	---	22.2	20.7
01/01/2012	15:30	0	0.9	2.7	FALSO	157.5	135	---	22.8	20
01/01/2012	16:00	0	1.3	4	FALSO	225.0	112.5	---	22	20
01/01/2012	16:30	0	2.2	5.8	FALSO	225.0	0	---	21.1	18.7
01/01/2012	17:00	0	1.8	6.7	FALSO	225.0	0	---	21.1	17.1
01/01/2012	17:30	0	1.3	6.3	FALSO	225.0	0	---	20.2	16.3
01/01/2012	18:00	0	1.8	7.6	FALSO	225.0	337.5	---	19.4	15.7
01/01/2012	18:30	0	0.4	7.1	FALSO	202.5	337.5	---	18.2	15.2
01/01/2012	19:00	0	0	8.9	FALSO	202.5	315	---	17.2	14.3
01/01/2012	19:30	0	0	9.4	FALSO	FALSO	315	---	---	13.3
01/01/2012	20:00	0	0	9.8	FALSO	FALSO	315	---	---	12.6
01/01/2012	20:30	0	0	10.3	FALSO	FALSO	315	---	---	12.3
01/01/2012	21:00	0	0	10.3	FALSO	FALSO	315	---	---	12.1
01/01/2012	21:30	0	0	10.3	FALSO	FALSO	315	---	---	11.9
01/01/2012	22:00	0	0	8.9	FALSO	FALSO	315	---	---	11.7
01/01/2012	22:30	0	0	9.8	FALSO	FALSO	315	---	---	11.3
01/01/2012	23:00	0	0	9.4	FALSO	FALSO	315	---	---	11.3
01/01/2012	23:30	0	0	8.5	FALSO	FALSO	315	---	---	11.1
02/01/2012	00:00	0	0	8.9	FALSO	FALSO	315	---	---	11.1
02/01/2012	00:30	0	0	8.1	FALSO	FALSO	315	---	---	10.8
02/01/2012	01:00	0	0	8.9	FALSO	FALSO	315	---	---	10.3
02/01/2012	01:30	0	0	9.8	FALSO	FALSO	315	---	---	10.5
02/01/2012	02:00	0	0	8.9	FALSO	FALSO	315	---	---	10.3
02/01/2012	02:30	0	0	8.9	FALSO	FALSO	315	---	---	10.2

ANEXO 2. PLANO DE ESTATOR



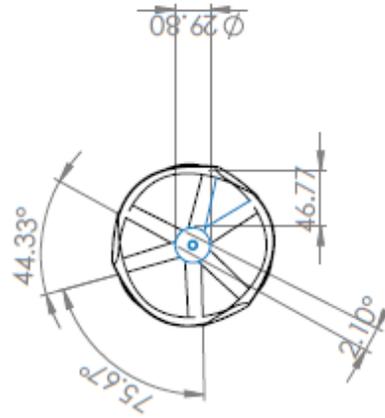
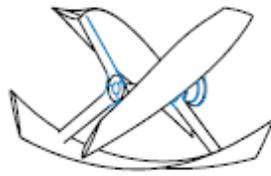
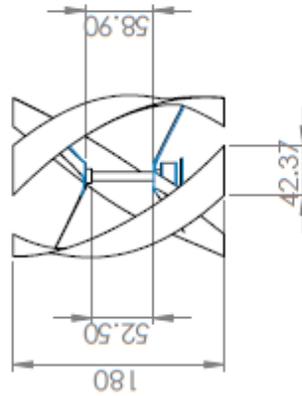
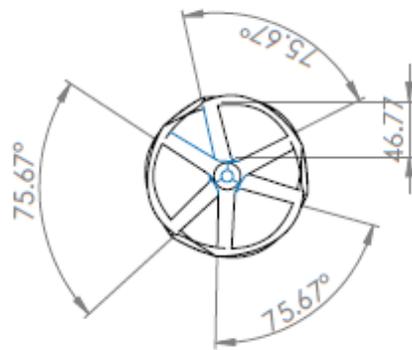
INFORMACIÓN CONFIDENCIAL Y DE MARCA LA INFORMACIÓN INCLUIDA EN ESTE DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A «NOMBRE DE LA COMPAÑÍA». QUEDA PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN EL PREVIO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE «NOMBRE DE LA COMPAÑÍA».		SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EFECTÚAN EN PULGADAS TOLERANCIAS: FRACCIONALES: ± ANGULAR MÁQUINA: ± 2 LUGARES DECIMALES ± 3 LUGARES DECIMALES ± INTERPRETAR TOLERANCIA GEOMÉTRICA POR: MATERIAL ACABADO		DIBUJADO VERIFICADO INGENIERIA FABRICACIÓN CALIDAD COMENTARIOS:	NOMBRE JESÚS BALAM FECHA	TÍTULO: DESEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA PARA IMPULSO DE UN MOTOR DE TIPO JAULA DE ARDILLA
		NO CAMBIE LA ESCALA		N.º DE DIBUJO A	N.º DE DIBUJO Estator	REV REV
UTILIZADO EN APLICACIÓN		ESCALA: 1:5		PESO: HOJA 1 DE 1		

ANEXO 3. PLANO DE ROTOR



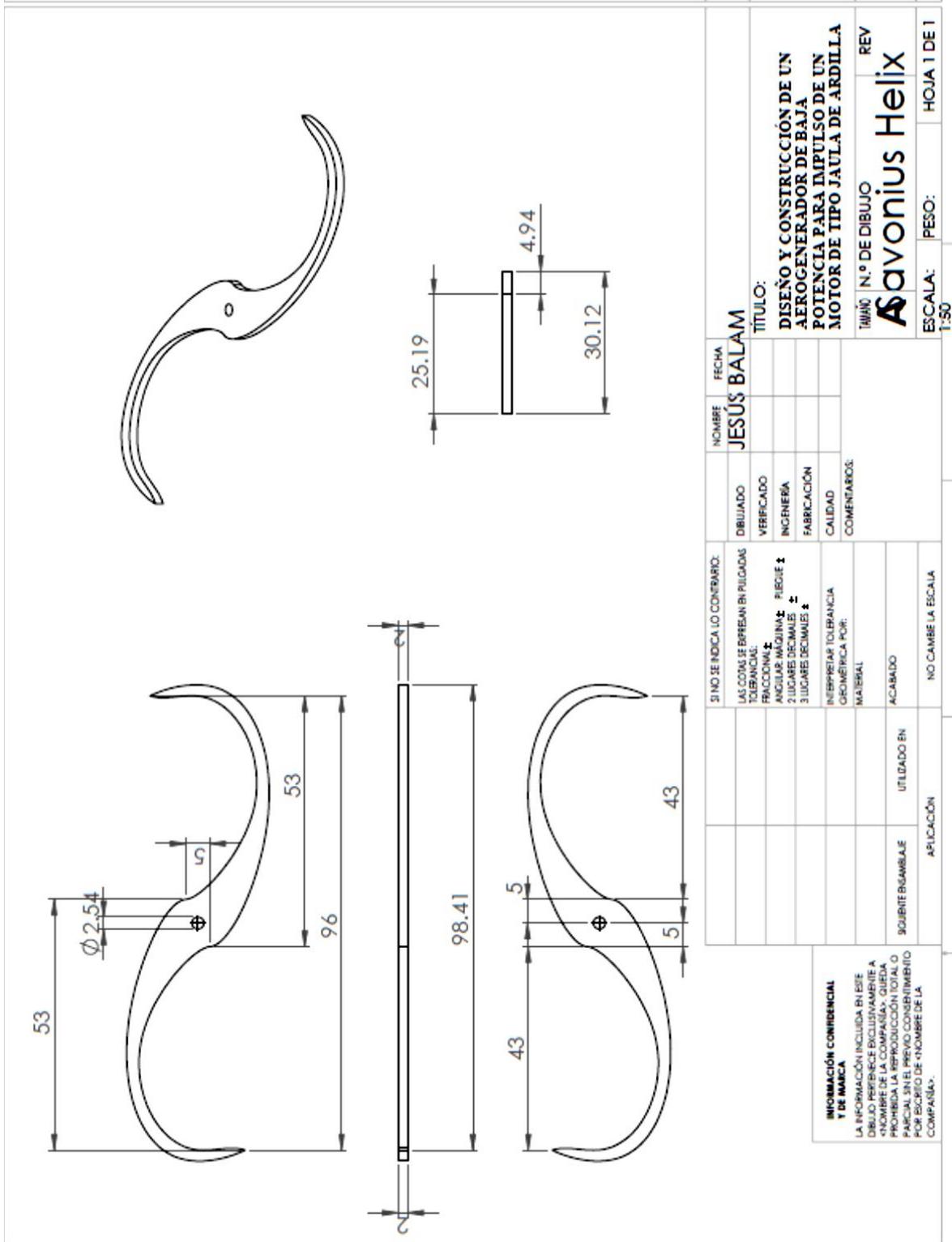
INFORMACIÓN CONFIDENCIAL Y DE MARCA LA INFORMACIÓN INCLUIDA EN ESTE DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A «NOMBRE DE LA COMPAÑÍA». QUEDA PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN EL PREVIO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE «NOMBRE DE LA COMPAÑÍA».		SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE BIRREAN EN PULGADAS TOLERANCIAL: FRACCIONAL: ANGULAR: MAGNITUD: 2 LUGARES DECIMALES 3 LUGARES DECIMALES PUEDE: INTERPRETAR TOLERANCIA GROMETRICA POR: MATERIAL		DIBUJADO VERIFICADO INGENIERIA FABRICACIÓN CALIDAD COMENTARIOS:	NOMBRE JESUS BALAM	FECHA
TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA PARA IMPULSO DE UN MOTOR DE TIPO JAULA DE ARDILLA		TAMAÑO N.º DE DIBUJO A		ESCALA: 1:3		
APLICACIÓN		NO CAMBIA LA ESCALA		PESO:		
SIGUIENTE ENAMBLAJE		UTILIZADO EN		HOJA 1 DE 1		

ANEXO 4. PLANO DARRIEUS HELICOIDAL



<p>INFORMACIÓN CONFIDENCIAL Y DE MARCA</p> <p>LA INFORMACIÓN INCLUIDA EN ESTE DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A «NOMBRE DE LA COMPAÑÍA». QUEDA PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN EL PREVIO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE «NOMBRE DE LA COMPAÑÍA».</p>		<p>SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE BIRREAN EN PULGADAS TOLERANCIAS: FRACCIONAL: ± ANGULAR: MÁQUINA: ± FLEJE ± 2 LUGARES DECIMALES ± 3 LUGARES DECIMALES ± INTERPRETAR TOLERANCIA GEOMÉTRICA POR: MATERIAL ACABADO UTILIZADO EN SOBLETE BOMBAE APLICACIÓN</p>		<p>NO CAMBE LA ESCALA</p>	<p>ESCALA: 1:50 PESO: HOJA 1 DE 1</p>
<p>DIBUJADO VERIFICADO INGENIERIA FABRICACIÓN CALIDAD COMENTARIOS:</p>	<p>NOMBRE JESÚS BALAM</p>	<p>FECHA</p>	<p>TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA PARA IMPULSO DE UN MOTOR DE TIPO JAULA DE ARDILLA</p>	<p>TAMÑO: N.º DE DIBUJO ADarrieus Helix REV</p>	

ANEXO 5. PLANO SAVONIUS HELICOIDAL



NOMBRE		FECHA	
JESÚS BALAM			
TÍTULO:			
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA PARA IMPULSO DE UN MOTOR DE TIPO JAULA DE ARDILLA			
N.º DE DIBUJO			
REV			
ESCALA:		PESO:	
1:50		HOJA 1 DE 1	
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EFREAN EN PULGADAS TOLERANCIAS: FRACCIONES: \pm ANGLE DE MÁQUINA: \pm PUNTO 1 2 LUGARES DECIMALES \pm 3 LUGARES DECIMALES \pm INTERPRETAR TOLERANCIA GEOMÉTRICA POR: MATERIAL ACABADO			
SOLICITE BISMARLE		UTILIZADO EN	
APLICACIÓN		NO CAMBIE LA ESCALA	
INFORMACIÓN CONFIDENCIAL Y DE MARCA LA INFORMACIÓN INCLUIDA EN ESTE DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A «NOMBRE DE LA COMPAÑÍA». QUEDA PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN EL PREVIO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE «NOMBRE DE LA COMPAÑÍA».			

ANEXO 6. GRAFICAS DE VELOCIDAD DEL VIENTO

