



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UNA TURBINA
EÓLICA SKYSTREAM**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

MIRIAM DEL ROCÍO MÁXIMO MARTÍNEZ



ASESOR DE TESIS:

DR. GILBERTO GONZALEZ ÁVALOS

MORELIA, MICHOACÁN. ENERO DE 2016.

Dedicatoria

Para mis amados padres

... Jovita Martínez Chiporagua & Carlos Máximo de Jesús ...

Ni todas las palabras del mundo se comparan con el amor y agradecimiento que les tengo

Muchas gracias por todo.

Agradecimientos

A mis padres: Jovita Martínez Chiporagua y Carlos Máximo de Jesús a quienes debo todo lo que soy como persona y académicamente. Les agradezco infinitamente su apoyo total en toda mi existencia, muchas gracias por todo y en especial a tí mamá por creer siempre en mí.

A mis hermanas Nelly, Jenny, Marisol y Karla por su apoyo en todos los sentidos y darme ánimo para seguir en el camino que he elegido.

A mi asesor de tesis Dr. Gilberto González Ávalos por todo el apoyo, paciencia y dirección durante todo el tiempo que duró este trabajo y disponibilidad, también en los trámites finales e igualmente por compartir sus conocimientos en los salones de clase.

A mi aula máter, la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y a mi querida Facultad de Ingeniería Eléctrica.

A mis maestros de licenciatura y compañeros con los que compartí clase.

A mis amigos: Eugenio Alejandro, Jesús Uriel, Marisela Yeraldín y Miguel (Kevin) por su amistad, por dejarme aprender con ellos y de ellos durante nuestros estudios en la FIE.

A B-J por ayudarme en las situaciones menos esperadas, tenerme paciencia durante el desarrollo de este trabajo y por estar ahí siempre.

Índice

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Índice	iv
Resumen	vi
Palabras clave	vi
Abstract.....	vii
Keywords.....	vii
Índice de Figuras	viii
Glosario	1
Capítulo 1	2
Introducción.....	2
1.1. La energía eólica	2
1.2. Objetivo	3
1.3. Justificación	3
1.4. Metodología científica.....	4
1.5. Contenido de la tesis.....	4
Capítulo 2	5
Generación con fuentes renovables	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. La energía por Biomasa.....	5
2.3. Energía Geotérmica	7
2.4. Energía Hidráulica.....	9
2.5. Energía Mareomotriz.....	15
2.6. Energía Solar	18
2.7. Energía Eólica.....	22
Capítulo 3	28
Modelado de una turbina eólica Skystream 3.7®.....	28
3.1. Introducción.....	28
3.2. Composición de una turbina eólica	28
3.3. Fundamentos teóricos de un aerogenerador	31

3.4. Características de la turbina eólica Skystream 3.7®	36
3.5 Modelado matemático del aerogenerador Skystream	43
Capítulo 4	49
Simulación de la turbina eólica Skystream.....	49
4.1. Introducción.....	49
4.2. Software de la turbina eólica Skystream 3.7.	49
4.3. Modelo propuesto en Simulink	54
Capítulo 5	64
5.1. Conclusiones.....	64
5.2. Recomendaciones	64
Bibliografía.....	65

Resumen

El uso la energía eólica es una de las formas más usadas como alternativa a la disminución de energía proveniente por combustibles fósiles. Esta tesis presenta un modelo de generación para poder compararlo con una turbina eólica Skytream con el propósito de conocer más a fondo este tipo de sistema de generación.

En el presente trabajo se desarrolla el modelado y simulación de un modelo de funcionamiento de un generador eólico basado en una máquina síncrona de imanes permanente (PMSG) misma que cumple ciertas características que la turbina eólica Skytream. El sistema se simuló en el ambiente Simulink de Matlab lo cual permiten un panorama de la generación de energía a través de fuentes de energía renovables.

El sistema propuesto contempló tres etapas principales como lo es la generación, un convertidor cd-cd elevador y un inversor trifásico. Para cada uno de estas etapas se desarrolló su respectivo modelo de bloques como parte de un sistema total en Simulink.

Para la etapa de potencia se desarrolló un convertidor elevador CD-CD que nos permite elevar la tensión cuando ésta es menor a la que el generador entrega. Para convertir este nivel de tensión a una carga, se desarrolló un inversor trifásico con modulación por ancho de pulsos (PWM).

Palabras clave

PMSG, energía renovable, turbina eólica, Simulink.

Abstract

The wind energy is one of the most popular renewable energy as an alternative to reduce production's energy from fossil fuels. The present thesis develops a generation model to compare it with a Skystream's wind turbine with the purpose to increase the knowledge about this kind of generation's system.

The present paper develops a model and a simulation of a permanent magnet synchronous generator with specifics characteristics from Skytream wind turbines. The system was simulated in Matlab, Simulink that allows a general view of energy generation through alternative sources of energy.

The proposed system consist three stages: generation, a boost converter and a three phase inverter in Simulink every stage was developed and its block system as part for the total system.

On the power stage a boost converter was designed to elevate the input voltage for the output voltage even if the voltage is minor at the generated voltage. to converter these voltage level, a three phase inverter with PWM was designed.

Keywords

PSMG; renewable energy, wind turbine, Simulink.

Índice de Figuras

Capítulo Dos

Figura 2. 1 Ciclo de energía por biomasa.	6
Figura 2. 2 Clasificación de la biomasa.	7
Figura 2. 3 Yacimiento geotérmico.	8
Figura 2. 4 Esquema general del funcionamiento de una central geo termoeléctrica.	9
Figura 2. 5 Esquema de funcionamiento de una central hidráulica.	11
Figura 2. 6 Figura 2.6 (a) Esquema común de una central de pasada. (b) Configuración correspondiente a una central de agua embalsada.	13
Figura 2. 7 Principio de funcionamiento de una central mareomotriz.	16
Figura 2. 8 Central mareomotriz Sihwa Lake.	17
Figura 2. 9 Radiación difusa.	19
Figura 2. 10 Sistema de colector solar.	20
Figura 2. 11 Composición interna de un panel fotovoltaico.	21
Figura 2. 12 Clasificación de aerogeneradores por su emplazamiento.	25
Figura 2. 13 Clasificación de aerogeneradores por la orientación del rotor. (a) Posición horizontal. (b) Posición vertical	25
Figura 2. 14 Configuración de posición del aerogenerador respecto al viento. (a) Sotavento horizontal. (b) Barbolento.	26

Capítulo Tres

Figura 3. 1 Partes principales de un aerogenerador.	29
Figura 3. 2 Modelo de Betz.	33
Figura 3. 3 Curva de potencia del aerogenerador Skystream 3.7®.	35
Figura 3. 4 Turbina eólica instalada Skystream 3.7.	37
Figura 3. 5 Vista general de las posiciones de elementos de la turbina eólica Skystream 3.7®.	41
Figura 3. 6 Circuito equivalente de un generador síncrono de imanes permanentes (GSIP) monofásico.	44
Figura 3. 7 Circuito de un puente rectificador trifásico.	45
Figura 3. 8 Esquema básico de un convertidor elevador	46
Figura 3. 9 Topología de un inversor trifásico de puente completo VSI de dos niveles.	47
Figura 3. 10 Generación de una señal PWM.	48

Capítulo Cuatro

Figura 4. 1 Sección Overview del software Skystream.	50
Figura 4. 2 Sección de diagnóstico rápido.	51
Figura 4. 3 Sección Turbine Setup.	51

Figura 4. 4 Comportamiento del aerogenerador en estado “Listo” .	52
Figura 4. 5 Comportamiento del aerogenerador en estado “Generando” .	53
Figura 4. 6 Sección de diagnóstico avanzado.	53
Figura 4. 7 Diagrama general del sistema de generación.	54
Figura 4. 8 Entrada tipo escalón.	55
Figura 4. 9 Sistema con entrada tipo rampa.	55
Figura 4. 10 Voltaje generado.	56
Figura 4. 11 Voltaje rectificado.	56
Figura 4. 12 Convertidor elevador de cd a cd.	57
Figura 4. 13 Salida del convertidor elevador.	57
Figura 4. 14 Inversor trifásico.	58
Figura 4. 15 Gráfica de generación de una señal PWM en Simulink.	58
Figura 4. 16 Salida del inversor trifásico.	59
Figura 4. 17 Detalle del voltaje trifásico en el inversor.	59
Figura 4. 18 Sistema con entrada tipo rampa.	60
Figura 4. 19 Entrada tipo rampa.	60
Figura 4. 20 Voltaje generado.	61
Figura 4. 21 Voltaje rectificado.	61
Figura 4. 22 Voltaje elevado.	62
Figura 4. 23 Voltaje trifásico en el inversor.	62
Figura 4. 24 Detalle del voltaje trifásico.	63

Glosario

A	Ampere, unidad de intensidad para la corriente eléctrica
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
CD-CA	Convertidor de corriente directa a corriente alterna
CD-CD	Convertidor corriente directa a corriente directa
dBm	decibelio-milivatio
M	Metro
m/s	Metro por segundo
PMSG	Generador síncrono de imanes permanentes
PWM	Modulación por ancho de pulso
R	Resistencia medida en omhs
rpm	Revoluciones por minuto
THD	Distorsión total de armónicos
V	Volts
W	Watts
M, m	Metro
N	Newton: unidad de fuerza en el Sistema Internacional de Unidades
Ω	Ohm, unidad de la resistencia eléctrica

Capítulo 1

Introducción

1.1. La energía eólica

La energía eólica es aquella que se obtiene a partir del viento que proviene del desplazamiento de masas de aire que se desplazan de áreas de presión alta hacia áreas de una presión menor; es decir, se aprovecha de la energía cinética generada por estas corrientes de aire para originar finalmente, energía eléctrica.

Desde hace muchos siglos, el viento ha sido una herramienta para poder desplazarse sobre el mar y ríos de los cuales se tienen registros desde el año 3000 A.C. También hacia el 200 A.C. se utilizaron los molinos de viento para accionar sistemas de agua y para moler granos en Persia y el medio Este. Fue a finales del siglo XIX cuando se comenzó la fabricación más detallada de molinos de viento para bombear agua en campos de cultivo, y después se enfocó a generar electricidad.

La energía eólica ha ganado gran interés durante los recientes años. Su interés fundamental se basa en la obtención de su materia prima para producir energía, ya que el aire es una fuente inagotable y limpia, su costo es nulo.

El uso de parques eólicos se ha popularizado alrededor del mundo, donde buscan reducir la emisión de dióxido de carbono CO_2 que se origina en la producción convencional de energía a base de combustibles fósiles. Así también, se toman en cuenta los lugares donde las condiciones climatológicas proporcionen una mayor producción de energía lo que apoya en la reducción de la cantidad emitida de dióxido de carbono y principalmente, genera una cantidad importante en el suministro energético.

El uso de energías renovables se ha vuelto muy popular alrededor del mundo. Es en la Unión Europea donde se ha dado prioridad al tener objetivos ambientales como el aumento de la sustentabilidad energética renovable, por lo que países como Londres, España, Dinamarca y

Alemania están en constante crecimiento con la construcción de grandes parques eólicos en altamar.

Tan sólo una granja eólica ubicada en Dinamarca, tiene 91 turbinas eólicas que producen 209 MW de energía que es suficiente para alimentar la demanda energética de 200 000 hogares. En España en el año 2011, el promedio de energía eólica que se utilizó durante una madrugada de Noviembre, fue del 59.6%.

En México, contamos con 26 parques eólicos operando principalmente en Oaxaca y uno localizado en Baja California. El número hasta 2013 de aerogeneradores que forman estos parques es de 1190 y que en conjunto en ese mismo año, generaron cerca de 1917 MW.

1.2. Objetivo

A través de esta investigación se pretende simular una turbina eólica Skystream 3.7® mediante su modelado matemático usando la herramienta computacional Simulink de Matlab. Todo esto con el fin de ampliar nuestros conocimientos en cuanto a la generación de este tipo de energía renovable y valorar su impacto ambiental.

1.3. Justificación

En la actualidad las energías renovables son una esperanza ante el uso desmedido de nuestros recursos naturales.

Actualmente, existe una búsqueda constante de reducir la contaminación producida por las formas comunes de obtención de energía buscando la reducción del CO_2 (dióxido de carbono). Por lo cual, se busca implementar fuentes alternativas de energía. Energías como la solar, la mareomotriz, geotérmica, hidroeléctrica y eólica, se han vuelto muy populares en este rubro de energías ecológicas.

La energía eólica es una fuente limpia e inagotable, su ventaja principal es que, como materia prima, su obtención no representa costo alguno.

El presente trabajo propone el análisis de la turbina eólica Skystream 3.7® como auxiliar para reducir el consumo de energía del edificio Omega perteneciente a la Facultad de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Mediante la obtención del modelado, simulación y comparación de pruebas realizadas a la turbina eólica, se estudia de una manera precisa la obtención de la energía, datos de producción y consumo así como también se determinan fallas que pueda presentar dicha turbina.

La elección de este tema busca mejorar la apreciación que tenemos hacia las energías alternas y que queda expuesta mediante el estudio a realizar a la turbina eólica Skystream3.7®.

1.4. Metodología científica

Para la realización de este trabajo, se consideraron las siguientes etapas:

1. Investigación del funcionamiento de un aerogenerador Skystream 3.7®.
2. Observación de los datos otorgados por el software de la turbina eólica Skystream 3.7®.
3. Simulación del aerogenerador en MATLAB.
4. Comparación de los datos reales con los datos obtenidos de la simulación.

1.5. Contenido de la tesis

En el primer capítulo se describe un breve resumen del uso de la energía eólica y su impacto en el medio ambiente.

En el segundo capítulo se da un panorama de las distintas fuentes alternas de energía existentes en el presente.

En el tercer capítulo se obtiene la realización del modelo matemático de la turbina eólica Skystream 3.7®.

En el cuarto capítulo se enfoca al análisis de los datos directamente proporcionados de la turbina. Así como la simulación y la comparación de los datos correspondientes.

En el quinto capítulo; finalmente se dan las conclusiones a las que se llegaron en la realización de este trabajo así como recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 2

Generación con fuentes renovables

2.1. Introducción

La energía es la capacidad de los cuerpos para realizar un trabajo, es decir, cuando surgen perturbaciones en su estado de movimiento.

La energía eléctrica se obtiene de otras formas de energía que se transforma en electricidad; en este proceso de transformación se produce dióxido de carbono el cual se origina cuando hay una combustión de cualquier sustancia que contenga carbono. Debido a las grandes cantidades emitidas, se ha buscado reducir estas cantidades mediante la obtención de energía por medio de energías más ecológicas.

A continuación se desglosan algunas de las fuentes alternas de energía que se han popularizado en las últimas décadas.

2.2. La energía por Biomasa

La biomasa es un concepto que engloba la cantidad de materia que se acumula en un individuo, una población, un ecosistema. En términos energéticos, la biomasa es un tipo de energía que se origina a partir del sol, ya que mediante este proceso se lleva a cabo la fotosíntesis vegetal, misma que origina clorofila que transforma el dióxido de carbono en materiales orgánicos que son utilizados por los animales y por el hombre. Este tipo de energía se basa en la transformación de la materia orgánica mediante un proceso de combustión. En la figura 2.1 se muestra el ciclo de generación de energía por biomasa.

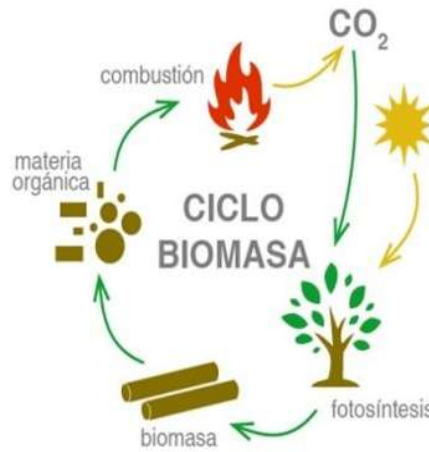


Figura 2. 1 Ciclo de energía por biomasa.

2.2.1. Biomasa natural

La biomasa natural es aquella que se encuentra naturalmente en el medio ambiente y que son residuos forestales como hojas, ramas, leña entre otros. Su producción es sin intervención alguna del hombre.

2.2.2. Biomasa residual

Es la generada con la intervención del hombre mediante el uso de materia orgánica. Principalmente proviene de explotaciones agrícolas, ganaderas o forestales.

Las ventajas son menor contaminación, evitan incendios, no emiten CO_2 así como también evita la explotación de los sistemas naturales.

Las desventajas son principalmente, el costo elevado de su producción y el rendimiento energético es menor en comparación a la energía proveniente de los combustibles fósiles. La fig.2.2 Ilustra la clasificación de la biomasa.

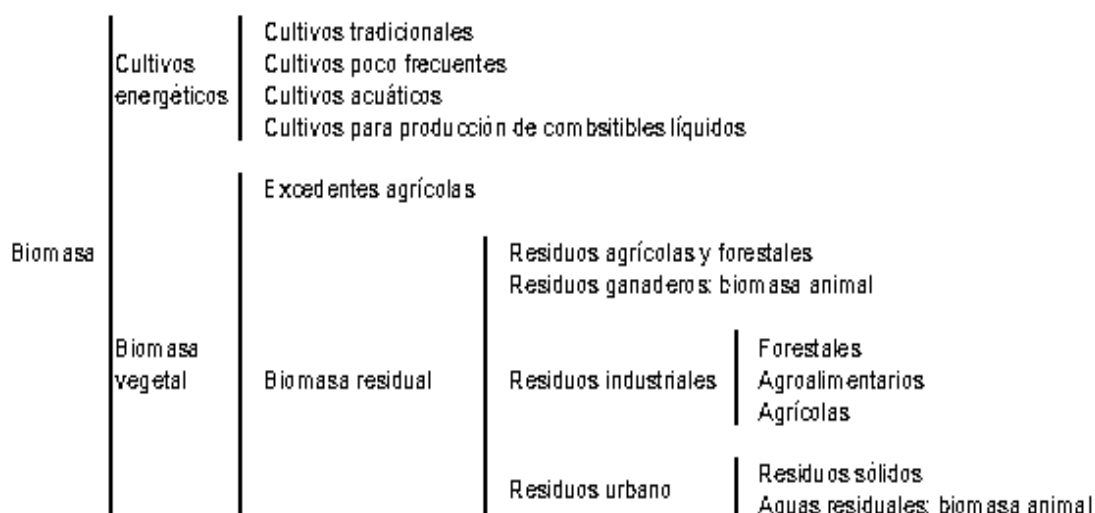


Figura 2. 2 Clasificación de la biomasa.

2.2.3. La biomasa en el mundo

Actualmente, se ha estado construyendo centrales importantes de biomasa alrededor del mundo. En 2006, en Viena, Austria se construyó la central de biomasa más grande de Europa utilizando residuos de origen forestal y produce aproximadamente 24.5MW suficiente para abastecer a 50 000 hogares.

La mayor planta de energía de biomasa en el mundo es la Ironbridge en Severn Gore, Reino Unido. Tiene una capacidad de generación de 740MW desde 2013.

Finlandia se destaca por ser el mayor productor de biomasa en el mundo. Ahí se encuentra la planta Alholmens Kraft que destaca como la segunda más grande a nivel mundial con una producción de 256MW ubicada en Alhomen, Jakobstad.

2.3. Energía Geotérmica

2.3.1. Obtención de la energía geotérmica

La energía geotérmica es energía renovable que aprovecha el calor diferencial entre el núcleo y el subsuelo de la tierra. El calor almacenado en el interior de la corteza se debe principalmente actividades volcánicas, géiseres, aguas termales. Estas fuentes de energía normalmente oscilan entre temperaturas de 15 °C en la superficie a los 6000 °C dentro del

núcleo interno. La diferencia de temperaturas provoca un flujo continuo de calor que proviene desde el núcleo hasta la superficie de la tierra.

Mayormente, las centrales geotérmicas se encuentran en un rango de profundidad de 200 a 1500 metros. La energía geotérmica se puede aprovechar de dos formas: directamente, como calor, o para la producción de electricidad. Figura 2.3. Muestra instalaciones de una central geotérmica.



Figura 2. 3 Yacimiento geotérmico.

2.3.2. La energía geotérmica como productor electricidad

Para producir electricidad se aprovecha la salida del vapor de las fuentes geotérmicas, que accionan turbinas que ponen en marcha generadores eléctricos. Para ello es necesario que la temperatura del agua subterránea sea superior a 150°C; si se usa la tecnología de ciclo binario, la temperatura puede ser de 100 °C (esta tecnología consiste básicamente en que el agua le cede el calor a otro fluido que se vaporiza a menor temperatura). Los yacimientos, que se utilizan para la producción de electricidad, son los denominados de alta temperatura (enrenovables). En la Figura 2.4. Se presenta un esquema básico de una central geotérmica para la producción de energía eléctrica.

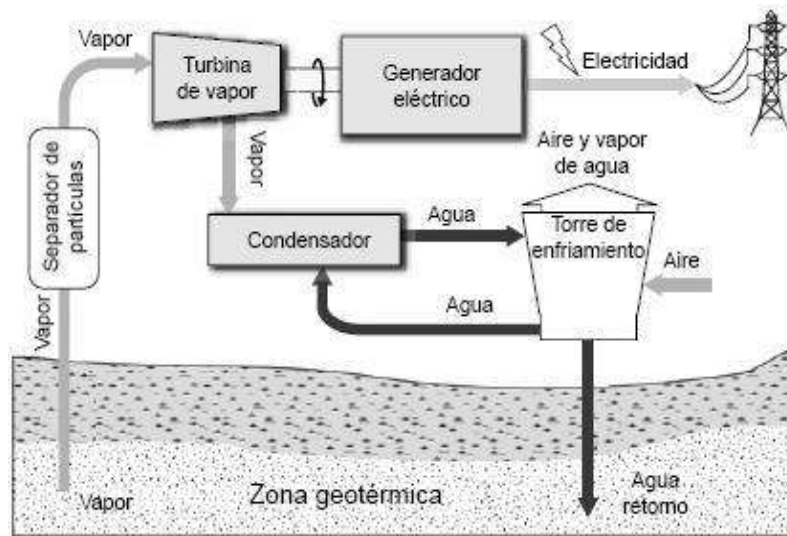


Figura 2. 4 Esquema general del funcionamiento de una central geotérmica.

2.3.3. La energía geotérmica como productor de calor

El uso de acuerdo a la temperatura del subsuelo clasifica 2 producciones de calor.

La primera recibe el nombre de energía geotérmica de alta entalpía cuando las condiciones físicas de presión y temperatura superan los 150°C. Se ubican directamente en los yacimientos geotérmicos

La energía geotérmica de baja entalpía maneja el rango de 30°C a 150°C. Se extrae del agua subterránea. Las aplicaciones más comunes son la calefacción de edificios, de invernaderos, del agua de piscinas, balnearios y principalmente, en usos industriales.

El calor se extrae del subsuelo terrestre, para poder calentar un fluido de alta compresibilidad y bajo punto de vaporización. Los diferentes sistemas de bombas de calor permiten extraer y utilizar económicamente ese calor contenido en cuerpos de baja temperatura, como lo son suelos y acuíferos. Las bombas de calor geotérmicas son máquinas que mueven el calor en una dirección opuesta a la dirección que tendería naturalmente, esto es, desde un espacio o cuerpo frío a uno de mayor temperatura. Muchas bombas de calor son reversibles y pueden proporcionar ya sea calor o frío al espacio (naturio ingeniería).

2.4. Energía Hidráulica

2.4.1. Generación

Debido a la energía del sol, se llevan a cabo el ciclo del agua proveniente de ríos, lagos, mares y océanos, formación de nubes, las precipitaciones y nuevamente el comienzo del ciclo. Este tipo de energía aprovecha la caída, movimiento del agua para producir energía cinética de corrientes o salto de agua para producir energía eléctrica. La energía hidráulica es una de las principales formas de obtención de energía.

Una central hidroeléctrica clásica es un sistema que consiste en tres partes: una central eléctrica en la que se produce la electricidad; una presa que puede abrirse y cerrarse para controlar el paso del agua; y un depósito para el almacenamiento de agua. El agua de detrás de la presa fluye a través de una entrada y hace presión contra las palas de una turbina, lo que hace que éstas se muevan. La turbina hace girar un generador para producir la electricidad. La cantidad de electricidad que se puede generar depende de hasta dónde llega el agua y de la cantidad de ésta que se mueve a través del sistema. La electricidad puede transportarse mediante cables eléctricos de gran longitud hasta casas, fábricas y negocios (national geographic).

La construcción de una central eléctrica depende de 2 partes fundamentales:

- a) Tipos de obras y equipamiento. Este concepto comprende al sistema presa-embalse. Contempla los canales, túneles, tuberías forzadas y chimeneas principalmente.
- b) Edificios, equipos y sistemas; esta parte es la encargada de la transformación de la energía. La parte fundamental es la central, así como turbinas hidráulicas, alternadores, transformadores, sistemas de baja, media y alta tensión.

El diagrama de una central hidroeléctrica se muestra en la figura 2.5.

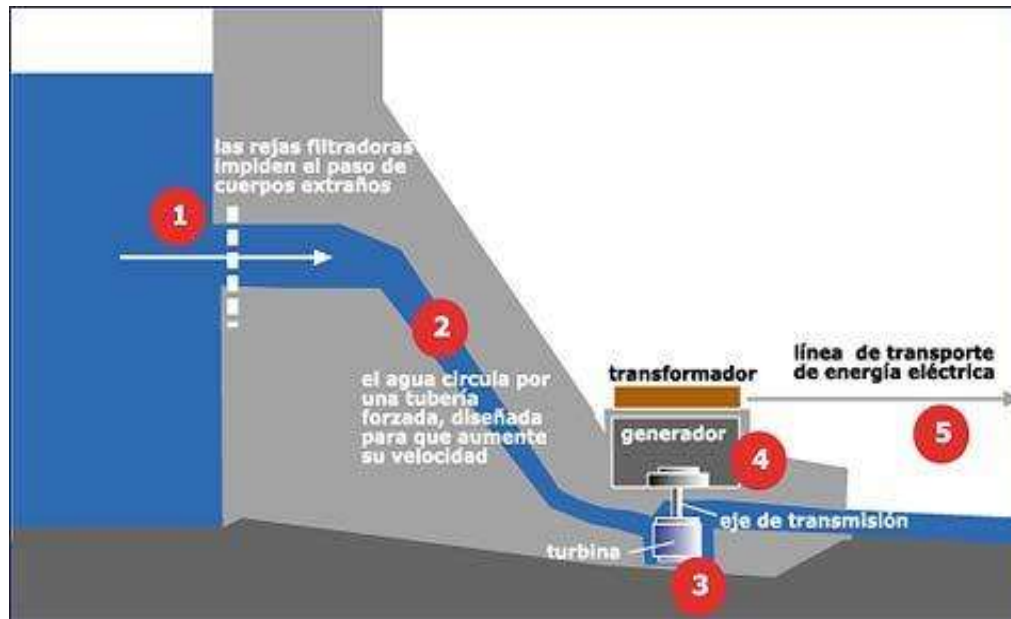


Figura 2. 5 Esquema de funcionamiento de una central hidráulica.

2.4.2. Clasificación de centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar de acuerdo a la utilización del agua como se explica a continuación.

Centrales de Pasada:

También conocidas como centrales de agua de corriente, se caracterizan por utilizar el agua mientras está fluyendo por el cauce de un río. El gasto varía de acuerdo a las condiciones de tiempo. En precipitaciones abundantes, la central produce su máxima potencia, mientras que la producción es mínima en tiempo seco. Son típicas presas que son construidas sobre el cauce de los ríos.

Centrales de Agua Embalsada:

Se alimenta del agua de grandes lagos o de pantanos artificiales (embalses), conseguidos mediante la construcción de presas. El embalse es capaz de almacenar los caudales de los ríos afluentes, llegando a elevados porcentajes de captación de agua en ocasiones. Esta agua es utilizada según la demanda, a través de conductos que la encauzan hacia las turbinas. Estas centrales también pueden ser de 2 tipos:

- 1) Centrales de regulación: se caracterizan por acumular grandes volúmenes de agua en el embalse. Son muy usados cuando existen bajos caudales gracias al almacenamiento continuo.
- 2) Centrales de bombeo o de acumulación: también se denominan centrales de acumulación debido a que concentran energía potencial mediante caudales de agua gracias al bombeo. Pueden ser de turbina y bomba, o de turbina reversible. La alimentación del generador que realiza el bombeo desde aguas abajo, se puede realizar desde otra central hidráulica, térmica o nuclear.

De acuerdo a la altura del salto existente se pueden clasificar en:

- a) Centrales de alta presión: Se caracterizan por tener un salto hidráulico mayor a los 200m. usualmente son instaladas en zonas altas montañosas aprovechando el gasto alto que desemboca en los lagos. Desalojan caudales de $20 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ por máquina.
- b) Centrales de mediana presión: manejan un rango de 20m a 200m en los saltos de agua. Desalojan caudales de $200 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ por turbina. Estas construcciones se encuentran principalmente en valles de media montaña.
- c) Centrales de baja presión: tienen saltos inferiores a los 20m. Se ubican en valles de montaña baja. Manejan caudales de $300 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ por turbina. Las turbinas características para estas centrales son de tipo Francis y Kaplan.

En la figura 2.6. Se muestran 2 tipos de central hidroeléctrica.

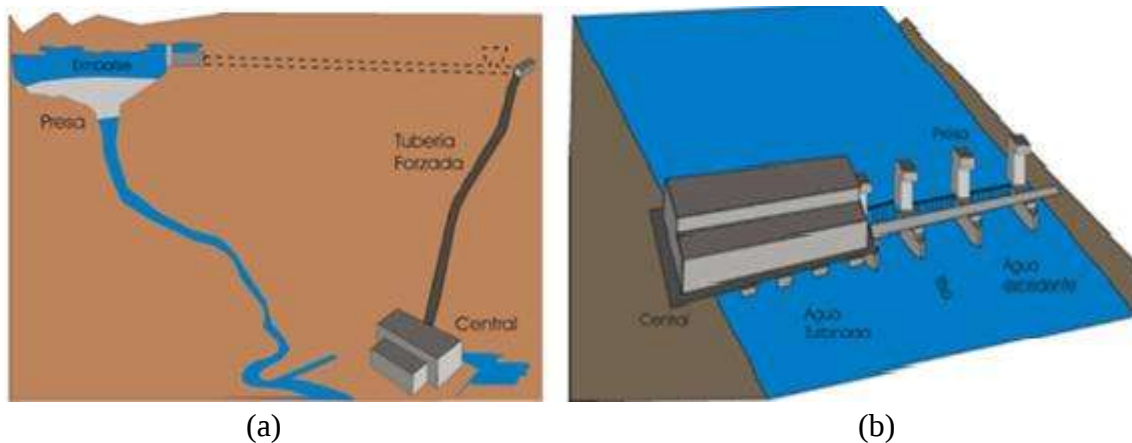


Figura 2. 6 Figura 2.6 (a) Esquema común de una central de pasada. (b) Configuración correspondiente a una central de agua embalsada.

2.4.3. Tipos principales de turbinas hidráulicas

La turbina hidráulica es la encargada de transformar la energía mecánica en energía eléctrica; es una turbo máquina motora, que absorbe energía de una corriente fluida (agua) y restituye energía mecánica. Existen varias clasificaciones de turbinas, para determinados sistemas hidroeléctricos. Las turbinas se pueden clasificar de varias maneras estas son:

- a) De acuerdo a la dirección en que entra el agua:
 - Turbinas axiales: el agua entra en el rodete en la dirección del eje.
 - Turbinas radiales: el agua entra en sentido radial, no obstante el agua puede salir en cualquier dirección.
- b) Respecto al modo de obrar del agua:
 - Turbinas de chorro o de acción simple o directa.
 - Turbinas de sobrepresión o de reacción.
- c) Según la dirección del eje:
 - Horizontales.
 - Verticales.

La variedad de tipos de centrales hidroeléctricas tienen en común algunos tipos de turbinas hidráulicas. Los modelos más utilizados en las centrales hidroeléctricas, son los modelos siguientes:

2.4.3.1. Turbinas de reacción.

Manejan presiones más bajas en el fluido. La entrada a la turbina se da simultáneamente por múltiples entradas que están dispuestas alrededor de la rueda de álabes y el trabajo se ejerce sobre todos los álabes simultáneamente provocando el giro de la turbina y del generador.

- a) Francis: usualmente son utilizadas para caídas medianas. Son descargadas a contra presión, se caracterizan también por tener una válvula de mariposa como medida de prevención.
- b) Kaplan: igualmente que la turbina Francis, es una turbina de reacción. Se caracterizan por su uso en caídas bajas, típicamente son usadas para gastos muy grandes.

2.4.3.2. Turbinas de chorro

Pelton: Se caracterizan por manejar una presión muy alta en el agua. Utilizan una válvula de aguja que se encarga de controlar el flujo de agua, mediante el paso de un gasto leve de agua. Este gasto leve choca con los álabes de la turbina por lo que hay transferencia de energía y se hace girar a la turbina. A su vez, esto hace girar un generador que está acoplado al eje de la turbina para producir energía eléctrica. Una válvula esférica es usada como medida de seguridad.

2.4.3.3. Turbinas de hélice

También conocidas como turbinas tipo propeller. Se caracterizan por que el receptor toma la forma de hélice de propulsión y por tener una distancia grande entre los álabes del receptor y las del distribuidor.

2.4.4. La importancia de la energía hidráulica

La energía hidráulica es una de las más importantes en la producción de electricidad. La energía hidroeléctrica es la que genera electricidad de forma más barata en la actualidad. Esto se debe a que, una vez que la presa se ha construido y se ha instalado el material técnico, la fuente de energía (agua en movimiento) es gratuita. Esta fuente de energía es limpia y se renueva cada año a través del deshielo y las precipitaciones (national geographic).

La central hidroeléctrica de mayor tamaño de los Estados Unidos se encuentra junto a la presa Grand Coulee, sobre el río Columbia, en la zona norte del estado de Washington. Más

del 70 por ciento de la electricidad producida en este estado estadounidense proviene de centrales hidroeléctricas.

2.5. Energía Mareomotriz

2.5.1. Generación

Debido a las concentraciones de viento en zonas de menor presión, hay más viento en los océanos y por lo tanto es mayor la producción de energía cinética. Este tipo de energía aprovecha el ciclo de las mareas, obteniendo electricidad gracias a las subidas y bajadas cíclicas del nivel del agua en las costas cuando éstas tienen al menos 5 metros de altura.

Una central mareomotriz se basa en el almacenamiento de agua en una represa formado al construir un dique con compuertas que permiten la entrada de agua para la generación eléctrica. El funcionamiento del sistema es cuando la marea sube, se abren las compuertas y se deja pasar el agua hasta que llega a su máximo nivel. En seguida, se cierra el dique para retenerla y se espera a que el mar vaya bajando al otro lado, lo que produce un gran desnivel. Esta altura es aprovechada para hacer pasar el agua por las turbinas y generar electricidad. Figura 2.7. Esquema de una central mareomotriz.

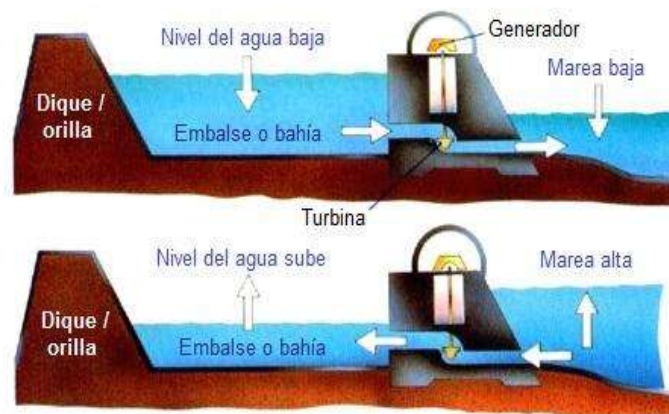


Figura 2. 7 Principio de funcionamiento de una central mareomotriz.

2.5.2. Uso de la energía de las olas

En algunas zonas el viento puede llegar a producir olas de más de 15 metros de altura, esto indica el gran potencial de la energía de las olas para producir electricidad. Producir energía mediante el movimiento oscilatorio de las olas, recibe el nombre de energía undimotriz.

La energía undimotriz, se diferencia de la energía mareomotriz en que se utiliza el movimiento de las olas hacia arriba y hacia abajo, con la ayuda de pistones dentro de cilindros, formando un generador eléctrico. Este tipo de energía es frecuentemente usada para la desalinización de agua marina.

Los dispositivos que permiten obtener energía eléctrica de las olas se pueden clasificar en dos grupos: fijos y flotantes

Los dispositivos fijos son los instalados a lo largo de la línea costera o sobre el lecho marino en aguas poco profundas. Algunas de sus ventajas sobre los dispositivos flotantes se emplean para mantenimiento. Una desventaja es la limitada cantidad de lugares para su instalación.

Los dispositivos de generación de energía eléctrica undimotriz de tipo flotante son sistemas que flotan en el océano cerca de la costa sobre la superficie o sumergidos.

2.5.3. El gradiente térmico

El gradiente térmico se conoce también como gradiente de temperatura, se refiere a la variación de temperatura de por unidad de distancia.

El gradiente térmico se produce por la diferencia de temperatura entre la superficie marina (más de 20°C) y la correspondiente a la del fondo del mar que oscila entre 0°C y 7°C, hay más diferencias mayores en zonas cercanas al ecuador. Para la que haya generación de electricidad, se necesita que exista una diferencia de temperatura de al menos 20°C entre la superficie y la capa situada a 100 metros de profundidad, lo que sucede en los mares tropicales y subtropicales.

2.5.4. Plantas de energía mareomotriz en el mundo

La central mareomotriz más grande del mundo se ubica en Corea, con una capacidad de producción eléctrica de 254 MW. Esta planta recibe el nombre de Sihwa Lake y se localiza en el Lago Sihwa a unos 4 km de la ciudad de Siheung, en la provincia de Gyeonggi, Corea del Sur. La figura 2.8 muestra la vista aérea de la central Sihwa Lake.



Figura 2. 8 Central mareomotriz Sihwa Lake

La segunda central más grande del mundo es la planta de energía mareomotriz de La Rance de 240 MW situada en la desembocadura del río Rance, en Bretaña, Francia. Esta central es la más antigua ya que fue la primera en obtener electricidad a partir del mar desde 1966. Esta planta tiene una capacidad de generación anual de 540 GWh.

2.6. Energía Solar

2.6.1. Generación

El sol está compuesto de gases, principalmente de hidrógeno, helio y carbono. En su interior se dan grandes transformaciones pues la energía nuclear pasa a energía de radiación, y a través del espacio pasa a ser radiación electromagnética siendo ésta la forma que llega a la superficie terrestre. De la energía que llega, una parte es absorbida por la atmósfera y el suelo, mientras que la otra parte es reemitida del suelo hacia el espacio exterior de nuevo.

2.6.2. Tipos de radiación

Existen dos tipos de radiaciones que llegan a la superficie terrestre la radiación directa y la radiación difusa.

- a) **Radicación indirecta:** es aquella que atraviesa la atmósfera sin sufrir incidencias ó cambios de dirección en su trayectoria
- b) **Radiación difusa:** la radiación dispersa ó difusa es la que sufre cambios en su dirección debido a los efectos de refracción, reflexión y por tanto, han incidido con elementos externos como polvo, nubes, gases contaminantes entre otros. En cuanto al tipo de aprovechamiento de la energía solar, se tiene la energía solar térmica y la solar fotovoltaica.

En la figura 2.9. Muestra el tipo de radiación que se da naturalmente y que incide sobre un panel solar.

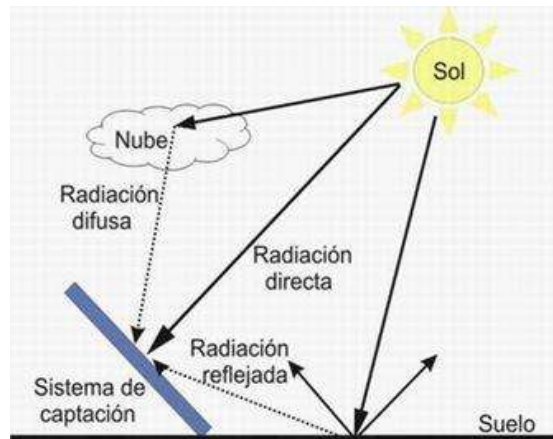


Figura 2. 9 Radiación difusa.

2.6.3. Energía solar térmica

Esta energía se basa en la captación de la radiación solar dando origen a la transferencia de calor a un fluido. Se da en función de la temperatura del fluido que produce agua caliente, vapor o energía eléctrica.

2.6.3.1. Captadores solares

En la mayoría de los casos, para el aprovechamiento de esta energía se utilizan captadores solares también conocidos como colector o placa solar dando usos directos o indirectos del fluido calentado.

Las partes fundamentales de un colector que es el encargado de captar la energía solar, son las siguientes:

- Cubierta frontal, transparente (Vidrio)
- Superficie absorbente, (de color negro) donde se hace circular el fluido.
- Aislamiento térmico, para evitar pérdidas de calor.
- Carcasa externa, para protección.

Su funcionamiento se basa en el efecto invernadero: la radiación solar- rayos solares -(onda corta) que inciden en el vidrio y lo atraviesa al mismo tiempo que es absorbida por una superficie caliente. Esta superficie emite a su vez, calor –radiación térmica– (onda larga); sin embargo, este tipo de onda no atraviesa el vidrio, por lo que se queda atrapada dentro del colector. La figura 2.10 muestra la composición básica de un captador solar.

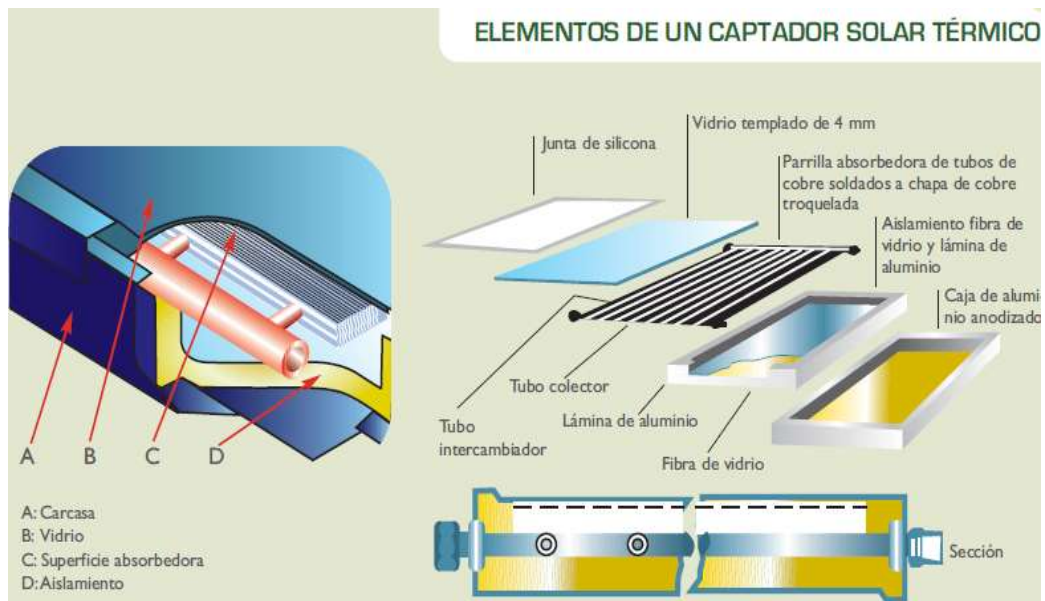


Figura 2. 10 Sistema de colector solar.

2.6.3.2. Clasificación de acuerdo a su aprovechamiento

En la mayoría de los casos, la energía solar térmica se utiliza para líquidos. De acuerdo a las diferentes temperaturas por las que se puede trabajar, se clasifican 3 tipos:

1. De baja temperatura: Son las más conocidas y manejan temperaturas menores a los 90° centígrados. Son usadas en producción de agua caliente sanitaria y en la climatización de piscinas.
2. De media temperatura: Tienen un rango de 80°C a 250°C. Se utilizan en procesos industriales y en la desalinización de agua de mar.
3. De alta temperatura: Supera los 250°C, su uso claro es en la obtención de vapor para producir electricidad.

2.6.4. Energía solar fotovoltaica

2.6.4.1. La Generación y el efecto fotovoltaico

La energía solar fotovoltaica es aquella que se obtiene mediante la transformación de los rayos solares en energía eléctrica. Este proceso es causa del efecto fotoeléctrico, el cual se

origina cuando hay incidencia lumínica sobre material heterogéneo produciendo corriente eléctrica.

2.6.4.2. Panel Solar

Un panel o módulo fotovoltaico, está compuesto por células fotovoltaicas conectadas entre sí y que están en un mismo plano. La energía de radiación incide sobre una estructura de material semiconductor que es absorbida por electrones de las capas más externas de los átomos que componen este material creando un flujo eléctrico interior de una tensión determinada.

Las células fotovoltaicas se pueden conectar en serie, en paralelo o en combinación serie-paralelo, dependiendo de los valores de tensión deseados. El panel produce electricidad en forma continua, los parámetros de tensión e intensidad son variantes por la cantidad de radiación solar que incide sobre las células y por la temperatura ambiente. La corriente y tensión continua también se puede convertir en alterna mediante el uso de inversores. Figura 2.11. Composición general de un panel solar.

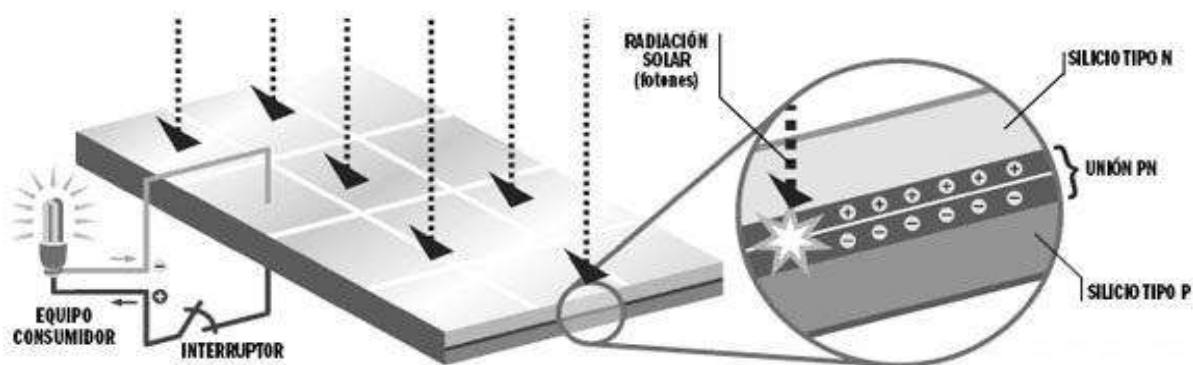


Figura 2. 11 Composición interna de un panel fotovoltaico.

2.6.5. Importancia de la energía solar

El sol es una fuente indirecta de energía ya que la energía que emite es la causante de los vientos, de llevar a cabo el ciclo del agua: la evaporación, condensación y precipitaciones dan origen a la mayoría de energías renovables como la eólica y la biomasa, exceptuando a la energía mareomotriz y geotérmica. Los aprovechamientos energéticos de la energía solar son como fuentes de calor y fuentes de electricidad principalmente.

2.7. Energía Eólica

2.7.1. El viento como energía

La energía eólica es la contenida en el viento en forma de energía cinética. Los vientos son movimientos o corrientes de aire que se originan por el calentamiento diferencial originado en distintos puntos geográficos que reciben cantidades distintas de radiación solar. La energía eólica es energía solar que se almacena en la atmósfera en forma de calor distribuido en un modo heterogéneo.

La dirección del viento se ve afectada por la diferencia de temperatura, la rotación terrestre, y la presión atmosférica. La energía del viento depende de su velocidad y en menor medida, de su densidad la cual disminuye con la altitud. Las velocidades aumentan con la altura, mientras que más cerca del suelo terrestre, la velocidad disminuye. Por tanto, los parámetros fundamentales a la hora de evaluar la energía del viento son la velocidad y la dirección predominante. La velocidad y la dirección del viento varían para una zona determinada durante el año.

2.7.2. Potencial eólico

Una de las formas más utilizadas en la actualidad para el aprovechamiento a gran escala de la energía eólica es a través de los denominados aerogeneradores.

Un aerogenerador también conocido como turbina eólica es un generador eléctrico accionado por una turbina, que a su vez corresponde a la intensidad del viento. Su funcionamiento se basa en que al incidir el viento en sus palas, se produce un trabajo mecánico de rotación en un generador que convierte el trabajo en electricidad.

El potencial eólico es la capacidad que tiene un aerogenerador para absorber la energía del viento y está definido por variables como:

- La distribución Weibull: encuentra la probabilidad que hay a lo largo de un año, en un lugar determinado, de que el aire se mueva a una velocidad u otra (twenergy).
- La densidad de potencia: señala la distribución de la energía eólica a distintas velocidades del aire.
- La curva de potencia: muestra la potencia eléctrica generada para cada velocidad del viento.

2.7.3. Clasificación de los aerogeneradores

Los aerogeneradores se pueden clasificar de acuerdo a su potencial nominal, a la velocidad del rotor, al número de palas, a la disposición del eje de giro. Las más importantes son las siguientes:

a) De acuerdo a su control y regulación

- Control por pérdida aerodinámica (Stall control) o de palas de paso fijo.
- Control por pérdida activa aerodinámica (active stall control).
- Control por variación del ángulo de paso de pala (pitch control).

b) De acuerdo a la velocidad del rotor de la turbina eólica:

- Velocidad constante
- Velocidad variable
- Velocidad semivariable
- Dos velocidades

c) Respecto a su interconexión con la red eléctrica

- Sistemas eólicos aislados. Pueden ser sin o con energía auxiliar (híbridos).
- Sistemas eólicos interconectados con la red eléctrica.

d) De acuerdo a su control y regulación

- Control por pérdida aerodinámica (Stall control) o de palas de paso fijo.
- Control por pérdida activa aerodinámica (active stall control).
- Control por variación del ángulo de paso de pala (pitch control).

e) Por el tipo de generador utilizado

- Generador asíncrono: presenta 2 configuraciones que son generador asíncrono con rotor bobinado doblemente alimentado y generador asíncrono con rotor jaula de ardilla.
- Generador síncrono: se encuentra como generador síncrono multipolo.

f) De acuerdo a su potencia nominal:

- Microturbinas: producción aproximada menor a 3KW. La energía producida es principalmente usada para carga de baterías de almacenamiento. El generador eléctrico es de imanes permanentes y se acciona por la turbina sin que haya un multiplicador de velocidad.
- Pequeños aerogeneradores: producción aproximada: menor a 50KW. Cubren el mismo tipo de demanda que las microturbinas pero con mayor potencia. Usualmente combina energía eólica con algún otro tipo como diésel, solar o la red eléctrica. Después de 10kW debido a la alta potencia, se introducen cajas de engranajes entre el eje del rotor y el del generador eléctrico con el fin de amplificar la velocidad del rotor. El generador eléctrico es síncrono o asíncrono.
- Grandes aerogeneradores: producción aproximada: Cubren el rango de 50-850 KW. Su función principal es la producción de electricidad para ser inyectada a la red eléctrica. Se caracterizan por ser de eje horizontal con rotor tri-pala. El rango de potencias entre 200 y 850kW manejan diámetros entre 25 y 50m. Tienen caja de engranajes para amplificar la velocidad y accionar el generador eléctrico.
- Aerogeneradores multimegavat: rango de producción: 1-3MW. Se caracterizan por tener rango de 50 a 90 metros y una altura entre 60 y 100m.

g) Respecto a su emplazamiento

- Aerogeneradores para emplazamientos terrestres (Onshore).
- Aerogeneradores para emplazamientos marinos (Offshore).

En la figura 2.12. se muestra los 2 tipos de emplazamiento para aerogeneradores.



Figura 2. 12 Clasificación de aerogeneradores por su emplazamiento.

a) Emplazamiento Offshore. b) Emplazamiento Onshore.

h) Por la orientación del rotor

- Eje vertical: el eje que transmite el movimiento de las palas es vertical. Debido a la simetría de sus palas, no necesita orientación lo que permite que se aprovechen los vientos de cualquier orientación.
- Eje horizontal: el eje que transmite el movimiento de las palas se encuentra en posición horizontal. Es la configuración más típica de las máquinas eólicas.

En la figura 2.13. Se observan la clasificación por orientación del rotor.

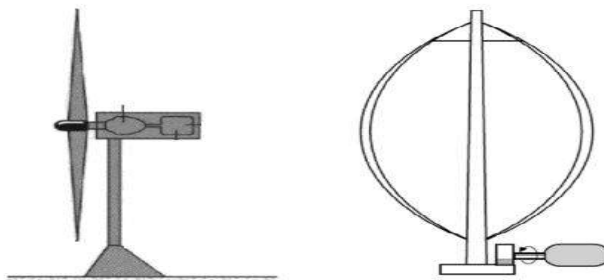


Figura 2. 13 Clasificación de aerogeneradores por la orientación del rotor. (a) Posición horizontal. (b) Posición vertical

i) Por la posición del aerogenerador respecto al viento

- Sotavento: cuando el rotor se encuentra en sentido contrario a la dirección del viento dominante. En este caso, la estructura de la torre y góndola descienden el aprovechamiento del viento por el rotor. Tiene como ventaja que el viento orienta a la góndola por lo que no necesita reorientación automática.
- Barvolento: el rotor se encuentra de frente a la dirección del viento dominante. Su principal ventaja es el mayor aprovechamiento de la fuerza del viento, pero se necesita de reorientación automatizada.

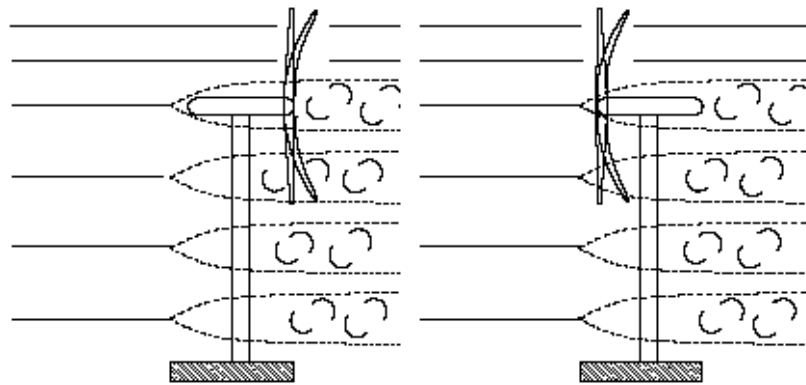


Figura 2. 14 Configuración de posición del aerogenerador respecto al viento. (a) Sotavento horizontal. (b) Barbolento.

2.7.4. Desventajas de la energía eólica

Si bien el beneficio de las energías alternas es sin duda la reducción de emisión de gases de efecto invernadero, también se analiza las desventajas que presenta cuando hay una producción de mayor energía, las cuales son las siguientes:

- a) Impacto visual: principalmente este criterio depende de fundamentos subjetivos de cada persona y de una comunidad en total; pocos aerogeneradores puede resultar agradables a la vista, pero un parque eólico puede provocar un impacto visual desagradable.
- b) Contaminación acústica: un aerogenerador o unos pocos pueden causar un ruido apenas susceptible al oído puesto que se colocan a altas distancias del suelo. Mientras que en los parques eólicos, el ruido es alto y resulta molesto si una población se encuentra muy cercana. Modelos recientes de turbinas prueban que el ruido ha

disminuido hasta un 50% de las primeras turbinas comercializadas, esto demuestra que algún daño por el ruido de los aerogeneradores resulta inválida.

- c) Impacto ambiental: los parques eólicos requieren de estudios ambientales. Principalmente se ubican en zonas donde no se requiere talar, puede afectar a las aves que transitan en esos aires. Sin embargo, se ha demostrado que las aves se acostumbran rápido a los aerogeneradores y usualmente desvían su trayectoria de vuelo con el fin de evitarlos.

Capítulo 3

Modelado de una turbina eólica Skystream 3.7®

3.1. Introducción

Una turbina eólica o un aerogenerador es una máquina capaz de convertir energía cinética del viento en energía eléctrica.

La primera etapa para la obtención de energía eléctrica es la transformación de energía cinética en mecánica; consiste en la captación de la energía cinética del viento que accionan las aspas y a su vez, hacen girar al rotor creando energía mecánica.

A continuación la energía mecánica acciona al rotor, y con ayuda de un multiplicador de velocidad, se aumenta la velocidad del rotor produciendo un flujo de electrones en el generador dando así paso a la transformación a energía eléctrica.

En este capítulo se conocen las partes esenciales que conforman un aerogenerador. Se dan principios teóricos del funcionamiento de los aerogeneradores. Se conocen las especificaciones técnicas de la turbina Skystream para desarrollar sus conceptos de funcionamiento.

Finalmente se desarrolla el modelo matemático para el aerogenerador analizado en forma dinámica y estática.

3.2. Composición de una turbina eólica

Para que un aerogenerador produzca energía eléctrica es necesario el funcionamiento de varias etapas. Estas etapas son componentes electrónicos en su mayoría.

La turbina eólica Skystream 3.7® es un aerogenerador tripala de eje horizontal (HAWT, por sus siglas en inglés). Algunas ventajas que presenta frente a los aerogeneradores de eje vertical son:

1. Los aerogeneradores de eje horizontal tienen un coeficiente de potencia (C_p) mayor para intervalos de valores de velocidad específica.
2. El área de barrido que abarca es mayor, por lo que logran mayor potencia.
3. Las características de par y potencia son más adecuadas para el accionamiento del generador eléctrico.
4. Un rotor tripala produce aproximadamente un 3% más energía que un rotor bipala. Además de tener la principal característica el poseer una velocidad de giro más suave y uniforme debido a su momento de inercia.
5. Presentan menor cantidad de vibraciones.

Las partes que componen un aerogenerador de eje horizontal se muestran en la figura 3.1.

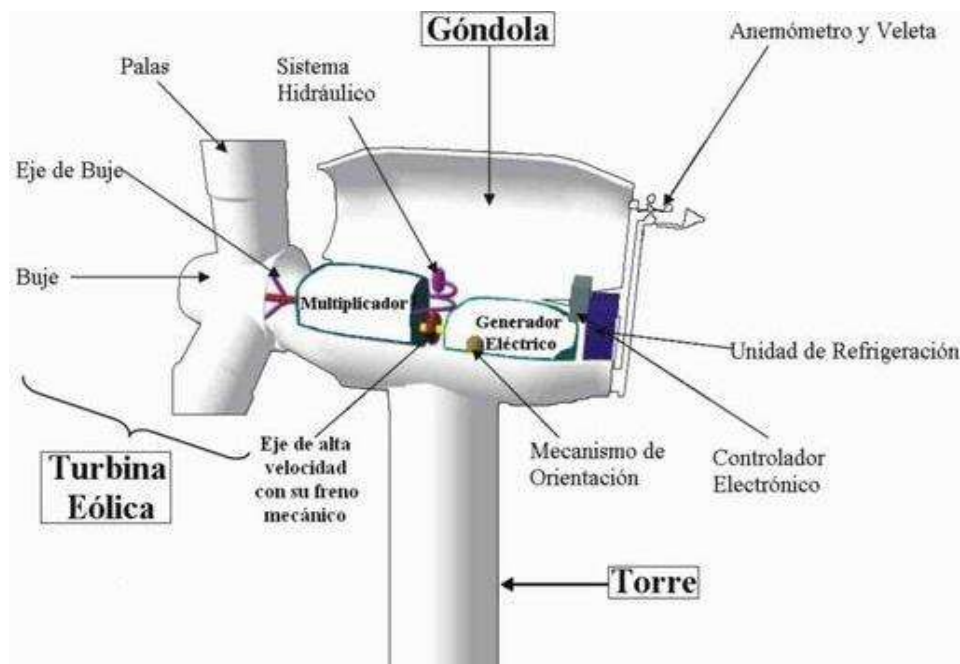


Figura 3. 1 Partes principales de un aerogenerador.

Góndola: es el cubículo donde se ubica el generador eléctrico, la caja multiplicadora de velocidad de rotación y los sistemas de control, regulación, orientación y frenado. Está formada por una estructura metálica, construida con placa y perfiles de acero colocada en el extremo superior de la torre. Cuenta también con una cubierta de protección pararrayos. Se ubica en la parte superior de la torre que le permite tener exteriormente al anemómetro y a la veleta.

Palas del rotor: transmiten la potencia de la fuerza del viento hacia el buje. Su longitud puede ser desde los 2m hasta los 20m para aerogeneradores de mayor potencia.

Buje: es el elemento al cual se unen las aspas. Es a través del buje por el cual la potencia eólica es captada por el rotor y se transmite a la caja multiplicadora de velocidad.

Nariz: es la cubierta metálica con forma cónica que se encuentra de cara al viento y lo desvía hacia el tren del motor. Presenta forma aerodinámica con la finalidad de impedir la formación de turbulencias.

Eje de baja velocidad: conecta al buje del rotor al multiplicador. Su velocidad no supera las 30 rpm.

Multiplicador de velocidad: permite transmitir movimientos giratorios entre 2 ejes, permitiendo modificar características de velocidad y sentido de giro. Principalmente, se encarga de acelerar al eje de mayor velocidad hasta 50 veces más la velocidad en las palas del rotor, permitiendo así, el funcionamiento del generador.

Eje de mayor velocidad: permite el funcionamiento del aerogenerador. Gira aproximadamente a 1500 rpm.

Generador eléctrico: es una máquina eléctrica que mantiene una diferencia de potencial entre 2 terminales, dando paso a la transformación de energía mecánica a energía eléctrica.

Controlador electrónico: es un dispositivo electrónico que se encarga de monitorear las condiciones del aerogenerador y controla el mecanismo de orientación. En caso de que el viento cambie la orientación del giro de las palas, el controlador se encarga de reorientarlas. En caso de alguna disfunción, es el encargado de apagar el aerogenerador y envía la información correspondiente al ordenador encargado de la turbina.

Refrigerador: (Sistema de refrigerador) contiene un ventilador eléctrico que se encarga de evitar sobre calentamientos en el generador. Se ubica bajo la góndola.

Torre: es el soporte vertical sobre el cual está la góndola y el rotor.

Anemómetro: se encarga de medir la velocidad del viento. Las señales electrónicas del anemómetro llegan al controlador electrónico para conectar el aerogenerador cuando el viento alcanza $5 \frac{m}{s}$. Cuando la velocidad del viento excede $25 \frac{m}{s}$, el aerogenerador se apaga para la protección de la turbina.

Veleta: monitoriza la dirección del viento dando orientación a la góndola. Las señales de la veleta son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador en contra del viento, mediante su mecanismo de orientación.

3.3. Fundamentos teóricos de un aerogenerador

Una turbina eólica Skystream 3.7® maneja las mismas nociones generales que todos los aerogeneradores, a continuación se da una breve mención de los principios importantes en el funcionamiento de una turbina eólica.

3.3.1 Principios de Operación

3.3.1.1. Potencial eólico

La potencia contenida en el viento nos brinda un límite para determinar la potencia de un aerogenerador.

Una masa de aire (m) con velocidad (v) posee una energía cinética ($E_k = \frac{1}{2}mv^2$).

Existen tres factores que permiten conocer la potencia que se puede obtener de un aerogenerador:

1. Área por donde pasa el viento es decir, la sección de barrida por el rotor.
2. Densidad del aire
3. Velocidad del viento

$$Potencia = \frac{Trabajo}{tiempo} = \frac{E_k}{t} = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{t} \quad (3.1)$$

Se considera que el aire atraviesa un área de sección transversal A . La cantidad de aire a su vez, forma un cilindro por lo que se considera el volumen de un cilindro, entonces:

$$Vol = A * \rho \quad (3.2)$$

La masa de aire (m) de densidad (ρ) que fluye con velocidad (v) a través de una sección de área (A) que es perpendicular a la dirección del flujo, es:

$$m = \rho * A * v \quad (3.3)$$

Entonces la potencia eólica se obtiene mediante

$$Potencia\ eólica = \frac{1}{2}(\rho A d) \frac{v^2}{t} == \frac{1}{2}(\rho A v^2) \left(\frac{d}{t}\right) = \frac{1}{2}(\rho A v^3) \quad (3.4)$$

Esta potencia se conoce como potencia eólica disponible (P_d) y es proporcional a la densidad del aire, al cubo de su velocidad y al área expuesta perpendicularmente al flujo del viento. La potencia eólica disponible es la máxima potencia que se podría obtener del viento si se pudiera extraer toda la energía cinética que contiene (Miguel, 2012).

Se tiene también la densidad de potencia disponible o potencia disponible por unidad de área ($\frac{P_d}{A}$) y se expresa de la forma:

$$\left(\frac{P_d}{A}\right) = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (3.5)$$

La densidad de potencia depende del cubo de la velocidad. Debido a lo anterior, es la importancia de elevar el rotor de la turbina a una altura mayor sobre el nivel del suelo ya que la velocidad tiende a crecer con la altura, evitando turbulencias. La densidad de potencia depende linealmente de la densidad del aire.

3.3.1.2. Coeficiente de potencia C_p

Al incidir el viento sobre el rotor, su energía cinética en la turbina eólica no es aprovechada en su totalidad ya que una parte del viento conserva una parte de su velocidad. Mientras que la energía que cede el viento al rotor presenta pérdidas en rozamientos aerodinámicos y mecánicos ocasionando que la energía final en el eje del rotor sea siempre menor a la cedida por el viento en los álabes del rotor.

En el eje del rotor se alcanza una potencia (P) es conocida como potencia en el eje del rotor o potencia al freno.

La potencia eólica del viento antes de incidir sobre el rotor es potencia eólica disponible (P_d). Su relación con la potencia en el eje se establece a través de un rendimiento de conversión o coeficiente de potencia (C_p).

El coeficiente de potencia C_p se define como la relación entre la potencia en el eje del rotor y la disponible en el viento y está dada mediante la ecuación 3.6. Es decir, es la cantidad de la energía del viento que una turbina es capaz de convertir a energía mecánica de rotación.

*Potencia de una turbina eólica = C_p * Potencia del viento*

$$C_p = \frac{P}{P_d} = \frac{P}{\frac{1}{2}(\rho A v^3)} \quad (3.6)$$

Donde:

P = potencia en el eje del rotor del generador (w).

A = área barrida por el rotor del generador (m^2)

ρ = densidad del aire en las condiciones de presión y temperatura del viento ($\frac{kg}{m^3}$)

v = velocidad del viento medido a la altura del buje del generador ($\frac{m}{s}$).

C_p es función de la velocidad específica y depende del tipo de rotor, la velocidad de giro y la velocidad del viento (Miguel, 2012).

3.3.1.3. Límite de Betz

El teorema de Betz establece un límite máximo para la potencia que puede extraerse del flujo de un viento de velocidad v . Se considera un área de un tipo cilindro que aparece en la figura 3.2. Donde la velocidad a la que entra el viento al área es v_1 , mientras que la velocidad que sale es v_2 .



Figura 3. 2 Modelo de Betz.

Se hace una ecuación de continuidad: $v_1 A_1 = A v = v_2 A_2$. La cantidad de masa de aire está dado por $m = \rho A v$.

La fuerza F , que el fluido realiza sobre el rotor de la máquina es el producto, se encuentra a partir de la variación de la cantidad de movimiento de la cantidad de masa:

$$F = m(v_1 - v_2) = \rho A v (v_1 - v_2) \quad (3.7)$$

Aplicando el teorema de Bernoulli a la ecuación anterior, el cual implica una relación entre los efectos de la presión, la velocidad y gravedad indicando que la velocidad aumenta cuando la presión disminuye. Suponiendo que se cumple $A_1 \approx A_2 \approx A$.

$$F = A(p_2 - p_1) = \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2) \quad (3.8)$$

La velocidad del viento está dada entonces como $v = 0.5(v_1 + v_2)$. La potencia (P) que el flujo del aire cede al rotor es el producto de la fuerza por la velocidad y combinando las ecuaciones (3.7) y (3.8) se obtiene:

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \quad (3.9)$$

La condición de máxima potencia P_{max} se determina cuando $dP/dt = 0$ y se alcanza cuando $v_2 = \frac{v_1}{3}$. Sustituyendo en la ecuación (3.9) se obtiene la potencia máxima que teóricamente puede extraerse de un flujo de viento de velocidad v_1 y está dada como:

$$P_{max} = \frac{16}{54} \rho A v_1^3 = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho A v_1^3 \right) = \frac{16}{27} P_d = 0.593 P_d \quad (3.10)$$

La ecuación (3.10) expresa el teorema de Betz “la máxima energía que puede extraerse de un flujo de aire con un turbina ideal es igual al 59.3% de la energía cinética del flujo incidente”. Por tanto, el valor máximo del coeficiente de potencia $C_p = 0.593$ (Miguel, 2012).

3.3.1.4. Curva de potencia de un aerogenerador

La potencia de un aerogenerador depende de la velocidad del viento y es inversamente proporcional a la densidad del aire. Entonces, la potencia de un aerogenerador se describe en función del viento y es conocida como curva de potencia.

Para conocer la curva de potencia es necesario que cumpla con los requisitos de la norma IEC 61400, la cual es un estándar internacional que dicta exigencias de seguridad para sistemas de generación de energía por medio de aerogeneradores. Se debe cumplir algunas características específicas para el diseño, mantenimiento, instalación y operación en condiciones ambientales específicas. Principalmente para cumplir esta norma, hay

condiciones de atmósfera estándar ISO, con presión atmosférica de 1013 mbar, densidad del aire de $1225 \frac{kg}{m^3}$ y temperatura de 15°C.

Para obtener la curva de potencia, el aire es medido a la altura del buje de la turbina eólica. Regularmente se muestrea en periodos de 10 minutos a una frecuencia de muestro de 0.5Hz, obteniendo un promedio para obtener un valor medio del valor de la potencia y de la velocidad en ese intervalo de tiempo. La figura 3.3. muestra la curva de potencia de la turbina eólica Skystream 3.7® dada en sus especificaciones técnicas. Así mismo, se distinguen 3 aspectos importantes de la velocidad del viento:



Figura 3. 3 Curva de potencia del aerogenerador Skystream 3.7®.

- Velocidad de arranque VA (cut in speed) : velocidad del viento para la cual el generador comienza a suministrar potencia útil. Es del orden de $4 \frac{m}{s}$.
- Velocidad nominal VN (rated speed): velocidad a la cual se alcanza la potencia nominal del aerogenerador. Está en un rango de $12 \text{ y } 15 \frac{m}{s}$.
- Velocidad de desconexión o parada VD (cuto ut speed): velocidad a la que el rotor se detiene a causa de la acción de sistemas de regulación y control para evitar cuando el viento sobrepasa su velocidad normal. Se encuentra en un rango de $25 \text{ a } 30 \frac{m}{s}$.

También se toma en cuenta la velocidad de supervivencia VS (suvirval speed) correspondiente a la velocidad del viento a la cual la turbina eólica puede dañarse a pesar de estar en paro. Comúnmente se encuentra para velocidades de $70 \frac{m}{s}$.

La curva de potencia inicia con VA y va aumentando hasta alcanzar la potencia nominal de la turbina eólica para la velocidad del viento. Es en este punto donde el sistema de regulación

mantiene a la potencia constante e igual a la nominal dentro del intervalo de velocidades del viento comprendidas entre V_N y V_D .

La curva de potencia del aerogenerador Skystream 3.7® (Fig.3.3) se muestra caracterizada por el tipo de regulación, como es el caso del rotor con control por pérdida aerodinámica de tipo pasivo (stall). Se observa que una vez que alcanza su velocidad nominal, se presenta una caída imprevista hasta que se llega a la velocidad de desconexión.

3.4. Características de la turbina eólica Skystream 3.7®

La turbina eólica Skystream3.7® es un aerogenerador tripala de eje horizontal (HAWT, siglas correspondientes en inglés). Su instalación es de tipo monopolo.

De acuerdo al tipo de emplazamiento que presenta, se clasifica como onshore. Su configuración según la posición de su rotor, es sotavento

Se encuentra ubicado en la Facultad de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Se encuentra instalada a una altura de 12 metros respecto al nivel del piso. Está conectada a la red eléctrica del edificio de la facultad.

La turbina eólica Skystream 3.7® instalada en la facultad antes mencionada, en el campus de la UMSNH aparece en la figura 3.4.



Figura 3. 4 Turbina eólica instalada Skystream 3.7.

Las especificaciones técnicas de la turbina eólica nos muestran las condiciones físicas de la composición del aerogenerador. Los datos que componen dichas especificaciones son material de construcción, requisitos generales de instalación eléctrica, de instalación mecánica, condiciones climáticas. Muestra también las dimensiones físicas, certificaciones y normas.

<i>Modelo</i>	<i>Skystream 3.7</i>
<i>Capacidad</i>	<i>1.8kW nominal 2.4kW pico</i>
<i>Peso</i>	<i>70 kg / 170 lbs.</i>
<i>Diámetro del rotor</i>	<i>3.72 m / 12 ft.</i>
<i>Área de barrido</i>	<i>115.7ft² / 10.87m²</i>
<i>Tipo de rotor</i>	<i>Bajo viento con control de regulación puesto</i>
<i>Dirección de rotación</i>	<i>Posición en sentido contrario al reloj</i>
<i>Material de las aspas</i>	<i>3 aspas de fibra de vidrio</i>
<i>Velocidad de giro</i>	<i>50 – 325 rpm</i>

<i>Velocidad de cierre</i>	<i>370 rpm</i>
<i>Velocidad punta(pico)</i>	<i>$66 - 213 \frac{f}{s}, 9.7 - 63 \frac{m}{s}$</i>
<i>Tipo de alternador</i>	<i>De imán permanente sin escobillas</i>
<i>Tipo de control de desvío</i>	<i>Pasivo</i>
<i>Alimentación a la red</i>	<i>Inversor de potencia eólica southwest</i> <i>120-240VAC, 50-60 Hz</i>
<i>Sistema de freno</i>	<i>Electrónico “Electronic stall regulation w/redundant relay switch control”</i>
<i>Velocidad de cut-in</i>	<i>$8 \text{ mph} / 3.5 \frac{m}{s}$</i>
<i>Velocidad nominal</i>	<i>$20 \text{ mph} / 9 \frac{m}{s}$</i>
<i>Control de usuario</i>	<i>Sistema de interfaz remota sin cables de 2 lados</i>
<i>Velocidad de supervivencia</i>	<i>$140 \text{ mph} / 63 \frac{m}{s}$</i>

3.4.1. Sistemas de funcionamiento

Los sistemas primordiales en los aerogeneradores son: sistema de control y regulación de potencia, de orientación y de frenado.

De acuerdo a los sistemas mencionados, el aerogenerador Skystream 3.7® presenta una configuración de: regulación y control pasiva por pérdida aerodinámica, sistema de orientación de rotor sotavento y sistema de orientación pasiva.

3.4.1.1. Sistema de regulación y control de potencia

El control y la regulación de potencia se encargan de ajustar la velocidad del rotor y en caso necesario, frenarlo para evitar daños cuando el viento supera las velocidades nominales. Los sistemas de regulación y control de potencia más utilizados en las turbinas eólicas son las siguientes:

- Control/ Regulación de potencia por cambio del ángulo de paso (o por ángulo de paso variable) “pitch controlled”.

El sistema activo de paso variable pitch, la pala gira sobre sí misma, alrededor de su eje longitudinal, lo que causa se cambie el ángulo de ataque de viento y por consecuencia varíe la

fuerza aerodinámica que se ejerce sobre esta pala. Por lo que se puede regular la velocidad de giro y potencia del rotor en forma continua.

Para velocidades inferiores a la nominal del aerogenerador, se ajusta el ángulo para extraer del viento la máxima potencia. Valores mayores a la velocidad nominal el ajuste se realiza para mantener constante la potencia captada al viento.

- Control/ Regulación activa por pérdida aerodinámica “active stall controlled”.

Maneja los otros 2 tipos de control pitch controlled y stall controlled. La pala solo gira pocos grados (10°) en zonas de viento de 18 a $25 \frac{m}{s}$. Cuando la velocidad excede a la nominal, el paso de pala disminuye en un rango de 0° hasta -5° ocasionando la entrada en pérdida aerodinámica de la pala. Su mayor ventaja es precisión en el control de la potencia, por lo que la máquina trabaja en condiciones cercanas a su máximo rendimiento.

- Control/ Regulación pasiva por pérdida aerodinámica “stall controlled”.

Sistema donde la pala se encuentra fija unida rígidamente al buje del rotor. La regulación es a través de un perfil de la pala diseñado para aumentar la pérdida aerodinámica a medida que aumenta la velocidad del viento.

A medida que crece la velocidad del viento alrededor de la pala, aumenta la potencia captada por el rotor. Cuando esta velocidad alcanza un cierto valor, el diseño del perfil de la pala provoca turbulencias ocasionando la entrada en pérdida aerodinámica de la pala y en consecuencia, la potencia se limite dejando de aumentar. Si la velocidad del viento alcanza cierto valor, las pérdidas aerodinámicas pueden conducir al frenado o parada del rotor.

3.4.1.2. Sistema de orientación

El plano de rotación del rotor debe permanecer perpendicular a la dirección del viento. De acuerdo a la posición de la torre, el rotor se puede situar de dos formas.

- a) Barbolento: La posición del rotor se encuentra delante de la torre o en aguas arriba de la torre. Reduce el ruido aerodinámico y la cantidad de oscilaciones del par del generador.
- b) Sotavento: La posición del rotor se encuentra detrás de la torre o en aguas debajo de la torre. Tiene como ventaja el no necesitar de un sistema de orientación de la

gónbola, mediante una conicidad adecuada de las palas, por lo que el sistema es auto-orientable.

3.4.1.3. Sistema de frenado

- Protección contra el embalamiento

La protección del aerogenerador ante condiciones climáticas inesperadas como vientos con grandes velocidades es primordial, por lo que se han desarrollado sistemas para poder parar el aerogenerador ante un mal funcionamiento de algunos de sus componentes, como es el caso del desarrollo de sistemas de protección contra el embalamiento. Es decir, para evitar que el rotor se accione a velocidades altas provocando su daño cuando existe una pérdida repentina o brusca de carga.

- Sistema de freno aerodinámico

Los sistemas de frenado más popular en los aerogeneradores es el sistema de frenado aerodinámico el cual consiste en el giro de las palas del rotor 90° respecto a su eje longitudinal.

En el caso de la turbina eólica Skystream, cuenta con un sistema de frenado por control de regulación por pérdida aerodinámica, que implica que se gira la punta de las palas del rotor en 90 grados alrededor del eje longitudinal.

3.4.2. Sistema de generación de electricidad

Un generador eléctrico es una máquina rotativa que se encarga de la transformación de energía mecánica en energía eléctrica manteniendo una diferencia de potencial eléctrica entre dos polos. Esta transformación se logra por la interacción del rotor (parte móvil) y el estator (parte estática), logrando la creación de un flujo magnético.

3.4.2.1. Tipos de generadores eléctricos para turbinas eólicas

Los sistemas de generación eléctrica más utilizados por los aerogeneradores son

- Generador eléctrico síncrono accionado directamente por una turbina eólica con velocidad variable.
- Generador eléctrico de inducción con rotor devanado doblemente alimentado, que es accionado a través de una turbina eólica con velocidad variable.
- Generador eléctrico asíncrono o de inducción, con rotor jaula de ardilla accionado a través de una caja multiplicadora por una turbina eólica a velocidad constante.

La turbina eólica Skystream 3.7® cuenta con un sistema de generación con un alternador síncrono de imanes permanentes sin escobillas. En la figura 3.5. Se observa la posición del alternador dentro del aerogenerador.

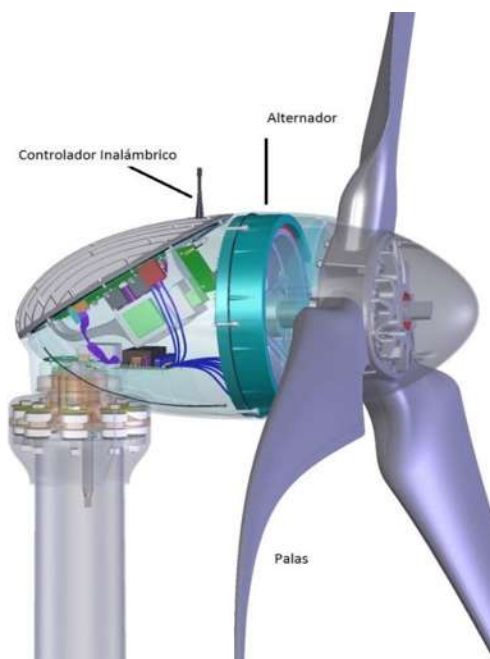


Figura 3. 5 Vista general de las posiciones de elementos de la turbina eólica Skystream 3.7®.

3.4.2.3 Generador eléctrico de imanes permanentes sin escobillas

El aerogenerador Skystream funciona con un generador eléctrico de imanes permanentes sin escobillas.

Un alternador de imanes permanentes es un generador síncrono en el que se ha sustituido el bobinado de excitación, normalmente en el rotor, por un sistema formado por imanes permanentes que se encargan de suministrar un campo de excitación constante. Debido a lo

anterior, etapas como la de regulación y el control de potencia reactiva no pueden realizarse a través de la excitación durante caídas de tensión.

En un generador síncrono se aplica una corriente DC al devanado del rotor, la que produce un campo magnético. Entonces el rotor del generador gira mediante un motor primario y produce un campo magnético rotacional dentro de la máquina. Este campo magnético rotacional induce un grupo trifásico de voltajes en los devanados del estator del generador.

Los devanados de campo son los que producen el campo magnético principal en la máquina. Los devanados de armadura son donde se induce el voltaje principal. En las máquinas síncronas, los devanados de campo están sobre el rotor. El rotor de un generador síncrono es un electroimán. Puede ser construido con polos salientes o polos no salientes.

Se debe suministrar una corriente CD al circuito del campo del rotor. Debido a que el rotor gira, se requiere un arreglo extra para entregar potencia CD a sus devanados de campo. En el caso del generador sin escobillas, la potencia es suministrada desde una fuente CD especial que usualmente, está montada directamente en el eje del generador síncrono.

En los generadores síncronos sin escobillas es necesario un excitador (o excitatrices) sin escobillas para suministrar la corriente de campo de la máquina. Un excitador sin escobillas es un generador CA pequeño cuyo circuito de campo está montado sobre el estator y su circuito de armadura está montado sobre el eje del rotor. La salida trifásica del generador excitador es rectificada a corriente directa por un circuito rectificador trifásico montado también en el eje del generador y se incluye en el circuito principal de campo CD. Por lo que es posible controlar y ajustar la corriente CD de campo de la máquina principal.

La excitación en un generador síncrono de imanes permanentes sin escobillas es independiente de algún suministro externo de potencia ya que se incluye un pequeño excitador piloto en el sistema. El excitador piloto es un generador CA pequeño de imanes permanentes montados en el eje del rotor y un devanado trifásico, montado sobre el estator. Este generador produce la potencia para el circuito de campo del excitador que, a su vez, controla el circuito de campo de la máquina principal.

3.5 Modelado matemático del aerogenerador Skystream

3.5.1. Modelado de la turbina eólica

La potencia disponible en la pala del aerogenerador depende solamente de la velocidad del viento y del área barrida por las palas de la turbina eólica

$$P_S = 0.5PC_p(\lambda, \beta)\rho AV^3 \quad (3.11)$$

ρ = DENSIDAD DEL AIRE

A = área de barrido

V = velocidad del viento

C_p = coeficiente de potencia o eficiencia aerodinámica

λ = razón de velocidad de punta

β = ángulo de desfase de la aspa

$$C_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_1} - c_3\beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_1}} + C_6\lambda \quad (3.12)$$

La ecuación (3.12) describe el modelo para el coeficiente de potencia para la turbina eólica Skystream 3.7® basada en las características de condiciones de viento nominales. Se dan algunos valores para los elementos que conforman la ecuación (3.12).

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda_1 + 0.008} - \frac{0.035}{\beta^2 + 1}$$

$$C_1 = 0.5176; C_2 = 116; C_3 = 0.4; C_4 = 5; C_5 = 21; C_6 = 0.0068.$$

3.5.2. Modelado del generador de imanes permanentes

El generador o alternador síncrono de imanes permanentes (GSIP) sin escobillas se ha popularizado en los sistemas de generación de energía en aerogeneradores debido a su bajo costo, sus dispositivos de control de electrónica de potencia así como mejoras en la calidad y ventajas que presentan frente a otros tipos de generadores.

El circuito equivalente para un generador síncrono de imanes permanentes sin escobillas monofásico, se presenta en la figura 3.6.

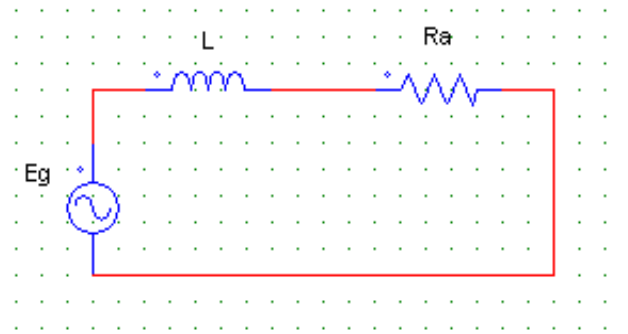


Figura 3. 6 Circuito equivalente de un generador síncrono de imanes permanentes (GSIP) monofásico.

La magnitud de la fuerza rms electromotriz (fem) E está dada por la expresión 3.13

$$E = K_1 \omega \phi \quad (3.13)$$

Donde ϕ =constante del generador de imanes permanentes.

$$E = K_1 \omega$$

La potencia por fase puede entonces expresarse como en la expresión 3.14:

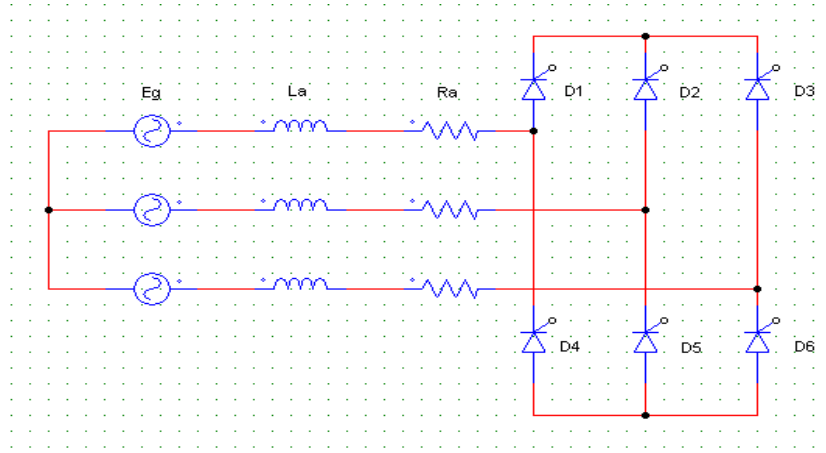
$$P = \frac{k^2 \omega^2}{(R + R_L)^2 + X^2} R_L = \frac{k^2 \omega^2}{R_L} \quad (3.14)$$

Donde k es la constante de la máquina y ω es la velocidad rotacional en rad/s.

3.5.3. Puente rectificador trifásico

Un rectificador trifásico es una configuración de semiconductores que permiten transformar corriente alterna trifásica en corriente continua. En este trabajo se utilizó un rectificador trifásico no controlado es decir, un puente de diodos y un capacitor. El valor de corriente directa es constante y unidireccional.

En la figura 3.7 se ilustra el modelo básico para un rectificador trifásico de puente completo.



La salida de voltaje V_{dc} se calcula como el promedio de la forma de onda del voltaje de salida sobre un subperiodo de $\pi/6$ a $\pi/2$.

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/6}^{\pi/2} V_{dc} d\theta = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_g \quad (3.15)$$

La corriente DC puede ser expresada como:

$$I_g = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\pi/3}^{\pi} I_{dc}^2 d\theta} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{dc1} \quad (3.16)$$

La ecuación anterior entonces se puede reescribir como

$$\frac{I_g}{I_{dc1}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (3.17)$$

Descartando las pérdidas, la potencia de entrada en corriente alterna

$$\begin{aligned} 3I_g V_g &= I_{dc1} V_{dc} \\ I_{dc1} &= \frac{3I_g V_g}{V_{dc}} = \frac{\pi I_g}{\sqrt{2}} \end{aligned} \quad (3.18)$$

3.5.4. Modelado de convertidor elevador de corriente directa a corriente directa (cd-cd)

Un convertidor elevador cd-cd es un arreglo de dispositivos de electrónica de potencia que permiten a partir de una fuente de cd de entrada, mantener un voltaje mayor al de la entrada en la salida. Su topología contempla cuatro elementos básicos: inductor, diodo un interruptor controlado y un capacitor como se ilustra en la figura 3.8.

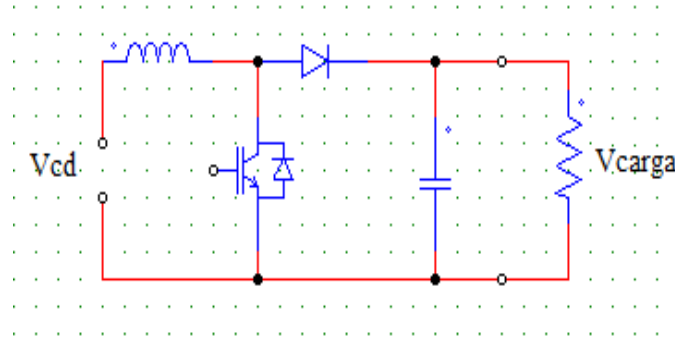


Figura 3. 8 Esquema básico de un convertidor elevador

En un convertidor elevador de corriente directa a corriente directa, las características del capacitor y del inductor como elementos almacenadores de energía permiten elevar la corriente proveniente de una fuente de alimentación y usarla como suministro al capacitor, originando niveles de voltaje mayores en la carga que en la fuente. Para la conmutación se seleccionó un transistor IGBT como interruptor (dispositivo que conmuta) y un diodo con tiempo de recuperación menor a la señal de control el cual tiene como función evitar que la corriente de descarga del capacitor se devuelva.

Cuando el IGBT está en conducción, la inductancia almacena energía que va a la carga y al capacitor sube a otro nivel de voltaje en los intervalos en los que el transistor esté en corte. Cuando el transistor está en saturación el diodo queda en polarización inversa y por consiguiente no conduce comportándose como un interruptor abierto. Dependiendo del voltaje deseado se propone un ciclo de trabajo y entonces el voltaje de salida para un rectificador se puede expresar como a continuación:

$$V_{salida} = \frac{V_{entrada}}{(1 - D)(1 + \frac{R_L}{(1 - D^2)R})} \quad (3.19)$$

Entonces podemos despreciar pérdidas y podemos obtener:

$$V_{entrada}I_{entrada} = V_{salida}I_{salida}$$

$$I_{salida} = (1 - D)(1 + \frac{R}{(1 - D)^2})I_{entrada} \quad (3.20)$$

Donde D es el ciclo de trabajo, R es la resistencia y R_L es la resistencia de la carga.

3.5.5. Modelado de inversor trifásico

Un inversor es un convertidor de corriente directa a corriente alterna, este tipo de configuración son comúnmente utilizadas para generar una señal de voltaje alterno ó corriente alterna con amplitud y frecuencia variable. Existen inversores monofásicos y trifásicos.

En un inversor trifásico una fuente de voltaje directo se conecta a un arreglo de 6 dispositivos de conmutación, típicamente MOSFET ó IGBT con el propósito de generar potencia de salida alterna misma que es demandada por la carga. Los inversores se clasifican por el tipo de entrada en: CSI (inversor por fuente de corriente y VSI (inversor por fuente de tensión) siendo éste último el propuesto para la simulación.

La configuración típica de un inversor se presenta en la figura 3.9 con 6 transistores IGBT's, y una carga RL en cada rama.

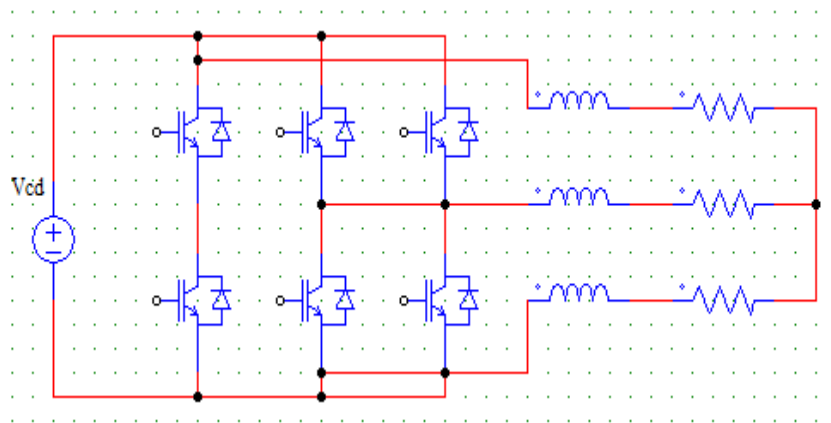


Figura 3. 9 Topología de un inversor trifásico de puente completo VSI de dos niveles.

Algunas técnicas de modulación para inversores en puente completo son la modulación por onda cuadrada, por onda cuasi-cuadrada y por ancho de pulso (PWM). A todo tipo de inversor se puede aplicar un PWM a la entrada de los dispositivos de conmutación: el PWM tiene la finalidad de variar la tensión de salida y controlar la generación de armónicos.

El funcionamiento esencial de la modulación por ancho de pulsos es comparar un valor de tensión de baja frecuencia con una señal triangular simétrica de alta frecuencia la cual determinará la frecuencia de conmutación. La frecuencia de onda triangular se denomina portadora y su valor es al menos 20 veces superior a la frecuencia máxima de la onda de referencia: la señal resultante de la comparación determina los tiempos de conducción y corte de los transistores. La figura 3.10 ilustra la generación de una señal PWM.

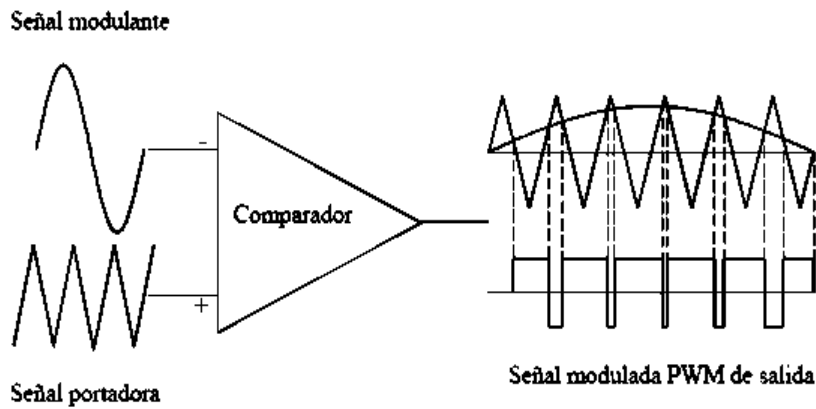


Figura 3. 10 Generación de una señal PWM.

La figura anterior muestra la modulación de una onda senoidal produciendo en la salida un valor de tensión con dos niveles cuya frecuencia es la onda triangular. Se muestra la ecuación 3.21 que define a la razón de la portadora o razón de modulación que es la relación entre la frecuencia de la onda portadora y la frecuencia fundamental.

$$n = \frac{frecuencia_{portadora}}{frecuencia_{referencia}} \quad (3.21)$$

La ecuación anterior es de gran importancia ya que entre mayor es su valor, se obtienen más pulsos por periodo de la onda fundamental lo cual es útil para disminuir el contenido armónico.

Capítulo 4

Simulación de la turbina eólica Skystream

4.1. Introducción

Una simulación ayuda a entender el comportamiento de un modelo abstracto de un sistema.

En el presente trabajo se simuló en la plataforma Simulink, entorno de programación visual que se encuentra dentro de MATLAB. Simulink proporciona las herramientas para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Trabaja con sistemas lineales y no lineales: modelando en tiempo continuo, tiempo discreto o en ambos.

La simulación de la turbina eólica ayuda a comparar los datos entregados por el software para un estudio más detallado de la producción de energía que logra la turbina.

4.2. Software de la turbina eólica Skystream 3.7.

4.2.1. Entorno gráfico

La turbina presenta cuatro estados de trabajo que son: de Generación, Listo, En espera y Falla. Dependiendo de su estado aparece dentro de la interfaz, un indicador verde o rojo según se encuentre el estado de su funcionamiento.

La plataforma muestra de igual manera el estado de la comunicación, que comprende los modos siguientes: USB, Interface, Skystream, Inverter, Data y Signal Strength (medido en dBm). De igual forma, dependiendo de su estado aparece un indicador en verde o rojo según sea el caso.

La plataforma cuenta con 5 secciones de interés, las cuales se da una breve descripción a continuación:

4.2.1.1 Sección Vista General (Overview)

La primera sección de información que ofrece el software correspondiente aparece en la figura 4.1, donde se encuentra información de la producción de la energía que se queda almacenada dentro del mismo software.

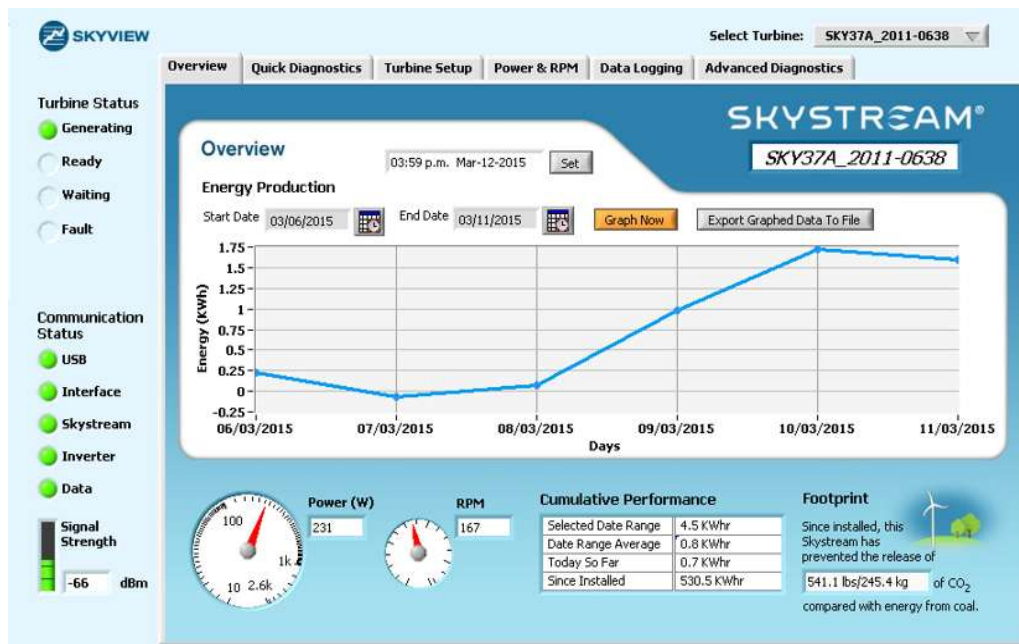


Figura 4. 1 Sección Overview del software Skystream.

La vista general (overview) es de gran utilidad ya que permite conocer la producción de energía, así como también permite graficar en cierto rango de tiempo que el usuario desee conocer. También indica la cantidad de revoluciones por minuto (RPM) que la turbina entrega en ese momento.

Siendo la sección principal del software, entonces ofrece los datos almacenados de producción de energía en el rango deseado, un promedio de producción durante el día actual (o al momento), la producción máxima en ese mismo día así como la producción total desde que la turbina fue instalada.

Uno de los datos más representativos del uso de la turbina eólica como medio alterno de la producción de energía, es la cantidad total de CO_2 que impide se libere a la capa de ozono, comparada con la cantidad de CO_2 expedida del uso de combustibles fósiles.

4.2.1.2. Sección Diagnóstico Rápido (Quick Diagnostics)

En la figura 4.2, se observa la sección correspondiente a Diagnóstico rápido (Quick Diagnostics) donde se encuentra la última información registrada como: la potencia de salida en el inversor y las revoluciones por minuto del generador.

Esta sección también entrega datos actuales como la temperatura dentro de la turbina, el modo del anemómetro, la versión del software, un timer y último evento.

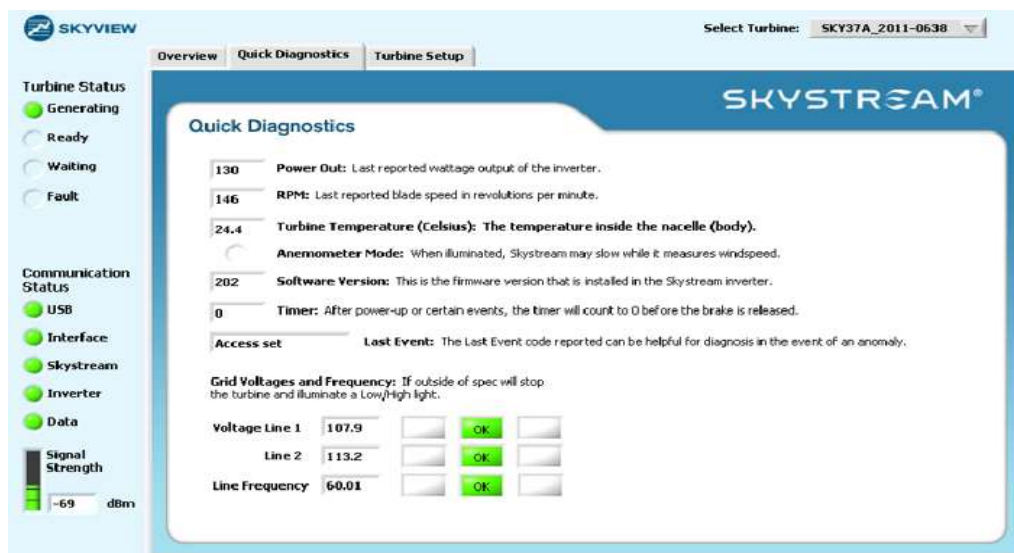


Figura 4. 2 Sección de diagnóstico rápido.

En la parte inferior de la sección, se encuentra los valores de voltajes de línea 1 y 2 actuales, así como la frecuencia de línea y de acuerdo a su estado, aparece un texto de “ok” en color verde o en tal caso, advertencia en color rojo. Como aparecen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Valores Típicos de voltajes de línea y frecuencia.

Voltaje de Línea 1	106.9 V
Voltaje de Línea 2	113.1 V
Frecuencia de Línea	60.01 Hz

4.2.1.3. Sección de Configuración de la Turbina (Turbine Setup)

La configuración de la turbina aparece en la sección “Turbine Setup” (figura 4.3).

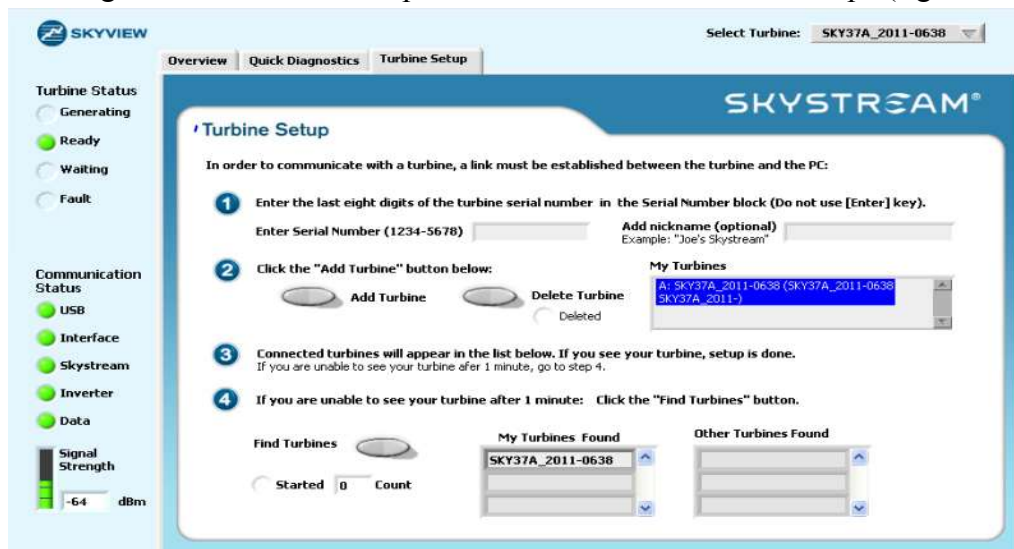


Figura 4. 3 Sección Turbine Setup.

Los pasos para la configuración de la turbina:

1. Se ingresa un número serial dentro del bloque Serial Number.
2. A continuación, se agregó la turbina Skystream 3.7.
3. Si la turbina se agregó correctamente, un indicador aparecerá dentro del recuadro “My Turbines”
4. En caso contrario, seleccionar “Find Turbines” para encontrar una serie que aparece dentro del bloque “My Turbines Found”.

4.2.1.4. Power & RPM

Dependiendo del estado de la turbina, se aprecian principalmente dos estados en tiempo real de la producción de energía y el número de revoluciones por minuto del generador. La figura 4.4 muestra la caracterización de la turbina cuando se encuentra en estado “Listo”. El estado listo indica que no se ha llegado a una velocidad constante para la cual la turbina comience a generar energía, mientras que la figura 4.5 caracteriza la turbina cuando se encuentra generado, graficando la potencia y las revoluciones por minuto en el tiempo.

Sección Power (potencia): gráfica la potencia instantánea presente en la turbina eólica mientras está generando.

Sección de RPM: muestra las revoluciones por minuto a las que gira el generador.

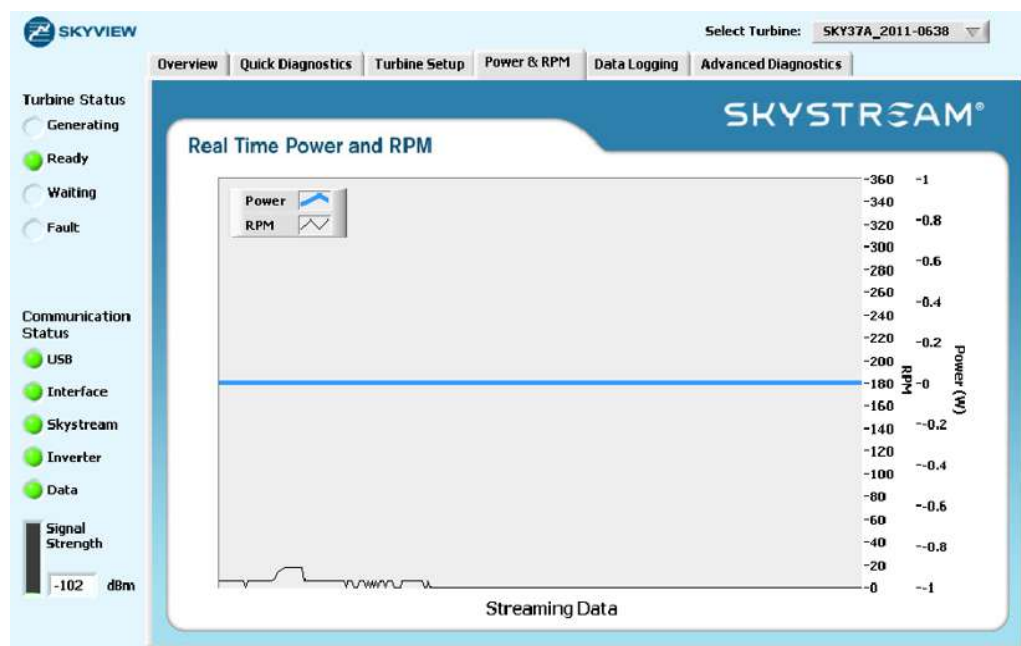


Figura 4. 4 Comportamiento del aerogenerador en estado “Listo”.

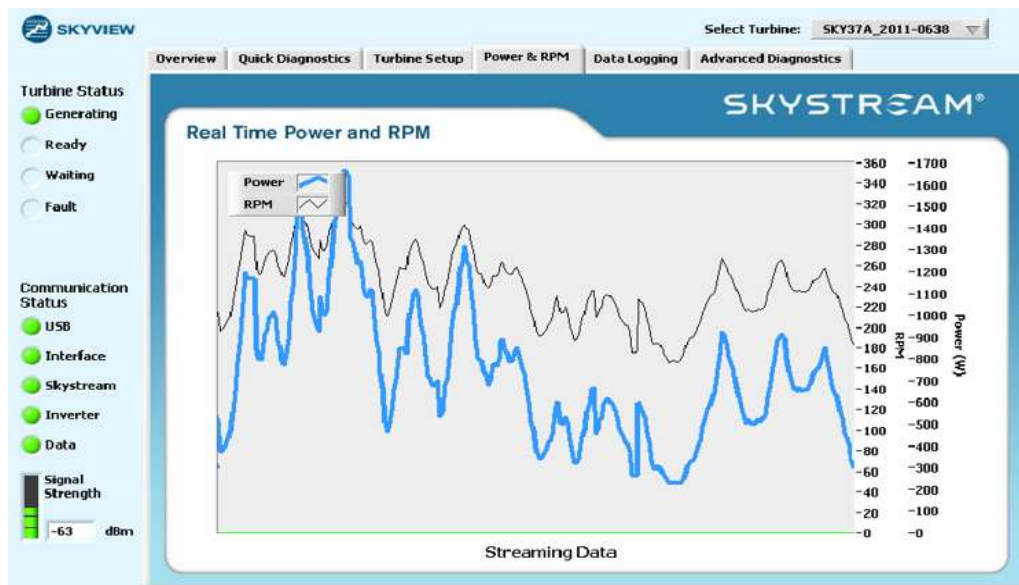


Figura 4. 5 Comportamiento del aerogenerador en estado “Generando”.

Las gráficas obtenidas en tiempo real muestran que la entrada al generador de la turbina eólica es un comportamiento no lineal. La potencia y las revoluciones por minuto dependen de un proceso inestable de la velocidad el viento.

4.2.1.5. Sección de Diagnóstico Avanzado (Advanced Diagnostics)

Esta sección se caracteriza por brindar información más detallada de la generación de energía. La vista general aparece en la figura 4.7. La cual muestra datos detallados del estado del sistema; ofrece voltajes, corrientes y potencia en tiempo real siempre y cuando, la turbina se encuentre generando.

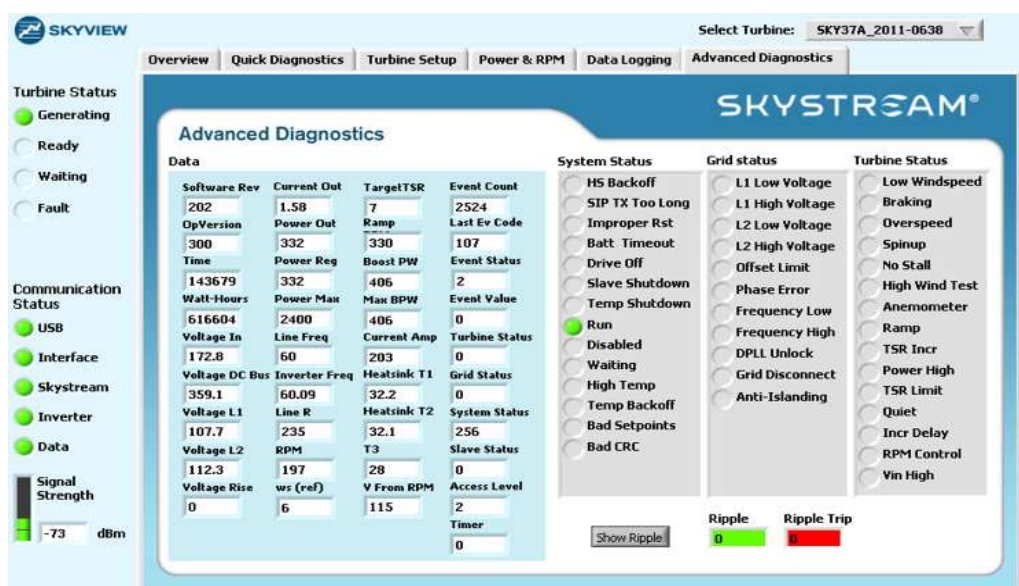


Figura 4. 6 Sección de diagnóstico avanzado.

4.3. Modelo propuesto en Simulink

Se propone un sistema de generación con un generador de imanes permanentes, un puente rectificador, un convertidor elevador y un inversor por el cual veremos el voltaje trifásico a la salida del mismo. Un diagrama general de este trabajo se muestra en la figura 4.7

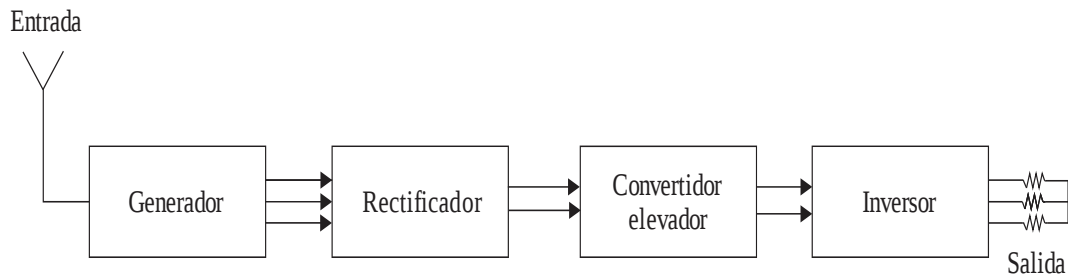


Figura 4. 7 Diagrama general del sistema de generación.

Con el sistema propuesto en Simulink se realizaron dos pruebas: la primera consiste en colocar una entrada tipo escalón para ver su voltaje generado mientras que la segunda es observar nuevamente el voltaje generado ocasionado pero ante una entrada tipo rampa.

Los parámetros de la máquina síncrona de imanes permanente, misma operada como generador para esta simulación se muestran en la siguiente tabla 4.2.

Tabla 4.2 Parámetros de la máquina síncrona de imanes permanentes.

Parámetros	Valor
Número de polos	5
Resistencia de armadura	0.423 Ω
Inductancia de armadura	8.35mH
Enlace de flujo magnético	0.412 Wb
Coeficiente de amortiguamiento	0.001211 N.m/s
Inercia del rotor	0.01179 Kg.m ²

4.3.1. Sistema de Generación con entrada tipo escalón

4.3.1.1. Entrada al generador

Se realiza una primera prueba con entrada escalón para el generador, la figura 4.8 muestra la entrada del par al generador. Simulink indica que la entrada a la máquina síncrona de imanes permanentes debe tener su entrada de par negativa para poder operar como generador, de otro modo opera como máquina.

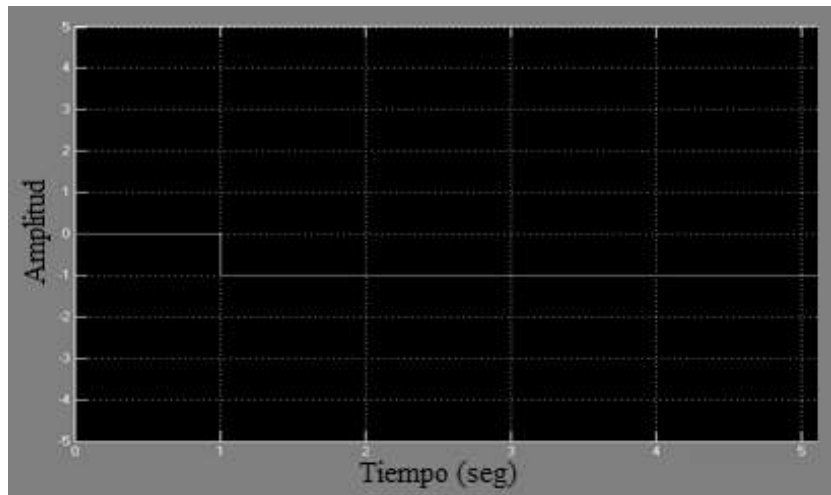


Figura 4. 8 Entrada tipo escalón.

El sistema ante una entrada tipo escalón se ilustra en la siguiente figura

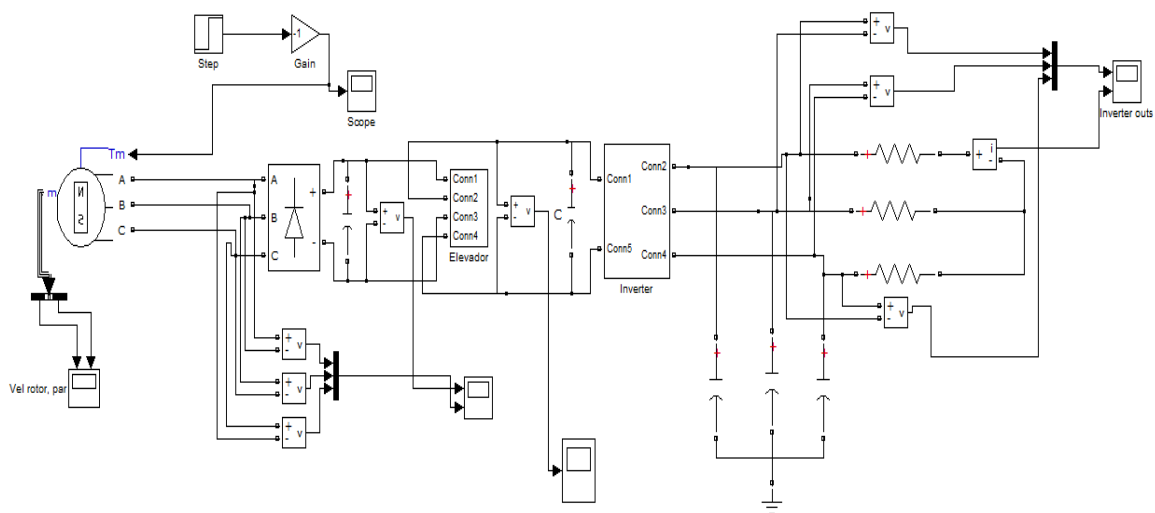


Figura 4. 9 Sistema con entrada tipo rampa.

4.3.1.2 Voltaje a la salida del generador

Con un tiempo de simulación de 10 segundos se observa que el voltaje se estabiliza a partir de 8 segundos con un voltaje generado de 48 v en corriente alterna como se observa a continuación en la figura 4.9.

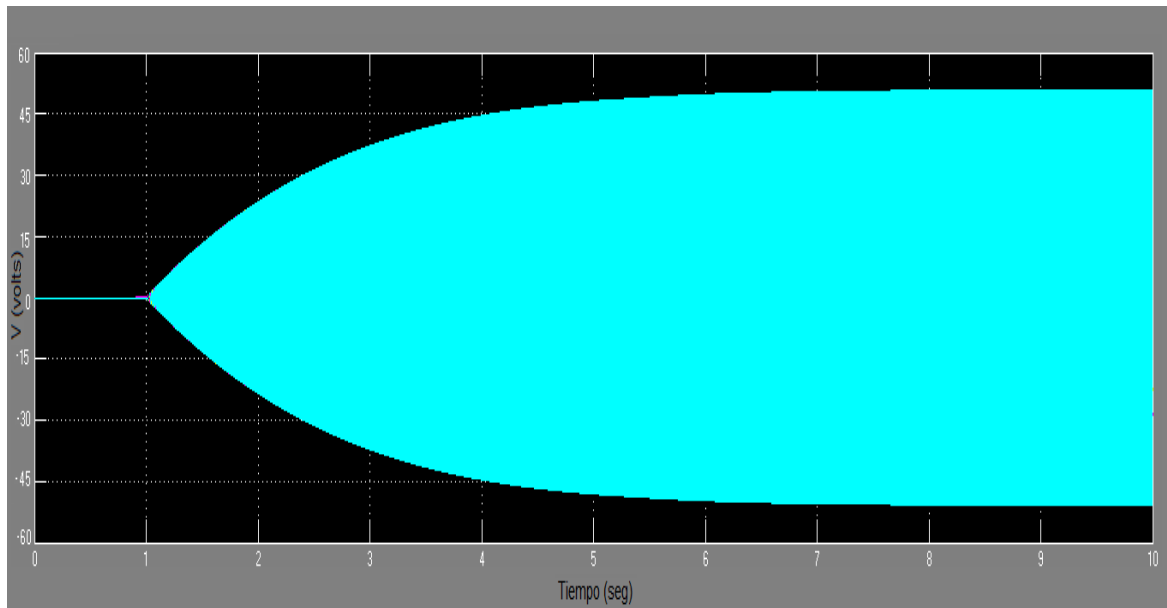


Figura 4. 10 Voltaje generado.

En la siguiente etapa, el valor de voltaje en corriente alterna anterior pasa por un puente rectificador lo que produce su valor de tensión en corriente directa correspondiente y que se muestra en la figura 4.11.

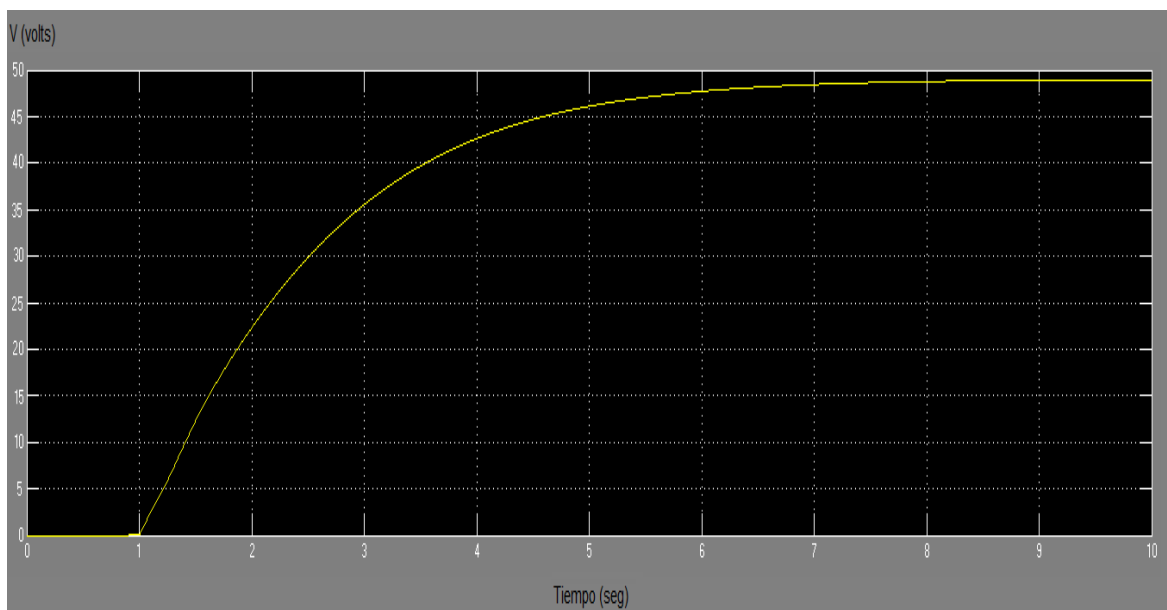


Figura 4. 11 Voltaje rectificado.

Las figuras anteriores muestran una rectificación satisfactoria para el voltaje generado.

4.3.1.3 Etapa del convertidor elevador cd-cd

El convertidor elevador diseñado para el sistema simulado aparece en la figura 4.11. El cual consiste en el arreglo de un inductor, un transistor IGBT, un diodo de recuperación rápida y el capacitor donde se carga voltaje.

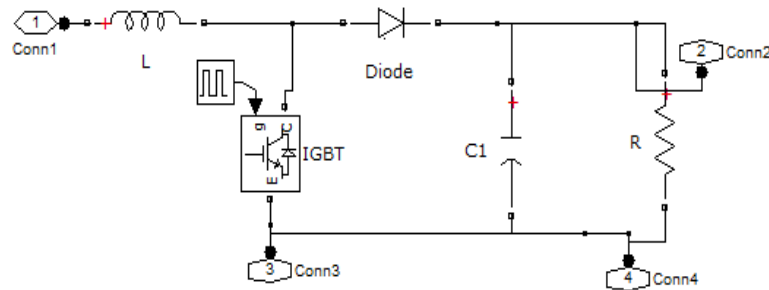


Figura 4. 12 Convertidor elevador de cd a cd.

Del modelo propuesto se obtiene la siguiente figura 4.12, que muestra la salida del convertidor se estabiliza a partir de 8 segundos para un voltaje de 120 vcd.

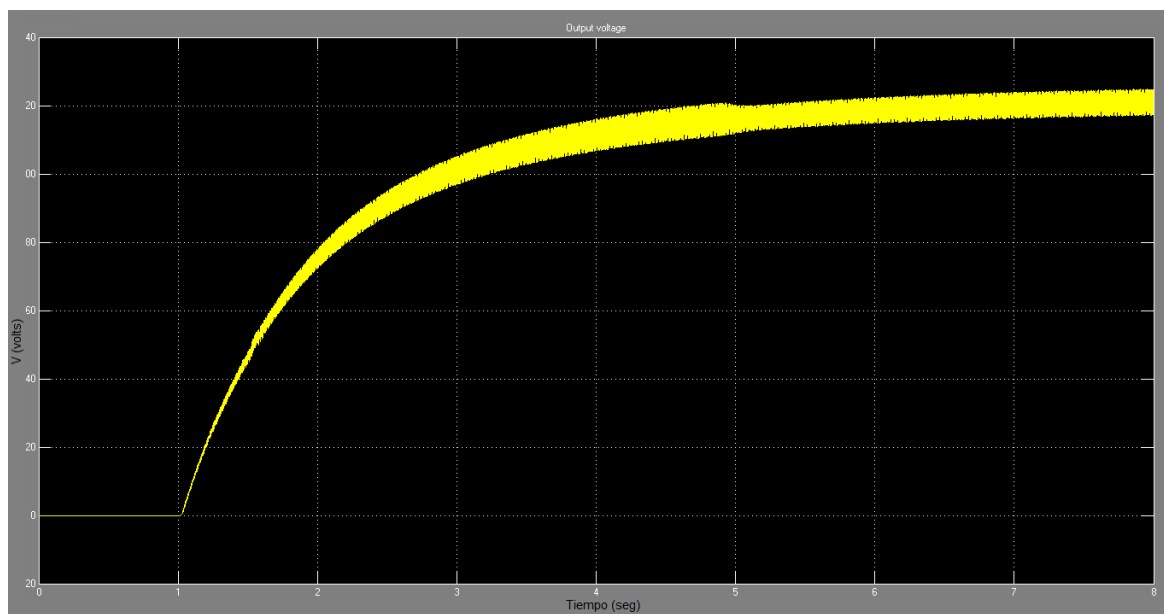


Figura 4. 13 Salida del convertidor elevador.

4.3.1.4 Etapa del inversor trifásico

El inversor trifásico propuesto utiliza un PWM el cual compara una única señal triangular con señales sinodales cuales tienen un desplazamiento de 120° entre ellas, para obtener una salida trifásica a la salida y que se ilustra en la figura 4.14.

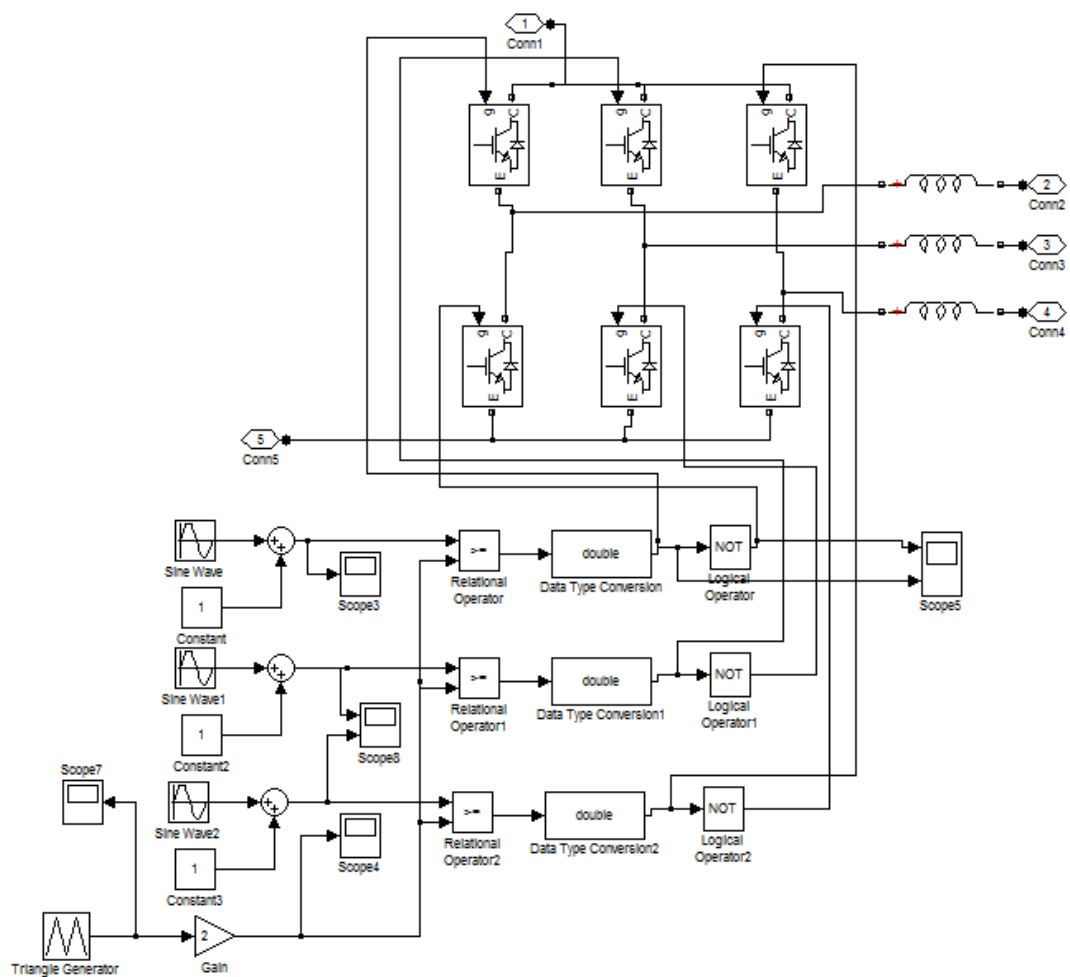


Figura 4. 14 Inversor trifásico.

Para observar el funcionamiento del inversor propuesto, se muestra la figura 4.15. La gráfica muestra la comparación entre la onda senoidal y una onda triangular produciendo la señal PWM.

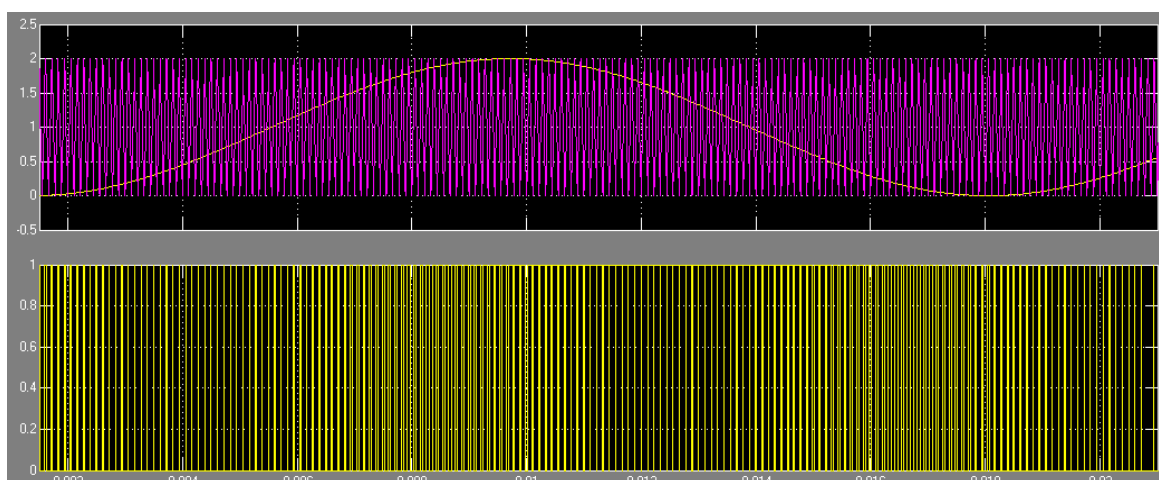


Figura 4. 15 Gráfica de generación de una señal PWM en Simulink.

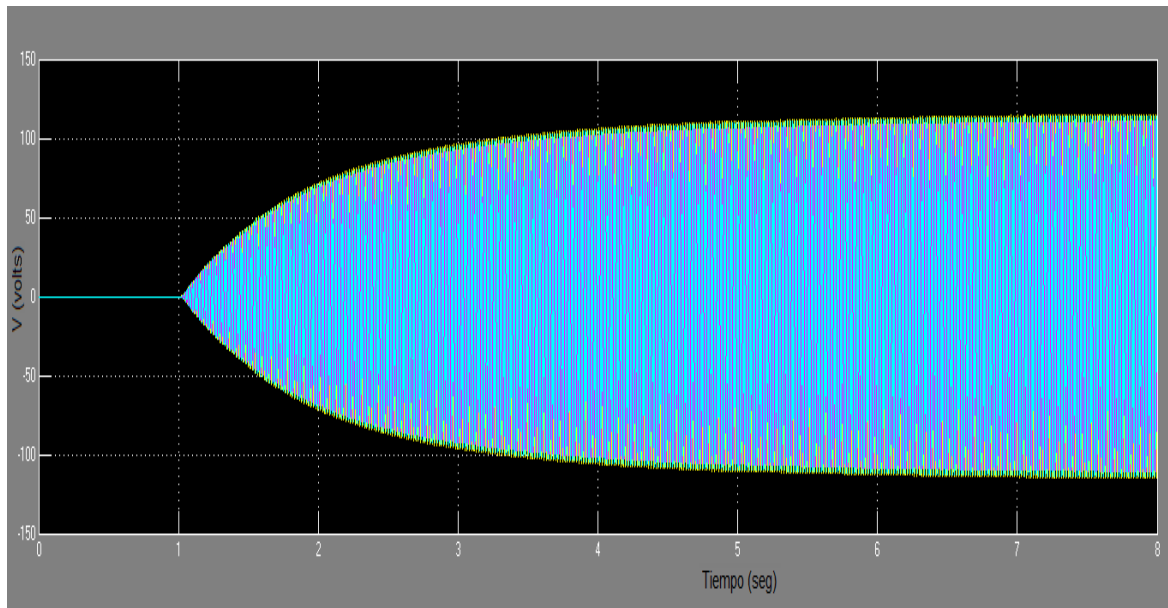


Figura 4. 16 Salida del inversor trifásico.

Realizado un acercamiento a la salida del inversor, observamos voltaje trifásico con desplazamiento de 120° entre cada línea y que se aprecia en el figura 4.17.

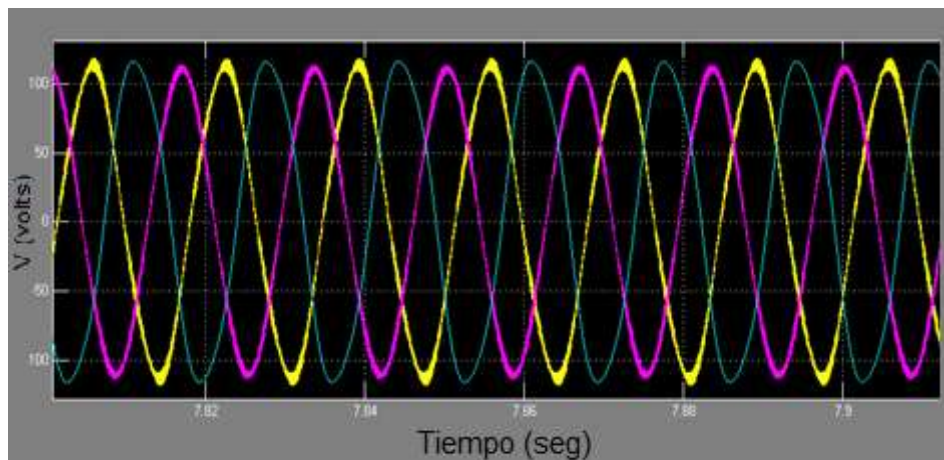


Figura 4. 17 Detalle del voltaje trifásico en el inversor.

4.3.2. Sistema de Generación con entrada tipo rampa

Es importante tener otro tipo de entrada para el modelo propuesto. Ahora se coloca una entrada tipo rampa, el sistema a simular es la figura 4.18.

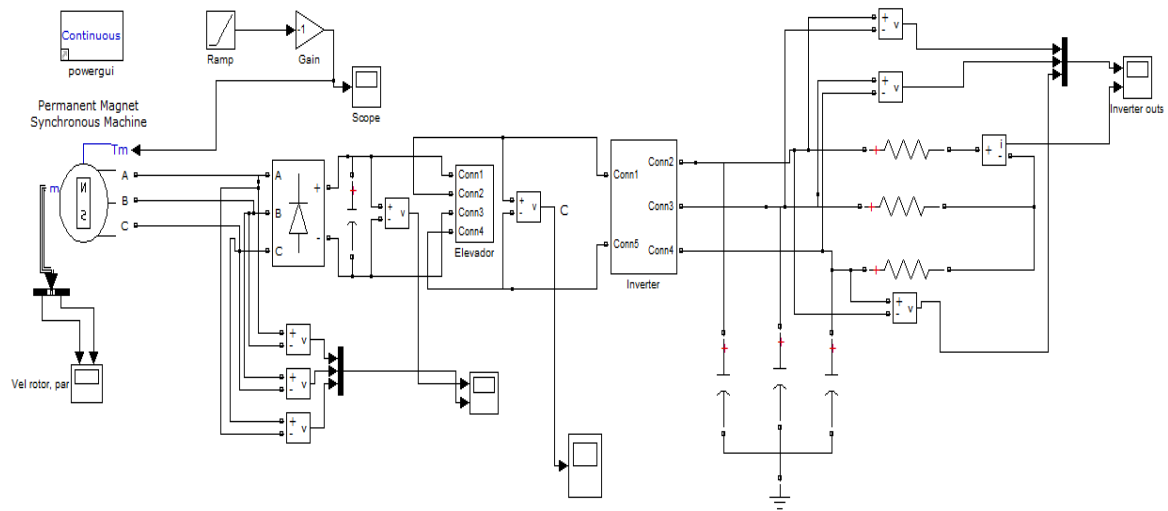


Figura 4. 18 Sistema con entrada tipo rampa.

4.3.2.1 Entrada al generador

En una segunda parte se modificó la entrada tipo escalón a una tipo rampa. En la figura 4.18 se grafica la entrada.

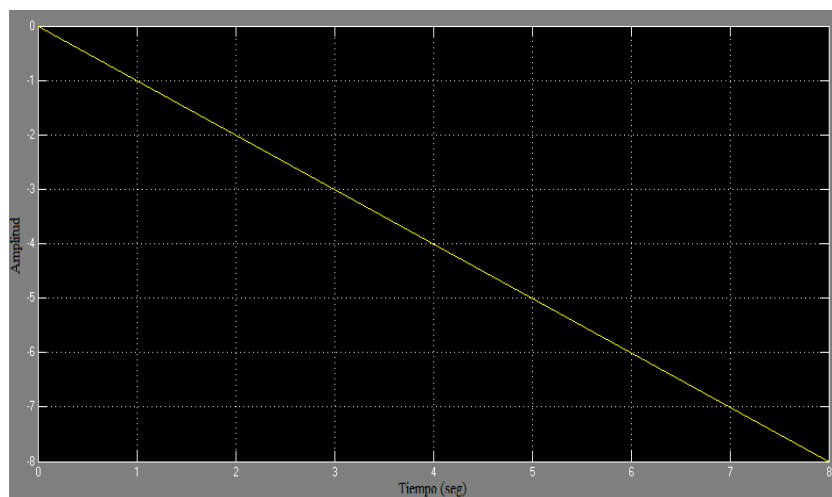


Figura 4. 19 Entrada tipo rampa.

4.3.2.2 Voltaje generado a partir de la entrada

A partir de una entrada tipo rampa el voltaje generado del sistema se ilustra en la figura 4.20.

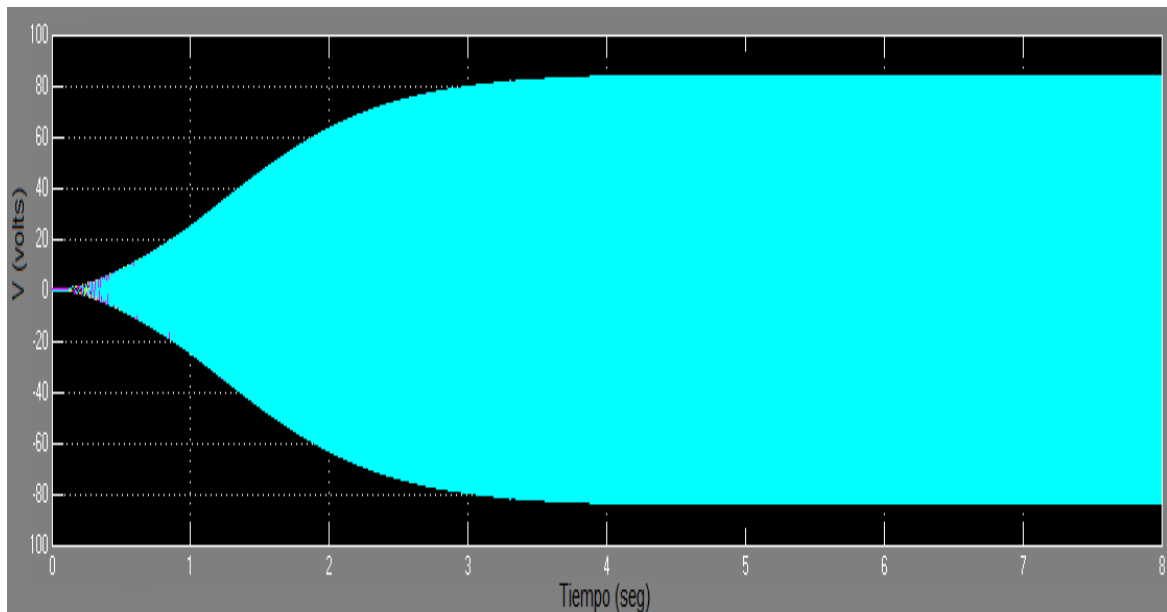


Figura 4. 20 Voltaje generado.

El valor de voltaje rectificado correspondiente ante una entrada tipo rampa se muestra en la figura 4.20.

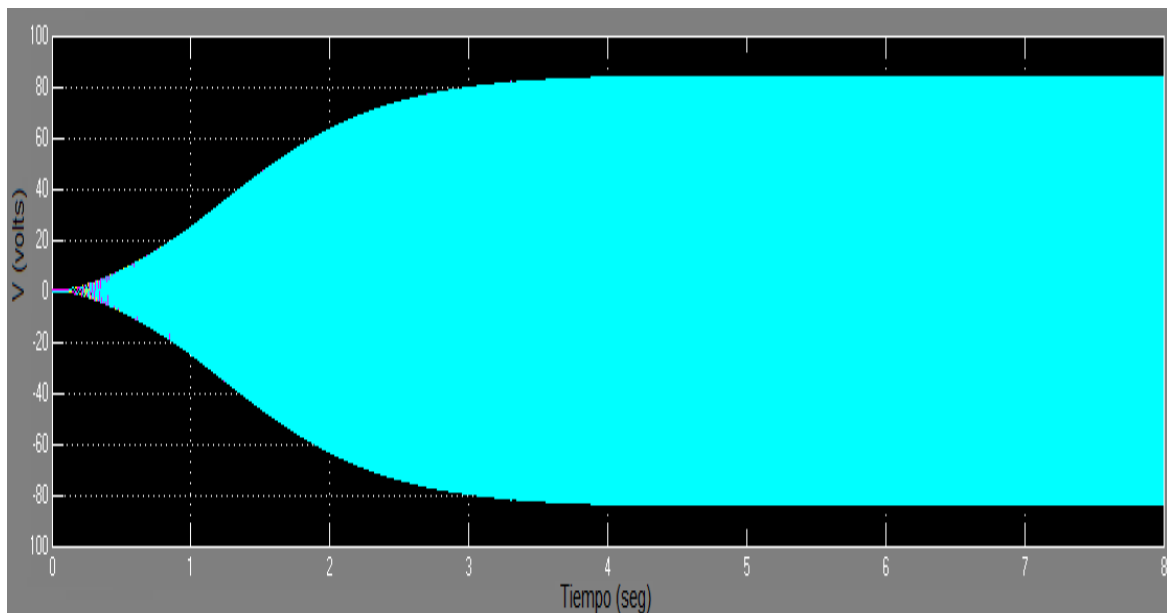


Figura 4. 21 Voltaje rectificado.

4.3.2.3 Voltaje en la etapa del convertidor elevador CD-CD

El voltaje a la salida del convertidor elevador se observa en la figura 4.22.

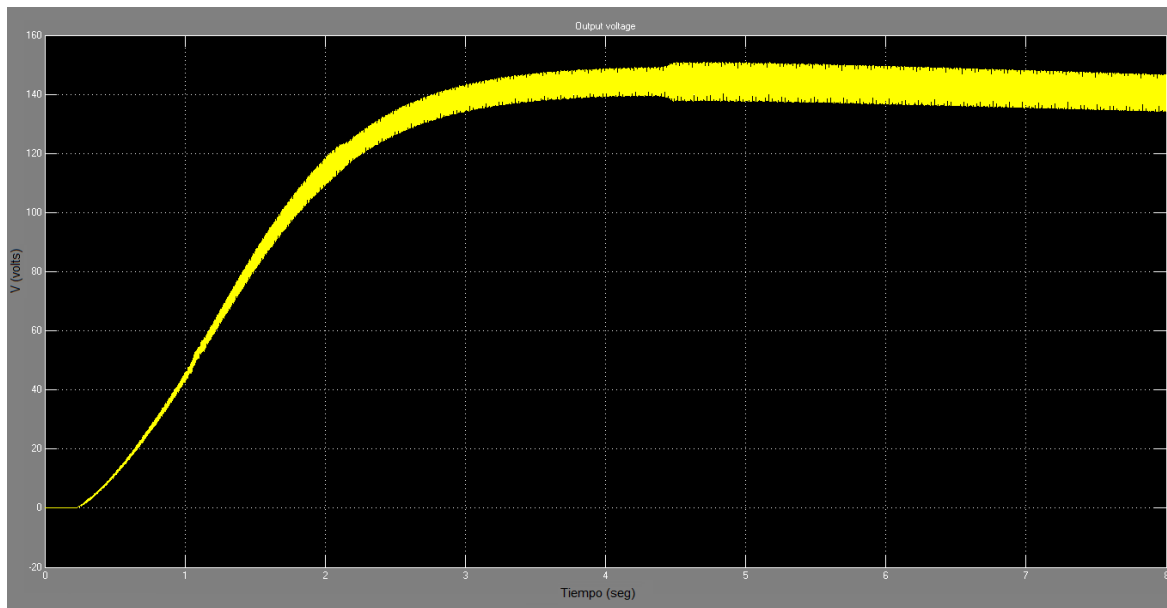


Figura 4. 22 Voltaje elevado.

4.3.2.4 Voltaje en la etapa del inversor

La señal de salida del inversor trifásico a partir de una entrada tipo rampa se ilustra en la figura 4.23.

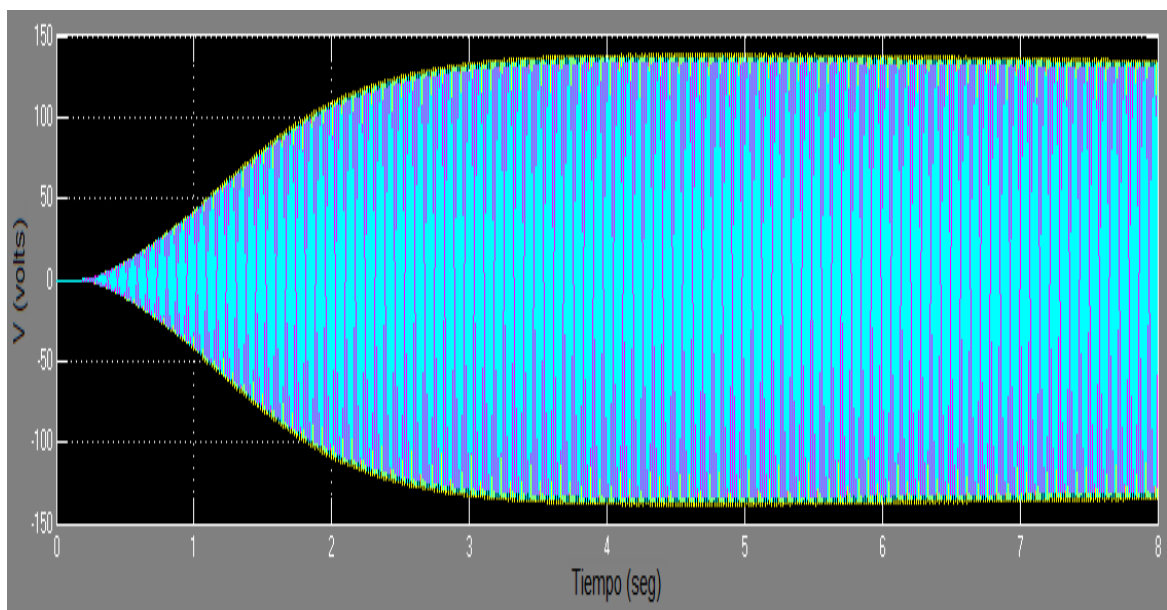


Figura 4. 23 Voltaje trifásico en el inversor.

Un acercamiento en el voltaje en el inversor se muestra en la figura 4.24.

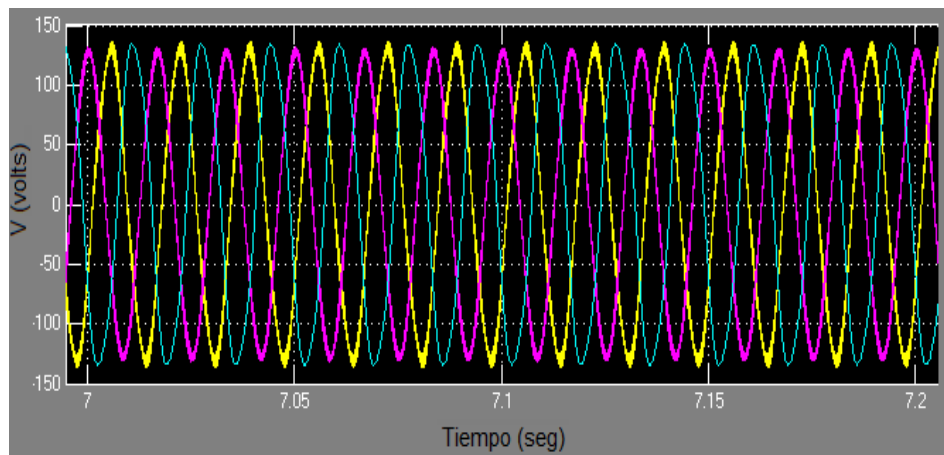


Figura 4. 24 Detalle del voltaje trifásico.

De acuerdo a los valores mostrados en la tabla 4.1. Se observa que los voltajes simulados son próximos a los valores de voltaje que entrega en tiempo real la turbina eólica. Los datos mostrados en la tabla 4.1 es promedio de una serie de barrido que se realizó al aerogenerador durante los meses de Marzo a Julio de 2015.

También se observa que independientemente del tipo de entrada el sistema se comporta de una forma estable.

Capítulo 5

5.1. Conclusiones

El trabajo desarrollado durante los capítulos anteriores nos recalca la importancia de nuevas fuentes de energía, en este caso particular se trató de enfatizar el uso de la energía eólica para disminuir el uso de energía originada por combustibles fósiles.

Se propuso un sistema de generación que nos permitió tener un panorama general de la generación de energía a través de la turbina eólica Skystream que se encuentra en el edificio Omega de ciudad universitaria de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Esta simulación permitió lograr el objetivo de simular y comparar los voltajes generados por la turbina para conocer su respuesta de generación.

El inversor propuesto tuvo una eficiencia satisfactoria ya que se observó una muy buena conversión y la cantidad de armónicos presente en la onda de salida fue mínima.

Los valores obtenidos en la salida del inversor de la simulación durante las pruebas son iguales a los voltajes entregados por la turbina eólica.

Se eligió Simulink ya que Matlab es un software muy completo que permite analizar a detalle y con valores muy cercanos a lo real los sistemas de potencias.

5.2. Recomendaciones

Al ser la primera versión del modelado se recomienda hacer un análisis matemático a detalle para lograr eliminar efecto de carga, bajar el rizado a un rango deseado, y acercar los valores simulados más a los valores reales.

Modelar el viento de tal forma que permita generar una entrada al generador donde el par esté variando ya que el viento se caracteriza por tener un comportamiento caprichoso, y entonces se compare en tiempo real el sistema propuesto con las salidas de la turbina de acuerdo a su software Skyview.

Se propone usar otra técnica de modulación PWM como la modulación senoidal modificada (MSPWM) ya que reduce el número de pérdidas de conmutación por lo que disminuye el contenido armónico (THD) en el sistema propuesto.

Bibliografía

enrenovables. (s.f.). Recuperado en 2015, de www.enrenovables.com/aprovechar-la-energia-geotermica/

Miguel, V. L. (2012). *Ingeniería de la Energía Eólica*. Alfaomega.

national geographic. (s.f.). Recuperado en 2015, de www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/calentamiento-global/hydropower-profile

naturro ingeniería. (s.f.). Recuperado en 2015, de <http://www.naturroingenieria.com/tipo-de-instalaciones/geotermica/>

twenergy. (s.f.). Recuperado en 2014, de <http://twenergy.com/a/aerogeneradores-que-son-y-como-funcionan-375>

Valderrama Fredy Fernando, C Moreno Henry, Vega Manuel Héctor. Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia dc tipo boost. 2011.

Cultura II A.B, Salameh Z.M.. Modeling and Simulation of a Wind Turbine Generator System. 2011.

Torres P. Carlos Andrés, Murillo Y. Duberney, Patiño Restrepo Carlo. Diseño y construcción de un inversor trifásico. Diciembre 2008.

Brogeras García Beatriz. Diseño y validación del control digital de un inversor de potencia en ejes de referencia síncronos conectado a la red. Octubre de 2011.

Schallenberg Rodríguez Julieta C., Piernavieja Izquierdo Gonzalo., Hernández Rodríguez Carlos. Energías renovables y eficiencia energética. Abril 2008.