

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Tesis

Diseño y construcción de un rectificador
trifásico para la turbina Skystream.

Que presenta para obtener el título como
Ingeniero Electricista

Miguel Contreras Barreto

Asesor de tesis:
Doctor en Ingeniería Eléctrica
Gilberto González Ávalos

Morelia, Michoacán, Noviembre del 2018

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico a mis padres, Ángeles y Miguel que siempre han estado conmigo, por formarme con su esfuerzo y dedicación para ser una persona de bien, además de motivarme a seguir adelante a pesar de todo y apoyarme a lo largo de mi formación académica además de mi vida personal; a mi familia y amigos que estuvieron siempre presentes cuando necesitaba apoyo o motivación, por hacer este proceso más ameno y agradable, y a mis profesores, que con su trabajo y dedicación lograron dejar en mí el conocimiento necesario para culminar un paso más en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, que siempre estuvieron presentes, por todo el apoyo que me han brindado, por ser el motivo de seguir adelante; sin ustedes esto no hubiese sido posible. Agradecerles por todo y decirles que nada malo que haya hecho en el pasado o que haga en el futuro no es culpa de ellos porque de haber tenido otros padres, no sé qué hubiera sido de mi persona.

A mi padre Miguel, han pasado muchos años desde que nací e incluso desde antes de eso ya estabas buscando lo mejor para mí. Haz trabajado duro y sin importar que llegaras cansado del trabajo siempre tenías una sonrisa para dar a tú familia, la persona más buena, integra y que más ama a su familia incluso cuando no lo mereciera. A mis hermanos Humberto y Yázkara, por ser parte clave en mi crecimiento personal, por hacerme dar más de mí.

A mis amigos, por estar siempre el uno para el otro, por no enfrentar solos los desafíos que se presentaron y por hacer de la universidad un proceso más agradable.

A mis profesores, por haberme otorgado las herramientas necesarias durante el proceso de mi formación profesional como ingeniero electricista, por demandar ese esfuerzo necesario para dejar los conocimientos bien plasmados en mí.

A mi asesor de tesis, Gilberto y a mi profesor Franco, por su fuerte apoyo durante la realización de esta tesis de investigación, que, con ellos el resultado esperado fue más sencillo de alcanzar demostrando la grandeza de mi facultad pero sobre todo de mi alma mater habiendo tenido el honor de ser ilustrado por su amabilidad, disposición y ganas de ayudar.

A Valentina, mi gran amor que me ha llenado de alegría desde que llegó a mi vida, siempre estando para mí en las buenas, en las malas y en las peores, por quererme como nunca había sentido y por demostrármelo cada día.

RESUMEN

En esta tesis de investigación se analiza la factibilidad del diseño y construcción de un rectificador trifásico para la turbina Skystream, haciendo un antecedente de una central de energía eólica con fuentes no renovables y fuentes renovables con énfasis al aprovechamiento de estas. Así como un análisis de el empaquetado, del circuito y el armado necesario para el funcionamiento de la turbina, dando a conocer el desarrollo de una de las etapas esenciales para la accesibilidad de estos en el país ya que cabe destacar que esta es una etapa de dos más para construir y diseñar los componentes que completan el diseño y la construcción de la turbina por completo, conformando la etapa del rectificador trifásico como la primera de ellas; de igual forma se menciona la tecnología de aplicación de estos rectificadores, sus antecedentes y en qué consisten, los cuales son utilizados como convertidores de corriente alterna a corriente directa mediante dispositivos semiconductores capaces de manejar grandes potencias como los diodos, tiristores, capacitores entre otros.

Finalmente, se lleva a cabo el diseño, construcción y pruebas de un rectificador aplicado a la turbina, su análisis para comprender completamente, desde sus principios básicos, cómo se compone, hasta su eficiencia y así implementar una central de este tipo en algún lugar en el país con las condiciones aptas, para de esta manera, poder evaluar los beneficios que aporta como una sola central de energía renovable limpia con este prototipo de rectificador trifásico.

PALABRAS CLAVE

Eólica, renovable, no renovable, turbina, skystream, rectificador, trifásico, semiconductor, empaquetado, central eólica.

ABSTRACT

This research thesis analyzes the feasibility of the construction and design and construction of a three-phase rectifier for the Skystream turbine, making a history of a wind power plant with non-renewable sources and renewable sources with emphasis on the use of these. As well as an analysis of the packaging, the circuit and the assembly necessary for the operation of the turbine, making known the development of one of the essential stages for the accessibility of these in the country since it is worth mentioning that this is a stage of 2 more to build and design the components especially in Michoacán, in the same way, the application technology of these rectifiers is mentioned, their antecedents and what they are used as converters of alternating current to direct current through semiconductor devices capable of handling great powers as diodes, thyristors, capacitors among others.

Finally, the design, construction and testing of a rectifier applied to the turbine is carried out, its analysis to fully understand, from its basic principles, how it is composed, up to its efficiency and thus implement a power plant of this type somewhere in the country with the suitable conditions, in this way, to be able to evaluate the benefits it brings as a single renewable clean energy plant with this three-phase rectifier prototype.

KEY WORDS

Central wind, renewable, non-renewable, turbine, sky stream, rectifier, three phase, semiconductor, packaging, wind power plant.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
PALABRAS CLAVE.....	III
ABSTRACT.....	IV
KEY WORDS.....	IV
ÍNDICE	V
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABLAS	X
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	XI
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 <i>Fuentes Renovables</i>	1
1.1.1 Energía Hidráulica.	1
1.1.2 Energía Solar.....	1
1.1.3 Energía Eólica.	2
1.1.4 Biomasa.....	2
1.1.5 Energía Marina.....	2
1.1.6 Energía Geotérmica.....	3
1.2 <i>Objetivos</i>	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivo Particular.....	3
1.3 <i>Justificación</i>	3
1.4 <i>Metodología</i>	4

1.5	<i>Contenido de la Tesis.</i>	5
Capítulo 2.	Antecedentes de las Centrales Eólicas y de la turbina Skystream.	6
2.1	<i>Introducción.</i>	6
2.2	<i>Centrales Eléctricas con Fuentes no Renovables.</i>	7
2.2.1	Termoeléctricas.	7
2.2.2	Turbogas.	9
2.2.3	Nucleares.	11
2.3	<i>Centrales con Fuentes Renovables.</i>	13
2.3.1	Hidroeléctricas.	13
2.3.2	Eólicas.	15
2.3.3	Termosolares.	20
2.3.4	Fotovoltaicas.	22
2.3.5	Biomasa.	26
2.4	<i>Aerogenerador Skystream.</i>	30
2.4.1	Aerogeneradores con eje vertical.	32
2.4.2	Aerogeneradores con eje horizontal.	35
2.4.3	Aerogenerador según la potencia suministrada.	39
Capítulo 3.	Rectificadores.	40
3.1	<i>Clasificación.</i>	40
3.1.1	Rectificador monofásico de media onda.	40
3.1.2	Rectificador monofásico de onda completa.	41
3.1.3	Rectificador trifásico de media onda.	42
3.1.4	Rectificador trifásico de onda completa.	43
3.1.5	Especificaciones, cuidados, costos y aplicaciones de diodos de alta potencia.	45
Capítulo 4.	Diseño y construcción del rectificador trifásico para la turbina Skystream.	58
4.1	<i>Rectificador trifásico de onda completa sin capacitor de compensación y sin carga.</i>	58

4.2	<i>Rectificador trifásico de onda completa sin capacitor de compensación y con carga...</i>	60
4.3	<i>Rectificador trifásico de onda completa con capacitor de compensación y sin carga...</i>	62
4.4	<i>Rectificador trifásico de onda completa con capacitor de compensación y con carga..</i>	64
4.5	<i>Rectificador con máquina de inducción jaula de ardilla.....</i>	66
4.5.1	<i>Pruebas sin carga.....</i>	66
4.5.2	<i>Pruebas con carga</i>	67
Capítulo 5.	<i>Conclusiones y Recomendaciones.....</i>	69
5.1	<i>Conclusiones</i>	69
5.2	<i>Recomendaciones.....</i>	71
Bibliografía		72

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Componentes principales de una planta de potencia térmica. [12]	7
Figura 2.2 Representación esquemática de una turbina de gas de ciclo abierto simple.	9
Figura 2.3 Diagrama T-S del ciclo Brayton.	10
Figura 2.4 Representación del ciclo abierto simple en el diagrama dinámico.	10
Figura 2.5 Diagrama esquemático de una planta de energía nuclear	12
Figura 2.6 Vista de corte transversal de una planta hidroeléctrica	14
Figura 2.7 Molino de viento que impulsa un pequeño generador de cd.	17
Figura 2.8 Turbina eólica que impulsa un generador asíncrono mediante una caja de velocidades.	17
Figura 2.9 Turbina eólica que impulsa un generador asíncrono conectado a un convertidor de frecuencia variable.	18
Figura 2.10 Turbina eólica conectada a un generador de inducción doblemente alimentado..	18
Figura 2.11 Turbina que impulsa directamente un alternador de imán permanente de alta potencia.....	19
Figura 2.16 Planta fotovoltaica de estructura estática.	23
Figura 2.17 Esquema de estructura estática.....	23
Figura 2.18 a) Esquema seguidor de un eje. b) Esquema seguidor dos ejes.	24
Figura 2.19 Planta fija de 1 MW para tecnología convencional.	25
Figura 3.1 Circuito rectificador de media onda.	40
Figura 3.2 Rectificación de la onda.	41
Figura 3.3 Circuito rectificador monofásico de onda completa.	42
Figura 3.4 Circuito rectificador trifásico de media onda.	42
Figura 3.5 Onda trifásica de un transformador sin rectificar..	42
Figura 3.6 Onda trifásica de un transformador rectificadora.	43
Figura 3.7 Puente rectificador de onda completa.....	43

Figura 3.8 Conexión trifásica del secundario del transformador.....	44
Figura 3.9 Onda de rectificador de onda completa.	44
Figura 3.10 Onda trifásica en rectificación completa.....	45
Figura 4.1 Esquema de conexión de un rectificador trifásico de onda completa	58
Figura 4.2 Señal de voltaje del rectificador simulado	59
Figura 4.3 Señal de voltaje del rectificador implementado.....	60
Figura 4.4 Modelo de rectificador con carga	60
Figura 4.5 Señal de voltaje del rectificador con carga	61
Figura 4.6 Señal de voltaje del rectificador con carga del circuito implementado	61
Figura 4.7 Circuito implementado de rectificador con y sin carga.....	61
Figura 4.8 Señal del rectificador con capacitor de compensación.....	63
Figura 4.9 Señal del rectificador implementado con capacitor de compensación.....	63
Figura 4.10 Señal del rectificador simulado con capacitor y carga.....	64
Figura 4.11 Señal del rectificador implementado con capacitor y carga.....	64
Figura 4.12 Circuito implementado de rectificador con capacitor de compensación.....	65
Figura 4.13 Señal rectificada del generador asíncrono sin capacitor de compensación.....	66
Figura 4.14 Señal rectificada del generador asíncrono con capacitor de compensación	67
Figura 4.15 Señal del rectificador con carga del generador asíncrono.....	67
Figura 4.16 Señal del rectificador conectado al generador asíncrono con carga y con capacitor de compensación.....	68
Figura 4.17 Circuito experimental del rectificador trifásico.....	68
Figura 5.1 Evolución de la generación bruta en el sistema eléctrico nacional, por fuente de energía, 2004-2014	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Ocupación de terreno de una planta fija de 1 MW.	25
Tabla 2.2 Ocupación de terreno de una planta con seguidores de 1 MW.....	26

GLOSARIO DE TÉRMINOS

AP	Alta presión.
^{235}U	Isótopo de uranio (235).
^{238}U	Isótopo de uranio (238).
BWR	Reactores de agua hirviendo.
CANDU	Canadá Deuterium Uranium.
CO_2	Dióxido de carbono.
CRE	Comisión reguladora de energía.
DNI	Irradiación normal directa
EGS	Sistemas geotérmicos estimulados.
FBR	Reactor de alimentador rápido.
GHI	Irradiación horizontal global
HDR	Roca seca caliente.
HTGR	Reactor de gas a alta temperatura.
PWR	Reactor de agua a presión.
SH_2	Sulfuro de hidrógeno.
UO_2	Dióxido de uranio.
β	Relación de compresión.
CCP	Concentrador cilindro parabólico.
HTF	Fluido caloportador.
KNO_3	Nitrato de potasio.
NaNO_3	Nitrato de sodio.
CCP	Colelector cilindro parabólico.
PS10	Plataforma Solúcar (11 MW).
PS20	Plataforma Solúcar (20 MW).
ISCC	Ciclo combinado solar integrado.
V_i	Voltaje de entrada.
V_o	Voltaje de salida.
V_1, V_2, V_3	Voltaje 1,2,3.
VRRM	Tensión inversa máxima.

VD	Tensión de codo.
trr	Tiempo de recuperación inverso.
VRWM	Tensión inversa de pico de trabajo.
VRRM	Tensión inversa de pico repetitivo.
VRSM	Tensión inversa de pico no repetitiva.
VBR	Tensión de ruptura.
VR	Tensión inversa continua.
IFAV	Intensidad media nominal.
IFRM	Intensidad de pico repetitivo.
IFSM	Intensidad directa de pico no repetitiva.
IF	Intensidad directa.
Tb	Tiempo de caída.
Ta	Tiempo de almacenamiento.
Qrr	Carga eléctrica desplazada.
di/dt	Pico negativo de intensidad.
Irr	Pico negativo de corriente.
SF	Factor de suavizado.
Tfr	Tiempo de recuperación directo.
VF	Voltaje final.
Pmáx	Potencia máxima disipable.
PAV	Potencia media disipada.
PRRM	Potencia inversa de pico repetitiva.
PRSM	Potencia inversa de pico no repetitiva.
Tjmáx	Temperatura de la unión.
Tstg	Temperatura de almacenamiento.
Rjc	Resistencia térmica unión-contenedor.
Rcd	Resistencia térmica contenedor-disipador.
L2t	Característica de fusión del cartucho.
VF	Voltaje final.
UPS	Sistema de alimentación interrumpida.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Fuentes Renovables.

Las fuentes de energía *renovables* son aquellas que se obtienen de fuentes naturales virtualmente inagotables a escala humana, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen (como el sol, el viento, etc.), o porque son capaces de regenerarse por medios naturales (como la marea, el oleaje, etc.) [1].

1.1.1 Energía Hidráulica.

Energía hidráulica, energía hídrica o hidro energía es aquella que se obtiene del aprovechamiento de la energía cinética y potencial de la corriente del agua, saltos de agua o mareas.

Se puede transformar a muy diferentes escalas. Existen, desde hace siglos, pequeñas explotaciones en las que la corriente de un río, con una pequeña represa, mueve una rueda de palas y genera un movimiento aplicado, por ejemplo, en molinos rurales. Sin embargo, la utilización más significativa la constituyen las centrales hidroeléctricas de represas.

Es generalmente considerada un tipo de energía renovable puesto que no emite productos contaminantes. Sin embargo, produce un gran impacto ambiental debido a la construcción de las presas, que inundan grandes superficies de terreno y modifican el caudal del río y la calidad del agua [2] [3].

1.1.2 Energía Solar.

La energía solar es una energía renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol. La radiación solar que alcanza la Tierra ha sido aprovechada por el ser humano desde la antigüedad, mediante diferentes tecnologías que han ido evolucionando. Hoy en día, el calor y la luz del Sol puede aprovecharse por medio de diversos captadores como células fotovoltaicas, helióstatos o colectores térmicos [4].

La energía solar térmica o energía termo solar consiste en el aprovechamiento de la energía del sol para producir calor que puede aprovecharse para cocinar alimentos o para la producción de agua caliente destinada al consumo de agua doméstico, ya sea agua caliente sanitaria, calefacción, o para producción de energía mecánica y, a partir de ella, de energía eléctrica. Adicionalmente, puede emplearse para alimentar una máquina de refrigeración por absorción, que emplea calor en lugar de electricidad para producir frío con el que se puede acondicionar el aire de los locales.

1.1.3 Energía Eólica.

Esta es la clase energía en la que estará enfocada esta tesis, ya que la turbina Skystream funciona con energía eólica la cual es energía obtenida a partir del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es convertida en otras formas útiles de energía para las actividades humanas como impulsar barcos en su desplazamiento, para bombear agua, para moler grano o, en su aplicación más desarrollada en la actualidad, para producir energía eléctrica. [5].

Para el aprovechamiento de la energía del viento se han desarrollado numerosos ingenios mecánicos a lo largo de la historia, todos con la característica común de tener una superficie de captación (en forma de vela, pala, aspa, etc.) y un eje (que puede ser de giro, este es el caso de los molinos de viento o los aerogeneradores) sobre el que se acopla el receptor último de la energía [5].

La inversión en parques eólicos en México supera 6,000 millones de dólares. Éstos son los estados que generarán más megavatios con energía eólica en 2018.

- Oaxaca: 5,564 megawatts.
- Tamaulipas: 1,350 megawatts.
- Coahuila: 1,080 megawatts.
- Nuevo León: 642 megawatts.
- Jalisco: 399 megawatts.

Dicho esto, SkyStream3.7 es el primer generador eléctrico residencial impulsado por el viento que se conecta a la red eléctrica. Es de bajo costo de mantenimiento. Existen dos tipos: Terrestre (Land) o Marino (Marine). Hay Versiones a 120V o a 220V.

1.1.4 Biomasa.

La energía del Sol es utilizada por las plantas para sintetizar la materia orgánica mediante el proceso de fotosíntesis. Esta materia orgánica puede ser incorporada y transformada por los animales y por el hombre. El término biomasa abarca un conjunto muy heterogéneo y variado de materia orgánica y se emplea para denominar a una fuente de energía basada en la transformación de la materia orgánica utilizando, normalmente, un proceso de combustión [6].

1.1.5 Energía Marina.

La energía marina es la energía cinética que almacenan los océanos, tanto las olas (de superficie y mareomotriz), las mareas y las corrientes marinas.

Los océanos tienen una enorme cantidad de energía y están muy cerca de la mayoría de las concentraciones de población. Bastantes investigaciones muestran que la energía oceánica tiene el potencial de proporcionar una cantidad sustancial de nuevas energías renovables en todo el mundo [7].

1.1.6 Energía Geotérmica.

La energía geotérmica es aquella energía que puede ser obtenida por el hombre mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra; que se transmite a través de los cuerpos de roca caliente o reservorios por conducción y convección, donde se suscitan procesos de interacción de fluidos y rocas, dando origen a los sistemas geotérmicos [8] [9].

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo General.

Mejorar la producción de energía eléctrica con un prototipo de rectificador trifásico en una central con fuente renovable eólica para obtener un mejor costo de estas y adquirir el mayor beneficio a los recursos naturales disponibles.

1.2.2 Objetivo Particular.

Mejorar el rendimiento y un costo más bajo de una central eólica añadiendo a esta un rectificador trifásico a una central con fuente renovable, sacándole mayor provecho a las zonas ventosas del país en especial aplicándolo en esta etapa de generación al estado de Michoacán ya que es uno de los estados que no están explotando este recurso como debería.

- Analizar las centrales eólicas para hacer estudios de dimensionamiento y eficiencia.
- Analizar los rectificadores trifásicos para, de igual forma, realizar estudios de dimensionamiento, eficiencia y costos.
- Diseñar y construir el rectificador trifásico y hacer pruebas en el laboratorio.

1.3 Justificación.

Como toda fuente de energía, causará algún tipo de impacto ambiental en el terreno en el cual se instala este tipo de plantas, en esta utiliza una buena cantidad de metros cuadrados para su construcción, las instalaciones necesitan intervenir ríos o talar bosques, y no hay instalaciones mineras, túneles, piscinas de desecho, ni fugas de combustible.

El tema de esta tesis de investigación se toma principalmente con la finalidad de obtener el mayor provecho de energía generada a partir de la energía eólica que se obtiene de una central eólica como la turbina Skystream. Esto, con la finalidad de aumentar el porcentaje de generación de energías limpias en el país.

Esto puede ser posible si los vientos son fuertes y así la producción aumenta, y para lograrlo sin que deje de ser una fuente de energía limpia, bastaría con agregar un rectificador trifásico dentro de la turbina, y de este modo aumentar energía eólica, a su vez se daría la sustitución de un motor de imanes permanentes por un máquina síncrona y una máquina de inducción jaula de ardilla (MIJA). Michoacán es un área de la cual se puede sacar bastante provecho, para mejorar la eficiencia de procesos donde el viento pueda llegar a ser la principal fuente de energía sea necesaria. De esta forma, aprovechamos dos recursos en los cuales México es rico, como lo es el recurso del viento (como la zona de la “ventosa” en nuestro país) y el ingenio mexicano para crear un rectificador trifásico eficiente para adecuarlo a la turbina Skystream (por el gran costo en el país). Es un hecho que la mayoría de las naciones en el mundo están tratando, en mayor o menor medida, de emplear más energías alternas, una de ellas la eólica. En México, la inversión realizada a la fecha en parques eólicos supera 6,000 millones de dólares (mdd), con más de 1,400 aerogeneradores operando. [10] [11].

1.4 Metodología.

Esta tesis de investigación, se elabora principalmente, mediante la lectura y recopilación de datos de libros, artículos de investigación, estudios, sitios web, entre otros, para tener un claro panorama de la situación energética actual en el país, para posteriormente realizar una amplia investigación sobre las centrales de energía eólica, desde su principio de funcionamiento, los lugares disponibles en México, tecnologías de instalación y manufacturado, así como analizar las plantas existentes (enfocándonos en las plantas ya presentes en México). También, se investigarán a fondo los rectificadores trifásicos, dado que el sistema funcionará con esta etapa haciendo enfoque en la parte del armado y empaquetado del circuito, y de esta forma poder analizar la diferencia de potencial que producirá con la señal de entrada, obteniendo 120 volts de corriente directa. Además, se hace el uso de software para obtener los datos y lecturas necesarios de esta primera etapa propuesta y para apoyo en los cálculos necesarios para dicha central así como el análisis y pruebas en el laboratorio.

1.5 Contenido de la Tesis.

En el capítulo 1 se da una introducción a las fuentes renovables, se plantea el problema y la solución a este, además de explicar el por qué y cómo es que se lleva a cabo.

En el capítulo 2 se exponen los antecedentes de las centrales eléctricas eólicas, tanto de centrales con fuentes renovables como de centrales con fuentes no renovables en especial con el enfoque hacia la eficiencia y funcionalidad de la turbina Skystream en sus diferentes presentaciones.

En el capítulo 3 se dan a conocer las tecnologías disponibles en rectificadores en sus diferentes tipos y los métodos de aprovechamiento de estas, su diseño y construcción en especial con enfoque al rectificador trifásico que se implementará a la turbina Skystream.

En el capítulo 4 se lleva acabo el procedimiento analítico necesario para obtener un resultado sobre las opciones de mejora en la central eólica al contar con el rectificador trifásico y sustituyendo el motor de imanes permanentes (Designado por fabricante) por una maquina síncrona y por una MIJA (Máquina de inducción jaula de ardilla) con pruebas en el laboratorio y revisar la potencia de generación de energía eléctrica.

En el capítulo 5 se expresan las conclusiones obtenidas durante la realización de esta tesis de investigación, analizando los resultados obtenidos en el capítulo 4.

Capítulo 2. Antecedentes de las Centrales Eólicas y de la turbina Skystream.

2.1 Introducción.

Uno de los problemas más importantes de la ingeniería, es la transformación de las fuentes de energía que nos ofrece la naturaleza, en aquellas formas que sean más fácilmente aprovechables por el hombre. La forma de energía que ha encontrado más adecuada para satisfacer sus necesidades es la energía mecánica, sin embargo, la naturaleza nos suministra la energía en forma tal que la mayoría de los casos se requiere una serie de transformaciones antes de contar con la energía mecánica para realizar un trabajo, la energía mecánica se puede obtener por ejemplo a partir de la energía cinética del viento, de la energía potencial de un salto de agua, etc., sin embargo, no es práctico tener una central de energía mecánica para de esta central llevar la energía a los centros de consumo, esto además de sumamente costoso, sería sumamente ineficiente. El problema anterior se ha resuelto mediante el uso de la energía eléctrica, ya que esta se puede transmitir y distribuir con menores costos y con menos pérdidas, de lo anterior se infiere la necesidad de tener centrales de energía, llamadas Centrales o Plantas Eléctricas, que se pueden definir como el conjunto de instalaciones que partiendo de algún tipo de energía están destinadas a la producción de energía eléctrica [11].

Con lo antes dicho no indica que necesariamente toda la energía que se usa en industrias, zonas residenciales, etc., tuvo que ser en alguna etapa energía eléctrica, ya que por ejemplo en gran parte del transporte se transforma directamente la energía química en mecánica, lo mismo sucede en muchos procesos de combustión, pero si es importante recalcar la gran importancia de las Plantas Eléctricas [11].

La energía se puede clasificar en:

- Primaria, tal como se obtiene de la naturaleza, petróleo, carbón, etc.
- Secundaria, ya elaborada como electricidad, gasolina, etc.

Algunos de los recursos que más debe cuidar un país, son sus recursos energéticos, en México no existe una buena relación entre el producto interno bruto y el consumo de energía por la unidad de producción, lo anterior se debe fundamentalmente a:

- Ausencia de un programa efectivo para el uso racional de la energía.

- Uso en la industria de tecnología altamente consumidora de energía, llamada comúnmente tecnología chatarra [11].
-

2.2 Centrales Eléctricas con Fuentes no Renovables.

2.2.1 Termoeléctricas.

Las plantas de generación térmica producen electricidad a partir del calor liberado por la combustión de carbón, petróleo o gas natural. [12]

Por lo general, las plantas térmicas se localizan cerca de un río o lago porque se requieren grandes cantidades de agua de enfriamiento para condensar el vapor a medida que sale de las turbinas.

La eficiencia de las plantas de generación térmica siempre depende de la baja eficiencia propia de las turbinas. En la mayoría de las plantas de generación térmica el gas es vapor. Para obtener una alta eficiencia, el cociente $\frac{\text{Temperatura del gas que SALE de la turbina}}{\text{Temperatura del gas que ENTRA a la turbina}} = \frac{T_2}{T_1}$ debe ser tan pequeño como sea posible.

Debido a otras pérdidas, algunas de las turbinas de vapor más eficientes tienen eficiencias de 45%. Esto significa que se pierde el 55% de la energía térmica durante el proceso de conversión térmica a mecánica. La enorme pérdida de calor y cómo disponer de éste representan uno de los aspectos fundamentales de una planta de generación térmica [12].

La estructura básica y los componentes principales de una planta de generación térmica se muestran en la Figura 2.1, y se detallan y describen a continuación.

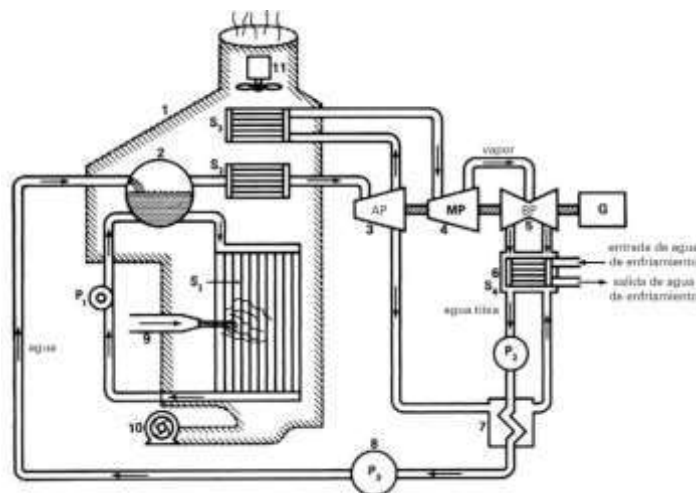


Figura 2.1 Componentes principales de una planta de potencia térmica. [12]

-
- Una enorme caldera (1) actúa como horno, transfiriendo calor del combustible que se quema a los tubos de agua S_1 , los cuales rodean por completo las llamas. Una bomba P_1 mantiene el agua circulando en los tubos.
 - Un tanque (2) que contiene agua y vapor a alta presión produce el vapor requerido por las turbinas. También recibe el agua suministrada por la bomba P_3 de alimentación de la caldera. El vapor pasa rápidamente hacia la turbina de alta presión AP después de haber pasado por el supercalentador S_2 . El supercalentador, compuesto de una serie de tubos que rodean las llamas, eleva la temperatura del vapor a unos 200 °C. Este incremento de temperatura garantiza que el vapor está absolutamente seco y eleva la eficiencia global de la estación.
 - Una turbina de alta presión (AP) (3) convierte la energía térmica en energía mecánica dejando que el vapor se expanda conforme pasa a través de sus aspas. Por consiguiente, la temperatura y presión a la salida de la turbina son menores que a la entrada. Para elevar la eficiencia térmica y evitar la condensación prematura, el vapor pasa a través de un recalentador S_3 , compuesto de un tercer juego de tubos calentados.
 - La turbina de mediana presión (MP) (4) es similar a la de alta presión, excepto que es más grande para que el vapor pueda expandirse aún más.
 - La turbina de baja presión (BP) (5) consta de dos secciones izquierda y derecha idénticas. Las secciones de la turbina extraen la energía restante disponible del vapor. El vapor que fluye hacia afuera de la turbina de baja presión se expande en un vacío casi perfecto creado por el condensador (6).
 - El condensador (6) hace que el vapor se condense dejando que fluya a través de tubos de enfriamiento S_4 . En los tubos fluye agua fría de una fuente externa, como un río o lago, la cual arrastra el calor. Éste es el vapor condensado que crea el vacío.
Una bomba de condensado P_2 extrae el vapor condensado tibio y lo dirige a través de un recalentador (7) hacia una bomba de agua de alimentación (8).
 - El recalentador (7) es un intercambiador de calor. Recibe vapor caliente, purgado de la turbina de alta presión (AP), para elevar la temperatura del agua de alimentación. Estudios termodinámicos indican que la eficiencia térmica global mejora cuando algo de vapor es purgado de esta manera, en lugar de dejarlo que siga su curso normal a través de las tres turbinas.
 - Los quemadores (9) suministran y controlan la cantidad de gas, aceite o carbón inyectada a la caldera. El carbón es pulverizado antes de ser inyectado. Asimismo, un espeso aceite es precalentado e inyectado como un chorro atomizado para mejorar la superficie de contacto (y la combustión) con el aire circundante.

- Un ventilador de tiro forzado (10) suministra las enormes cantidades de aire necesarias para la combustión.
- Un ventilador de tiro inducido (11) conduce los gases y otros productos de combustión hacia un aparato de limpieza, y de allí a la chimenea y al aire externo.
- El generador (G), directamente acoplado a las tres turbinas, convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

En la práctica, una planta de vapor tiene cientos de componentes y accesorios más para garantizar una alta eficiencia, seguridad y economía. Por ejemplo, válvulas de control regulan la cantidad de vapor que fluye hacia las turbinas; complejos purificadores de agua mantienen la limpieza y composición química requeridas del agua de alimentación, y bombas de aceite mantienen los cojinetes adecuadamente lubricados. Sin embargo, los componentes básicos que acabamos de describir nos permiten entender la operación y algunos de los problemas básicos de una planta térmica [12].

2.2.2 Turbogas.

Una planta de turbina de gas es aquella que aprovecha la energía de gas caliente (generalmente aire), para mover una turbina llamada de gas, que a su vez está acoplada al generador eléctrico. [11]

La turbina de gas para producir energía mecánica aprovecha el calor que lleva consigo los gases de combustión o aire, los cuales los cuales se calentaron al quemarse un combustible, y se expansionan de forma parecida al vapor en las turbinas de vapor, sobre los álabes móviles de un rodete. El ciclo termodinámico que sigue es el denominado Brayton.

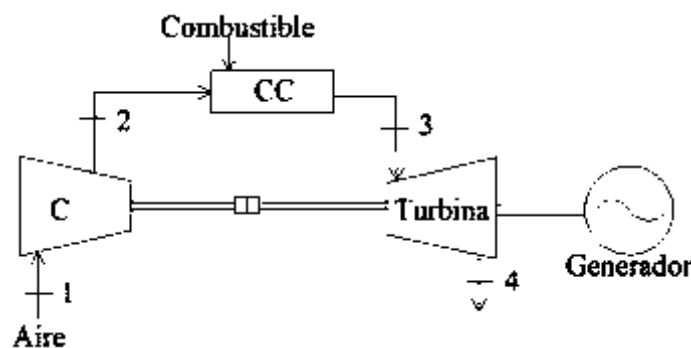


Figura 2.2 Representación esquemática de una turbina de gas de ciclo abierto simple.

En la Figura 2.2 se representa esquemáticamente una planta con turbina de gas con un ciclo simple y en la Figura 2.3 su ciclo de funcionamiento en el diagrama entrópico.

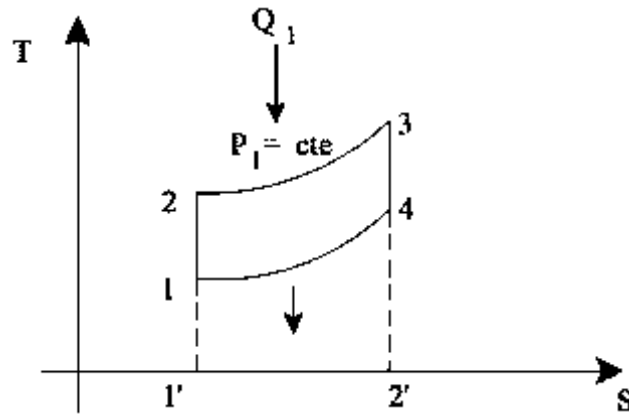


Figura 2.3 Diagrama T-S del ciclo Brayton.

El aire entra en el compresor a la presión atmosférica y es comprimido adiabáticamente desde el punto 1 al punto 2 del diagrama. En el punto 2 comienza la combustión, que tiene lugar a presión constante desde el punto 2 al punto 3 con introducción de una cierta cantidad de calor Q_1 que produce un aumento en el volumen del fluido, esto se realiza en la cámara de combustión, donde se quema un combustible. En el punto 3 inicia una expansión adiabática terminándose en el punto 4, este proceso se realiza en la turbina. En el punto 4 los gases se descargan al exterior o bien, eventualmente refrigerados a presión constante según la línea 4-1, vuelven al estado inicial para reiniciar el ciclo

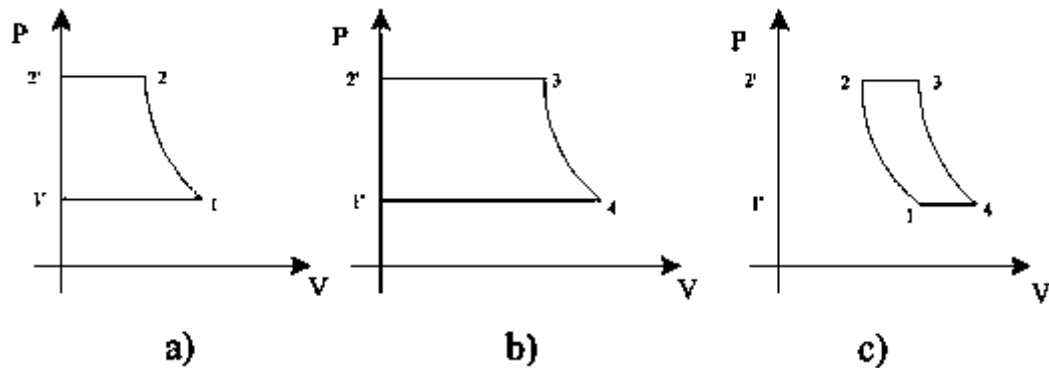


Figura 2.4 Representación del ciclo abierto simple en el diagrama dinámico.

a) Trabajo del compresor. b) Trabajo de la turbina. c) Trabajo útil.

En el diagrama dinámico (Figura 2.4) se tiene que el trabajo del compresor (Figura 2.4a) es la superficie comprendida entre los puntos 1'-1-2-2'. El aire entra a la presión atmosférica (punto 1') y va aumentando de volumen hasta el punto 1, aquí sufre una compresión adiabática según la línea 1-2 y, a partir del punto 2' se expande en la cámara de combustión en el punto 1'.

El trabajo total en la turbina está indicado en la Figura 2.4b y representado por la superficie comprendida entre 2'-3-4-1'.

En 3 a la entrada de la turbina, el gas se expansiona adiabáticamente hasta 4, la salida de la turbina. El trabajo útil, Figura 2.4c, será la diferencia entre el trabajo total y el trabajo necesario para el compresor, es decir, según la figura, la superficie comprendida entre 1-2-3-4. De lo anterior se desprende que la turbina ha desarrollado trabajo que se utiliza por un lado para alimentar al compresor y por otro lado, la energía, se alimenta al generador eléctrico [11].

2.2.3 Nucleares.

Las plantas nucleares producen electricidad a partir del calor liberado por una reacción nuclear. Cuando el núcleo de un átomo se divide en dos (un proceso llamado fisión atómica), se libera una considerable cantidad de energía. Hay que aclarar que una reacción química, como la combustión de carbón, produce sólo un reacomodo de los átomos, sin afectar de ninguna manera sus núcleos.

Una planta nuclear es idéntica a una térmica, excepto que la caldera es reemplazada por un reactor nuclear. El reactor contiene el material fisionable que genera el calor. Así, una planta nuclear contiene un generador síncrono, una turbina de vapor, un condensador, etc., similares a los encontrados en una planta térmica convencional. La eficiencia total también es similar (entre 30 y 40 por ciento), y debe contar con un sistema de enfriamiento. Por consiguiente, las plantas nucleares también están localizadas cerca de ríos y lagos. En áreas secas se instalan torres de enfriamiento. Debido a estas similitudes, sólo examinaremos el principio de operación del reactor mismo [12].

Cuando el núcleo de un átomo se fisiona, se divide en dos. Por lo general, la masa total de los dos átomos formados de este modo es menor que la del átomo original. Si existe una pérdida de masa, se libera energía de acuerdo con la ecuación de Einstein:

$$E = mc^2$$

Donde

$$E = \text{energía liberada [J]}$$

$$m = \text{pérdida de masa [kg]}$$

$$c = \text{velocidad de la luz [} 3 \times 10^8 \text{ m/s]}$$

Se libera una enorme cantidad de energía porque, de acuerdo con esta fórmula, una pérdida de masa de un sólo gramo produce $9 \times 10^{13} \text{ J}$, lo cual equivale al calor emitido por la combustión de 3 mil toneladas de carbón. El uranio es uno de esos elementos que pierden masa cuando se fisionan. Al producir esta

fisión en un átomo de uranio, se realiza una reacción en cadena en la cual una gran cantidad de átomos son fisionados de una manera controlada.

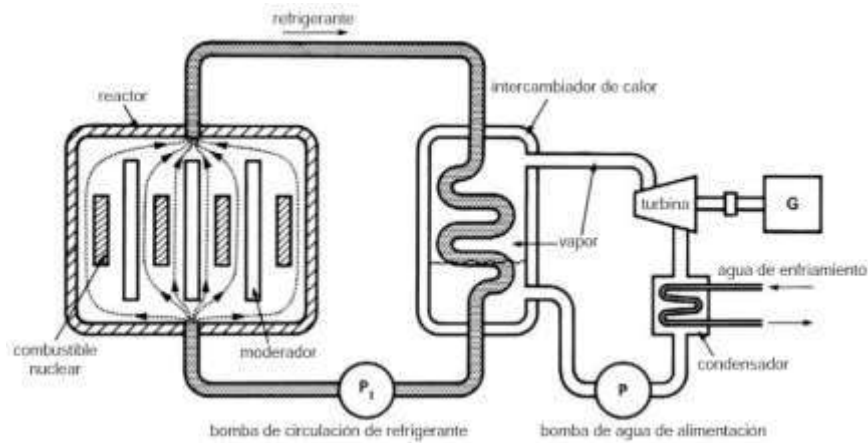


Figura 2.5 Diagrama esquemático de una planta de energía nuclear

Cuando inicia la reacción en cadena, la temperatura aumenta con rapidez. Para mantenerla a un nivel aceptable, tiene que fluir rápidamente un líquido o gas a través del reactor para absorber el calor. Este refrigerante puede ser agua pesada, agua ordinaria, sodio líquido o un gas como helio o bióxido de carbono. El refrigerante caliente se mueve en un circuito cerrado que incluye un intercambiador de calor. Este último transfiere el calor a un generador de vapor que impulsa las turbinas (Figura 2.5). Así, contrario a lo que su nombre nos haría creer, el refrigerante no está frío sino demasiado caliente [12].

Existen varios tipos de reactores, pero los siguientes son los más importantes:

- **Reactor de agua a presión (PWR, por sus siglas en inglés).** Se utiliza agua como refrigerante y se mantiene a una presión tan alta que no puede hervir y convertirse en vapor. Se puede utilizar agua ordinaria, como en los reactores de agua ligera, o agua pesada, como en los reactores CANDU (Canada Deuterium Uranium).
- **Reactores de agua hirviente (BWR, por sus siglas en inglés).** El refrigerante en este reactor es agua ordinaria que hierve a alta presión y libera vapor. Esto elimina la necesidad de un intercambiador de calor, porque el vapor circula directamente a través de las turbinas. Sin embargo, como en todos los reactores de agua liviana, se puede utilizar bióxido de uranio enriquecido que contenga aproximadamente 3 por ciento de ^{235}U .
- **Reactor de gas a alta temperatura (HTGR, por sus siglas en inglés).** Este reactor utiliza un refrigerante de gas inerte, como helio o bióxido de carbono. Debido a la alta temperatura de operación (por lo general de $750\text{ }^{\circ}\text{C}$), se utiliza grafito como moderador. El vapor creado por el

intercambiador de calor está tan caliente como el producido en una caldera de vapor que quema carbón. Por lo tanto, la eficiencia total de las plantas HTGR es de aproximadamente 40 por ciento.

- **Reactor de alimentador rápido (FBR, por sus siglas en inglés).** Este reactor tiene la extraordinaria capacidad de generar calor y crear combustible nuclear adicional mientras está en operación.

2.3 Centrales con Fuentes Renovables.

2.3.1 Hidroeléctricas.

Las plantas de generación hidroeléctricas convierten la energía del agua en movimiento en energía eléctrica mediante una turbina hidráulica acoplada a un generador síncrono. [12]

La potencia que se puede extraer de una cascada depende de su altura y caudal. Por lo tanto, el tamaño y la ubicación física de una planta hidroeléctrica dependen de estos dos factores. La potencia hidroeléctrica se puede calcular mediante la ecuación:

$$P = 9.8 \, qh$$

Donde

P = potencia hidráulica disponible [kW]

q = caudal del agua [m^3/s]

h = altura de la caída del agua [m]

9.8 = coeficiente para manejar las unidades

A causa de las pérdidas por fricción en los conductos de agua, de la carcasa de la turbina y de la turbina misma, la salida de potencia mecánica de la turbina es un poco menor que la calculada mediante la ecuación anteriormente. Sin embargo, la eficiencia de las grandes turbinas hidráulicas es de entre 90 y 94 por ciento. La eficiencia del generador es aún más alta, de entre 97 y 99 por ciento, dependiendo del tamaño del generador [12].

Una instalación hidroeléctrica se compone de represas, vías fluviales y conductos que forman un embalse y canalizan el agua hacia las turbinas. Éstos y otros elementos descritos nos permiten entender algunos componentes y características básicos de una planta hidroeléctrica (Figura 2.6).

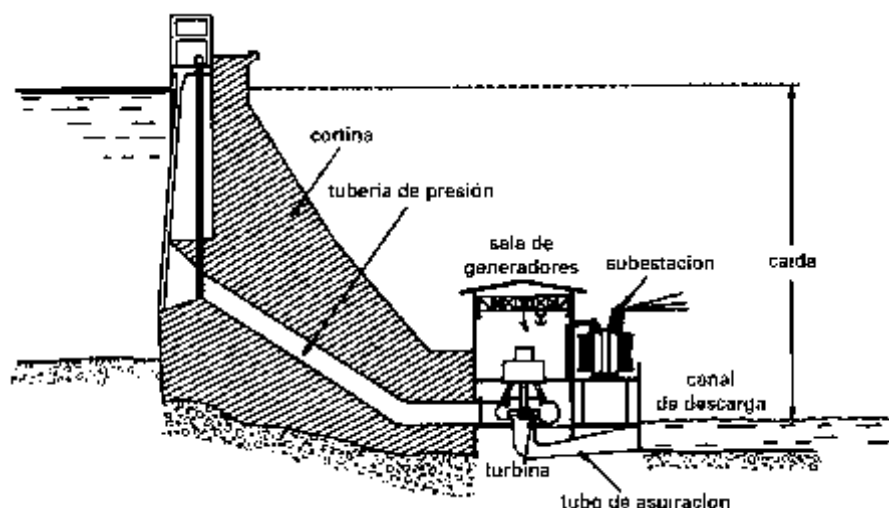


Figura 2.6 Vista de corte transversal de una planta hidroeléctrica

- **Cortinas.** Las cortinas hechas de tierra o concreto se construyen a través de lechos de ríos para crear embalses de almacenamiento. Los embalses compensan las precipitaciones reducidas durante las estaciones secas y los flujos anormales debidos a las lluvias intensas y derretimientos de nieve. Las cortinas permiten regular el flujo de agua durante todo el año para que la central eléctrica pueda funcionar casi a toda su capacidad.

Se proporcionan vertederos adyacentes a la cortina para descargar agua cuando el nivel del embalse suba demasiado. Hemos visto que la demanda de electricidad varía considerablemente a lo largo del día, y de una estación a otra. Por consiguiente, el agua disponible no siempre se puede utilizar para suministrar energía al sistema. Si el embalse de agua es pequeño o casi inexistente (como en plantas localizadas en tramos de ríos), desafortunadamente se tiene que dejar que el agua se derrame por el vertedero sin utilizarla.

Las cortinas sirven a menudo para un doble propósito, proporcionar irrigación y vías de navegación, además de su rol de generación de potencia.

- **Conductos, tuberías de presión y caja espiral.** En grandes instalaciones, los conductos conducen el agua del sitio de la presa a la planta de generación. Pueden ser canales abiertos o túneles cavados en la roca. Los conductos alimentan una o más tuberías de presión (enormes tubos de acero), las cuales llevan el agua a las turbinas individuales. Enormes válvulas, en ocasiones de varios metros de diámetro, permiten interrumpir el abasto de agua en los conductos. Las tuberías de presión canalizan el agua hacia la caja espiral que circunda el rodete o rotor (turbina) de modo que el agua se distribuya uniformemente alrededor de su circunferencia. Aspas guía y compuertas de mariposa controlan el agua para que fluya uniformemente hacia las aspas del rotor. Las compuertas de mariposa se abren y cierran en

respuesta a un poderoso mecanismo hidráulico controlado por los respectivos gobernadores de turbina.

- **Tubo de aspiración y canal de descarga.** El agua que ha pasado a través del rotor fluye entonces a través de un canal vertical cuidadosamente diseñado, llamado tubo de aspiración. Éste mejora la eficiencia hidráulica de la turbina. Conduce al canal de desfogue, el cual canaliza el agua corriente abajo del lecho del río.
- **Central eléctrica.** La central eléctrica contiene los generadores síncronos, transformadores, cortacircuitos, etc., y aparatos de control asociados. Los instrumentos, relevadores y medidores están en un cuarto central desde donde toda la planta puede ser monitoreada y controlada. Finalmente, muchos otros dispositivos (demasiado numerosos para mencionarlos aquí) conforman la planta hidroeléctrica completa [12].

2.3.2 Eólicas.

La energía extraída del viento ofrece un interesante complemento para las plantas de gas o carbón que generan electricidad. En esta sección examinaremos las propiedades del viento y cómo es utilizado actualmente para generar energía eléctrica.

El viento posee energía debido a su masa y velocidad. Por ejemplo, considere un metro cúbico de aire que se mueve a una velocidad de 10 m/s. Sabiendo que un metro cúbico tiene una masa de aproximadamente 1.2 kg, posee una energía cinética dada por:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 1.2 \times 10^2 = 60 J \quad (2.1)$$

Si se disminuye la velocidad del aire mediante algún dispositivo mecánico (como una turbina eólica), el aire cederá una parte de su energía cinética. Por consiguiente, la turbina eólica producirá una salida de potencia mecánica que se puede utilizar para impulsar un generador eléctrico.

Mediante la ecuación 2.1 podemos deducir que la potencia inherente del viento está dada por la fórmula aproximada:

$$P_a = 0.6v^3 \quad (2.2)$$

Donde

P_a = potencia por metro cuadrado de frente al viento [W/m^2]

v = velocidad del viento [m/s]

La ecuación (2.2) supone que el viento, si pudiera ser aprovechado por completo, sería detenido continuamente desde su velocidad original v . En la práctica, es imposible que una turbina eólica detenga completamente el viento. Por lo tanto, la potencia máxima que se puede extraer del viento es de 30 a 40% de la que resultó mediante la ecuación (2.2).

En lo referente a la intensidad, el viento se clasifica más o menos como sigue:

Brisa leve	3 m/s	11 km/h
Brisa moderada	7 m/s	25 km/h
Brisa fuerte	12 m/s	43 km/h
Ventarrón	18 m/s	65 km/h
Huracán	>32 m/s	>115 km/h

Para aplicaciones de potencia eólica, la velocidad del viento utilizable oscila entre 5 y 15 m/s.

Para utilizar el viento debemos considerar los siguientes factores:

- La velocidad del viento puede fluctuar 625% dentro de un periodo de unos cuantos minutos.
- Los cambios de dirección del viento; así, la orientación de la turbina se debe cambiar mientras el viento está soplando a fin de extraer la mayor cantidad de potencia eólica disponible.
- La constancia y velocidad del viento dependen de su ubicación. Por lo tanto, antes de elegir un lugar satisfactorio, se debe tener un registro anual de la dirección, velocidad y duración del viento.
- Siempre que la potencia eólica exceda la del generador, se deben tomar medidas para limitar la potencia eléctrica.
- Cuando entran en juego vientos huracanados o ventarrones, es necesario inclinar las aspas de la turbina como corresponda o detenerlas por completo para que no dañen la turbina y su torre.
- Por su gran altura, las aspas de la turbina son un blanco natural de rayos.
- La nieve y el aguanieve durante el invierno demandan a una particular atención.
- La potencia generada por una granja eólica casi siempre tiene que ser alimentada a una red de potencia existente.
- La energía eólica es gratuita y no contamina en absoluto.

Al estudiar las turbinas eólicas, limitaremos nuestros comentarios a los tipos de tres aspas que generan energía eléctrica en el rango de 100 kW a 3000 kW. Algunas turbinas eólicas están diseñadas para generar hasta 5 MW. En aplicaciones comerciales, las turbinas eólicas se agrupan en las llamadas granjas eólicas.

Para extraer la máxima energía del viento, la velocidad de rotación de la turbina debe ser una fracción específica de la velocidad del viento. Como regla general, y dependiendo de la potencia nominal de la turbina, la velocidad de la punta de las aspas debe ser entre 4 y 8 veces la velocidad del viento. Como la velocidad del viento puede cubrir un amplio rango, lo ideal es que la velocidad de rotación de la turbina sea variable. Sin embargo, muchas turbinas eólicas están diseñadas para operar básicamente a velocidad constante.

Se utilizan principalmente cinco métodos para generar electricidad a partir del viento:

1. Turbina que impulsa un generador de cd (Figura 2.7) [12].

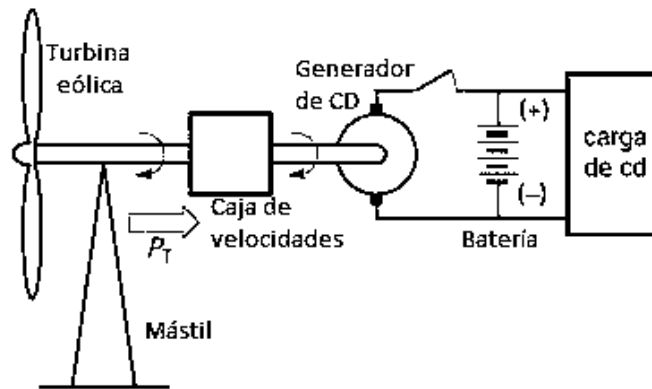


Figura 2.7 Molino de viento que impulsa un pequeño generador de cd.

2. Turbina que impulsa un generador asíncrono a velocidad constante (Figura 2.8). La velocidad del generador es prácticamente constante, así que no siempre puede extraer la máxima cantidad de energía del viento [12].

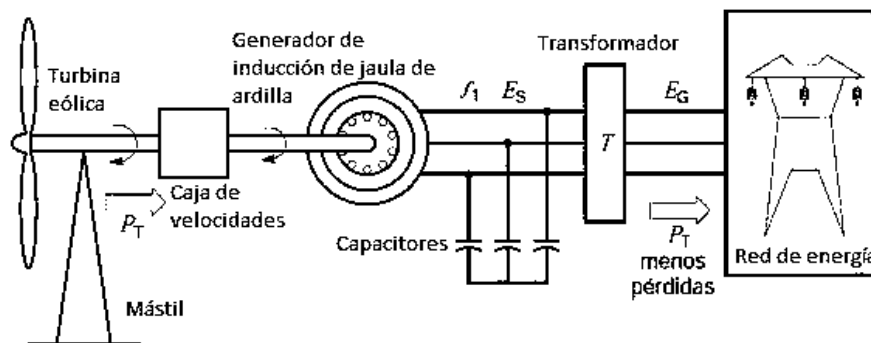


Figura 2.8 Turbina eólica que impulsa un generador asíncrono mediante una caja de velocidades.

3. Turbina que impulsa un generador asíncrono a velocidad variable (Figura 2.9). Esto permite extraer siempre la máxima energía del viento [12].

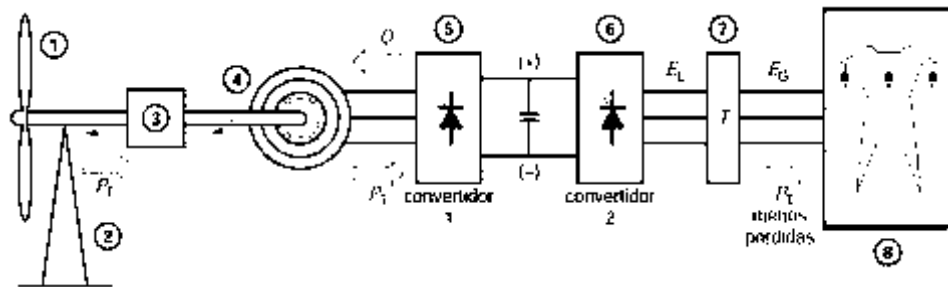


Figura 2.9 Turbina eólica que impulsa un generador asíncrono conectado a un convertidor de frecuencia variable.

4. Turbina que impulsa un generador de inducción doblemente alimentado a velocidad variable (Figura 2.10). Los convertidores 1 y 2 solo tienen que transportar una pequeña parte de la potencia P_T generada por la turbina eólica [12].

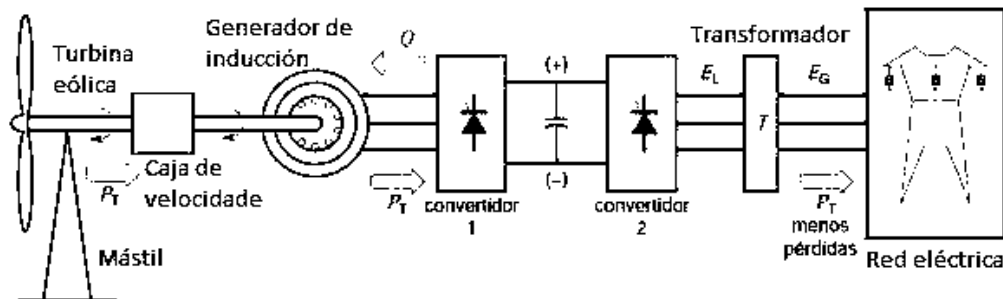


Figura 2.10 Turbina eólica conectada a un generador de inducción doblemente alimentado.

5. Turbina que impulsa un generador de imán permanente a velocidad variable (Figura 2.11). La ausencia de una caja de velocidades elimina un componente que en ocasiones requiere mantenimiento [12].

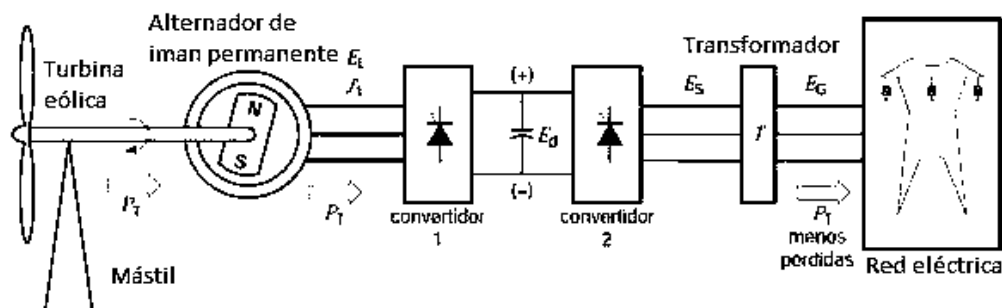


Figura 2.11 Turbina que impulsa directamente un alternador de imán permanente de alta potencia.

Ahora hablando especialmente de la turbina o aerogenerador Skystream, la competitividad, la bajada de precios, y la promoción de los dispositivos domésticos destinados a producir energía limpia, seguramente provocará un mayor aprovechamiento de las fuentes energéticas renovables en aquellos hogares bien soleados y/o expuestos al viento. El aerogenerador Skystream 3.7 es uno de esos productos que hace más fácil a los dueños de viviendas o pequeños negocios, tomar la decisión de aprovechar la energía eólica que cruza su propiedad.

Con la turbina Skystream 3.7 va a ser posible que muchos hogares puedan reducir o eliminar sus gastos de factura eléctrica, ya que su potencia nominal de 2.4kW permitirá cubrir las necesidades de entre el 40% y el 90%, dependiendo de la velocidad del viento y del consumo medio mensual. Pero este aerogenerador también destaca por su compacto diseño y fácil instalación, pues viene con controles e inversor incorporados. Es una forma silenciosa y asequible de protegerse de los crecientes gastos en electricidad.

Skystream se puede conectar directamente a la instalación de electricidad de la casa (sin necesidad de baterías). Si hay viento, los electrodomésticos funcionan alimentados (en parte) por la energía que proporcione la turbina; en caso contrario, el hogar es abastecido por la energía de la compañía eléctrica contratada. En días de fuertes vientos es posible aportar el exceso de energía a la compañía, produciendo más ahorro.

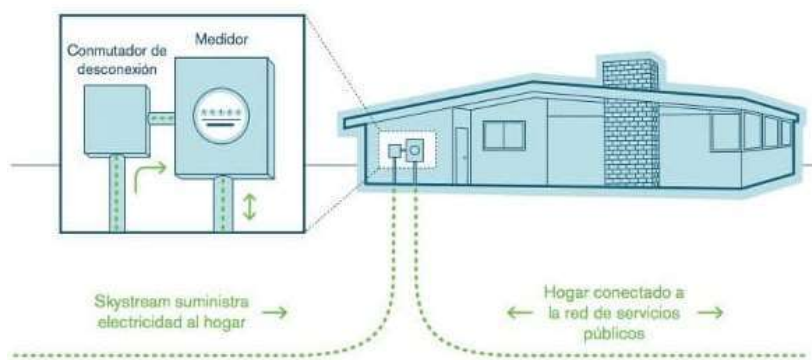


Figura 2.12 Forma en la que se suministra la energía eléctrica por la conexión que se realiza.

La turbina Skystream se puede instalar sobre una torre sin tensores, y opera a bajas revoluciones, contando con unas medidas de seguridad para protegerse de fuertes vientos (sin controles mecánicos). Opcionalmente puede llevar un monitoreo remoto con el fin de llevar un mayor control sobre su funcionamiento desde nuestra computadora.

El fabricante recomienda este tipo de aerogenerador para propiedades con un mínimo de 2,000m² despejadas de árboles y edificios, que las normativas locales permitan una estructura de 12.8m de altura, y que la compañía eléctrica tenga acuerdo de interconexión con los dueños de las viviendas.

2.3.3 Termosolares.

La distribución de la energía solar que llega a la Tierra no es uniforme. En la caracterización de la radiación solar incidente en la Tierra, con el objeto de estimar el potencial solar, intervienen diversos factores. Entre estos factores pueden señalarse:

- Las condiciones climatológicas, que influyen en el grado de nubosidad, la turbidez atmosférica, viento predominante, etc.
- Época del año.
- La latitud del lugar.
- Orientación de la superficie receptora.

En la Figura 2.13 se representa un mapa estimativo de la radiación solar en el mundo, en watt sobre m². Puede observarse que la radiación es superior en las zonas ecuatoriales y tropicales e inferior en las zonas polares.

La tecnología actual que se utiliza para captar la energía solar directa y convertirla en una forma eficiente de energía se ha desarrollado en dos direcciones (4) [10].

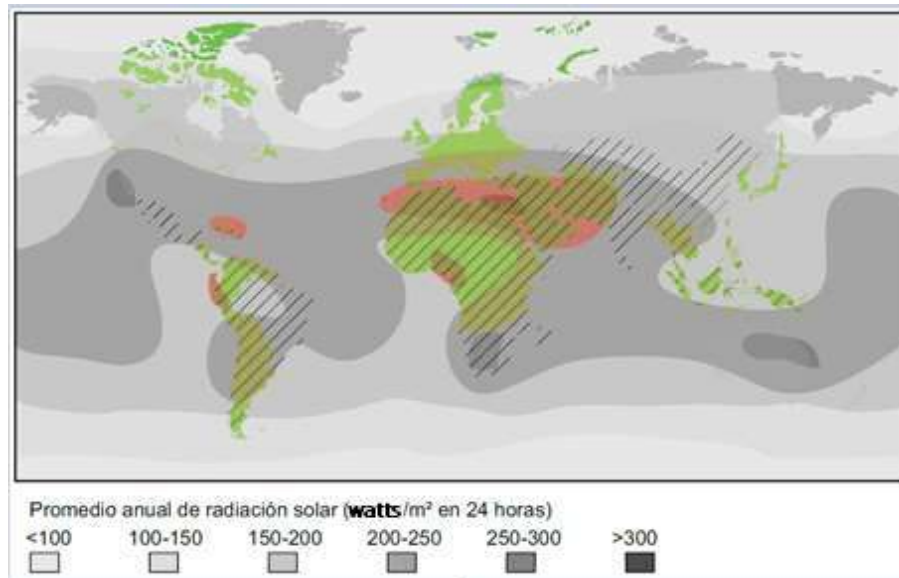


Figura 2.13 Mapa estimativo de la radiación solar en el mundo.

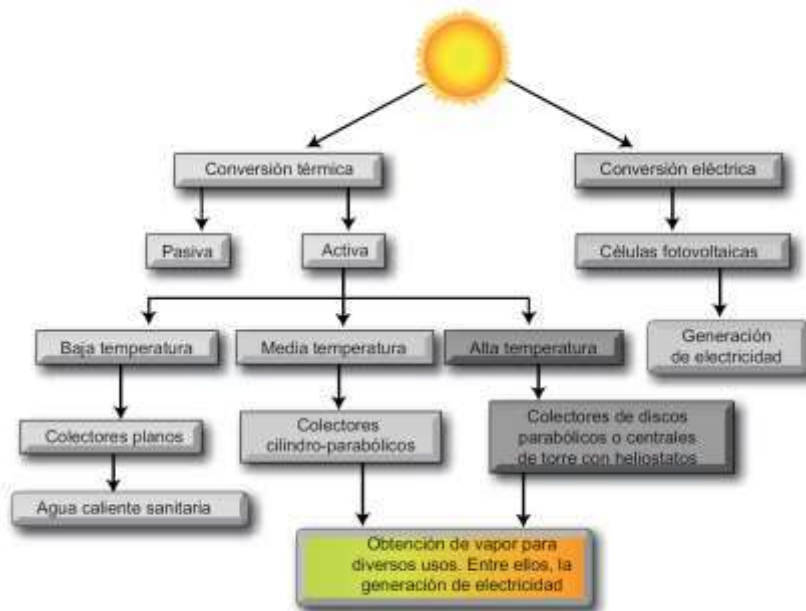


Figura 2.14 Clasificación de las tecnologías de aprovechamiento de la energía solar.

La tecnología utilizada en la captación de la energía solar térmica de forma activa se puede clasificar, en función del margen de temperatura que se requiera, en tecnologías de (Figura 2.15):

- Baja temperatura ($T < 90\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Media temperatura ($90\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 400\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Alta temperatura ($T > 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) [10].

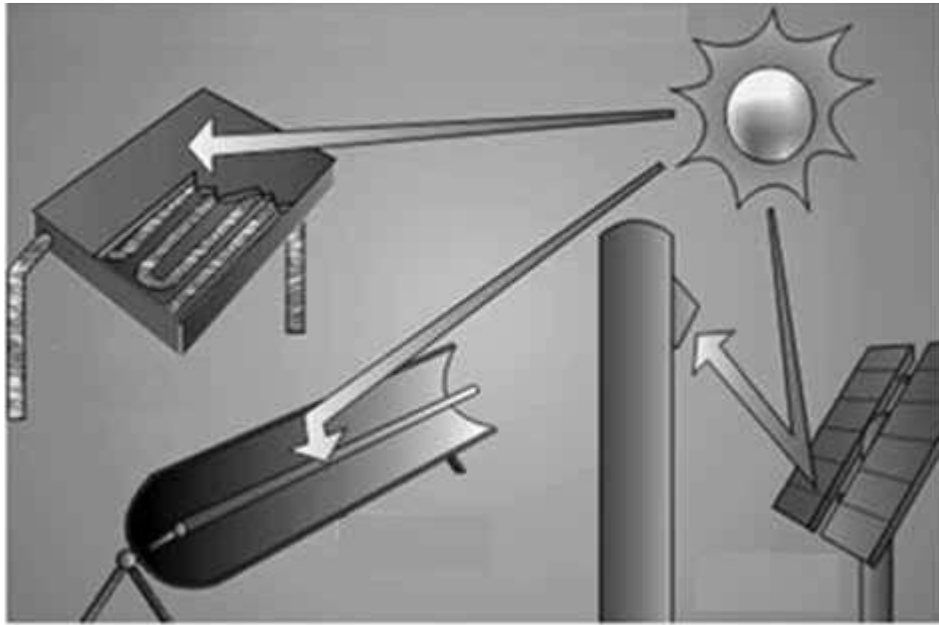


Figura 2.15 Formas de aprovechamiento térmico.

La tecnología solar térmica de media temperatura suele tener dos aplicaciones diferentes:

La **producción de calor** en procesos industriales. Por ejemplo, vapor a temperaturas superiores a los 150 °C.

La **generación de electricidad** mediante la conexión del fluido caliente (hasta 400 °C) utilizado por los colectores a un sistema convencional de producción de electricidad a partir de un ciclo térmico [10].

2.3.4 Fotovoltaicas.

La energía solar fotovoltaica se basa en la utilización de células solares o fotovoltaicas, fabricadas con materiales semiconductores cristalinos que, por efecto fotovoltaico, generan corriente eléctrica cuando sobre los mismos incide la radiación solar. El silicio es la base de la mayoría de los materiales más ampliamente utilizados en el mundo para la construcción de células solares [10].

Desde el punto de vista de su capacidad para conducir la electricidad los materiales se clasifican en conductores y en aislantes.

En los materiales denominados conductores sus átomos disponen de electrones en su capa más externa (electrones de valencia), que no están muy ligados al núcleo y, por tanto, se pueden desplazar fácilmente de un átomo a otro; basta que exista una pequeña diferencia de potencial.

En los materiales aislantes los electrones de valencia están fuertemente atados al núcleo, por tanto, para poder desplazarse requieren de grandes diferencias de potencial.

Entre estas dos clases de materiales se encuentran los denominados semiconductores. Los electrones de valencia de los materiales semiconductores de una célula solar fotovoltaica presentan una cierta ligazón con el núcleo, pero son arrancados por la energía de los fotones de la radiación solar que incide sobre ellos. Este fenómeno se denomina efecto fotovoltaico [10].

Una primera observación que se puede hacer de este tipo de instalaciones es que estas plantas solares pueden ser estáticas o con seguidores, y en este segundo caso, con seguidor a uno o dos ejes. En la Figura 2. puede verse parte de una planta de estructura estática y en las Figura 2.13 y Figura 2.14 los esquemas de estructura estática y de seguidores a un eje y dos ejes respectivamente [10].

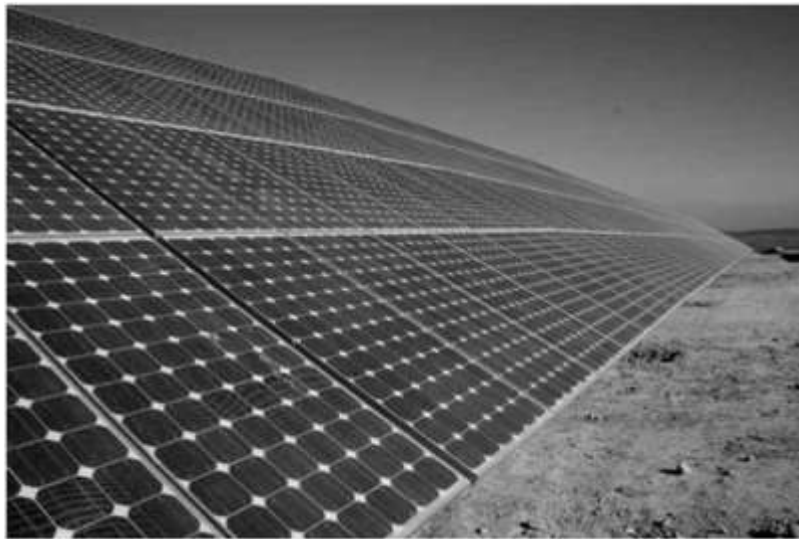


Figura 2.16 Planta fotovoltaica de estructura estática.



Figura 2.17 Esquema de estructura estática.

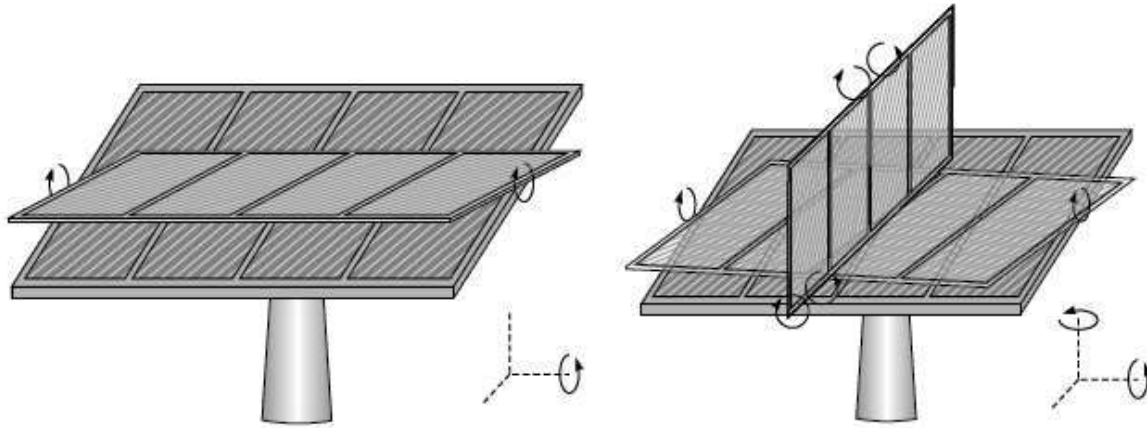


Figura 2.18 a) Esquema seguidor de un eje. b) Esquema seguidor dos ejes.

2.3.4.1 Plantas Fijas.

En las plantas fijas, no se permite mover el módulo fotovoltaico para que se encuentre enfrenteado al sol en todo momento. La inclinación del panel solar, será la óptima para recibir la mayor irradiación a lo largo del año y dependerá de la altitud en que instalemos el panel. Existe la posibilidad de que se pueda regular la inclinación, caso en que se elegirá una para verano y otra para invierno.

La tecnología óptima para la instalación en plantas fijas es tecnología convencional, puesto que la tecnología de concentración no es económicamente viable. Para la instalación de plantas fotovoltaicas, existen ciertos requerimientos como:

- El clima (DNI, GHI).
- La orografía.
- Disponibilidad de conexión eléctrica a la red.

El terreno aproximado para la instalación de una planta fija de un 1 MW para tecnología convencional viene definido junto a las dimensiones del ancho (x en metros) y el largo (y en metros) de un rectángulo que simula las dimensiones de la planta (Figura 2.).

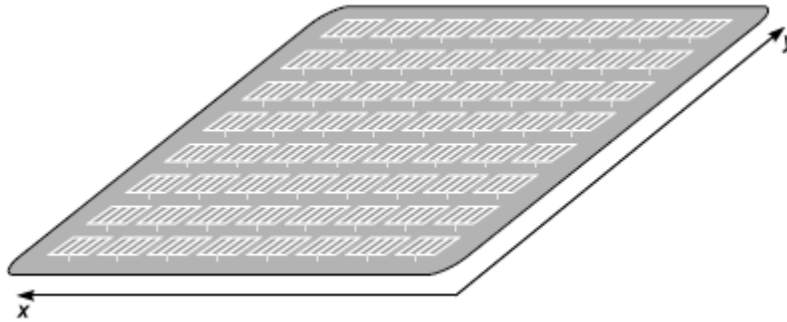


Figura 2.19 Planta fija de 1 MW para tecnología convencional.

Tabla 2.1 Ocupación de terreno de una planta fija de 1 MW.

1 MW	Convencional
Plantas fijas	1.4 ha
Ocupación del terreno*	$x = 120 \text{ m}$ $y = 120 \text{ m}$
*Para unas condiciones de radiación en torno a los 2,120 kWh/m ² y año.	

2.3.4.2 Plantas con Seguidores.

Con las plantas fotovoltaicas de módulos con seguidores tanto de un eje como de dos 2 ejes se permite un seguimiento muy exacto del sol que conduce a la obtención de altos rendimientos.

La tecnología fotovoltaica con seguidores es la adecuada para zonas con media y alta radiación. Es una tecnología ampliamente demostrada desde hace años, con un mercado muy extenso debido a sus características como energía distribuida. En este caso existen unos costos de mantenimiento, que, aunque pueden considerarse bajos, deben tenerse en cuenta frente a los costos casi nulos que por este concepto tienen las instalaciones fijas.

Las tecnologías óptimas para la instalación en plantas con seguidores son la tecnología convencional y *thin film*.

El terreno aproximado para la instalación de una planta con seguidores de un 1 MW para las diferentes tecnologías viene definido junto a las dimensiones del ancho (x en metros) y el largo (y en metros) de un rectángulo que simula las dimensiones de la planta como se muestra en la tabla 2.2.

1 MW	Convencional
Plantas seguidor 1 eje*	4.6 ha
	$x = 215 \text{ m}$
	$y = 215 \text{ m}$
Plantas Seguidor 2 ejes*	5 ha
	$x = 225 \text{ m}$
	$y = 225 \text{ m}$
*Para unas condiciones de radiación en torno a los 2.120 kWh/m ² y año.	

Tabla 2.2 Ocupación de terreno de una planta con seguidores de 1 MW.

Deben compararse aquí las 5 ha que se requieren para una planta de 1 MW con seguidor a dos ejes, frente a las 4.6 ha en el caso de seguidor en un eje (aproximadamente un 10% menos que en el primer caso), o sobre todo las solamente 1.4 ha que supone para una planta con estructura fija de igual potencia. Estas diferencias significativas deben tenerse en cuenta a la hora de apostar por uno u otro sistema, muy especialmente cuando el terreno sea un condicionante.

Otro elemento a considerar, antes de apostar por el tipo de planta, es que una instalación con seguidor a un eje viene a dar entre un 15% y un 20% más de energía que una instalación fija y en el caso de dos seguidores, entre el 30% y el 35% más que las estáticas.

Evidentemente, además de lo comentado en los dos párrafos anteriores, el costo de los diferentes sistemas varía, siendo más caras cuanto más complejas, como ya se ha apuntado.

Pensando en la amortización de sistema, a la hora de elegir entre uno u otro tipo (el equivalente de los intereses de los bancos, a la pregunta de ¿qué es mejor, plazo fijo o plazo variable?), en este caso tenemos que conjugar tres elementos, el terreno, el capital y la radiación del lugar [10].

2.3.5 Biomasa.

Como la mayoría de las fuentes de energía renovables, la energía de la biomasa procede originariamente del Sol (Figura 2.). Se podría sintetizar diciendo que la biomasa es la energía solar convertida por la vegetación, mediante el proceso de fotosíntesis, en materia orgánica (energía química almacenada).

Sin embargo, hay que señalar que la biomasa puede ser primaria (producto directo de la fotosíntesis) o secundaria, la cual recibe la energía del Sol de forma indirecta (por ejemplo, excrementos de animales y fangos residuales).

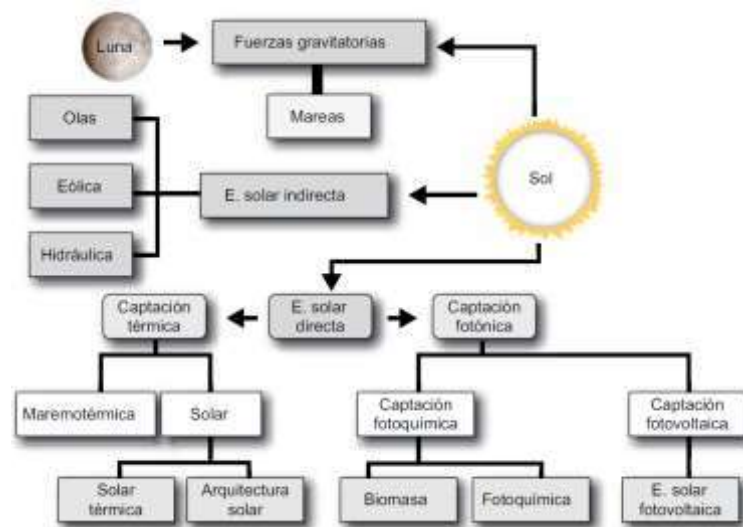


Figura 2.20 Origen de la Biomasa.

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético la biomasa puede clasificarse en dos categorías, biomasa de residuos y biomasa de cultivos energéticos.

A su vez, la biomasa de residuos puede diferenciarse en cuatro categorías: residuos urbanos, residuos agrícolas, residuos ganaderos y residuos forestales (Figura 2.21).

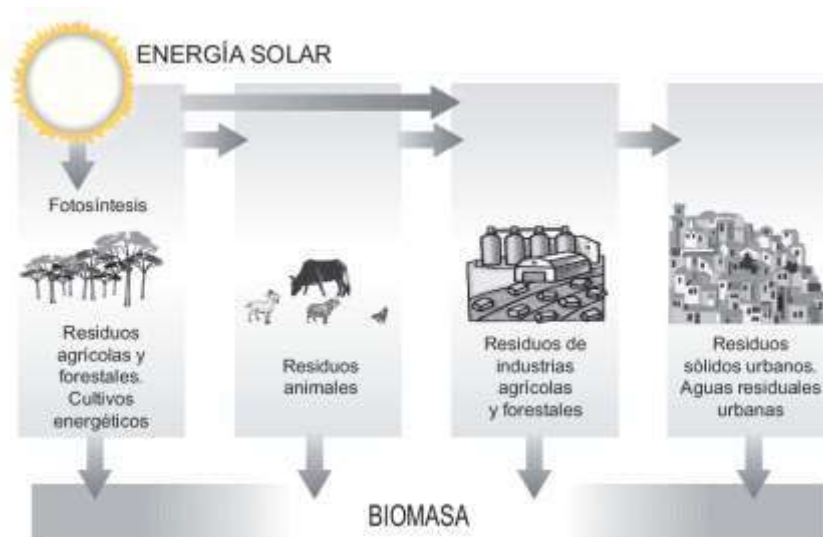


Figura 2.21 Fuentes de Biomasa.

Asimismo, diversas actividades industriales que manejan biomasa vegetal o animal generan subproductos. Por último, los núcleos de población, fruto de la actividad cotidiana de sus habitantes, también generan residuos sólidos (residuos sólidos urbanos) y residuos líquidos (aguas residuales urbanas) (Figura 2.22).

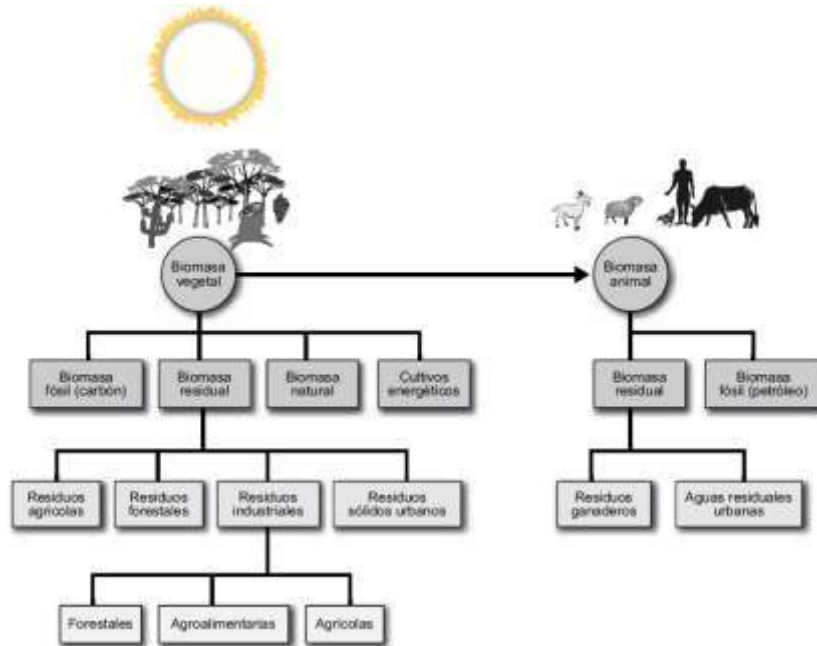


Figura 2.22 Clasificación de las fuentes de Biomasa.

Existen diferentes formas de transformar la energía química de la biomasa en otro tipo de energía. La forma más común y sencilla consiste en quemarla directamente en un horno y usar el calor generado para producir vapor que se utiliza como medio de calefacción o para accionar una turbina que, acoplada a un generador eléctrico, produce electricidad (Figura 2.23).

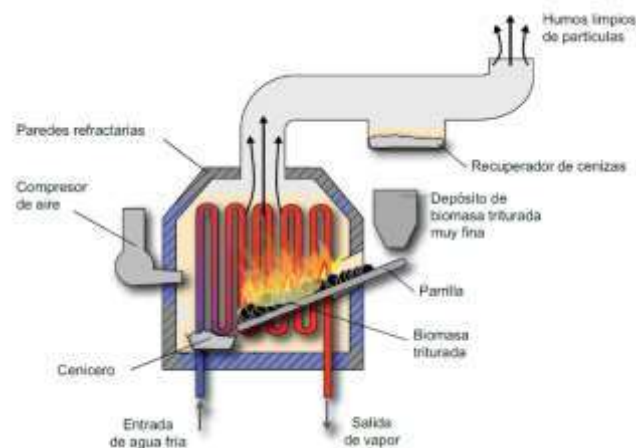


Figura 2.23 Generación de vapor por Combustión Directa.

Una segunda técnica consiste en utilizar procesos termo-químicos de conversión (carbonización, gasificación y pirolisis) con los cuales se pueden obtener combustibles gaseosos o líquidos, que pueden ser empleados en un proceso de combustión y producir calor o generar electricidad.

Otra técnica utiliza procesos físico-químicos (transesterificación) para obtener combustibles líquidos que se pueden destinar, previo proceso de combustión, a la producción de calor o la generación de electricidad.

Asimismo, existen técnicas de conversión bioquímica (fermentación alcohólica, digestión anaeróbica, descomposición aeróbica) con las que se pueden obtener combustibles gaseosos y líquidos con los cuales generar calor y electricidad o, en el caso del producto (compost) obtenido con la descomposición aeróbica (presencia de oxígeno), aprovechar el calor liberado en el proceso mediante el empleo de una bomba de calor para suministrar calor a baja temperatura.

La biomasa, desde el punto de vista medioambiental, podría considerarse como una sustitución directa de los combustibles fósiles, particularmente del carbón, ya que se quema o gasifica de una manera análoga a como lo hace el carbón y, como el carbón, produce emisiones atmosféricas, principalmente dióxido de carbono, sin embargo, existen diferencias importantes [10].

Una central de producción de electricidad con turbinas que se accionan con gas procedente de la biomasa es similar a una central de vapor convencional (Figura 2.24), excepto que, en vez de quemar el combustible para producir vapor y con él accionar las turbinas, éstas se accionan directamente con los gases calientes de la combustión de la biomasa, (Figura 2.25).

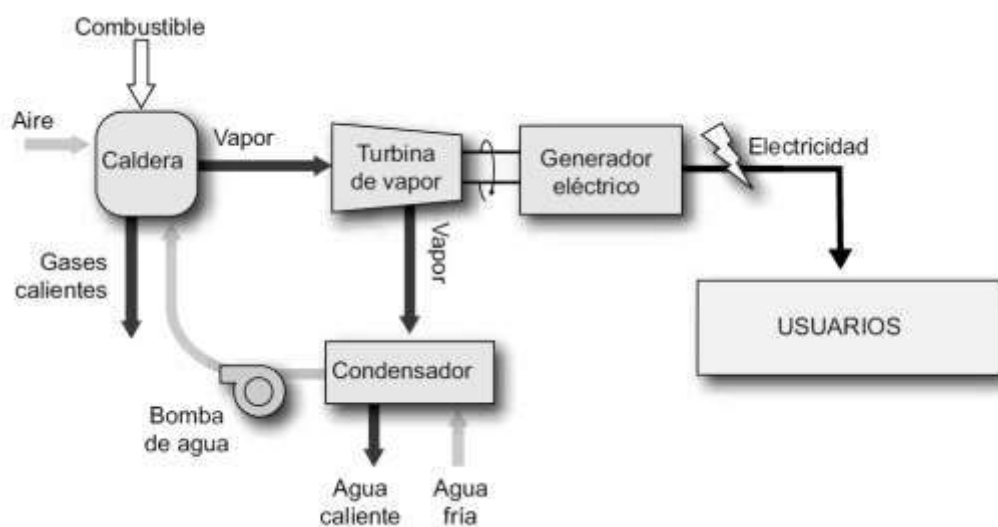


Figura 2.24 Esquema conceptual de una central convencional de turbina de vapor.

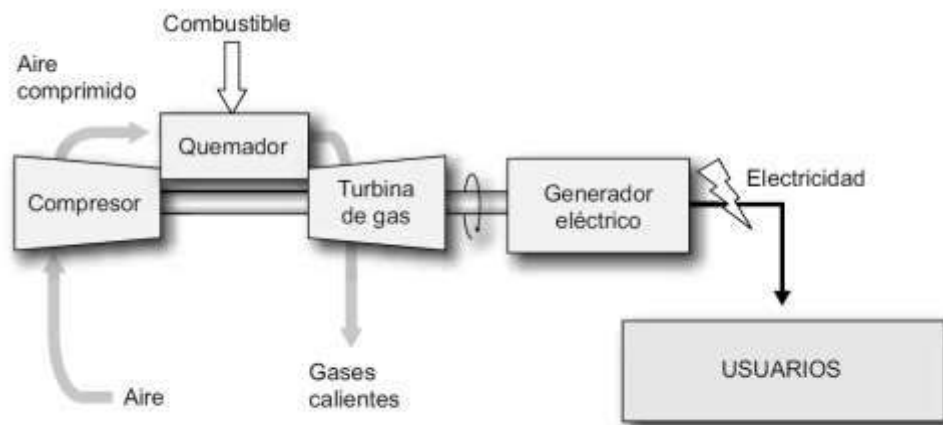


Figura 2.25 Esquema conceptual de una central de turbina de gas.

La biomasa vegetal cuando crece toma dióxido de carbono de la atmósfera durante el proceso de fotosíntesis. Por tanto, durante el ciclo completo de crecimiento, cosecha y combustión existe un equilibrio neto entre la adición y sustracción de dióxido de carbono a la atmósfera. Sin embargo, la principal diferencia entre biomasa y carbón consiste en que la biomasa no contiene sulfuros y, por tanto, las centrales de gas procedentes de biomasa no precisan de tratamientos para eliminar los dióxidos de sulfuro antes de liberar las emisiones a la atmósfera [10].

2.4 Aerogenerador Skystream.

La turbina personal original del viento de Skystream diseñada para los hogares y los negocios, la Skystream pavimentó la manera mientras que el primer aero generador personal inclusivo del viento (con los controles y el inversor construidos adentro) diseñado para trabajar en vientos muy bajos. Produce hasta 400 kilowatts-hora de electricidad limpia por mes y viene completo con Skyview que supervisa el software, así que usted puede seguir en directo el funcionamiento de Skystream de su computadora.

Los aerogeneradores domésticos son la nueva revolución industrial ya que puede trabajar en áreas urbanas y comerciales debido a su bajo nivel de ruido, es muy eficiente, versátil, atractivo y en su mayoría silencioso. Gracias a su regulador integrado y su inversor permite carga directa de la red de inyección 220 V/60 Hz, produce energía con brisas de 3.5 m/s lo que da su capacidad total de 10.3 m/s. un nivel de ruido muy bajo permite su instalación en áreas residenciales y el diseño de sus cuchillas hace que su cuerpo y su impacto visual sean mínimos.

Los aerogeneradores producen electricidad aprovechando la energía natural del viento para impulsar un generador. El viento es una fuente de energía limpia, sostenible que nunca se agota, y la transformación de su energía cinética en energía eléctrica no produce emisiones.

Los aerogeneradores son la evolución natural de los molinos de viento y hoy en día son aparatos de alta tecnología. La mayoría de turbinas genera electricidad desde que el viento logra una velocidad de entre 3 y 4 metros por segundo, genera una potencia máxima de 15 metros por segundo y se desconecta para prevenir daños cuando hay tormentas con vientos que soplan a velocidades medias superiores a 25 metros por segundo durante un intervalo temporal de 10 minutos.

Especificaciones técnicas:

- Potencia nominal: 1.9 kW nominal de salida a 9 m/s.
- Potencia máxima: 2.6 kW.
- Rotor: Motor de imanes permanentes sin escobillas.
- Voltaje de salida: 240 VCA.
- Estimación de producción de energía: 400 KWh por mes a 12 MPH (5.4 M/s).
- Peso: 77 kg.
- Altura: Torres de 10.4 m o 21.3 m.

En la figura 2.26 se muestran las partes características del aerogenerador.

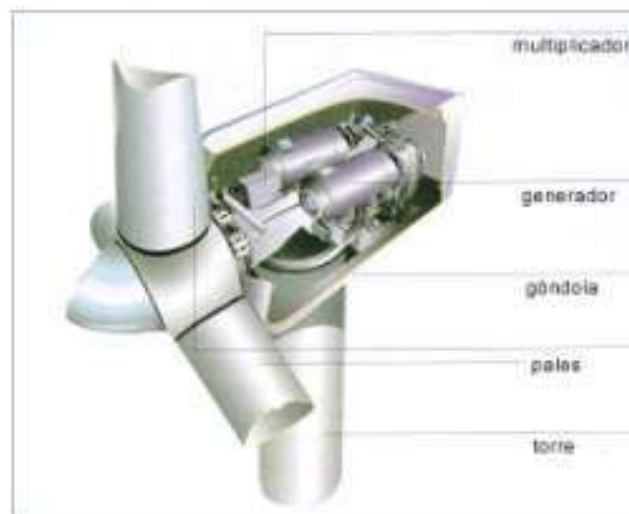


Figura 2.26 Aerogenerador Skystream.

Generar energía a partir del viento es simple. El viento pasa sobre las aspas del aerogenerador y provoca una fuerza giratoria. Las palas hacen rodar un eje que hay dentro de la góndola, que entra a una caja de

cambios. La caja de cambios incrementa la velocidad de rotación del eje proveniente del rotor e impulsa el generador que utiliza campos magnéticos para convertir la energía rotacional en energía eléctrica.

La energía del generador, de 690 volts, pasa por un transformador para adaptarla al voltaje necesario de la red de distribución, generalmente de entre 20 y 132 kilovolts. Las redes regionales de distribución eléctrica reparten la energía por todo el país, tanto para hogares como negocios.

Tanto los aerogeneradores terrestres como los marinos tienen en la parte superior de la góndola dos instrumentos que miden la velocidad y la dirección del viento. Cuando el viento cambia de dirección, los motores giran la góndola y las palas se mueven con ella para ponerse de cara al viento. Las aspas también se inclinan o se ponen en ángulo para asegurar que se extrae la cantidad óptima de energía a partir del viento.

Toda esta información queda grabada en los ordenadores y se transmite a un centro de control. En los parques eólicos, que son agrupaciones de más de un aerogenerador, hay entre 0 y 6 personas trabajando físicamente, en función de la cantidad de aerogeneradores. Cada aerogenerador es revisado periódicamente. Los ordenadores controlan los diferentes componentes de la turbina y, si detectan un problema, hacen que la turbina deje de funcionar y alertan a un técnico o ingeniero para que la revise [11].

2.4.1 Aerogeneradores con eje vertical.

Los aerogeneradores de eje vertical no necesitan mecanismo de orientación y el generador eléctrico puede ir al suelo. Pero su producción energética es menor, respecto a un aerogenerador convencional de la misma potencia y se han de motorizar para facilitar su puesta en marcha.

Sus principales ventajas son que no necesita un sistema de orientación al ser omnidireccional y que el generador, multiplicador, etc., son instalados a ras de suelo, lo que facilita su mantenimiento y disminuyen sus costes de montaje. Sus desventajas frente a otro tipo de aerogeneradores son sus menores eficiencias, la necesidad de sistemas exteriores de arranque en algunos modelos, y que el desmontaje del rotor para tareas de mantenimiento hace necesaria que toda la maquinaria del aerogenerador sea desmontada.

Aerogenerador con rotor Savonius. Es el modelo más simple de rotor, consiste en cilindros huecos desplazados respecto su eje, de forma que ofrecen la parte cóncava al empuje del viento, ofreciendo su parte convexa una menor resistencia al giro. Se suele mejorar su diseño dejando un espacio entre ambas caras para evitar la sobre presión en el interior de la parte cóncava. Pueden construirse superponiendo varios elementos sobre el eje de giro.

No son útiles para la generación de electricidad debido a su elevada resistencia al aire. Su bajo costo y fácil construcción les hace útiles para aplicaciones mecánicas. En la figura 2.27 se muestra el aerogenerador Savonius.



Figura 2.27 Aerogenerador tipo Savonius.

2.4.1.1 Aerogenerador con rotor Darrieus.

Patentado por G.J.M. Darrieus en 1931, es el modelo de los aerogeneradores de eje vertical de más éxito comercial. Consiste en un eje vertical asentado sobre el rotor, con dos o más finas palas en curva unidas al eje por los dos extremos, el diseño de las palas es simétrico y similar a las alas de un avión, el modelo de curva utilizado para la unión de las palas entre los extremos del rotor es el de Tropo Skien, aunque puede utilizarse también catenarias. Evita la necesidad de diseños complejos en las palas como los necesarios en los generadores de eje horizontal, permite mayores velocidades que las del rotor Savonius, aunque sin alcanzar las generadas por los modelos de eje horizontal, pero necesita de un sistema externo de arranque. En la figura 2.28 se muestra el aerogenerador Darrieus.



Figura 2.28Aerogenerador tipo Darrieus.

2.4.1.2 Aerogenerador con rotor Giromill.

Este tipo de generadores también fueron patentados por G.J.M. Darrieus. Consisten en palas verticales unidas al eje por unos brazos horizontales, que pueden salir por los extremos del aspa e incluso desde su parte central. Las palas verticales cambian su orientación a medida que se produce el giro del rotor para un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento como se muestra en la figura 2.29.



Figura 2.29 Aerogenerador tipo Giromill.

2.4.1.3 Aerogenerador con rotor Windside.

Es un sistema similar al rotor Savonius, en vez de la estructura cilíndrica para aprovechamiento del viento, consiste en un perfil alabeado con torsión que asciende por el eje vertical. La principal diferencia frente a otros sistemas de eje vertical es el aprovechamiento del concepto aerodinámico, que le acerca a las eficiencias de los aerogeneradores de eje horizontal así se muestra en la siguiente figura 2.30.



Figura 2.30Aerogenerador tipo Windside.

2.4.1.4 Torres tubulares.

Consisten en grandes tubos de acero de forma tubular o cónica que ofrecen en su interior espacio para los equipos de suelo y para el acceso a resguardo hacia la góndola. Necesitan de una instalación más laboriosa y cara, pero ofrecen una mayor resistencia y menos mantenimiento necesario que las torres de celosía. Son las más empleadas en equipos de generación de energía.



Figura 2.31 Aerogenerador con Torre Tubular.

2.4.2 Aerogeneradores con eje horizontal.

Los de eje horizontal son los más utilizados y permiten cubrir desde aplicaciones aisladas de pequeña potencia hasta instalaciones en grandes parques eólicos.

Un aerogenerador de eje horizontal es, básicamente, una máquina rotacional, movimiento el cual es producido por la energía cinética del viento, cuando éste actúa sobre un rotor que normalmente dispone de tres palas. El movimiento rotacional producido es transmitido y multiplicado mediante un multiplicador de velocidad, hasta un generador que produce la energía eléctrica. Todos estos componentes se instalan sobre una góndola que se sitúa arriba de una torre de apoyo.

En la actualidad la gran mayoría de los aerogeneradores que se construyen conectados a red son tripala de eje horizontal. Los aerogeneradores horizontales tienen una mayor eficiencia energética y alcanzan mayores velocidades de rotación por lo que necesitan caja de engranajes con menor relación de multiplicación de giro, además debido a la construcción elevada sobre torre aprovechan en mayor medida el aumento de la velocidad del viento con la altura.

Los modelos de eje horizontal puede subdividirse a su vez por el número de palas empleado, por la orientación respecto a la dirección dominante del viento y por el tipo de torre utilizada:

Tripala. Es el más empleado en la actualidad, consta de 3 palas colocadas formando 120º entre sí. Un mayor número de palas aumenta el peso y coste del aerogenerador, por lo que no se emplean diseños de mayor número de palas para fines generadores de energía de forma comercial, aunque si para fines mecánicos como bombeo de agua etc. En la figura 2.32 se muestran sus características.



Figura 2.32 Aerogenerador tipo Tripala.

2.4.2.1 Aerogenerador Bipala.

Ahorra el peso y coste de una de las palas respecto a los aerogeneradores tripala, pero necesitan mayores velocidades de giro para producir la misma energía que aquellos. Para evitar el efecto desestabilizador necesitan de un diseño mucho más complejo, con un rotor basculante y amortiguadores que eviten el choque de las palas contra la torre como se muestra en la siguiente figura 2.33.



Figura 2.33 Aerogenerador Bipala.

2.4.2.2 Aerogenerador Monopala.

Tienen, en mayor medida, los mismos inconvenientes que los bipala, necesitan un contrapeso en el lado opuesto de la pala, por lo que el ahorro en peso no es tan significativo. En la figura 2.34 se muestra al aerogenerador monopala.



Figura 2.34 Aerogenerador Monopala.

2.4.2.3 Orientadas a barlovento.

Cuando el rotor se encuentra enfocado de frente a la dirección del viento dominante, consigue un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento que en la opción contraria o sotavento, pero necesita un mecanismo de orientación hacia el viento. Es el caso inmensamente preferido para el diseño actual de aerogeneradores.



Figura 2.35 Aerogenerador orientado Barlovento.

2.4.2.4 Orientadas a sotavento.

Cuando el rotor se encuentra enfocado en sentido contrario a la dirección del viento dominante, la estructura de la torre y la góndola disminuye el aprovechamiento del viento por el rotor, en este caso el viento es el que orienta con su propia fuerza a la góndola, por lo que no son necesarios elementos de reorientación automatizada en la teoría, aunque si suelen utilizarse como elemento de seguridad. Las palas y la góndola son contruidos con una mayor flexibilidad que en el caso de orientadas a barlovento. La figura 2.36 muestra el aerogenerador orientado a sotavento.



Figura 2.35 Aerogenerador orientado a Sotavento.

2.4.2.5 Torres de celosía.

Son las construidas mediante perfiles de acero unidos mediante tornillería. Son muy baratas y fáciles de construir pero necesitan de verificaciones periódicas de la correcta sujeción de los segmentos de acero entre sí. Necesitan un emplazamiento extra para la instalación de los equipos de suelo como sistemas de control o equipos eléctricos, el acceso a la góndola se realiza por escalerillas exteriores de baja protección frente a fuertes vientos y condiciones climáticas adversas. No se utilizan en zonas geográficas septentrionales o para aerogeneradores de gran potencia como se muestra en la figura 2.37.



Figura 2.37 Aerogenerador tipo Torre de Celosía.

Cada aerogenerador dispone de un microprocesador que controla y regula sus variables de puesta en marcha, funcionamiento y paro, transmitiendo toda esta información a la central de control de la instalación. Igualmente, cada aerogenerador incorpora, en la base de la torre, un armario con todos los componentes eléctricos. Previos al transporte de la energía eléctrica generada hasta la conexión con la red o los puntos de consumo [12].

2.4.3 Aerogenerador según la potencia suministrada.

2.4.3.1 Equipos de baja potencia.

Históricamente son los asociados a utilización mecánica como bombeo del agua, proporcionan potencias alrededor del rango de 50 KW, aunque pueden utilizarse varios equipos adyacentes para aumentar la potencia total suministrada. Hoy en día siguen utilizándose como fuente de energía para sistemas mecánicos o como suministro de energía en equipos aislados.

También se utilizan en grupo y junto con sistemas de respaldo como motores de gasolina para suministro de energía de zonas rurales o edificios, ya sea conectándose a red o con baterías para almacenar la energía producida y garantizar la continuidad de la cobertura energética.

2.4.3.2 Equipos de media potencia.

Son los que se encuentran en el rango de producción de energía de 150 KW. Son utilizados de forma similar a los equipos de baja potencia pero para mayores requerimientos energéticos. No suelen estar conectados a baterías de almacenamiento, por lo que se utilizan conectados a red o junto con sistemas de respaldo.

2.4.3.3 Equipos de alta potencia.

Son los utilizados para producción de energía de forma comercial, aparecen conectados a red y en grupos conformando centrales eólicas, ya sea en tierra como en entorno marino. Su producción llega hasta el orden del gigawatt. El diseño elegido mayoritariamente para estos equipos son los aerogeneradores de eje horizontal tripala, orientados a barlovento y con torre tubular [12].

Capítulo 3. Rectificadores.

3.1 Clasificación.

Tipo de circuito destinado a convertir la corriente alterna en corriente continua, los cuales son ampliamente utilizados en la industria para alimentar motores de corriente continua de alta potencia, así como; su uso en los equipos electrodomésticos para la alimentación de sus diferentes circuitos. Su componente fundamental para diseñarlos son los diodos rectificadores.

En electrónica, un rectificador es el elemento o circuito que permite convertir la corriente alterna en corriente continua. Esto se realiza utilizando diodos rectificadores, ya sean semiconductores de estado sólido, válvulas al vacío o válvulas gaseosas como las de vapor de mercurio (actualmente en desuso).

Dependiendo de las características de la alimentación en corriente alterna que emplean, se les clasifica en monofásicos, cuando están alimentados por una fase de la red eléctrica, o trifásicos cuando se alimentan por tres fases.

Atendiendo al tipo de rectificación, pueden ser de media onda, cuando sólo se utiliza uno de los semiciclos de la corriente, o de onda completa, donde ambos semiciclos son aprovechados [13].

3.1.1 Rectificador monofásico de media onda.

La función de este circuito es eliminar uno de los dos semiperiodos de una señal alterna senoidal, proveniente del secundario del transformador. El componente electrónico que se usa para este fin es el diodo, que tiene la propiedad de conducir en un solo sentido. La función de este circuito es eliminar uno de los dos semiperiodos de una señal alterna senoidal, proveniente del secundario del transformador. El componente electrónico que se usa para este fin es el diodo, que tiene la propiedad de conducir en un solo sentido.

El esquema y las formas de onda son las que se representan en la figura 3.1.

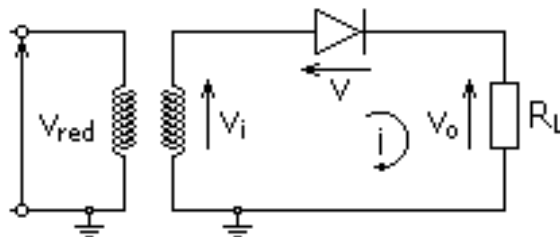


Figura 3.1 Circuito rectificador de media onda.

Es construido con un diodo ya que este puede mantener el flujo de corriente en una sola dirección, se puede utilizar para cambiar una señal de corriente alterna a una de corriente continua se muestra un circuito rectificador de media onda. Cuando la tensión de entrada es positiva, el diodo se polariza en directo y se puede sustituir por un corto circuito. Si la tensión de entrada es negativa el diodo se polariza en inverso y se puede remplazar por un circuito abierto. Por tanto cuando el diodo se polariza en directo, la tensión de salida a través de la carga se puede hallar por medio de la relación de un divisor de tensión. Sabemos además que el diodo requiere 0.7 volts para polarizarse, así que la tensión de salida está reducida en esta cantidad (este voltaje depende del material de la juntura del diodo). Cuando la polarización es inversa, la corriente es cero, de manera que la tensión de salida también es cero. Este rectificador no es muy eficiente debido a que durante la mitad de cada ciclo la entrada se bloquea completamente desde la salida, perdiendo así la mitad de la tensión de alimentación. El voltaje de salida en este tipo de rectificador es aproximadamente 0.45 veces el voltaje eficaz de la señal de entrada. La forma de onda que observamos a la salida se muestra en la figura 3.2. [13].

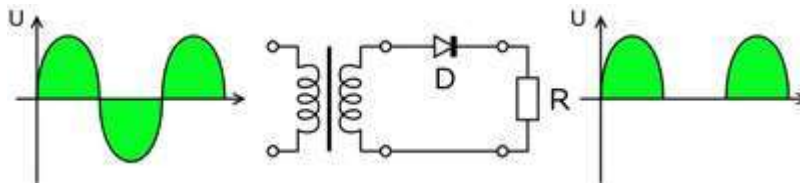


Figura 3.2 Rectificación de la onda.

3.1.2 Rectificador monofásico de onda completa.

Un rectificador de onda completa es un circuito empleado para convertir una señal de corriente alterna de entrada (V_i) en corriente de salida (V_o) pulsante. A diferencia del rectificador de media onda, en este caso, la parte negativa de la señal se convierte en positiva o bien la parte positiva de la señal se convertirá en negativa, según se necesite una señal positiva o negativa de corriente continua.

Existen dos alternativas, bien empleando dos diodos o empleando cuatro (puente de Garetz).

El rectificador de onda completa es un circuito empleado para aprovechar ambos semiciclos de la corriente alterna y obtener corriente directa como resultado ideal (positivo y negativo) aunque el resultado aparenta ser el mismo que en el rectificador de media onda, en este caso los niveles de intensidad son superiores y la caída de tensión es menor cuando se le aplica una carga al sistema.

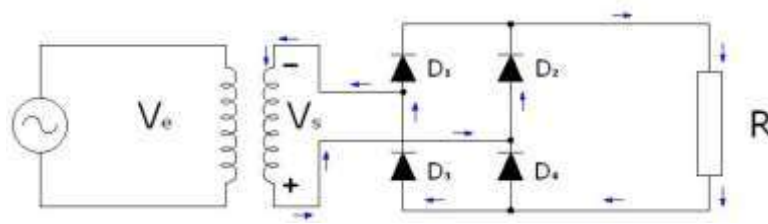


Figura 3.3 Circuito rectificador monofásico de onda completa.

3.1.3 Rectificador trifásico de media onda.

Consisten en conectar un diodo a la salida de cada arrollamiento, que se unirán en un punto común que después alimentará a la resistencia o carga del circuito. El retorno de la corriente se realiza a través de la línea de neutro. La imagen inferior nos aclara esta explicación.

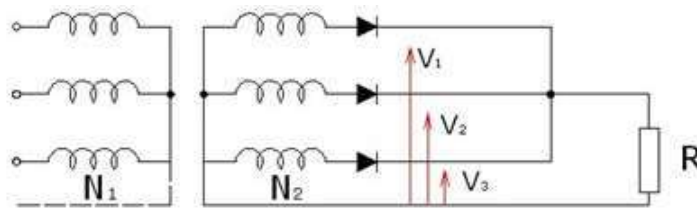


Figura 3.4 Circuito rectificador trifásico de media onda.

Es evidente que el arrollamiento secundario está dispuesto en estrella y que de la unión común de las tres bobinas se saca la línea de neutro. Además, tal y como indica la imagen, cada bobina tendrá, con respecto a neutro, las tensiones V_1, V_2 y V_3 respectivamente, que se producirán desfasadas 120° como se ve en la figura 3.4.

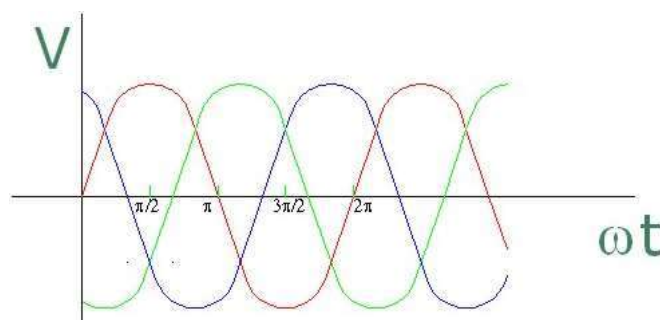


Figura 3.5 Onda trifásica de un transformador sin rectificar.

Las tensiones V_1, V_2 y V_3 están representadas en la gráfica, por las ondas roja, verde y azul. Pero en realidad, al haber colocado un diodo a cada salida, el semiciclo negativo de cada onda quedará suprimido,

es decir, que la tensión que le llegue a la carga será la línea ondulada de color gris [13] como se ve en la figura 3.5.

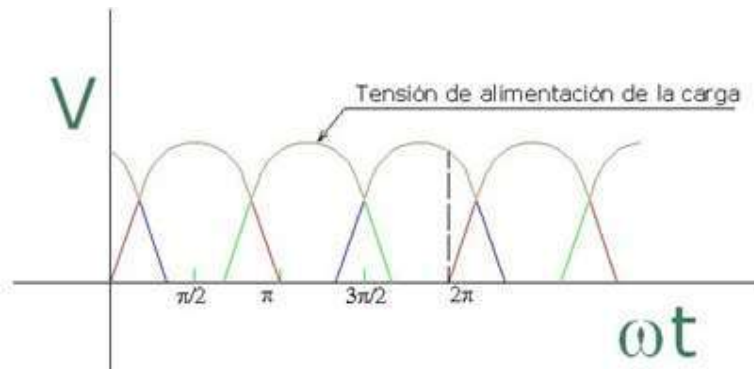


Figura 3.5 Onda trifásica de un transformador rectificado.

Analizando la imagen podemos observar que cada bobina alimentará la carga durante 1/3 del periodo y cada diodo estará conduciendo durante tanto tiempo como la corriente de su bobina sea superior que la de las demás. La línea de trazos de la imagen representa la duración de un ciclo, tal y como puede observarse. Como la corriente de alimentación de la carga la aportan tres bobinas en cada ciclo, esta será más continua.

3.1.4 Rectificador trifásico de onda completa.

Si ahora disponemos de un puente hexadiodo, de manera que podamos rectificar el semiperiodo negativo, que antes quedaba anulado, la tensión producida será aún más continua que en los casos anteriores como se ve en la figura 3.7.

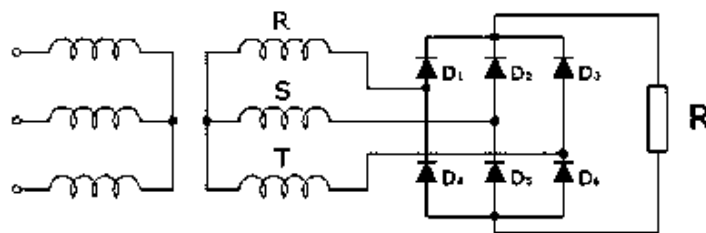


Figura 3.6 Puente rectificador de onda completa.

Podemos observar como ahora, nuestro transformador, tiene a la salida de cada bobina dos diodos, de manera que se rectificará la onda completa. Para aclarar más aún el funcionamiento, vamos a representar

las bobinas R, S y T desfasadas en el espacio 120° , pues constructivamente es como se encuentran. Imaginemos que la producción de corriente comienza en la bobina R-S (onda roja), siendo el semiperiodo positivo el que se produce a la salida de R. La corriente por tanto circulará hasta D1 que, por ser positiva, lo atravesará hasta la carga R y retornará por D5 hasta la bobina S. 180° después, se producirá el semiperiodo negativo, por lo que al haber cambiado el sentido de la corriente, el positivo estará a la salida de la bobina S, atravesará el diodo D2 en dirección a la carga, retornando por D4 hasta la bobina R [13] como se ve en la figura 3.8.

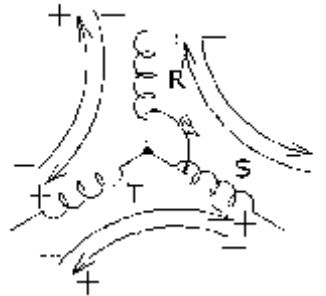


Figura 3.7 Conexión trifásica del secundario del transformador.

Esta secuencia la repetimos para las bobinas S-T (onda verde), actuando D2 y D6 para el semiperiodo positivo y D3 y D5 para el semiperiodo negativo; y para las bobinas T-R (onda azul), en cuyo caso la secuencia será D3 y D4 para la semionda positiva y D1 y D6 para la semionda negativa.

Ya sólo queda hacer un matiz, y es que el desfase entre el semiperiodo positivo y negativo es de 180° , mientras que el desfase entre arrollamientos es de 120° , por lo que antes de que el semiciclo de una de las bobinas haya finalizado, se estará produciendo la siguiente onda en otro arrollamiento. Esto queda de manifiesto si en la representación senoidal de un transformador trifásico, se traslapan los semiciclos positivos y negativos como se ve en la figura 3.9.

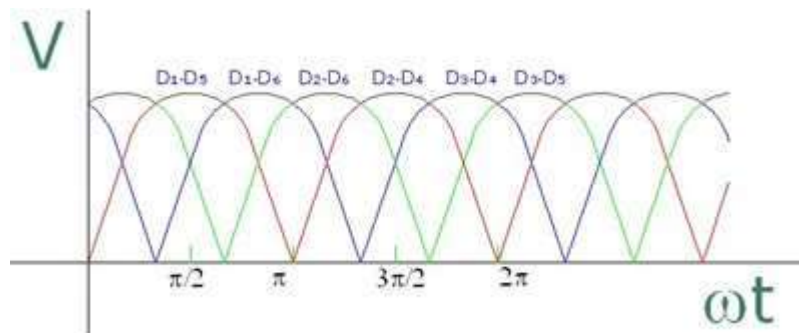


Figura 3.8 Onda de rectificador de onda completa.

Puede apreciarse como ahora el aporte de tensión es cada $1/6$ del periodo, resultando una tensión aún más continua que en los casos anteriores. Si depuramos las partes de la onda que no afectan a la alimentación de la carga, resultará una señal como la que muestra la figura 3.10.

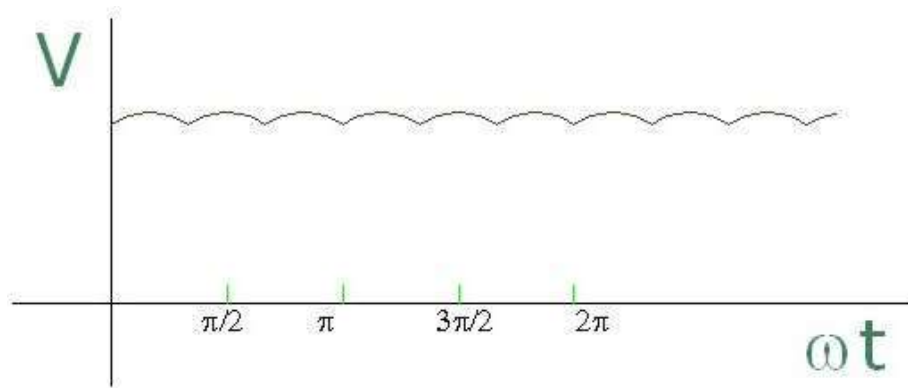


Figura 3.9 Onda trifásica en rectificación completa.

En los rectificadores trifásicos la finalidad es la de generar una tensión o corriente continua específica, a partir de una fuente de corriente alterna. Presentan mejores ventajas comparativas que los de media onda. Disminuye el rizado en las corrientes de salida en la barra de corriente continua y se obtiene un mayor valor de tensión y corriente continua.

Las aplicaciones de un rectificador trifásico son cargadores de batería, fuentes de poder, control de velocidad y posición de máquinas de corriente continua, transmisión en corriente continua, excitación de máquinas sincrónicas, electro filtros, entre otras [13].

3.1.5 Especificaciones, cuidados, costos y aplicaciones de diodos de alta potencia.

Uno de los dispositivos más importantes de los circuitos de potencia son los diodos, aunque tienen, entre otras, las siguientes limitaciones: son dispositivos unidireccionales, no pudiendo circular la corriente en sentido contrario al de conducción. El único procedimiento de control es invertir el voltaje entre ánodo y cátodo.

Los diodos de potencia se caracterizan porque en estado de conducción, deben ser capaces de soportar una alta intensidad con una pequeña caída de tensión. En sentido inverso, deben ser capaces de soportar una fuerte tensión negativa de ánodo con una pequeña intensidad de fugas, como se muestra en la figura 3.11.

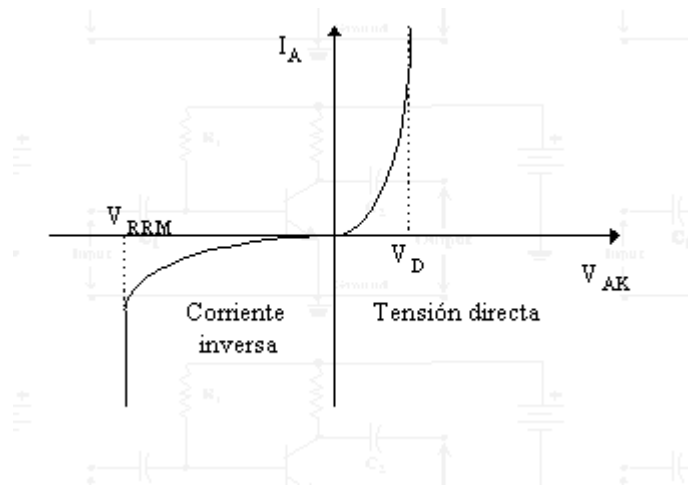


Figura 3.11 Curva característica del diodo.

El diodo responde a la ecuación:

$$I = I_S \times (e^{qV/KT} - 1)$$

La curva característica será la que se puede ver en la parte superior, donde:

VRRM es la tensión inversa máxima

VD es la tensión de codo.

A continuación vamos a ir viendo las características más importantes del diodo, las cuales podemos agrupar de la siguiente forma:

- Características estáticas.
- Parámetros en bloqueo (polarización inversa).
- Parámetros en conducción.

Modelo estático.

- Características dinámicas.
- Tiempo de recuperación inverso (trr).

Influencia del trr en la conmutación.

Tiempo de recuperación directo.

- Potencias.

Potencia máxima disipable.

Potencia media disipada.

Potencia inversa de pico repetitivo.

Potencia inversa de pico no repetitivo.

- Características térmicas.
 - Protección contra sobre tensión.
 - Características estáticas.
-
- Parámetros en bloqueo
 - a) **Tensión inversa de pico de trabajo (VRWM)**: es la que puede ser soportada por el dispositivo de forma continuada, sin peligro de entrar en ruptura por avalancha.
 - b) **Tensión inversa de pico repetitivo (VRRM)**: es la que puede ser soportada en picos de 1 ms, repetidos cada 10 ms de forma continuada.
 - c) **Tensión inversa de pico no repetitiva (VRSM)**: es aquella que puede ser soportada una sola vez durante 10ms cada 10 minutos o más.
 - d) **Tensión de ruptura (VBR)**: si se alcanza, aunque sea una sola vez, durante 10 ms el diodo puede destruirse o degradar las características del mismo.
 - e) **Tensión inversa continua (VR)**: es la tensión continua que soporta el diodo en estado de bloqueo.

En la figura 3.12 se muestran los parámetros de bloqueo.

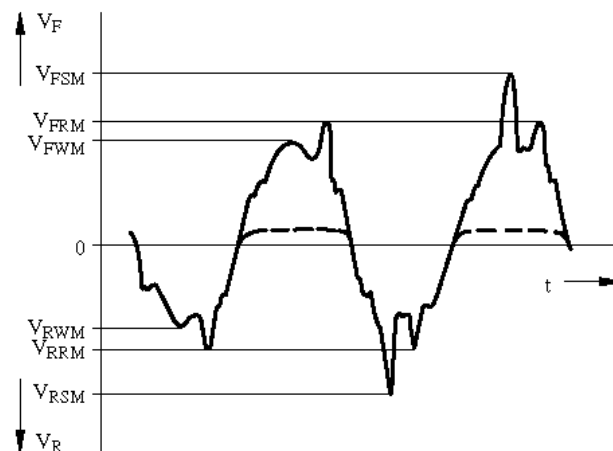


Figura 3.12 Parámetros del bloqueo.

- Parámetros en conducción
 - a. **Intensidad media nominal (IF (AV))**: es el valor medio de la máxima intensidad de impulsos sinusoidales de 180° que el diodo puede soportar.

- b. **Intensidad de pico repetitivo (IFRM)**: es aquella que puede ser soportada cada 20 ms, con una duración de pico a 1 ms, a una determinada temperatura de la cápsula (normalmente 25°).
- c. **Intensidad directa de pico no repetitiva (IFSM)**: es el máximo pico de intensidad aplicable, una vez cada 10 minutos, con una duración de 10 ms.
- d. **Intensidad directa (IF)**: es la corriente que circula por el diodo cuando se encuentra en el estado de conducción.

Los modelos estáticos del diodo se ilustran en la figura 3.13.

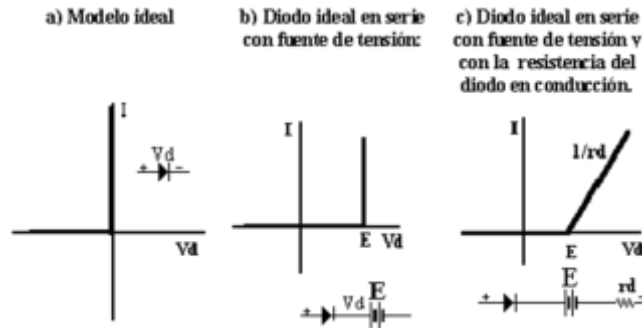


Figura 3.13 Modelos ideales de diodos.

Los distintos modelos del diodo en su región directa (modelos estáticos) se representan en la figura 3.13. Estos modelos facilitan los cálculos a realizar, para lo cual debemos escoger el modelo adecuado según el nivel de precisión que necesitemos.

Estos modelos se suelen emplear para cálculos a mano, reservando modelos más complejos para programas de simulación como PSPICE. Dichos modelos suelen ser proporcionados por el fabricante, e incluso pueden venir ya en las librerías del programa.

- Características dinámicas.

El tiempo de recuperación inverso de un diodo se muestra en la figura 3.14.

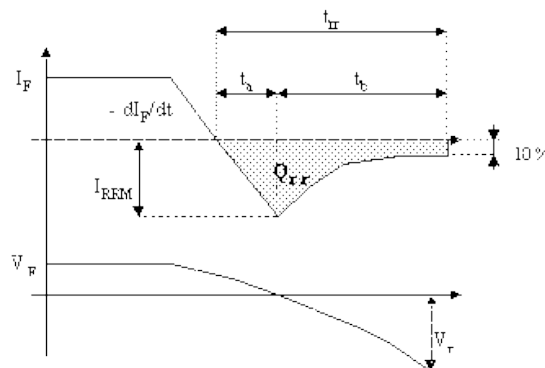


Figura 3.14 Recuperación inversa del diodo.

El paso del estado de conducción al de bloqueo en el diodo no se efectúa instantáneamente. Si un diodo se encuentra conduciendo una intensidad I_F , la zona central de la unión P-N está saturada de portadores mayoritarios con tanta mayor densidad de éstos cuanto mayor sea I_F . Si mediante la aplicación de una tensión inversa forzamos la anulación de la corriente con cierta velocidad di/dt , resultará que después del paso por cero de la corriente existe cierta cantidad de portadores que cambian su sentido de movimiento y permiten que el diodo conduzca en sentido contrario durante un instante. La tensión inversa entre ánodo y cátodo no se establece hasta después del tiempo t_a llamado tiempo de almacenamiento, en el que los portadores empiezan a escasear y aparece en la unión la zona de carga espacial. La intensidad todavía tarda un tiempo t_b (llamado tiempo de caída) en pasar de un valor de pico negativo (IRRM) a un valor despreciable mientras va desapareciendo el exceso de portadores.

t_a (tiempo de almacenamiento): es el tiempo que transcurre desde el paso por cero de la intensidad hasta llegar al pico negativo [14].

t_b (tiempo de caída): es el tiempo transcurrido desde el pico negativo de intensidad hasta que ésta se anula, y es debido a la descarga de la capacidad de la unión polarizada en inverso. En la práctica se suele medir desde el valor de pico negativo de la intensidad hasta el 10 % de éste.

t_{rr} (tiempo de recuperación inversa): es la suma de t_a y t_b .

$$t_{rr} = t_a + t_b$$

Q_{rr} : se define como la carga eléctrica desplazada, y representa el área negativa de la característica de recuperación inversa del diodo.

di/dt : es el pico negativo de la intensidad.

I_{rr} : es el pico negativo de la intensidad.

La relación entre t_a / t_b es conocida como factor de suavizado "SF".

Si observamos la gráfica podemos considerar Q_{rr} por el área de un triángulo:

$$Q_{rr} = \frac{1}{2} t_{rr} \times I_{RRM}$$

De donde:

$$I_{RRM} = \left[\frac{dI_F}{dt} \right] \times t_a$$

Para el cálculo de los parámetros IRRM y Q_{rr} podemos suponer uno de los dos siguientes casos:

Para $t_a = t_b$ $t_{rr} = 2t_a$

Para $t_a = t_{rr}$ $t_b = 0$

En el primer caso obtenemos:

$$t_{rr} = \sqrt{4 \times \frac{Q_{rr}}{\left(\frac{di}{dt}\right)}} \quad I_{RRM} = \sqrt{Q_{rr} \times \left(\frac{di}{dt}\right)}$$

Y en el segundo caso:

$$t_{rr} = \sqrt{2 \times \frac{Q_{rr}}{\left(\frac{di}{dt}\right)}} \quad I_{RRM} = \sqrt{2 \times Q_{rr} \times \left(\frac{di}{dt}\right)}$$

Influencia del t_{rr} en la conmutación

Si el tiempo que tarda el diodo en conmutar no es despreciable:

Se limita la frecuencia de funcionamiento.

Existe una disipación de potencia durante el tiempo de recuperación inversa.

Para altas frecuencias, por tanto, debemos usar diodos de recuperación rápida.

Factores de los que depende t_{rr} :

A mayor IRRM menor t_{rr} .

Cuanta mayor sea la intensidad principal que atraviesa el diodo mayor será la capacidad almacenada, y por tanto mayor será t_{rr} .

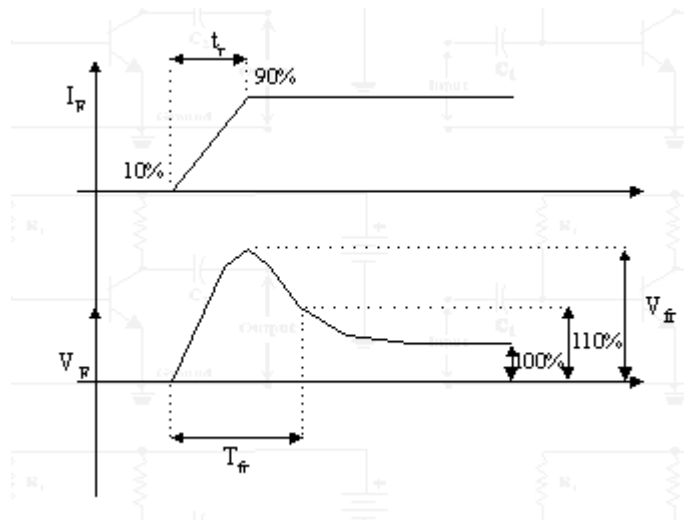


Figura 3.15 Recuperación directa del diodo.

- Tiempo de recuperación directo

t_{fr} (tiempo de recuperación directo): es el tiempo que transcurre entre el instante en que la tensión ánodo-cátodo se hace positiva y el instante en que dicha tensión se estabiliza en el valor V_F , el cual se muestra en la figura 3.15.

Este tiempo es bastante menor que el de recuperación inversa y no suele producir pérdidas de potencia apreciables.

- Disipación de potencia.

Potencia máxima disipable ($P_{m\acute{a}x}$)

Es un valor de potencia que el dispositivo puede disipar, pero no debemos confundirlo con la potencia que disipa el diodo durante el funcionamiento, llamada ésta potencia de trabajo.

- Potencia media disipada (PAV)

Es la disipación de potencia resultante cuando el dispositivo se encuentra en estado de conducción, si se desprecia la potencia disipada debida a la corriente de fugas.

Se define la potencia media (PAV) que puede disipar el dispositivo, como:

$$P_{T(AV)} = \frac{1}{T} \int_0^T U \times i_A \times dt$$

Si incluimos en esta expresión el modelo estático, resulta:

$$P_{T(AV)} = \frac{1}{T} \int_0^T (U_0 + i_A \times R) \times i_A \times dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_0 \times i_A \times dt + \frac{1}{T} \int_0^T i_A^2 \times R \times dt$$

Como:

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_A \times dt$$

Es la intensidad media nominal

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_A^2 \times dt$$

Es la intensidad eficaz al cuadrado

Nos queda finalmente:

$$P_{T(AV)} = U_0 \times I_m + I_{ef}^2 \times R$$

Generalmente el fabricante integra en las hojas de características tablas que indican la potencia disipada por el elemento para una intensidad conocida.

Otro dato que puede dar el fabricante es curvas que relacionen la potencia media con la intensidad media y el factor de forma (ya que el factor de forma es la intensidad eficaz dividida entre la intensidad media).

- Potencia inversa de pico repetitiva (PRRM)

Es la máxima potencia que puede disipar el dispositivo en estado de bloqueo.

Potencia inversa de pico no repetitiva (PRSM)

Similar a la anterior, pero dada para un pulso único.

- Características térmicas.
- Temperatura de la unión (Tj_{máx})

Es el límite superior de temperatura que nunca debemos hacer sobrepasar a la unión del dispositivo si queremos evitar su inmediata destrucción.

En ocasiones, en lugar de la temperatura de la unión se nos da la "operating temperature range" (margen de temperatura de funcionamiento), que significa que el dispositivo se ha fabricado para funcionar en un intervalo de temperaturas comprendidas entre dos valores, uno mínimo y otro máximo.

- Temperatura de almacenamiento (Tstg)

Es la temperatura a la que se encuentra el dispositivo cuando no se le aplica ninguna potencia. El fabricante suele dar un margen de valores para esta temperatura.

Resistencia térmica unión-contenedor (R_{jc})

Es la resistencia entre la unión del semiconductor y el encapsulado del dispositivo. En caso de no dar este dato el fabricante se puede calcular mediante la fórmula:

$$R_{jc} = (T_{j\text{máx}} - T_c) / P_{\text{máx}}$$

Siendo T_c la temperatura del contenedor y $P_{\text{máx}}$ la potencia máxima disipable.

Resistencia térmica contenedor-disipador (R_{cd})

Es la resistencia existente entre el contenedor del dispositivo y el disipador (aleta refrigeradora). Se supone que la propagación se efectúa directamente sin pasar por otro medio (como mica aislante, etc.) [14].

- Protección por sobre tensión.
- Principales causas de sobre tensión.

La causa principal de sobre tensión es, naturalmente, la presencia de un cortocircuito en la carga, debido a cualquier causa. De todos modos, pueden aparecer picos de corriente en el caso de alimentación de motores, carga de condensadores, utilización en régimen de soldadura, etc.

Estas sobrecargas se traducen en una elevación de temperatura enorme en la unión, que es incapaz de evacuar el calor generado, pasando de forma casi instantánea al estado de cortocircuito (avalancha térmica).

- Órganos de protección

Los dispositivos de protección que aseguran una eficacia elevada o total son poco numerosos y por eso los más empleados actualmente siguen siendo los fusibles, del tipo "ultrarrápidos" en la mayoría de los casos.

Los fusibles, como su nombre indica, actúan por la fusión del metal de que están compuestos y tienen sus características indicadas en función de la potencia que pueden manejar; por esto el calibre de un fusible no se da sólo con su valor eficaz de corriente, sino incluso con su I_{2t} y su tensión.

- Parámetro I_{2t}

La I_{2t} de un fusible es la característica de fusión del cartucho; el intervalo de tiempo t se indica en segundos y la corriente I en amperes.

Debemos escoger un fusible de valor I_2t inferior al del diodo, ya que así será el fusible el que se destruya y no el diodo.

- Diodos rectificadores para baja frecuencia

Características

I_F (AV): 1A – 6000 A

V_{RRM} : 400 – 3600 V

V_{Fmax} : 1,2V (a I_F (AV) max)

t_{rr} : 10 μ s

Aplicaciones

Rectificadores de Red.

Baja frecuencia (50Hz).

El costo de un diodo rectificador de propósito general, 6 Amperes, | Mr758 es de \$8.00 en cualquier tienda departamental de electrónica, el cual se muestra en la figura 3.16.



Figura 3.16 Diodo rectificador de baja frecuencia.

- Diodos rápidos (fast) y ultrarrápidos (ultrafast)

Características

I_F (AV): 30A – 200 A

V_{RRM} : 400 – 1500 V

V_{Fmax} : 1,2V (a I_F (AV) max)

t_{rr} : 0,1 - 10 μ s

Aplicaciones

Conmutación a alta frecuencia (>20kHz).

Inversores.

UPS (Sistema de alimentación ininterrumpida).

Accionamiento de motores CA.

El costo de un diodo rectificador rápido Hfa25tb60 To-220 25a 600v es de \$21.50 en cualquier tienda departamental de electrónica, que se muestra en la figura 3.17.



Figura 3.17 Diodo rectificador rápido.

Lo mismo sucede en cuanto al precio de un diodo rectificador ultra rápido.

- Diodos Schotkky

Características

I_F (AV): 1A – 120 A

V_{RRM} : 15 – 150 V

V_{Fmax} : 0,7V (a I_F (AV) max)

t_{rr} : 5 ns

Aplicaciones

Fuentes conmutadas.

Convertidores.

Diodos de libre circulación.

Cargadores de baterías

El costo de un diodo Sr5100 Diodo Schottky 100v 5a con las especificaciones antes mostradas es de \$29.00 en cualquier tienda departamental de electrónica, mostrada en la figura 3.18.



Figura 3.18 Diodo rectificador Schottky.

- Diodos para aplicaciones especiales (alto voltaje)

Característica

I_F (AV): 0,45A – 2 A

V_R : 7,5kV – 18kV

V_{RRM} : 20V – 100V

t_{rr} : 150 ns

Aplicaciones

Aplicaciones de alta tensión.

El precio de un diodo rectificador de aplicaciones especiales (altos voltajes) con los parámetros antes mostradas es de \$10.00, que se ilustra en la figura 3.19.



Figura 3.19 Diodo rectificador para alto voltaje.

- Diodos para aplicaciones especiales (alta corriente)

Características

I_F (AV): 50A – 7000 A

VRRM: 400V – 2500V

VF: 2V

trr: 10 μ s

Aplicaciones:

Aplicaciones de alta corriente.

El costo de un diodo rectificador de alta corriente, en este caso viene empaquetado como un puente de Diodos con los parámetros mostrados anteriormente es de \$585.00 en cualquier tienda departamental de electrónica, que se representa en la figura 3.20. [14].



Figura 3.20 Puente de diodos de alta corriente.

Capítulo 4. Diseño y construcción del rectificador trifásico para la turbina Skystream.

En este capítulo se realiza la implementación del rectificador trifásico de onda completa. En esta implementación se observará la señal de voltaje en la salida del puente de rectificador con y sin capacitor de corrección de rizado, y en ambos casos se obtendrá esta señal con y sin carga.

Sin embargo, es necesario establecer los criterios de las pruebas a realizar, tales como la carga de prueba, el voltaje de entrada al rectificador y el voltaje en las terminales de salida de este mismo. La carga a utilizar está definida por el generador utilizado, ya que este tiene una potencia máxima de $\frac{1}{4}$ de HP de potencia, es decir, 187 Watts de potencia de generación, lo cual entrega aproximadamente una corriente de 1.5 A en la salida del rectificador, pero debido a que no es conveniente utilizar un generador a plena carga, y por las limitantes del equipo del laboratorio, se utiliza una carga que necesita 0.7 A.

4.1 Rectificador trifásico de onda completa sin capacitor de compensación y sin carga.

En este circuito se implementa principalmente para observar el rizado existente en todos los puentes rectificadores sin compensar con un capacitor, y también es necesario obtener la diferencia de potencial obtenida en terminales del rectificador, para poder calcular adecuadamente el valor de este capacitor. La estructura de este circuito se muestra en la figura 4.1.

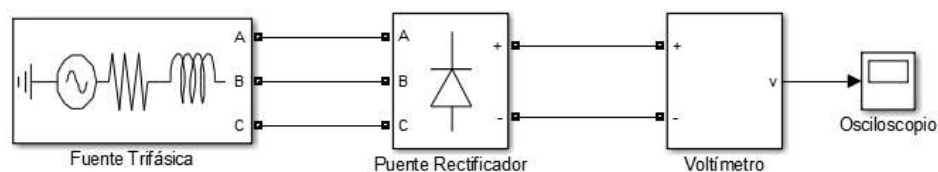


Figura 4.1 Esquema de conexión de un rectificador trifásico de onda completa

Con este esquema se procede a realizar una simulación para observar los resultados esperados en el circuito real. Cabe observar que en este caso, se ajusta el voltaje de la fuente para que el voltaje de pico sea igual a 120 Vcd en la salida del rectificador, lo cual se realiza de la siguiente forma.

$$V_{cd} = V_{pp_{rms}} * \sqrt{2} \quad \therefore \quad V_{pp_{rms}} = \frac{V_{cd}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{pp_{rms}} = \frac{120}{\sqrt{2}} = 87 \text{ V}_{rms}$$

Donde:

$V_{pp_{rms}}$:	Voltaje RMS de fase a fase
V_{cd} :	Voltaje de corriente directa

En este caso, es necesario transformar la medición de voltaje alterno a voltaje de pico de las ondas senoidales, ya que este es el valor al cual el capacitor se carga, y entrega a la carga de forma constante.

Por lo que se ajusta el voltaje de la fuente a 87V entre fases para obtener 120V de corriente directa a la salida del puente, ya que este es el voltaje nominal del equipo del laboratorio, lo que permite que los datos de placa sean válidos durante todos los experimentos.

Con esto, se realiza una simulación en Simulink, dejando que Simulink escoja automáticamente la solución y dejando correr la simulación por 1 segundo, donde se obtiene la señal de rectificación de la figura 4.2.

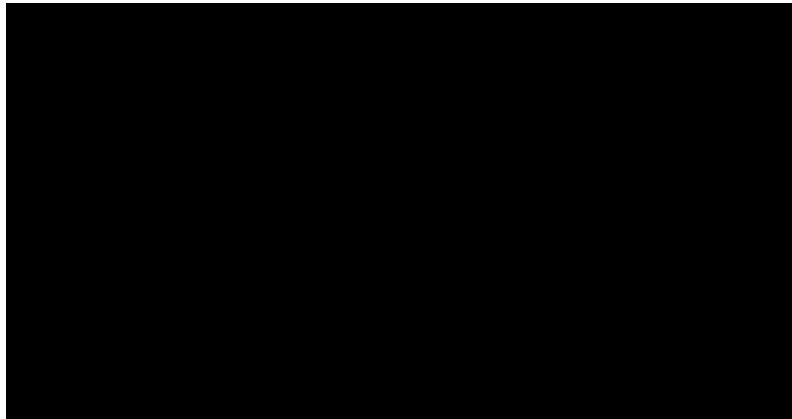


Figura 4.2 Señal de voltaje del rectificador simulado

Se observa un rizado en la salida del rectificador explicadas en el capítulo 3. Se procede a implementar el circuito utilizando diodos 1N5406, los cuales son capaces de soportar voltajes inversos de pico de 600V y una corriente de 3 A, debido a los valores nominales de la máquina síncrona utilizada, además de que durante el periodo de ajuste se pueden esperar valores grandes de voltaje.

El circuito es implementado utilizando una máquina síncrona como generador y una máquina de CD como primo-motor, y se obtiene la señal de voltaje de la figura 4.3.

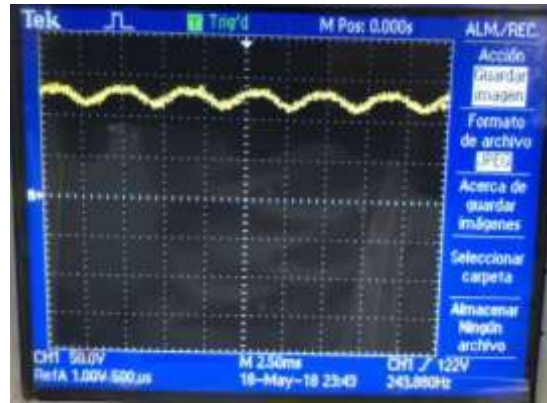


Figura 4.3 Señal de voltaje del rectificador implementado

Se observa que las dos figuras son muy cercanas en forma y en valores. Por lo que se procede a conectar carga al rectificador para observar el cambio en la forma de onda.

4.2 Rectificador trifásico de onda completa sin capacitor de compensación y con carga.

En este caso, se observa los efectos que tiene una carga puramente resistiva en el rectificador, principalmente en la señal de voltaje del rectificador, en el cual se espera una deformación de la señal en los puntos de cambio de fase. Por lo que se utiliza el diagrama esquemático de la figura 4.4.

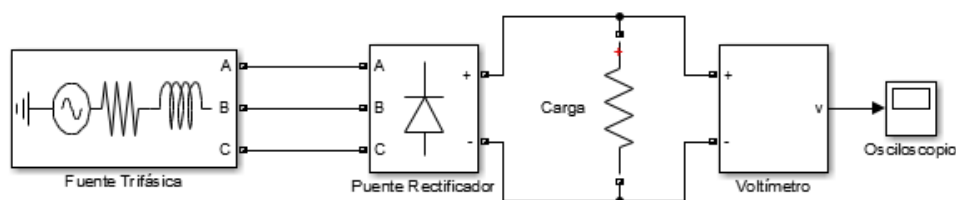


Figura 4.4 Modelo de rectificador con carga

Con este esquema, se implementa una simulación en simulink, con una carga pequeña solamente para observar el cambio en la señal de voltaje rectificado. La señal de voltaje se muestra en la figura 4.5, y se observa un cambio en el rizado de la señal, principalmente en los puntos de unión del rizado.



Figura 4.5 Señal de voltaje del rectificador con carga

Se implementa el mismo circuito en el laboratorio, y se obtiene la señal de la figura 4-6, en la cual se observa un cambio en la forma de onda, similar al observado en la simulación. El circuito utilizado para las pruebas de la sección 4.1 y 4.2 se muestra en la figura 4.7.

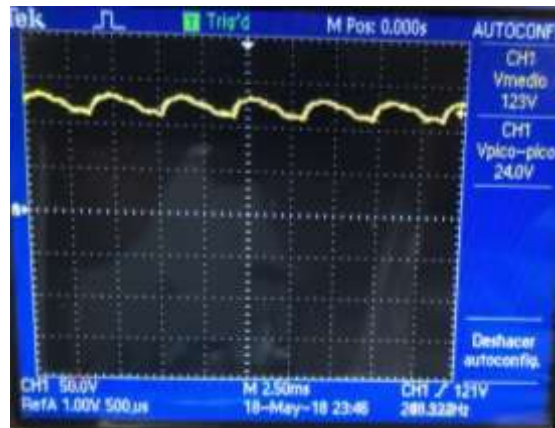


Figura 4.6 Señal de voltaje del rectificador con carga del circuito implementado

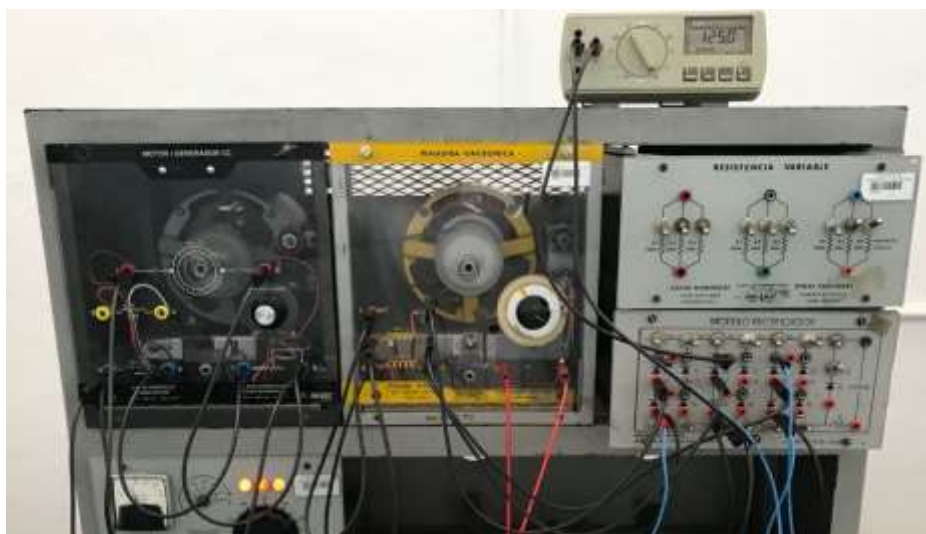


Figura 4.7 Circuito implementado de rectificador con y sin carga.

4.3 *Rectificador trifásico de onda completa con capacitor de compensación y sin carga.*

En este caso, es necesario calcular el capacitor para obtener una rectificación ideal en el puente, es decir, que no exista ningún tipo de rizado en las terminales de salida del rectificador, por lo que se utiliza el siguiente método para obtener el valor de capacitancia necesario:

$$\frac{I}{C} = \frac{dV}{dt} \quad \therefore \quad C = I * \frac{dt}{dV}$$

$$dt = \frac{1}{f * 6}$$

$$dV = 0.05 * V_{cd}$$

$$I = \frac{P}{V}$$

Con valores de $P=180W$, $V=120V$ y $f=60Hz$ se obtiene:

$$dt = \frac{1}{60 * 6} = 2.7778ms \quad dV = 0.05 * 120V = 6V \quad I = \frac{180W}{120} = 1.5A$$

$$C = 1.5 * \left(\frac{2.7778ms}{6V} \right) = 695\mu F$$

Donde:

dt Diferencial de tiempo

dV Diferencial de Voltaje

C Capacitancia

I Corriente

P Potencia máxima a la salida del rectificador

V Voltaje en terminales del rectificador máximo

Se utiliza el valor de 0.05 debido a que normalmente este tipo de rectificadores cuenta con un rizado de variación del 5%, y el periodo es dividido entre 6 ya que se obtienen 6 pulsos de voltaje por cada ciclo de onda senoidal sin rectificar.

Debido a que no existen capacitores de $695\mu\text{F}$, se utiliza un capacitor de $1000\mu\text{F}$ a un voltaje de 200V , debido a que opera a 120VCD en el rectificador. Con lo que al colocar este capacitor se obtiene la señal de voltaje de la figura 4.8 del simulador.



Figura 4.8 Señal del rectificador con capacitor de compensación.

Se observa que la señal del simulador no es perfectamente recta, tarda cierto tiempo en llegar al valor nominal de 120V , esto es debido al tiempo que se tarda el capacitor en cargarse, y presenta este tipo de señal.

En el circuito implementado, con el capacitor conectado, se observa la señal de osciloscopio de la figura 4.9, se observa que la rectificación es completamente lineal, debido a que el tiempo de carga del capacitor es demasiado rápido, y no es posible captarlo en el osciloscopio.

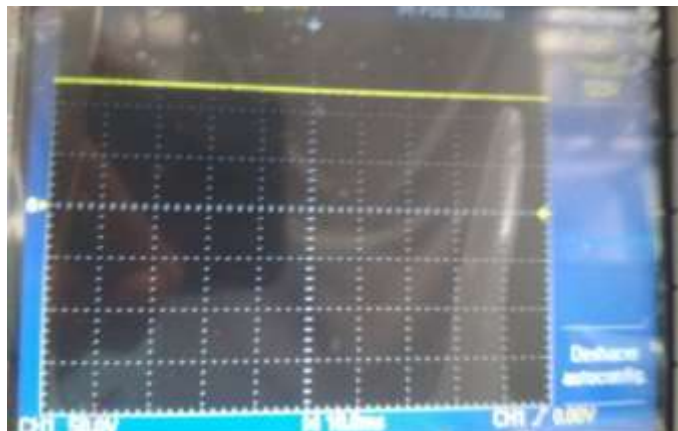


Figura 4.9 Señal del rectificador implementado con capacitor de compensación

4.4 *Rectificador trifásico de onda completa con capacitor de compensación y con carga*

Para finalizar las pruebas del circuito, se utiliza una carga puramente resistiva, y se conecta en paralelo con el capacitor de compensación. En este caso, se obtiene la respuesta de la figura 4.10, y se observa un pequeño ruido en la señal, posiblemente debido al solucionador de simulink, o bien al paso de integración utilizado.

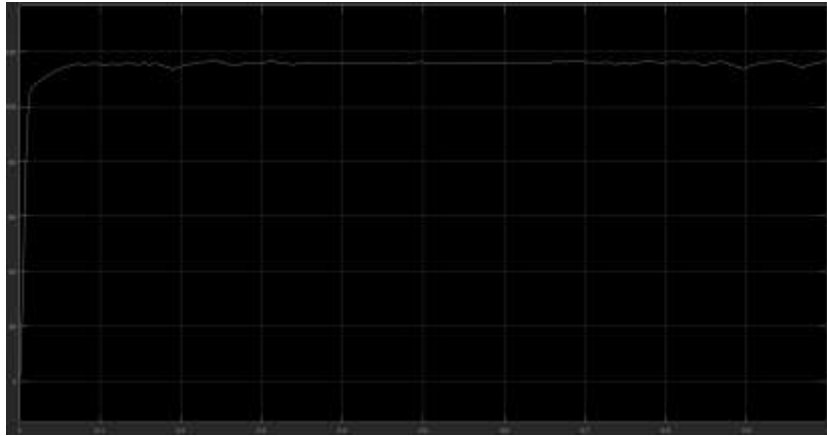


Figura 4.10 Señal del rectificador simulado con capacitor y carga.

Finalmente, se conecta carga al circuito implementado, la respuesta se muestra en la figura 4.11. En este caso, se esperaba la aparición de un pequeño rizado, pero debido a que el capacitor es más grande de lo necesario, este rizado no se encuentra. El circuito armado para realizar las pruebas de las secciones 4.3 y 4.4 se muestra en la figura 4.12.

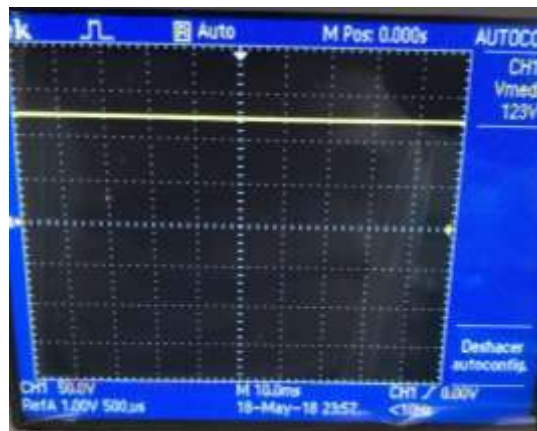


Figura 4.11 Señal del rectificador implementado con capacitor y carga.



Figura 4.12 Circuito implementado de rectificador con capacitor de compensación.

4.5 *Rectificador con máquina de inducción jaula de ardilla*

Ahora se cambia el generador síncrono por un generador de inducción jaula de ardilla. Este tipo de generadores son más comunes en las turbinas eólicas, pero mostró desventajas al operarlo aislado de la red en el modelo experimental.

4.5.1 *Pruebas sin carga*

Se inician las pruebas al colocar el generador con el rectificador diseñado y mostrando las señales de voltaje en circuito abierto con y sin capacitor de compensación. Como se muestra en la figura 4.13, la señal rectificada muestra una gran cantidad de distorsión, debido a que los generadores asíncronos deben de ser alimentados con capacitores y deben de girar a una velocidad específica para que generen energía. Esto es complicado de realizar en el laboratorio debido a diversas imperfecciones en el equipo, posiblemente causadas por el constante uso que tiene este.

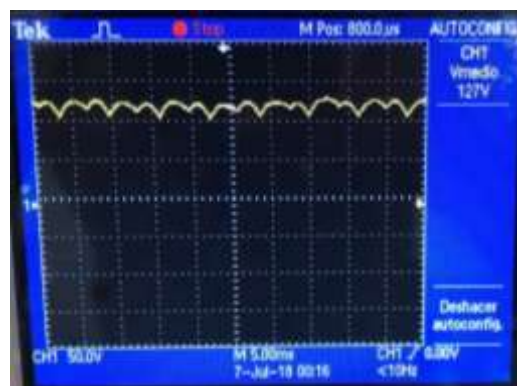


Figura 4.13 Señal rectificada del generador asíncrono sin capacitor de compensación

Al colocar el capacitor de compensación, ilustrado en la figura 4.14, se muestra que la señal es rectificada perfectamente, es decir, el capacitor absorbe completamente cualquier variación de

voltaje que pueda existir en las terminales del rectificador. El capacitor utilizado es el mismo que en el prototipo con una maquina síncrona como generador.

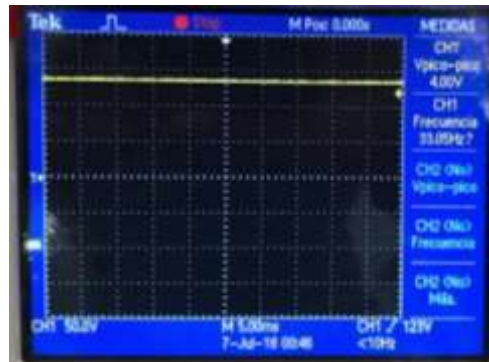


Figura 4.14 Señal rectificada del generador asíncrono con capacitor de compensación

4.5.2 Pruebas con carga

En este caso no es posible colocar toda la carga deseada como con la máquina síncrona, sólo fue posible colocar una séptima parte de la carga, debido a las condiciones operativas de la máquina de inducción, es decir, la máquina no podía generar la cantidad suficiente de energía para satisfacer la carga completa, por lo que esta tuvo que ser reducida para mostrar el funcionamiento con carga.

Por lo que se utiliza una carga que demanda 0.1 Amperes a 120 V, y se conecta al rectificador sin capacitor de compensación. La forma de onda del voltaje se muestra en la figura 4.15, y se observa que gracias a la carga, se obtiene una señal más estable en las terminales de salida del rectificador, con una variación menos errática del voltaje.

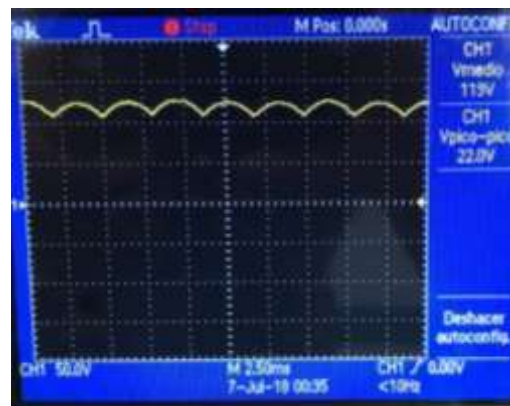


Figura 4.15 Señal del rectificador con carga del generador asíncrono

Después se coloca el capacitor de compensación para observar la señal perfectamente rectificada. En la figura 4.16 es posible observar que esta señal es libre de cualquier componente de AC, es decir, una línea completamente recta, lo cual es lo esperado de este rectificador.



Figura 4.16 Señal del rectificador conectado al generador asíncrono con carga y con capacitor de compensación

Finalmente, se muestra en la figura 4.17 el circuito experimental armado en el laboratorio, el cual está compuesto de un medidor de voltaje, un osciloscopio, una máquina de CD utilizada como primomotor, una máquina de inducción jaula de ardilla, un módulo de diodos, un módulo de capacitores y un módulo de resistencias.



Figura 4.17 Circuito experimental del rectificador trifásico.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

El objetivo de esta tesis es el de diseñar un rectificador trifásico para la turbina Skystream en la cual se aprovecharán los recursos naturales en los que México tiene gran potencial, tal como las corrientes de viento y los recursos como la planicies especiales para la construcción e implementación de aerogeneradores, que además de ser abundantes, tienen un impacto ambiental mucho menor al que tienen las centrales eléctricas convencionales, que representan la mayor parte de energía eléctrica que se genera en el país, que es por medio de la quema de combustibles fósiles, como se mencionó en el capítulo 2 (Figura 5.1 [18]).

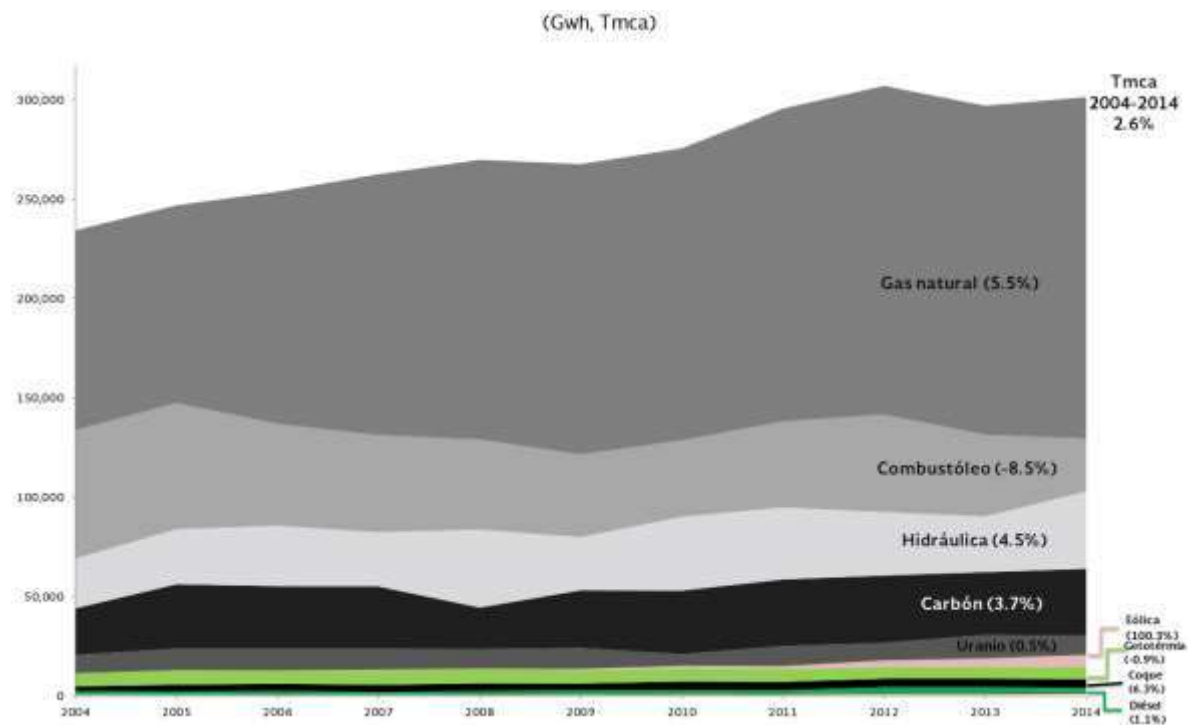


Figura 5.1 Evolución de la generación bruta en el sistema eléctrico nacional, por fuente de energía, 2004-2014

Incluso se puede apreciar que son recursos que prácticamente no son explotados para la generación de energía eléctrica y que de hecho la energía eólica se ha reducido un 0.9%, mientras que comparándose con la energía termo solar que es tan irrelevante que ni siquiera cuadra dentro del gráfico.

En el capítulo 3 se dieron a conocer las tecnologías que se utilizan actualmente para aprovechar el recurso eólico, con la finalidad de lograr comprender los procesos que se llevan a cabo en centrales de este tipo y apreciar sus beneficios, que son principalmente ecológicos con la construcción del rectificador trifásico.

Finalmente, en el capítulo 4 se realiza el análisis detallado del diseño y la construcción del rectificador trifásico, con la finalidad de evaluar los modos de operación de la central eólica en conjunto con el rectificador trifásico.

Debe considerarse que no se puede contar con que la potencia de la central eólica sea constante o que esté disponible todo el tiempo, ya que depende de la incidencia del viento en esta, la cual no es constante ni está siempre presente en un punto de la superficie terrestre.

En la construcción del rectificador, es importante tomar en cuenta el rizado presentado en la señal de voltaje en las terminales del rectificador, el cual se incrementa de igual manera a la que se incrementa la carga. Esto se corrige al colocar un capacitor en paralelo a las terminales del rectificador.

Con esto, al realizar el prototipo del rectificador, se mostró que el rizado es pequeño cuando no se tiene carga, aproximadamente del 5% de variación de voltaje, pero al conectar carga de aproximadamente 40W, este rizado se incrementa a una variación del 20% aproximadamente. Esta variación puede resultar peligrosa para equipo sensible, por lo que se calculó un capacitor de compensación.

Este capacitor corrigió el rizado en vacío y con carga, entregando una señal de voltaje de corriente directa sin ninguna variación. Sin embargo, para el cálculo del capacitor se tiene que utilizar los valores máximos de voltaje y potencia (con lo que se obtiene la corriente), lo cual provoca que se utilice un capacitor sobredimensionado en la mayoría de los casos, además de que comúnmente no es posible encontrar comercialmente el valor del capacitor calculado.

Esto implica tener que tomar una decisión con este componente, al tener que escoger un capacitor que cumpla con la compensación del voltaje la mayoría del tiempo, y que no presente grandes variaciones al momento de la carga máxima.

Al igual que la implementación del rectificador trifásico, se sustituyó otro componente el cual fue el motor de imanes permanentes sin escobillas por la máquina síncrona y un motor de inducción jaula de ardilla para hacer la prueba de que puede hacerse con este tipo de motores con un menor costo y con la misma eficiencia y producción de energía eléctrica.

5.2 Recomendaciones

Lo anterior puede ser abordado en trabajos de investigación futuros sobre este mismo tema, así como incluir más factores que modificarían los resultados, como la geometría del campo de aerogeneradores eólicos, alteraciones en el flujo del viento, entre otros, así como también se podría plantear la necesidad de añadir un elemento auxiliar donde sea posible mantener una potencia de generación más estable a las predicciones de generación de la turbina Skystream. Además de poder realizar un análisis de la relación costo-beneficio y también poder compararla frente a otras centrales, para así, poder determinar si el beneficio va más allá del aspecto ecológico.

Un trabajo futuro es realizar un estudio de tiempo del viento, para poder determinar la potencia media generada durante un periodo de tiempo, y poder escoger un capacitor de una manera más informada.

Además es importante realizar el estudio de calidad de la energía de este tipo de dispositivos, ya que este tema impacta directamente en el sistema eléctrico, y provoca afectaciones al introducir una gran cantidad de energía renovable al sistema.

Este trabajo también puede ser utilizado para después utilizar un convertidor de CD a CD (Boost), para eliminar posibles variaciones de voltaje en las terminales de salida, y así poder unir múltiples generadores eólicos a una línea de CD, y finalmente utilizar un inversor para transformar la energía a corriente alterna y poder interconectarla a la red eléctrica, o bien, que sea utilizada en una localidad aislada, dependiendo del punto de construcción y de los objetivos de esta central generadora.

Bibliografía

- [1] J. M. C. Úbeda, Educación medioambiental, Editorial Club Universitario, 2007.
- [2] [En línea]. Available: <https://goo.gl/3zrtAU>. [Último acceso: 18 septiembre 2017].
- [3] [En línea]. Available: <https://goo.gl/s5fRhZ>. [Último acceso: 18 septiembre 2017].
- [4] International Energy Agency , Solar Energy Perspectives: Executive Summary, 2011.
- [5] «IMF Business School,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/4UDAs2>. [Último acceso: 27 septiembre 2017].
- [6] Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., Energías Renovables y Eficiencia Energética, Canarias, 2008.
- [7] Carbon Trust, «Future Marine Energy. Results of the Marine Energy Challenge: Cost competitiveness and growth of wave and tidal stream energy,» 2006.
- [8] «Renewable Energy World,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/EjL5Td>. [Último acceso: 01 octubre 2017].
- [9] «Geofar,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/PiUAuf>. [Último acceso: 01 octubre 2017].
- [10] R. C. P. A. C. S. M.-A. G. José A. C. González, Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables, Madrid: Pearson Educación, 2009.
- [11] <https://bit.ly/2lickdQ>.
- [12] <https://bit.ly/2rlaqsE>.
- [13] <https://bit.ly/2GhRF3I>.
- [14] <https://bit.ly/2IEg88U>.

-
- [15] M. S. López, Diseño Conceptual de medidor de gases incondensables para Los Azufrez Michoacán, México, D.F.: Tesis, 2012.
- [16] N. H. Cruz, «CONAGUA,» 15 febrero 2012. [En línea]. Available: <https://goo.gl/xPJ5wy>. [Último acceso: 10 diciembre 2017].
- [17] NEPSOLAR, «NEP-SOLAR,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/jT6Q7t>. [Último acceso: 10 diciembre 2017].
- [18] SENER, «gob,» 2015. [En línea]. Available: <https://goo.gl/yfoVjg>. [Último acceso: 13 diciembre 2017].
- [19] J. Pearce, Potovoltaics - A Path to Sustainable Futures, Futures, 2002.
- [20] «Howstuffworks,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/8oE5LT>. [Último acceso: 19 septiembre 2017].
- [21] «Solar Thermal Energy,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/JQHxPX>. [Último acceso: 19 septiembre 2017].
- [22] K. W. Böer, «Chemistry Explained,» [En línea]. Available: <https://goo.gl/DSvBjs>. [Último acceso: 19 septiembre 2017].