



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

“*TEORÍA, MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA
MÁQUINA SÍNCRONA*”

TESIS

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

LUIS JUÁREZ PEREA

Director de tesis:

DR. ISMAEL ALBINO PADILLA

Puebla, Pue.

Noviembre 2018



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

“

*“TEORÍA, MODELADO Y SIMULACIÓN DE LA
MÁQUINA SÍNCRONA”*

TESIS

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

LUIS JUÁREZ PEREA

Director de tesis:

DR. ISMAEL ALBINO PADILLA

Puebla, Pue.

Noviembre 2018

OFICIO AUTORIZACION TEMA DE TESIS



Oficio No. 3837/2018

C. Luis Juárez Perea

Pasante de la Maestría en Ingeniería
con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia
Facultad de Ingeniería, BUAP.
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **Teoría, Modelado y Simulación de la Máquina Síncrona**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia. Asignándose como Director al M.C. Ismael Albino Padilla.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Zaragoza, noviembre 21 de 2018

M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director

C.c.p. M.C. Ismael Albino Padilla, Director del Tema de Tesis

C.c.p. Archivo

ABH/GCC/sco*

Qu

Facultad
de Ingeniería

Bldv. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING - 4, Col. San Manuel.
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

OFICIO AUTORIZACION DE IMPRESIÓN

H Puebla de Zaragoza a 24 Noviembre de 2018

M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Presente

Por medio del presente el que suscribe MC Ismael Albino Padilla, Asesor del tema de tesis:

“Teoría, Modelado y Simulación de la Máquina Síncrona”
Presentado por el Ing. Luis Perea, pasante de la Maestría en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia que se imparte en ésta Facultad Académica.

Después de haber revisado en contenido temático, metodología y redacción de la tesis. Autorizo de impresión de la misma.

Agradeciendo de antemano sus finas atenciones, me despido enviándole un cordial saludo.

MC. Ismael Albino Padilla



CCP Dr. Alejandro Bautista Hernández/Secretario del Posgrado e Investigación FI/BUAP
CCP Ing Luis Perea /Alumno/ Maestría en Ingeniería en SEP/FI/BUAP

DEDICATORIAS

Gracias a la vida que me ha dado tanto.

PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN.	1
Antecedentes	1
Justificación.....	2
Planteamiento y delimitación del problema,	3
Objetivos	3
CAPITULO 1	4
Nociones teóricas de generación de energía eléctrica.....	4
Introducción	4
• La energía y sus desafíos en la actualidad.....	4
• Formas de obtener trabajo de la energía.....	6
1. Energías renovables.....	7
1.1 Energía solar.....	7
1.2 Las centrales solares.....	7
1.3 Las células foto solares	8
1.4 Los paneles solares.....	8
1.4 Energía hidroeléctrica	10
1.5 Energía del oleaje y de las mareas	11
1.6 Energía eólica.....	12
1.7 Energía geotérmica.....	13
1.8 Energía mare motérmica (gradiente térmico de los mares).....	15
1.9 Energía de las biomasas	16
1.9 Célula de combustible	17
2. Energías no renovables.....	18
2.1 Petróleo.....	18
2. 2 Teorías de formación del petróleo.....	18
2. 3 Características del petróleo	19
2.4 Gas natural.....	20
2.5 El Carbón.....	21
2.4 Recursos nucleares	23
CAPITULO II	25

Generador Síncrono.....	25
II.1 Introducción.....	25
El generador de corriente alterna	25
II.2 El rotor	30
II.3 Devanado del rotor.	31
II.4 Anillos de sujeción del rotor.....	34
II.5 Cuñas y Amortiguadores	35
II.6 Anillos rozantes, porta carbones y aterrizamiento del neutro	35
II.7 Ventiladores.....	37
II. 8 Componentes de estator.....	37
II.9 Marco del Estator.....	39
II.10 Devanados del Estator	40
Componentes del sistema de enfriamiento por hidrógeno.	43
II.11 Carcasa del estator	44
II. 12 Sistema de excitación	46
CAPITULO III	47
Pruebas Eléctricas	47
III.1 Introducción	47
• Origen del fenómeno	48
III.2 Clasificación de las descargas parciales.....	49
III.3 Descargas parciales asociadas a la degradación.....	50
III.4 Nocividad de las descargas parciales	51
III. 5 Auto extinción de una descarga parcial.....	51
III.6 Perturbación eléctrica producida por las descargas parciales	52
• Otros efectos	52
III.7 Descargas parciales en transformadores	52
III. 8 Medida de las descargas parciales en transformadores	53
• Objetivos de las mediciones	53
• Pruebas de aislamiento a transformadores	53
III.9 Detección de descargas parciales en el aislamiento de transformadores	54
• Métodos eléctricos.	54

• Métodos químicos.	54
• Métodos Acústicos.	54
• Método Químico análisis cromatográfico.	54
• Acetileno (C₂H₂).	55
• Etileno (C₂H₄).	55
• Bioxido de carbono (CO₂).	56
• Hidrogeno (H₂).	56
• Compuestos del aire (O₂, N₂)	56
III. 10 Ambigüedad de ciertos diagnósticos.....	56
III. 11 Método acústico: localización de descargas por ultrasonido	58
• Procedimiento de medida	59
• Dificultad del método por ultrasonido	59
III. 12 Efectos de las descargas parciales sobre el refrigerante del transformador	60
III.13 Efectos de las descargas parciales sobre el aislamiento solido del transformador.....	60
III.14 Análisis de Falla de un Rotor de Polo Liso de 300 MW, 20 kV con Enfriamiento en Hidrógeno.....	63
III. 15 Desarrollo de Pruebas	67
• Extracción de Anillos de Retención.	69
• Análisis Metalográfico.	70
• Reparación en garantía.	75
• Conclusiones.	77
III.16 Reporte fotográfico durante la realización de pruebas eléctricas.....	77
CAPITULO IV	80
Modelado y Simulación de Generadores Síncronos	80
IV.1 Introducción	80
IV.2 Modelo del sistema	81
IV.3 Simulaciones	82
CAPITULO IV	95
Conclusiones	95
Bibliografía.....	96

PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN.

Antecedentes

La energía no se puede definir; no es algo que se puede determinar, no obstante se puede conceptualizar que es un ente del cual se puede obtener trabajo. La energía se presenta bajo diferentes aspectos: energía eléctrica, calorífica, química, nuclear. La física sólo acepta la existencia de la energía mecánica en sus dos formas: potencial y cinética. Las antes nombradas son formas que en su aspecto micro físico se reduce a fenómenos mecánicos de interacción o choque entre partículas y, por lo tanto, a energía mecánica. La energía ha estado, está y estará ahí infinita e inmutable. La energía llena el espacio que rodea al hombre, pero sin que éste sepa captarla ni, en ocasiones, utilizarla de la mejor manera para beneficio de la sociedad.¹

Los medios energéticos muestran dos grupos definidos de energía: el primero, la energía que se recibe permanentemente del sol y el viento; el segundo, la energía acumulada en la Tierra durante millones de años. Actualmente, el énfasis se ubica en los dos planos. No obstante, es importante destacar que en el caso de la primera se busca mejorar los diferentes medios de captación; puesto que puede cubrir las necesidades humanas e industriales; por lo que corresponde a las segundas el problema es el límite de las energías acumuladas en la Tierra en forma de combustibles fósiles como carbón, petróleo, gas natural y por fisión (nuclear). Es importante apuntar que tenemos grupos de energía: la no-renovable (petróleo, carbón, uranio) y la renovable (energía solar, eólica, mareas).

De esta manera, la energía eléctrica es la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencia entre dos puntos. Esta diferencia permite establecer una corriente eléctrica que surge cuando se ponen en contacto los dos puntos (positivo y negativo) por medio de un conductor eléctrico. La corriente eléctrica se manifiesta como el movimiento de cargas

¹ En la década de 1960 comenzaron las dificultades para la utilización del petróleo que se había convertido en una fuente de primer orden de energía, como la contaminación que se produce y su futuro agotamiento. Los países productores de petróleo advirtieron de las reservas limitadas y, en muchos casos, a tomar conciencia de la potencia económica y política que les da el control del petróleo. En el caso de México, si bien es uno de los países productores la falta de planeación y proyección de este consumible no permitió, como sucedió en otros países como los árabes convertirse en una importante potencia económica y política.

eléctricas negativas (electrones) a través de un cable conductor metálico. Cuando se cierra un circuito eléctrico y se genera el movimiento de electrones a través de un conductor se acciona un interruptor.

La generación de energía eléctrica consiste en transformar alguna clase de energía química, mecánica, térmica o luminosa en energía eléctrica. Para la generación industrial se recurre a las centrales eléctricas. En decir, la generación eléctrica se realiza mediante un alternador (generador); si bien estos no difieren entre sí en cuanto a su principio de funcionamiento, varían en función a la forma en que se accionan.

Es importante recordar el descubrimiento de Nikola Tesla: la corriente alterna.² La forma de producir la corriente alterna en los alternadores, se ha llevado a cabo una inmensa actividad tecnológica para llevar la energía eléctrica a todos los lugares habitados, por lo que junto a la construcción de grandes y variadas centrales eléctricas, se han construido sofisticadas redes de transporte y sistemas de distribución.

Justificación

El tema o estudio de la generación de energía eléctrica es un desafío ante el progreso y el desarrollo de las sociedades, sobre todo, en lugares como el nuestro donde los recursos no-renovables tienden a agotarse y ponen en duda garantizar a las siguientes generaciones un desarrollo sustentable. Si bien hay avances en la investigación científica y, por lo tanto, en diseños de nuevos materiales y aislamientos para nuevas máquinas eléctricas que obtengan mejor eficiencia en el proceso de generación de electricidad, esto no implica que las máquinas síncronas como el alternador presenten fallas: por operación y por mantenimiento (preventivo y correctivo).

En la industria eléctrica de nuestro país, el alternador es fabricado en el extranjero; puesto que continua siendo construido, por ejemplo, por compañías como: AGKANIS; SIEMENS; HITACHI; MITSUBISHY; GENERAL ELCTRIC; BROWN BOVERI-, etcétera. Esto implica al país, entre varios aspectos, disponer de divisas extranjeras para la compra y la reparación de

² La corriente alterna es la corriente eléctrica en la que magnitud y sentido varían de forma cíclica. La corriente alterna fue un significativo avance a la corriente continua.

refacciones de alternadores. Esta situación nos obliga a mejorar la planeación de mantenimiento preventivo del alternador en la industria eléctrica.

Planteamiento y delimitación del problema, que, en todo el diseño construcción, operación y modelado de sus componentes, son necesarios conocimientos teórico conceptuales para hacer que la máquina se pueda representar adecuadamente. Por otra parte el modelo de la máquina permite entender ciertos comportamientos de la máquina e incluso puede ayudar a un operador a tomar práctica en los procedimientos de operación adecuados de la máquina para satisfacer los requerimientos del sistema asegurando la confiabilidad del sistema, protegiendo a la máquina. El modelo a utilizar será uno implementado en Matlab Simulink. La configuración de la máquina será la más sencilla disponible y sin controles.

Objetivos

- Recopilar información práctica del generador.
- Utilizar un modelo para observar distintos comportamientos de los generadores.
- Observar comportamiento del sistema de excitación y velocidad.

CAPITULO 1

Nociones teóricas de generación de energía eléctrica

Introducción

El consumo cada vez creciente de energía no podrá ser satisfecho por las llamadas fuentes tradicionales basados en los combustibles fósiles: carbón, gas, petróleo y uranio, por lo que estas deberán ser sustituidas paulatinamente por otras fuentes, que a su vez sean **renovables**.

Los retos que actualmente se tienen frente a la energía, la cual ha sido soportada por fuentes no renovables, sin embargo, los avances científicos y tecnológicos de los últimos años, sobre todo, después de la segunda mitad del siglo XX. La crisis del petróleo a nivel mundial en los años setenta generó una mayor demanda del hidrocarburo, situación que ha puesto en alerta alternativas de otras fuentes de energía.

Este capítulo tiene como propósito exponer las distintas fuentes de generación de energía. Se divide en dos grandes grupos: la energía renovable y la energía no renovable.

- **La energía y sus desafíos en la actualidad**

Explicar lo útil de la energía resulta más sencillo que conceptualizar su esencia, es decir, responder a la pregunta: **¿Qué es la energía?** *No obstante, en general la energía es definida como todo aquello capaz de producir o realizar algún trabajo*, es la expresión de una relación física. La energía se presenta bajo diferentes aspectos: energía eléctrica, calorífica, química, nuclear. Aunque en realidad la **física** solo acepta la existencia de *la energía mecánica, en sus dos formas: potencial y cinética* (Marín, 1982: 1-8).

Debido a que las antes nombradas son formas que en su aspecto microfísica se reducen a fenómenos mecánicos de interacción o choque entre partículas y, por tanto, a energía mecánica. Las anteriores denominaciones se siguen utilizando para expresar el origen del trabajo, que en cierto momento se está desarrollando, o para expresar el modo del que nos hemos servido para obtenerlo.

Según las teorías actuales, el universo esta compuesto únicamente de energía, a partir de la cual se ha formado la materia que constituye los planetas, estrellas, galaxias. Esta energía ha estado, está y estará ahí, infinita e inmutable, sin que el paso del tiempo la afecte. Llenando todo el espacio que rodea al hombre, pero sin que este sepa en la actualidad captarla ni utilizarla. Es un desafío la búsqueda de la técnica necesaria para captar y dominar esta cantidad de energía, prácticamente infinita comparada con la que tiene y recibe la tierra.

Las exigencias de las industrias, los medios de transporte, han contribuido a mejorar el nivel de vida de la sociedad pero este avance ha demandado mayor consumo de energía, lo que ha obligado a la búsqueda de soluciones rápidas sin tomar en cuenta el medio ambiente.

Sin embargo, lo energético es vital para el futuro de la humanidad y es un desafío para la ciencia, sobre todo, para la física. La energía es una solución pero es también un problema para el desarrollo sostenible.

Nuestras economías, utilizan combustible que, además de no ser renovables, ocasionan daños al entorno que habitamos. Los actuales sistemas energéticos están alterando el clima global con la emisión a la atmósfera de enormes cantidades de carbono, más de una tonelada anual por habitante del planeta. [...] La misma comunidad científica ha aceptado que el futuro desarrollo tiene que ir unido al desarrollo de nuevas fuentes energéticas que favorezcan el mejoramiento de la calidad de vida. (Hernández, 2007: 4).

La atención se ha centrado en el sol, situado a 149×10^6 km, como origen de toda la energía acumulada y recibida por la tierra durante los cuatro mil quinientos millones de años que se suponen de vida y como manantial de energía prácticamente inagotable.

Una primera panorámica que analizaremos, de los medios energéticos en fase de investigación y explotación. Muestran dos grupos muy definidos de energías:

a) Energías que se reciben constantemente del sol y b) energía acumulada en la tierra durante millones de años. (Marín, 1982: 5).

Continua en estudio el aprovechamiento de la energía solar, a través de diferentes medios de captación, por considerarse que esta puede ser la nueva forma de energía; ya que cubre suficientemente las necesidades del mundo. Aunque la energía solar presenta diferentes

posibilidades, *como las corrientes oceánicas, movimiento del agua del mar (mareomotrices)*. También, cabe mencionar la *energía hidráulica de los saltos del agua, acción del viento*.

La energía solar, por un lado, consiste en concentrar por medio de espejos los rayos solares³ sobre una caldera, el vapor producido en esta pone en funcionamiento una turbina que, a su vez, mueve un alternador generando electricidad; por otro, reside en la captación por medio de las células foto solar o fotovoltaica⁴. Estas células son semiconductores a base de silicio que tienen la propiedad de generar energía eléctrica al recibir la luz del sol. El mayor inconveniente que ha impedido hasta el momento su difusión, es su alto costo de fabricación a pesar de ser muy abundante el silicio en la naturaleza⁵.

Por otra parte, las energías acumuladas en la tierra en forma de combustible fósiles como carbón, petróleo, gas natural y la más actual obtenida por fisión⁶, y que han sido las fuentes tradicionales en diferentes épocas, solo acompañaran al hombre durante un periodo muy breve sobre la superficie en la tierra.

- **Formas de obtener trabajo de la energía**

El hombre tiene a su disposición dos grandes grupos de energía: *la energía renovable y la energía no renovable*. En el primer grupo figuran la energía solar, la eólica, las de las mareas, etc. aunque en este grupo se encuentran englobadas dentro de la energía solar, pues son producidas por la energía radiada del sol; así ocurre con la energía eólica o del aire, producto del calentamiento solar de la superficie terrestre, que a su vez calienta la masa del aire próxima a ella. Lo mismo sucede con la energía hidráulica, producida por la evaporación del agua de los mares, ríos y lagos causada por el calor del sol. En este grupo hay que hacer la salvedad de la energía de los mares, producida por la atracción que ejerce la luna sobre el agua del mar (mareomotrices). Todas ellas son totalmente renovables. En el segundo grupo se encuentra el petróleo, el carbón, el uranio etc. Estas energías se consumen sin que se tenga posibilidad de renovarlas en un futuro relativamente próximo (Marín, 1982: 9).

³ Por ejemplo, las centrales solares.

⁴ Por ejemplo, los satélites

⁵ El silicio es muy abundante en los desiertos.

⁶ El proceso de fisión se produce cuando un neutrón incide sobre el núcleo de determinadas sustancias, este núcleo se divide o escinde en dos nuevos núcleos.

1. Energías renovables

1.1 Energía solar

De todas las formas posibles de aprovechamiento de la energía solar, las más rentables, y que se han desarrollado industrialmente son: Las centrales solares, las células foto solares y los paneles solares. En el caso de las células y paneles, las dos son energías que utilizan la radiación solar, la térmica (los paneles) aprovecha el calor del Sol mientras que la fotovoltaica (las células) convierte la luz en electricidad. La térmica se emplea fundamentalmente para calentar un fluido, que a su vez sirve para la producción de agua caliente sanitaria, para calentar piscinas, para la climatización de edificios y para otras aplicaciones industriales. También puede emplearse para mover turbinas que generan electricidad. La electricidad de origen fotovoltaico sirve para alimentar motores, otros aparatos eléctricos o para ser vertida a la red eléctrica. Una diferencia importante entre ambas (paneles y células) es que la térmica se almacena en depósitos de agua, mientras que la fotovoltaica en baterías. En los siguientes párrafos se describirán cada una.

1.2 Las centrales solares⁷

Estas centrales transforman la energía solar en energía eléctrica. El proceso se lleva a cabo concentrando la radiación solar por medio de espejos sobre una caldera de agua, produciéndose vapor que pasa a través de una turbina, la cual a su vez mueve un alternador, generando corriente eléctrica.

⁷ **1)** La planta de Marruecos, en Uarzazat, esta planta de tres etapas fue inaugurada en febrero de 2016 y tendrá capacidad de generar hasta 580mw; a inicios de 2014 **2)** Las plantas más grandes del mundo estaban en China (LongyangxiaHydro-solar PV Station 320MW), **3)** Estados Unidos (California Valley Solar Ranch 250MW) **4)** India (Charanka Solar Project 214MW). **5)** Las plantas Solar Star I y II constituyen entre ambos 579 MW y hace unos meses se convirtió en el parque solar más grande del mundo. El plantel, propiedad de BHE Solar, está ubicado en Rosamond California [Consulta el 3 de junio de 2016 <https://energialimpiaparatos.com/2016/04/04/155pq/>]

1.3 Las células foto solares⁸

La electricidad de origen fotovoltaico sirve para alimentar motores, otros aparatos eléctricos o para ser vertida a la red eléctrica, se almacena en baterías, que son caras y menos eficientes.

Están formadas por sustancias semiconductoras que transforman la luz solar en electricidad. Existen varias clases: de sulfuro de cadmio y cobre; de galio; de silicio; pero la que tiene un uso industrial es la última (la de silicio), pastillas. Al llegar la radiación solar a la superficie se produce un movimiento de electrones en su interior, apareciendo entre sus extremos una diferencia de potencial (voltaje), lo que les convierte en una pequeña pila o generador de corriente eléctrica.

1.4 Los paneles solares⁹

Este sistema se basa en que al llegar los rayos solares al tubo o tubos pintados en negro para que tengan mayor poder absorbente, se calienta el agua que circula por ellos. Su funcionamiento se debe al efecto invernadero; los rayos del sol son radiaciones de longitud de onda de $0.48 \cdot 10^{-6}$ m., el tubo al calentarse emite gran parte de esta energía que recibe por medio de ondas de $7.76 \cdot 10^{-6}$ m. de longitud de onda. El vidrio deja de pasar las ondas que llegan del sol pero impide el paso de las que emite el tubo, por ser éstas de mayor longitud de onda que las primeras. Debido a este procedimiento, la energía calorífica queda dentro del colector produciendo la elevación de la temperatura del agua que circula dentro del tubo del panel solar (Ver Figura No. 1.1).

Este sistema es uno de los más baratos y sencillos, llegando a absorber el 90% de la radiación incidente, con lo que el agua, en los sistemas menos sofisticados, adquiere temperatura

⁸ 1) Longyangxia Hydro- Solar PV Station. 850 MW. China; 2) Solar Star Solar Farm I y II. 579 MW. Estados Unidos; 3) Desert Sunlightg Solar Farm. 550 MW. Estados Unidos; 4) Topaz Solar Farm. 550 MW. Estados Unidos; 5) Copper Mountain . 458 MW. Estados Unidos; 6) Charanka Solar Park. 345 MW. India; 7) Planta fotovoltaica de Cestas. 300 MW. Francia; 8) Agua Caliente Solar Project. 290 MW. Estados Unidos; 9) Antelope Valley Solar Ranch. 266 MW. Estados Unidos; 10) Mount Signal Solar. 265,7 MW; California Valley Solar Ranch. 250 MW. [Consulta el 3 de junio de 2016 <http://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-fotovoltaicas-del-mundo/>]

⁹ Energía que utiliza la radiación solar, es la energía térmica que aprovecha el calor del Sol, se emplea fundamentalmente para *calentar un fluido*, que a su vez sirve para la producción de agua caliente sanitaria, para calentar piscinas, para la climatización de edificios y para otras aplicaciones industriales. También puede emplearse para mover turbinas que generan electricidad; España es un referente mundial en este aprovechamiento, pues tiene 17 centrales activas (generan casi 800 megavatios) a las que se esperan añadir otras 43 en los próximos años (alcanzará entonces unos 2500 megavatios).

entre 70° C y 90° C. Se utiliza para producir agua caliente y para la calefacción y necesita de un sistema complementario de zonas de almacenamiento.

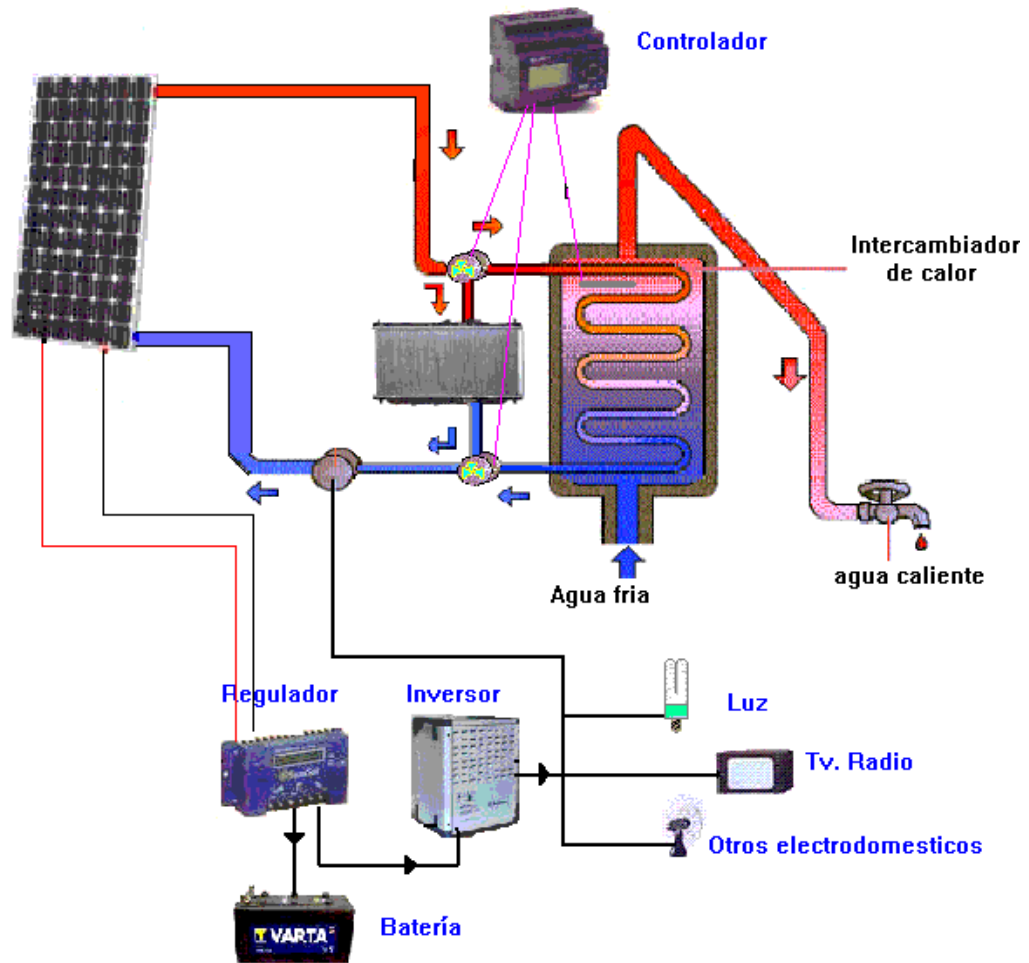


Figura No. I.1 Diagrama de un panel solar

1.4 Energía hidroeléctrica¹⁰

Es la energía que se obtiene a partir de corrientes de agua. Este tipo se refiere al movimiento de agua dulce, puesto que a pesar de existir corrientes de agua salada en los océanos, su aprovechamiento no pasa de ser teórico¹¹. La aplicación de esta energía se realiza en los saltos de agua de las grandes presas. Se puede considerar que únicamente un 6.5% del total se produce en pequeñas presas locales.

Es la forma de energía más aprovechada en todo el mundo, sobre todo, en países industrializados y casi se puede afirmar que dentro de las posibilidades técnicas su beneficio está en el límite. Es previsible que solo las mejoras técnicas puedan aumentar su rendimiento, lo que supondría un incremento de un 3% a un 4% sobre el total de la energía hidráulica producida en los países avanzados (Ver Figura No. I.2).

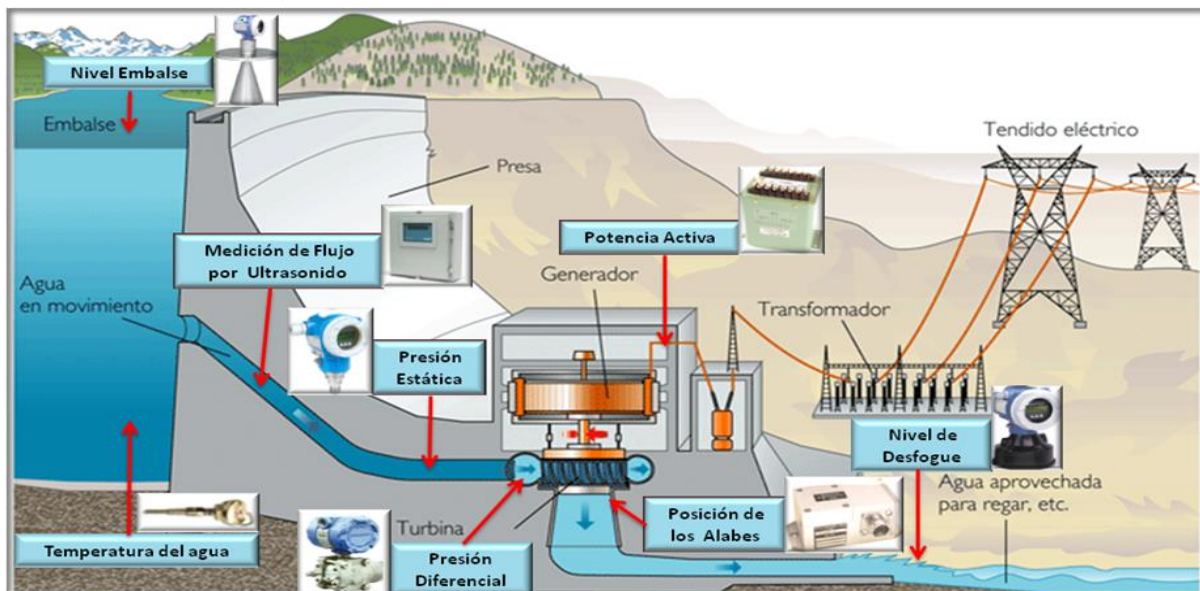


Figura No. I.2 Diagrama de una planta hidroeléctrica

¹⁰ 1) Central hidroeléctrica de las Tres Gargantas. 22.500 MW. China; 2) Central hidroeléctrica de Itaipú. 14.000 MW. Paraguay-Brasil; 3) Central hidroeléctrica de Xiluodu. 13.860 MW. China; 4) Central hidroeléctrica de Guri. 10.235 MW. Venezuela; 5) Central hidroeléctrica de Tucuruí. 8.370 MW. Brasil; 6) Central hidroeléctrica Grand Coulee. 6.809 MW. Estados Unidos; 7) Central hidroeléctrica de Xiangjiaba. 6.448 MW. China; 8) Central hidroeléctrica de Longtan. 6.426 MW. China; 9) Central hidroeléctrica de Sayano-Shushenskaya. 6.400 MW. Rusia; 10) Central hidroeléctrica de Krasnoyarsk. 6.000 MW. Rusia.

[Consulta 3 junio 2016

<http://elperiodicodelaenergia.com/las-10-centrales-hidroelectricas-mas-grandes-del-mundo/>;

<http://www.fierasdelaingenieria.com/las-centrales-hidroelectricas-mas-grandes-del-mundo/>

¹¹ Este aspecto es un desafío para el campo de la investigación científica en el campo de la generación eléctrica.

1.5 Energía del oleaje y de las mareas¹²

Para captar la del oleaje se han hecho diferentes instalaciones, basándose generalmente en el desnivel que adquiere un cuerpo flotante con el movimiento de las olas; aunque no han pasado de ser instalaciones experimentales. El aprovechamiento de las mareas es una realidad; ya que se obtienen actualmente cantidades significativas de energía por este procedimiento. Cabe destacar que este tipo de energía no produce contaminación (Ver Figura No. I.3).

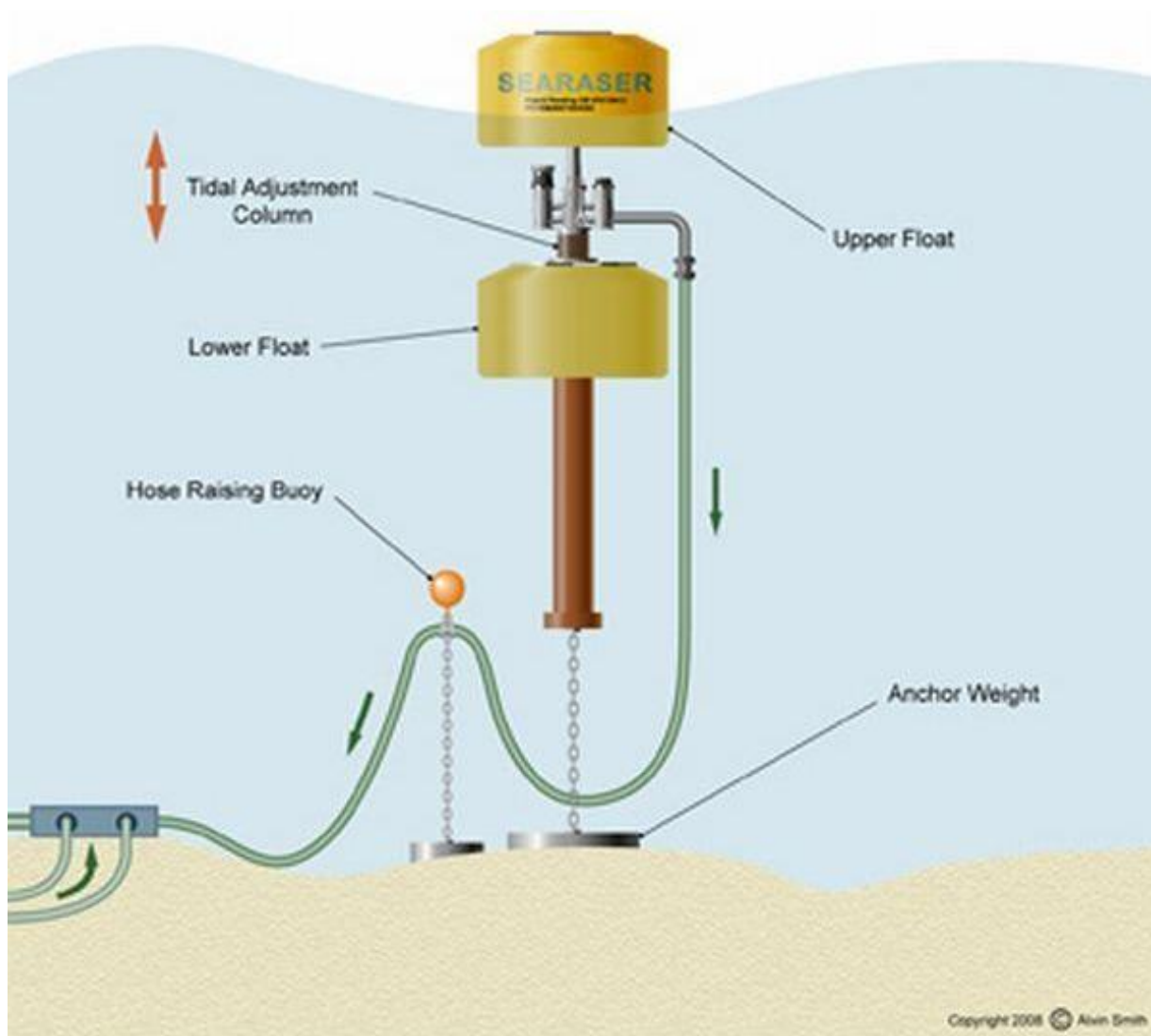


Figura No. I.3 Diagrama de Energía del oleaje y de las mareas

¹² Por ejemplo, en la Central instalada en el estuario del Río Rance, Francia; en la Planta de Energía Mareomotriz Sihwa Lake, Corea del Sur; en la Planta de Energía Mareomotriz TidalLagoon, Reino Unido; Proyecto de Energía Mareomotriz MeyGen, Escocia; en la Planta de Energía Mareomotriz Annapolis Royal, Canadá. [Consulta 3 junio 2016

<http://www.fierasdelaingenieria.com/las-plantas-de-energia-mareomotriz-mas-grandes-del-mundo/>

1.6 Energía eólica¹³

Es uno de los sistemas más antiguos para obtener energía. Hace doce siglos se utilizaban molinos para moler trigo y más recientemente para bombear agua, como en Holanda para desecar las zonas ganadas al mar y en diferentes partes para obtener agua de los pozos. Los inconvenientes de este tipo de energía son: su intermitencia (interrupción) y los graves daños que produce a la instalación un incremento excesivo a la velocidad del viento. Como contrapartida tiene la sencillez del mecanismo, que prácticamente se reduce a una torre con unas aspas y un elemento transmisor del movimiento de estas. Su contaminación es nula (Ver Figura No. I.4).

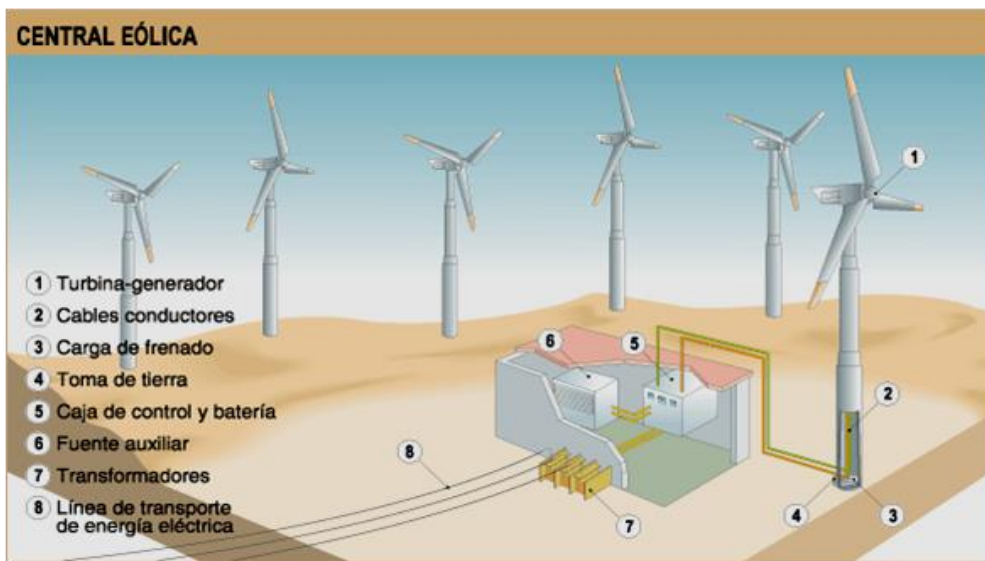


Figura No. I.4 Diagrama de Energía eólica

¹³ 1) Centro de Energía Eólica Alta (AWEC, Alta WindEnergy Centre) situado en Tehachapi, (Condado de Kern), en California, Estados Unidos, es actualmente el mayor parque eólico del mundo, con una capacidad operativa de 1.020 MW; 2) Parque Eólico Shepherds Flat situado cerca de Arlington, al este de Oregón, en Estados Unidos, es el segundo parque eólico más grande del mundo con una capacidad instalada de 845 MW; 3) Parque Eólico Roscoe localizado a 72 kilómetros al suroeste de Abilene en Texas, Estados Unidos, es actualmente el tercer mayor parque eólico del mundo con una capacidad instalada de 781,5 MW; 4) Centro de Energía Eólica HorseHollow ubicado entre el condado de Taylor y Nolan en Texas, Estados Unidos, es actualmente el cuarto parque eólico más grande del mundo con una capacidad instalada de 735,5 MW; 5) Parque Eólico Capricorn Ridge, situado entre los condados de Sterling y Coke en Texas, Estados Unidos, es en la actualidad el quinto parque eólico más grande del mundo con una capacidad instalada de 662,5 MW; 6) London Array, el mayor parque eólico marino del mundo con una capacidad instalada de 630 MW sus instalaciones se sitúan en el exterior del estuario del Támesis a más de 20 km de las costas de Kent y Essex; 7) Parque Eólico Fantanele-Cogealac localizado en la provincia de Dobruja en Rumania, es el séptimo mayor parque eólico del mundo con una capacidad instalada de 600 MW; 8) Parque Eólico Fowler Ridge, ubicado en el condado de Benton en Indiana, Estados Unidos, es el octavo mayor parque eólico del mundo una capacidad instalada total de 599,8 MW; 9) Parque Eólico Sweetwater, localizado en el condado de Nolan, Texas, Estados Unidos, es actualmente el noveno mayor parque eólico del mundo con una capacidad instalada de 585,3 MW;. [Consulta 3 junio 2016

<http://www.fierasdelaingenieria.com/las-plantas-de-energia-mareomotriz-mas-grandes-del-mundo/>

1.7 Energía geotérmica¹⁴

Distribuidas por debajo de la superficie terrestre se encuentran capas de agua a temperaturas que oscilan entre 50°C y 90°C. Gran parte de estas capas freáticas se han descubierto al realizarse perforaciones en prospecciones petrolíferas. Estas masas de agua tienen las características precisas para utilizarlas en la calefacción de viviendas, con el consiguiente ahorro del petróleo consumido para este fin (Ver Figura No. I.5).

Estadísticamente se puede aceptar que cada punto puede abastecer 2000 viviendas, siendo su duración de veinte a cincuenta años, como es lógico, ambos datos dependen de la importancia de la capa explotada. El proceso sería extraer agua a temperatura elevada, utilizarla para

¹⁴ 1) Complejo Geotérmico Geysers – EE.UU. El Complejo Geotérmico Geysers situado a unos 121 kilómetros al norte de San Francisco, California, se compone de 18 plantas de energía que la convierten en la instalación geotérmica más grande en el mundo. El complejo cuenta con una capacidad instalada de 1.517 MW y una capacidad de producción activa de 900 MW; 2) Complejo Geotérmico Larderello – Italia. El Complejo Geotérmico Larderello, que consta de 34 plantas con una capacidad neta total de 769 MW, es la segunda mayor instalación de energía geotérmica del mundo. La energía producida en el campo geotérmico, situado en la Toscana, Italia Central, representa el diez por ciento de toda la energía geotérmica producida en el mundo y atiende al 26,5% de las necesidades energéticas regionales; 3) Complejo Geotérmico Cerro Prieto – México. Con 720 MW, la Central de Energía Geotérmica Cerro Prieto situada en el sur de Mexicali, en Baja California al norte de México, es la tercera mayor instalación geotérmica en el mundo. Las turbinas del complejo incluyen cuatro de tipo condensación de 110 MW, cuatro de tipo doble flash de 110 MW, cuatro de tipo flash único de 37,5 MW más otras cuatro de 25 MW y una de 30 MW. Todas han sido suministradas por Toshiba y Mitsubishi Heavy Industries. Una quinta planta, que comprenderá dos turbinas de 50 MW, se encuentran actualmente en construcción; 4) Complejo Geotérmico Makban – Filipinas. El Complejo Geotérmico Makban, también conocido como Plantas de Energía Makiling-Banahaw, se encuentra en los municipios de Bahía y Calauan en la provincia de Laguna y, Santo Tomás, en la provincia de Batangas. Es la cuarta mayor instalación de energía geotérmica en el mundo, con una capacidad de producción de 458 MW; 5) Complejo Geotérmico Salton Sea – EE.UU. El Complejo Geotérmico Salton Sea incluye un conjunto de 10 plantas de generación de energía geotérmica en Calipatria, cerca del Mar de Salton en el Valle Imperial de California del Sur. Con una capacidad de generación combinada de 340 MW, es la quinta instalación geotérmica más grande en el mundo; 6). Complejo Geotérmico Hellisheidi – Islandia. El Complejo Geotérmico Hellisheidi es una planta de producción combinada de calor y electricidad (CHP) de vapor flash situada en el monte Hengill, aproximadamente a 20 kilómetros al este de la capital, Reykjavik. La planta tiene una capacidad de producción de 303 MW de energía eléctrica y 400 MW de energía térmica; 7) Complejo Geotérmico Tiwi – Filipinas. El Complejo Geotérmico Tiwi se sitúa en en la provincia de Albay, a unos 300 kilómetros al sureste de Manila. Con 289 MW (neto), es la séptima instalación geotérmica más grande en el mundo, siendo propiedad de AP Renewables, una filial de Aboitiz Power. El complejo se compone de tres plantas de energía que disponen de dos unidades cada una; 8) Complejo Geotérmico Malitbog – Filipinas. El Complejo Geotérmico Malitbog de 232,5 MW, situado aproximadamente a 25 kilómetros al norte de la ciudad de Ormoc, en la isla de Leyte, es la octava instalación de energía geotérmica más grande del mundo. La planta fue propiedad de Visayas Geothermal Power Company (VGPC), que posteriormente transfirió los derechos de propiedad a la Philippine National Oil-Energy Development Company (PNOC); 9) Complejo Geotérmico Wayang Windu – Indonesia. El Complejo Geotérmico Wayang Windu se encuentra en Pangalengan, aproximadamente 40 kilómetros al sur de la ciudad de Bandung, en la provincia de Java Occidental. La instalación geotérmica, con una capacidad de producción de 227 MW, es la novena más grande del mundo; 10) Complejo Geotérmico Darajat – Indonesia. El Complejo Geotérmico Darajat situado en Garut, en el Distrito de Pasirwangi en Java Occidental, es la décima mayor instalación geotérmica en el mundo con una capacidad instalada de 259 MW, la cual está gestionada por Darajat GPP Amoseas Indonesia, una subsidiaria de Chevron Texaco. [Consulta 23 junio 2016 <http://www.fierasdelaingenieria.com/las-plantas-de-energia-geotermica-mas-grandes-del-mundo/>]

calefacción de las viviendas y volverla a inyectar, a temperatura menor, a una distancia suficiente, para que su retorno a la capa caliente sea mínimo.

Este sistema se podría completar con el sistema llamado helio geotérmico, que consiste en calentar masa de agua por medio de la energía solar, durante los meses cálidos, e inyectarlas a unos 90°C en una capa interna de la tierra. Se ha comprobado que, al extraerla, el agua se recupera hasta con un 80 por 100 de la energía total inicial, y a una temperatura próxima al 70°C. El proceso se cerraría inyectando el agua caliente del procedimiento helio geotérmico en la capa freática caliente, de la cual se ha extraído agua caliente durante el invierno.

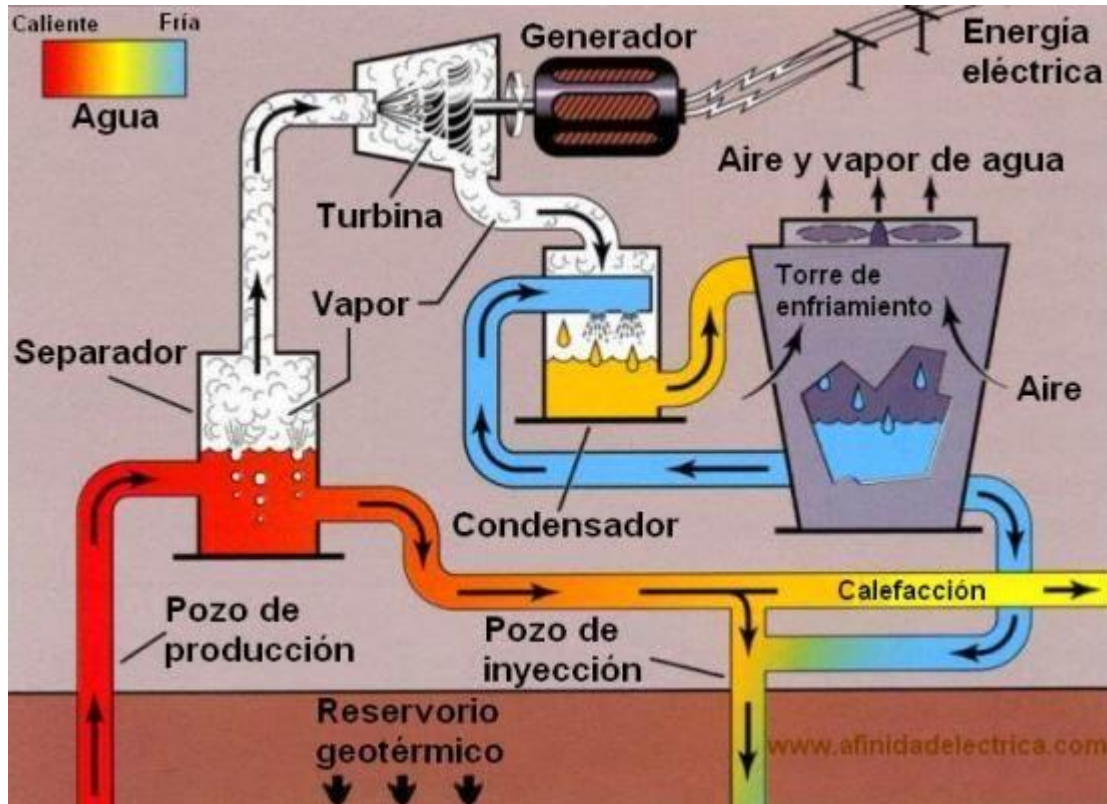


Figura No. I.5 Diagrama de Energía geotérmica

1.8 Energía maremotérmica (gradiente térmico de los mares)¹⁵

En los mares cálidos existe una diferencia de temperatura, entre la superficie y a unos 4000 mil metros de profundidad del orden de los 20°C. A pesar de no ser muy elevada, esta diferencia es significativa. Las centrales bajo este proceso funcionan a baja presión a través de una sustancia como el propano líquido o amoniaco que se enciende con el agua caliente que entraría por la parte superior a nivel de agua. El gas obtenido movería una turbina y está un alternador, produciéndose energía eléctrica, volviéndose el vapor a condensarse al refrigerarlo con el agua fría de la parte inferior. El rendimiento de este sistema es muy bajo, pero no tiene importancia en el proceso completo; ya que la energía calorífica o térmica del mar es inagotable (Ver Figura No.I.6).

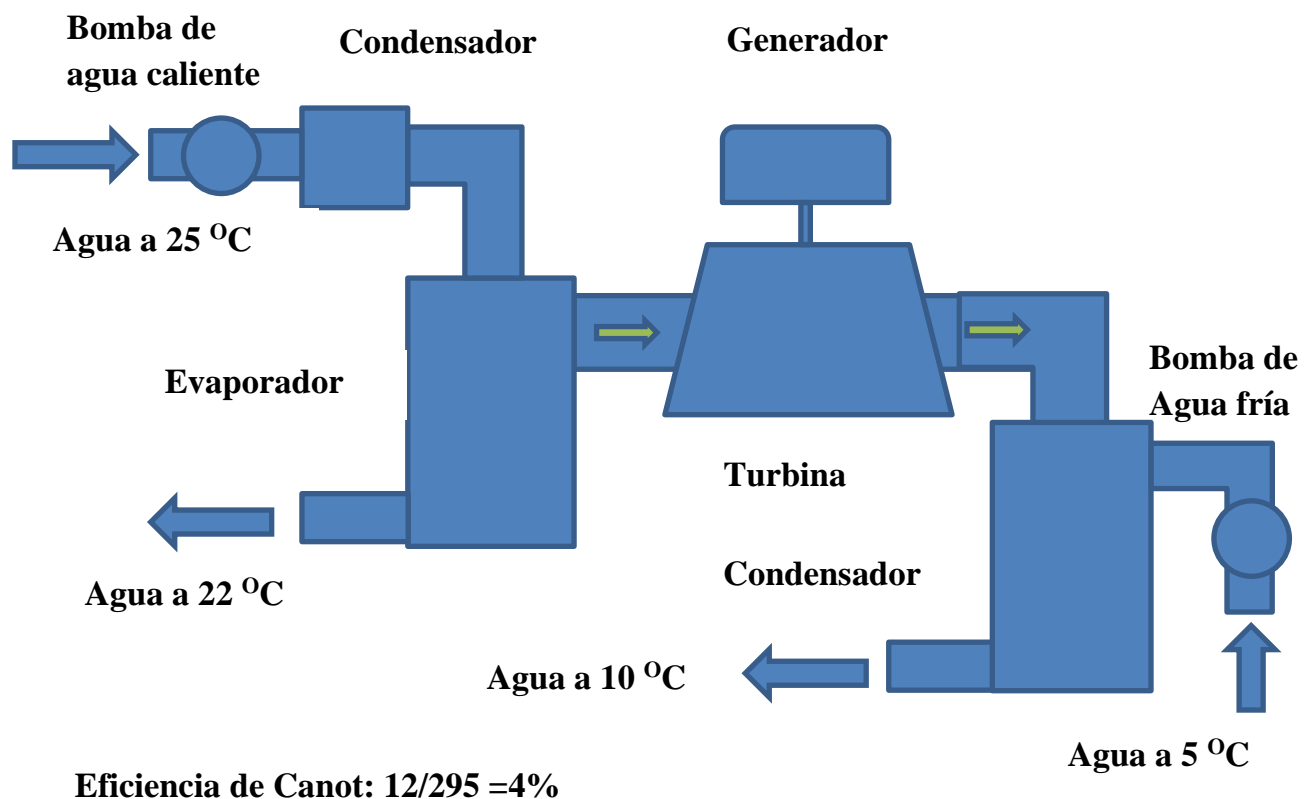


Figura No. I.6 Diagrama de Energía maremotérmica

¹⁵ Es importante mencionar que en 1929, George Claude construyó una central en la Bahía Mantanzas, Cuba y luego Francia construyó otra en la Costa de Marfil. Sin embargo, *por dificultades técnicas de esos años, hicieron que las centrales se abandonaran*, pero el esfuerzo no fue inútil; puesto que sirvió para demostrar que las centrales de este tipo fueran viables en un futuro.

1.9 Energía de las biomásas¹⁶

En este tipo de energías se haya comprendidas todas aquellas de origen vegetal (*maderas, turbas, carbón vegetal, tracción animal (tractor)*) que se obtienen o se pueden obtener por los procesos naturales que se producen en la tierra. En Brasil se obtiene en la actualidad cerca de $2 \cdot 10^9$ litros de alcohol que se pueden utilizar como combustible, y sirven de carburante para una parte de los automóviles (Ver Figura No. 1.7).

Los procesos de fermentación anaerobia de las materias orgánicas producen gas metano junto con dióxido de carbono. El gas metano es un carburante y relativamente sencillo de almacenar. Este proceso se puede poner en marcha en todas las granjas, por ese sistema en Chile se produce una energía equivalente de 15×10^9 kWh. En China existen 4 millones de generadores de este tipo y actualmente se está procediendo de su implementación en la India.

Estos y otros procedimientos como el aprovechamiento de la basura a base de fermentaciones y el aprovechamiento de las algas marinas, pueden ser energías de sustitución en área determinadas de la superficie terrestre.

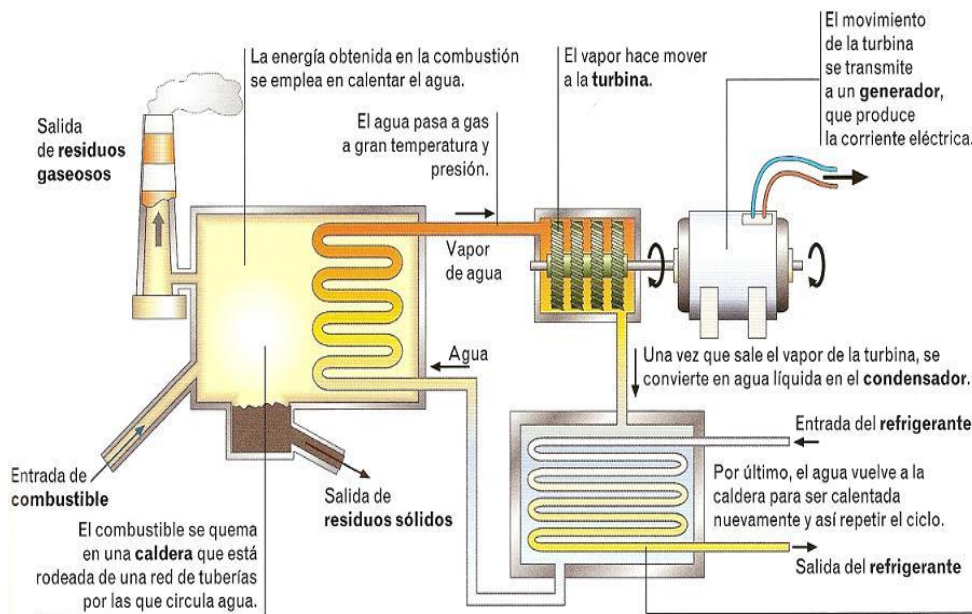


Figura No. I.7 Diagrama de Energía de las biomásas

¹⁶ **1.** Planta Ironbridge de 740 MW, en Reino Unido. La planta Ironbridge con una capacidad de 740 MW localizada en Severn Gorge, Reino Unido, es la planta de energía de biomasa más grande del mundo. **2.** Planta Alholmens Kraft de 265 MW, en Finlandia. La planta Alholmens Kraft de 265 MW ubicada en las instalaciones de la fábrica de papel UPM-Kymmene en Alholmen, Jakobstad, Finlandia, es la segunda planta de energía de biomasa más grande del mundo. **3.** Planta Polaniec de 205 MW, en Polonia.. [Consulta 23 de junio de 2016 <http://elperiodicodelaenergia.com/las-10-centrales-hidroelectricas-mas-grandes-del-mundo/>

1.9 Célula de combustible¹⁷

Este tipo de célula produce electricidad de forma directa a partir de combustible y sin dejar residuos contaminantes. Consta de dos polos, positivo y negativo, a los que se suministra el combustible, por ejemplo, hidrógeno al negativo y oxígeno al positivo. Como consecuencia de una serie de acciones químicas en ambos polos pasan electrones del positivo al negativo, generando una diferencia de potencial entre ambos y comportándose el sistema como un generador de corriente continua siendo el voltaje real, que produce este tipo de célula del orden de 0.8 v. La célula de combustible es usada actualmente. La United Technologies Corporation diseñó y construyó una planta formada por un conjunto de células, capaz de producir 4.5×10^6 W.

Este tipo de generadores tienen ventajas: no contamina y no necesita tendido eléctrico de transporte; ya que en cada zona se puede situar un generador, funcionando independientemente de los demás, eliminando gastos de transporte. Sin embargo, el costo es muy elevado, por ejemplo, hace un par de años era de 1500 dls. por kw. Sólo su lanzamiento industrial puede llevar un costo a unos límites del orden de 350 dls (Ver Figura No I.8).



Figura No I.8 Diagrama de Célula de combustible

¹⁷ La central con pilas de combustible más grande del mundo. Una central eléctrica con pilas de combustible de 11,2 MW, la más grande del mundo según Fuel Cell Energy, comenzó a operar en Daegu City (Corea del Sur). [Consulta 23 junio 2016 http://www.exitae.es/blog/energias-renovables/la-central-con-pilas-de-combustible-mas-grande-del-mundo_705]

2. Energías no renovables

2.1 Petróleo

Proveniente del latín *petroleum* (*petra*-piedra y *óleum*-aceite), la palabra petróleo significa aceite de piedra. Es un compuesto de hidrocarburos, básicamente una combinación de carbono e hidrogeno.

El petróleo corresponde a un grupo de sustancias bituminosas muy abundantes en la naturaleza que se encuentran en muy variadas formas y reciben diversas denominaciones como petróleo en bruto, aceite de piedra, nafta, asfalto, o bien se halla mesclado con materias minerales, como ocurre en las pizarras bituminosas.

Al analizar petróleo de procedencias diversas, de manera general puede decirse que lo forman los siguientes elementos químicos.

Carbono	de 76 a 86 por ciento
Hidrogeno	de 10 a 14 por ciento

A veces contiene algunas impurezas mezcladas como oxígeno, azufre, y nitrógeno. También se han encontrado huellas de compuestos de hierro, níquel, vanadio y otros metales.

2. 2 Teorías de formación del petróleo

Existen varias teorías sobre los orígenes de formación del petróleo que pueden ser clasificadas en dos grandes rubros: *la de formación inorgánica* y *la de formación orgánica*. La primera explica la formulación del petróleo como el resultado de *reacciones geoquímicas entre el agua y el bióxido de carbono*, además de otras sustancias inorgánicas como carburos y carbonatos de metales.

Esta teoría fue de gran aceptación durante muchos años, pero a medida que se han perfeccionado las técnicas del análisis geológico se han ido acumulando información al respecto, se ha dado paso a teorías de formación orgánica que determinan que el petróleo es producto de la *descomposición de organismos vegetales y animales* que existieron en ciertos periodos del tiempo geológico y que fueron sometidos a enormes presiones y a elevadas temperaturas.

Los principales factores que han contribuido a tener una mayor aceptación de las teorías orgánicas de formación del petróleo es el hecho de que a partir de estudios realizados en laboratorio de rocas petrolíferas de campos productores, se ha encontrado en ellas ciertas propiedades ópticas que solo se localizan en sustancias orgánicas, además de que el contenido de nitrógeno y de otras sustancias en el petróleo proceden de materiales orgánicos.

Por otra parte, la escasez de depósitos de origen incandescente en muchos de los campos aceiteros, ha sido para la mayoría de los geólogos una razón convincente de que el petróleo no tiene origen inorgánico.

Hubo una hipótesis que suponía al carbón mineral como origen de los hidrocarburos, pero en contra de ellas se comprobó la predominante frecuencia con que se presentan los yacimientos petrolíferos en áreas que carecen de esta sustancia mineral.

También puede confirmar el *origen orgánico del petróleo* la evidencia de que la mayor parte de los yacimientos del mundo se localizan en lugares que *fueron ocupados por lagos y mares hace millones de años*¹⁸.

2.3 Características del petróleo

El petróleo se encuentra en el subsuelo impregnado en formaciones de tipo arenoso o calcáreo. Asume los tres estados físicos de la materia: sólido, líquido y gaseoso, según su composición y la temperatura y presión a que se encuentra. Su color varía entre el *ámbar* y *el negro*; su densidad es menor que la del agua. En estado gaseoso es *inodoro, incoloro e insípido*, por lo que, como *medida de seguridad*, se le mezcla un compuesto sulfuroso (**mercaptano**) para descubrir su presencia y evitar intoxicaciones. Puede hallarse solo o compuesto con el petróleo líquido dentro de un mismo yacimiento. En el subsuelo se encuentra por lo general encima de una capa de agua, hallándose en la parte superior una de gas.

¹⁸ Los datos históricos del petróleo en México señalan que durante la época precortesiana, las tribus que habitaron el territorio mexicano utilizaron el petróleo como material de construcción, medicina, pegamento, impermeabilizante y como incienso para los ritos religiosos. Por ejemplo, los indígenas totonacas (región de Veracruz) lo recogían de la superficie de las aguas para utilizarlos como medicina e iluminante. En las costas mexicanas los indígenas los usaban para limpiar y blanquear su dentadura. Años más tarde, en el último cuarto del siglo XIX, en 1886 la Water Pierce Oil Company construyó en el puerto de Veracruz una refinería con capacidad de 500 barriles diarios para procesar el petróleo crudo, importado de Estados Unidos. Diez años más tarde fundó otra refinería en el margen izquierdo del Río Panuco, entre la ciudad de Tampico y la desembocadura del río para procesar 2000 barriles diarios de petróleo crudo importado del país del norte y convertido en kerosina. En 1898 la compañía adquirió la refinería que construyeran Fairburn y Dickson en el mismo puerto, cambiando el nombre de “El Águila” por el “El Gallo”. (PEMEX, 1984: 18).

El hidrocarburo no se encuentra distribuido uniformemente en las capas del subsuelo. Es necesario que concurren *cuatro condiciones* para dar lugar a *un yacimiento* donde se acumule petróleo y gas.

1. Una roca almacenadora porosa y permeable, en forma tal que bajo presión, el petróleo pueda moverse a través de sus poros de tamaño microscópico.
2. Una roca impermeable sello que evite el escape del petróleo a la superficie
3. El yacimiento debe tener forma de “trampa”. Es decir que las rocas impermeables se encuentren dispuestas en tal forma que el petróleo no pueda moverse hacia los lados.
4. Deben existir rocas cuyo contenido orgánico se haya convertido en petróleo por efecto de la presión y de la temperatura (PEMEX, 1984: 11).

Existen tres clases de yacimientos: *de recuperación primaria, secundaria y terciaria*. En los primeros el petróleo sale impulsado por la presión de los gases o se necesita bombearlo. En los segundos, se requiere recurrir a inyectar agua o gases para poder extraerlo. La recuperación terciaria corresponde al caso en que se inyectan sustancias adecuadas para lograr que el petróleo fluya con facilidad.

2.4 Gas natural

Es uno de los combustibles de mayor provenir en todo el planeta, en la actualidad cubre una gran parte de la demanda de energía como Estados Unidos, Europa y Japón. El auge de este combustible comienza después de la Segunda Guerra Mundial. En Estado Unidos el gas cubría en 1985 el 30% del consumo total de energía.

El gas natural tiene grandes ventajas: La primera que su combustión no contamina al medio ambiente; la segunda que su transporte y producción es sencillo, con lo que su costo es bajo; la tercera que se puede controlar y distribuir fácilmente, empleándose en todos los sectores del consumo, salvo en el de transporte de gran escala; aunque no se descarte esta última posibilidad.

El transporte del gas natural no presenta dificultad cuando se hace en forma gaseosa, a través de gaseoductos, pero necesita de ciertas manipulaciones cuando se quiere transportar entre

dos puntos no existiendo dicho gaseoducto. En su estado natural ocupa un gran volumen, por lo cual hay que reducirlo a forma líquida, estado en el que ocupa un volumen 600 veces menor. Para conseguirlo es necesario bajar su temperatura -162°C , la técnica actual resuelve este paso con mayor facilidad y a pequeño costo, pero aparece la dificultad de encontrar un recipiente adecuado, ya que incluso que el acero al carbono se vuelve quebradizo a tan baja temperatura.

A lo largo de la historia de la introducción de este combustible se han registrado accidentes, como el de Cleveland en 1944, en el que se produjo una fuga de gas líquido de un recipiente de almacenaje; derramándose y entrando en ebullición rápidamente los vapores formados entraron en ignición, produciéndose un gigantesco incendio en el que murieron 128 personas. Este y otros accidentes similares frenaron la expansión de este combustible. Hoy en día existen normas muy estrictas para su transporte y almacenamiento, con lo que su índice de peligrosidad no es mayor que el de otros combustibles. Normalmente los recipientes son esféricos y constan de tres capas: la interior de una aleación de acero con níquel, la intermedia de un material aislante e incombustible llamado perlita, y la exterior de cualquier material, acero, hormigón, con la única condición de que este sirva de sostén a las dos capas interiores, ya que esta capa exterior no se ve afectada por las condiciones internas del gas. Cuando el depósito es de almacenamiento, las normas exigen que a su alrededor existe un muro de contención, para que en el caso de que se produzca un derrame evitar otra catástrofe similar a la de 1944.

El gas natural, cuya composición es metano con pequeñas cantidades de etano, propano y nitrógeno, se obtiene por perforación de yacimientos que producen únicamente gas o como subproducto en la extracción del petróleo. En este último caso, se suele desperdiciar, dejándolo que escape a la atmósfera o quemándolo (Marín, 1982: 27-29).

2.5 El Carbón

Carboeléctrica

México cuenta con tres centrales carboeléctricas cuya capacidad conjunta es de 5,378 MW equivalentes al 7% de toda la capacidad instalada. En 2017 estas centrales contribuyeron con 30,557 GWh de energía eléctrica, que representa el 9% de la generación de electricidad en 2017 (Mapa 2.2.6.- Figura 1.9). Las centrales carboeléctricas se encuentran ubicadas en Coahuila y Guerrero. El estado de Coahuila es el mayor productor a nivel nacional de carbón mineral⁴², el

cual es utilizado en las centrales de Rio Escondido y Carbón II. La central dual Petacalco en el estado de Guerrero, utiliza como combustible primario carbón importado y puede utilizar también combustóleo⁴³. A nivel mundial el carbón representa la fuente principal de energía para la generación de electricidad. Los países con mayor generación eléctrica a partir de esta fuente energética son China y Estados Unidos de América ⁴⁴. La concepción básica de una central Carboeléctrica es análoga a una central termoeléctrica. El cambio principal radica en el generador de vapor, el cual es mas complejo, de mayores dimensiones y con superficies mas grandes para la transferencia de calor. Además, requiere de un tratamiento especial del combustible, el cual consiste en la pulverización y secado del carbón, así como de sistemas anticontaminantes como colectores de bolsas y equipos de desulfuración. Si bien, una Carboeléctrica es mas eficiente que una termoeléctrica convencional, el uso del carbón como ⁴² México participa con el 0.1% de la reserva mundial de carbón, equivalente a 1,211 millones de toneladas, poco mas del 90% se localiza en el estado de Coahuila (BP Statistical Review of World Energy, y Servicio Geológico Mexicano (SGM)). ⁴³ En 2017 se importaron 10.5 millones de toneladas de carbón, principalmente de tres países: 62% proveniente de Colombia, 2.2% de Canadá y 35% los Estados Unidos combustible primario para la generación de electricidad origina importantes emisiones contaminantes (en promedio emite 773 kilogramos de CO₂ por MWh) y afecta a los equipos y materiales de la central generadora. No obstante, existen sistemas de captura y almacenamiento de CO₂ que pueden ser integrados a dichas centrales, con la finalidad de mitigar el nivel de emisiones al medio ambiente.

MAPA 2.2.6. CAPACIDAD Y GENERACIÓN EN CENTRALES CARBOELÉCTRICAS Y LECHO FLUIDIZADO 2017
(MW, GWh)



Fuente: Elaborado por la SENER con datos de la CFE, la CRE y el CENACE.
Los totales pueden no coincidir por redondeo.

Figura I.9. Centrales Carboeléctricas en México. (PRODESEN 2018)

2.4 Recursos nucleares

México cuenta con una sola central nucleoelectrónica ubicada en el estado de Veracruz, con una capacidad actual de 1,608 MW, cuya generación represento el 3% del total nacional (10,883 GWh) (ver, Mapa 2.2.10.- figura 1.10). A nivel mundial, la energía nuclear participa con el 11% de la energía eléctrica generada mediante los 450 reactores nucleares en operación, Estados Unidos de América y Francia son los países con el mayor número de centrales instaladas (99 y 58 plantas respectivamente) 49. Una central nuclear sigue el mismo principio de generación de energía eléctrica que una central de tecnología convencional, con la diferencia de que no requiere de un proceso de combustión. El vapor necesario para poner en marcha la turbina y esta a su vez el generador se obtiene mediante el proceso de fisión del uranio. La fisión se produce al chocar un neutrón contra un núcleo de uranio o plutonio dentro de un reactor. La división de estos núcleos genera energía, partículas subatómicas y más neutrones que al chocar con otros núcleos de uranio o plutonio provocan una reacción en cadena. La energía generada se aprovecha mediante un refrigerante, el cual puede ser agua o sodio líquido. Este fluido absorbe el calor dentro del reactor y permite generar vapor de agua mediante un sistema secundario. La fisión nuclear es una tecnología que ha estado en uso desde hace más de 50 años. Los últimos diseños ofrecen mayor seguridad y rendimiento. Las nucleoelectrónicas tienen una vida media útil de 60

años, tiempo que supera al resto de las tecnologías. Este tipo de centrales representan una fuente segura y competitiva para el suministro de energía eléctrica, ya que generan electricidad de forma continua para satisfacer la demanda base. La energía nuclear es una fuente limpia, ya que no requiere de combustión para su funcionamiento, no está sujeta a la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles y en su proceso de generación no libera emisiones contaminantes.

MAPA 2.2.10. CAPACIDAD Y GENERACIÓN EN CENTRALES NUCLEOELÉCTRICAS 2017
(MW, GWh)



Figura I.10. Central Nucleoeléctrica en Veracruz México. (PRODESEN 2018)

GRÁFICO 2.2.2. CAPACIDAD INSTALADA POR TIPO DE TECNOLOGÍA 2017
(Porcentaje)

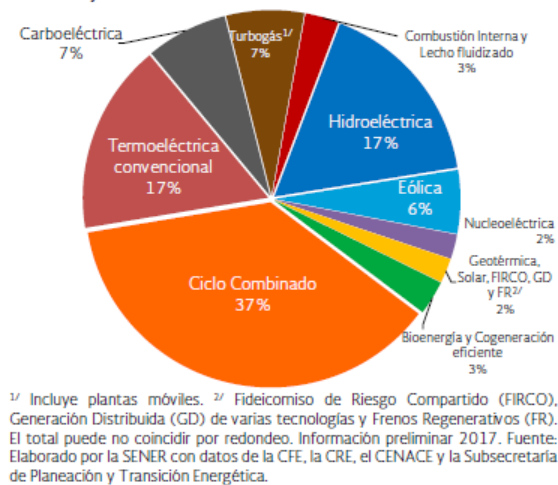


Figura I.11. Situación de la Generación Eléctrica en México al 2017. (PRODESEN 2018)

CAPITULO II

Generador Síncrono

II.1 Introducción

El generador de corriente alterna

- **Clasificación y andamiaje de los alternadores**

El tipo de alternador de campo giratorio puede dividirse en dos tipos: *vertical* y *horizontal*. El *vertical*, se utiliza de manera principal en la relación con las turbinas hidráulicas. La superioridad del tipo *horizontal* depende del hecho de que el desarrollo de las turbinas de vapor exigía velocidades mucho más elevadas que las que eran normales antes de la adopción, de esta forma de motor primario y es evidente que el diseño horizontal reúne mejores condiciones que el vertical para proporcionar la necesaria fortaleza de armadura, libertad de vibración y sencillez de construcción de cojinetes (Langsdorf, 1971: 420)

- **Construcción del inducido. Requerimientos para la refrigeración**

Las características esenciales del generador síncrono en conjunto. El núcleo del inducido cualquiera que sea el tipo de la máquina está formado por chapas de acero laminado de un espesor aproximado de 0.035 cm., firmemente unidas la armadura. En algunos proyectos, los salientes de cola de milano de las chapas del núcleo encajan en ranuras hechas en el bastidor en otros los salientes del bastidor engranan con las ranuras de las chapas. Para que el núcleo tenga el espesor requerido se dispone capas sucesivas de forma que las uniones por cubre juntas entre segmentos adyacentes de una capa caigan en medio de las siguiente, estando las proyecciones de cola de milano y las ranuras para su recepción situadas de tal forma que hagan posible tal disposición. Las chapas están fuertemente unidas mediante pernos pasantes y placas terminales, estando estas últimas provistas para sostener los dientes del inducido (Langsdorf, 1971: 420).

La armadura exterior o carcasa que soporta el núcleo del inducido se construye con láminas de acero soldadas eléctricamente, en lugar de las armaduras más costosas de acero fundido que se utilizaban antiguamente. Cuando se trata de turbos alternadores en los que la ventilación forzada es una necesidad, el **diseño interior de la carcasa** debe prever los adecuados conductos para el libre movimiento de grandes volúmenes de aire de refrigeración o de gas hidrogeno, por lo que la *carcasa debe de estar totalmente cerrada*.

Cuando se trata de alternadores para turbinas hidráulicas o para máquinas de combustión interna de *baja o media velocidad*, caracterizados por **grandes diámetros y pequeña longitud axial** no existen dificultades especiales para proporcionar la suficiente ventilación que mantenga la temperatura de trabajo dentro de los límites de seguridad. Además de las grandes superficies útiles para la radiación directa, existe la acción aireadora del campo giratorio, que puede incrementarse proveyéndole de aspas de ventilador alrededor de la periferia. Si es pequeña la longitud axial del núcleo, el calor desarrollado en la parte envuelta del devanado del inducido, se trasladará a la conexiones terminales, donde se disipará si la acción aireadora es suficiente; pero, generalmente, es necesario subdividir el núcleo dotándolo de conductos de ventilación a intervalos de 7.5 centímetros, aproximadamente, para permitir el flujo de aire refrigerado radialmente en el núcleo. La provisión de las adecuadas cualidades de refrigeración se convierte en un problema de la **máxima importancia en el proyecto** de turbo alternadores de **elevada velocidad y gran capacidad**. La ecuación de la potencia de salida: $K_{va} = \zeta d^2 l n$

Demuestra que el efecto de la elevada velocidad, n , es reducir la cantidad de material activo (determinada por el diámetro d y la longitud axial l) por debajo del necesario en una máquina de baja velocidad de la misma capacidad, disminuyendo así considerablemente la superficie útil para la radiación directa. El diámetro debe mantenerse lo suficientemente pequeño para conservar la velocidad periférica del rotor dentro del límite de seguridad, de modo que para grandes capacidades, la longitud axial debe ser considerable, lo que se añade a la dificultad de refrigerar la parte central del núcleo, que se encuentra demasiado alejada de las conexiones terminales para permitir que el calor se traslade a lo largo de los inductores del inducido hasta las conexiones terminales, con moderada diferencia de temperatura entre el punto medio y lo externos. Estos razonamientos señalan la necesidad de encerrar completamente la máquina afín

de permitir el empleo de ventilación forzada para disipar el calor, con lo que el proyectista se enfrenta con la dificultad de diseñar conductos de suficiente sección para permitir el paso del necesario volumen de aire. La *cantidad necesaria de aire refrigerante* puede calcularse mediante las siguientes consideraciones:

Peso de 1 pie cúbico de aire seco a 60°F y 28,5 pulgadas

$$Hg=0.07272 \text{ libras}$$

Calor específico de aire=0.2418

1 Btu=778 libras pie

La energía necesaria para elevar 100 pies cúbicos de aire

$$=0.07272 \times 100 \times 0.2418 \times 778 \times 9/5 =2.462$$

$$=2.462 \times 0.746/33.000 \text{ km-min} = 0.0559 \text{ kw-min}$$

Por lo tanto, una pérdida de un kW elevará la temperatura de 100 pies cúbicos de aire a $1/0.0559 = 18^\circ\text{C}$ en un minuto. Si la temperatura del aire es más elevada, el peso por pie cúbico será inferior a la cifra utilizada anteriormente, en cuyo caso, la elevación de la temperatura correspondiente a una pérdida dada, será más alta en relación inversa con la disminución del peso específico.

Por ejemplo¹⁹, del volumen necesario del aire refrigerante, consideramos el caso de una máquina de 15 000 kVA, 1500 rpm y 25 ciclos, que tiene un rendimiento de 96.5 %. Las pérdidas en las máquina son: $15000/0.965 - 15000 = 545 \text{ kW}$.

¹⁹Ejemplo recuperado de Langsdorf (1971) de B. G. Lamme, High-speed Turbo-alternator, Designs and Limitations, Trans AIEE, 32:11 1931

Lo que exige 54500 pies cúbicos de aire por minuto, con una diferencia de 18°C entre las temperatura del aire de entrada y salida, o sea *50000 pies cúbicos por minuto*, aproximadamente, para una *elevación de temperatura de 20°* suponiendo una velocidad media del aire de 6000 pies por minuto (*valores del 5000 a 6000 pies por minuto son corrientes de aire*), la superficie de la sección transversal de los conductores del aire debe ser de $8\frac{1}{3}$ pies cuadrados, o sea, muy superior a los que puede obtenerse con el método ordinario de ventilación radial, en la que el aire refrigerante entra en los conductos a través del núcleo del estator por el entre hierro.

Si suponemos que la velocidad periférica del rotor de la máquina descrita anteriormente es 20000 pies por minutos, el diámetro tendrá 51 pulgadas y con un entre hierro de 1 pulgada (de hierro a hierro) y en la hipótesis de que el aire procede de los dos extremos, la sección trasversal útil será 2.22 pies cuadrados, o sea, ligeramente superior a una cuarta parte de la superficie necesaria.

En lo que al *rotor* se refiere, no existe dificultad alguna para proporcionar suficiente aire refrigerante, porque las *pérdidas* en el rotor *constituyen únicamente el 10%* aproximadamente, de las pérdidas totales, por lo que solamente necesitará 5000 pies cúbicos de aire, aproximadamente, por minuto, lo que corresponde a una superficie del conducto de 0.83 pies cuadrados, aproximadamente, o sea, perfectamente dentro de la cantidad disponible; la dificultad surge por la cantidad mucho mayor de aire refrigerante que necesita el estator.

Las limitaciones del método radial llevaron al desarrollo de los métodos de refrigeración *circunferencial* y *axial*. En la *circunferencial*, el aire es proporcionado en uno más punto sobre la periferia exterior del núcleo del estator y se fuerza circunferencialmente en los conductos entre chapas hasta las adecuadas bocas de salida si se combina este método con el sistema radial, los conductos del estator tendrán que llevar las dos corrientes de aire (ventilación circunferencial y ventilación axial) Por lo que la interferencia resultante disminuirá la efectividad de ambas.

Para evitar dicha interferencia, algunas máquinas se han construido cerrado conductos radiales alternos en la superficie exterior y todos ellos en el entre hierro. El gran conducto central proporciona una boca de salida para el aire refrigerante que va al rotor. Este método tiene la desventaja de que los conductos del estator no están todos en paralelo, lo que se traduce en una reducción de la superficie útil y un aumento de la longitud del camino.

En la *axial*, el aire refrigerante del *estatores forzado en sentido axial* en los conductos forados en las perforaciones de la chapas del estator. Este proyecto tiene la gran ventaja de que el calor del estator que fluye con mayor libertad a lo largo de las chapas, que a través de ellas encuentra su camino directamente hasta las aberturas axiales con una caída de temperatura considerablemente inferior que la necesaria para hacer fluir a través de las chapas.

Cuando el aire refrigerante que se utiliza para la ventilación forzada de generadores contiene una cantidad apreciable de materias solidas en suspensión, como sucede cuando el ambiente circundante tiene cantidad de humo o de polvo, el aire refrigerante *debe filtrarse o purificarse*, con el objetivo de evitar las posibles obstrucciones de los conductos en el núcleo. Se han empleado filtros hechos de tejido elástico, pero resultan engorrosos a causa de la frecuencia con que han de renovarse cuando el aire este sucio. El lavado del aire se hace pasar por una cámara de rocío, lo que constituye un remedio eficaz; ya que al mismo tiempo que se hace desaparecer el polvo se reduce considerablemente la temperatura inicial del aire, con lo que incrementa la potencia de salida del generador sin exceder el límite permisible de temperatura en el punto más caliente.

Cuando se trata de motores y generadores de gran capacidad, la circulación del aire refrigerante exige una potencia considerable y el correspondiente costoso equipo auxiliar. Con el aire como medio refrigerante existe un cierto límite de las características nominales el cual no sería posible conservar los límites de temperatura dentro de un margen de seguridad. Un nuevo aumento de las características nominales (potencia) exige un medio refrigerante que tenga un calor específico mayor que el aire y una densidad menor que él. **El hidrogeno**, que tiene un calor específico de 3409 (14_{1/2} veces, aproximadamente, el del aire) y una densidad de 0.005611 libras por pie cúbico a 0°C y 760 mm de Hg, cumple tales requisitos por lo que se emplea para la refrigeración de grandes condensadores y generadores síncronos. Su utilización *requiere diseños totalmente cerrados aprueba de explosiones y dotados de serpentines* (caminos) de refrigeración (que conduzca en agua o aceite circulantes) dentro de la carcasa, para la extracción del calor de la atmósfera de hidrogeno circulante²⁰.

²⁰ Ejemplo recuperado de Langsdorf (1971) de M.D. Ross, Application of Hydrogen Cooling to Turbine Generator, Trans AIEE, 50: 381 (1931)

II.2 El rotor (Philip Kiameh, 2011)

El rotor es hecho de acero, el acero tiene un tratamiento en vacío para minimizar fracturas. Un tratamiento de recalentamiento es hecho para aliviar esfuerzos mecánicos justo después del maquinado. Exámenes ultrasónicos son hechos en varias etapas del rotor, la figura 2.1 ilustra las ranuras del rotor .también se ilustra una sección transversal del rotor así como el flujo del gas. El par de oposición que experimenta el rotor incrementa de 4 a 5 veces la plena carga cuando ocurre un corto circuito en las terminales del generador. El acoplamiento de la turbina con el rotor debe ser capaz de soportar el par pico.

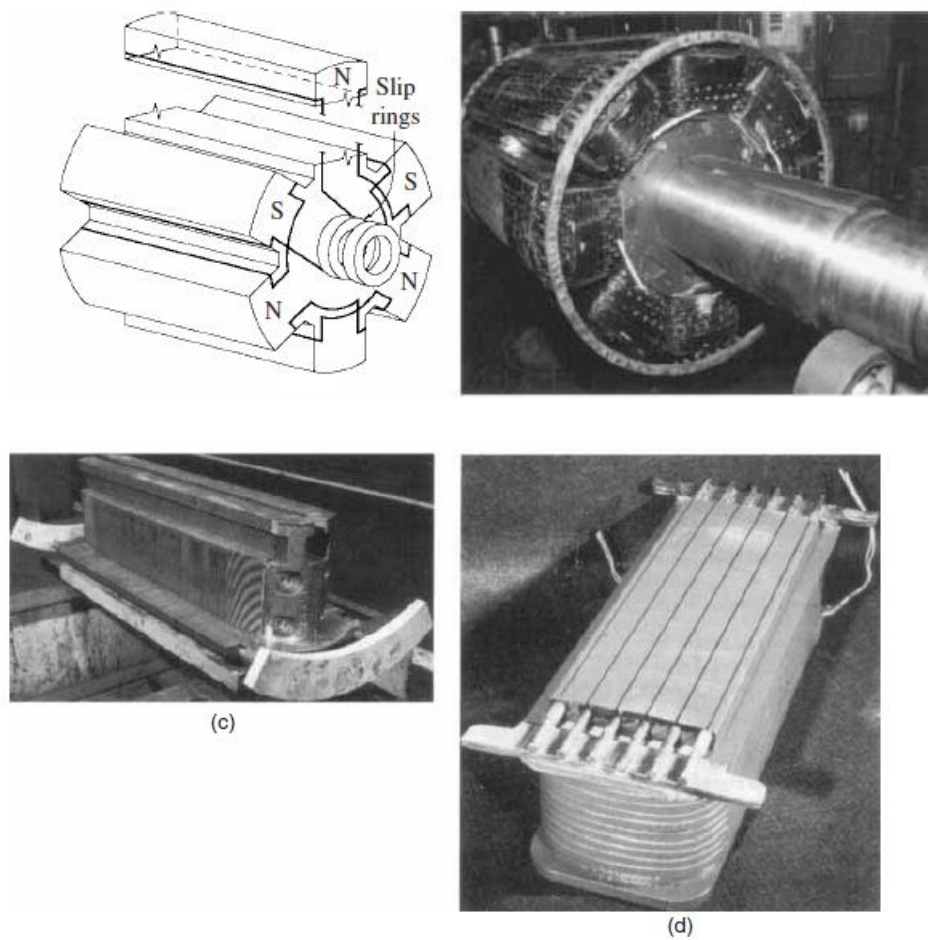


Figura 2.1 Componentes del rotor

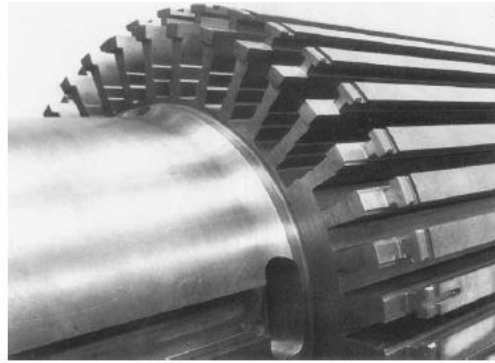
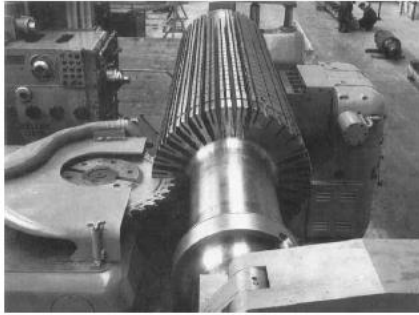


Figura 2.2 Ranurado del rotor para la colocación del devanado de campo. (Philip Kiameh, 2011)

II.3 Devanado del rotor.

Cada vuelta del rotor es ensamblada separadamente en medias vueltas o en más piezas. Las juntas están en el centro del final de cada vuelta, en una esquina. Estas se sujetan después de ensamblar cada vuelta para formar una arreglo conectado en serie. Las bobinas están hechas de cobre de alta conductividad con una cantidad pequeña de plata para mejorar las propiedades de elasticidad. El gas de enfriamiento sale por ranuras alineadas radialmente. Cubiertas para la ranura son moldeadas en fibra de vidrio para aislar los devanados. Estos separadores de fibra de vidrio son usados entre cada vuelta. Aislan contra 10 V entre vueltas adyacentes figura 2.2.. Los anillos de fin y los discos de fin están separados de los finales de bobina por capas grandes de aislante. Bloques de aislamiento se colocan entre los finales de bobina para asegurar que los devanados no se deformen. Las ranuras de los devanados están colocadas diametralmente en pares opuestos. Tienen un paso de ranura sobre dos tercios de la periferia del rotor, dejando las caras polares sin ranuras. Esto resulta en una diferencia de rigidez en los dos ejes perpendiculares. Ésta diferencia origina vibración a dos veces la velocidad. Ranuras para equilibrar se colocan en las caras polares para prevenir que ocurra éste problema, las ranuras son más anchas y menos profundas que las que se utilizan para los devanados. Se rellenan con bloques de acero para restaurar las propiedades magnéticas. Los bloques contienen hoyos para permitir que el gas de ventilación fluya. (Philip Kiameh, 2011)

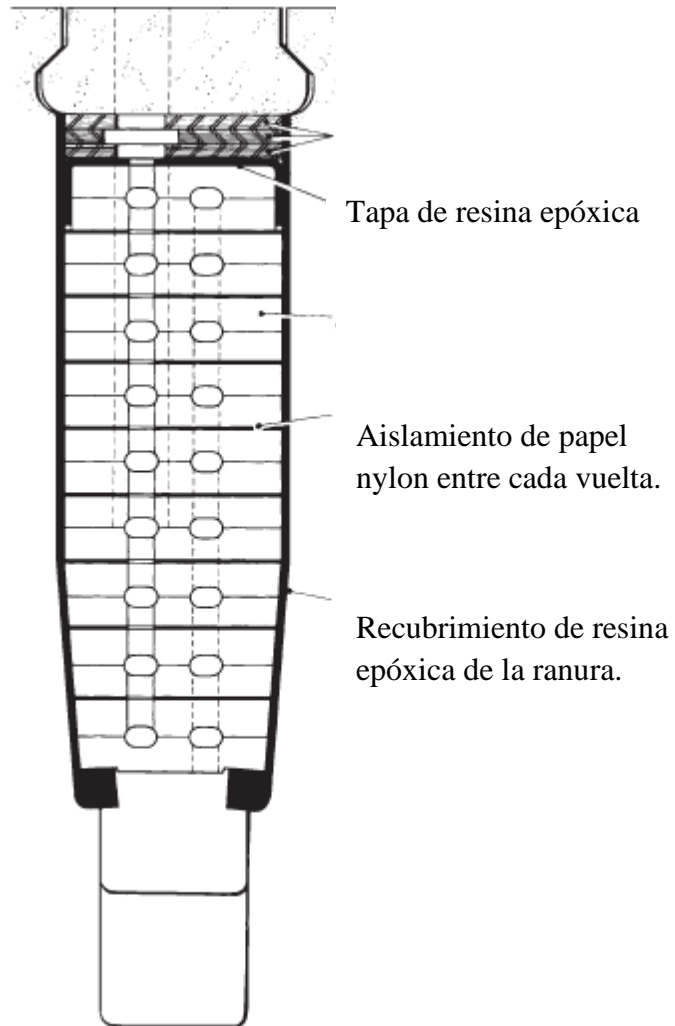


Figura 2.3 Devanado de campo en la ranura del rotor. (Philip Kiameh, 2011)

La temperatura promedio no debe exceder 115°C . El hidrógeno entra al rotor por ambos extremos por el final de los devanados y emerge radialmente por las cuñas. En la figura 2.4 se observan los ventiladores usados para mover el hidrógeno al estator. Guías flexibles de hechas con tiras delgadas de cobre son conectadas al final de los devanados. Estas guías son colocadas en dos ranuras poco profundas en la flecha, cuñas las retienen.

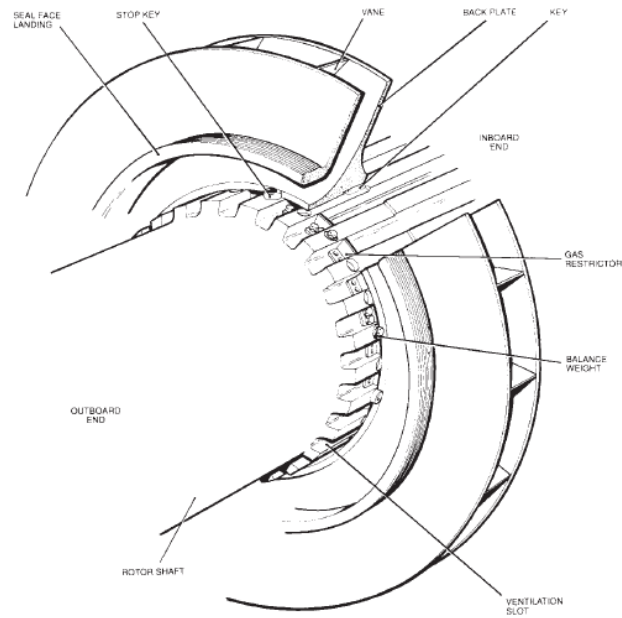


Figura 2.4 Ventiladores de rotor. (Philip Kiameh, 2011)

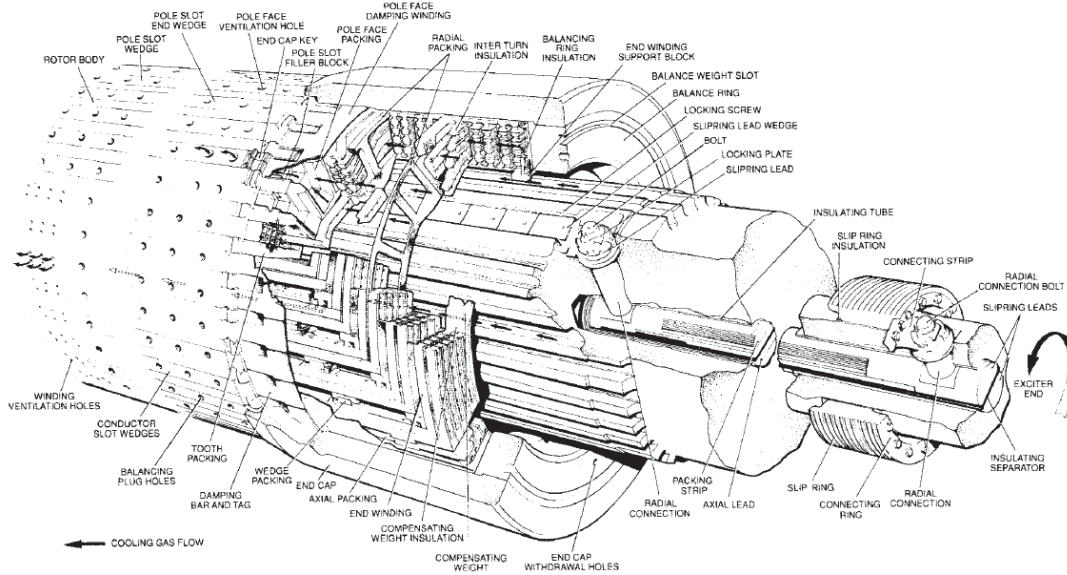


Figura 2.5 Devanado del rotor. (Philip Kiameh, 2011)

II.4 Anillos de sujeción del rotor.

Los Anillos de sujeción (figura 2.6) se utilizan para impedir que los finales del devanado salgan expulsados por las fuerzas centrifugas. Estos anillos han sido tradicionalmente fabricados de acero austenitico no magnético. Éste se ajusta al cuerpo del rotor, éste equipo es susceptible a los esfuerzos y corrosión, por lo que un terminado protector se lleva a cabo en todas las superficies excepto en la parte que embona para asegurar que el hidrógeno, vapor de agua no hagan contacto con el metal.



Figura 2.6. Anillo de sujeción del extremo del rotor. (Philip Kiameh, 2011)

Los anillos deben removerse después de 8 a 10 años de trabajo, y ser inspeccionados a detalle usando tinta fluorescente. Un escaneo ultrasónico no es suficiente debido a la estructura granular del material. Un estudio reciente ha demostrado que el acero austenitico con un contenido de 18% de Mn, 18% Cr es inmune a las fracturas por corrosión-esfuerzo. Las nuevas máquinas usan esta aleación, también se utiliza para reemplazar anillos. Esto elimina la necesidad de inspección periódica. Es importante mencionar que una fractura de uno de estos anillos resulta en un daño serio de las máquinas provocando salidas de varios meses. Se recomienda reemplazar los materiales anteriores con los nuevos mencionados anteriormente.

II.5 Cuñas y Amortiguadores

Las cuñas son usadas para retener los devanados colocados en las ranuras, Están diseñadas para soportar esfuerzos de los devanados mientras el hidrógeno pasa por los orificios. Éstos deben ser no magnéticas para minimizar el flujo de dispersión a los largo de la circunferencia del rotor. Normalmente están hechas de aluminio. Se utiliza una cuña completa por ranura. Durante falla del sistema, o durante desbalance eléctrico por carga, ocurren corrientes de secuencia negativa, lo que origina corrientes inducidas en la superficie del rotor. Éstas corrientes fluyen en las cuñas , las cuales actúan como amortiguadores, de forma similar a las barras que existen en los motores de inducción.

II.6 Anillos rozantes, porta carbones y aterrizamiento del neutro

La corriente de excitación es de alrededor de 5000 A CD para una unidad de 660 MW. La superficie del anillo debe ser muy grande para ser enfriada mientras transmite la corriente. La figura 2.7 ilustra el porta carbón, incluyendo sujetadores de los carbones y una abrazadera removible . Los sujetadores pueden ser removibles. Resortes para hacer presión constante se usan para mantener la presión. La vida de un carbón debe ser de al menos 6 meses. Un compartimiento separado almacena el porta carbones. Un ventilador montado en el rotor proporciona ventilación para que el polvo del carbón, no se extienda por los componentes del sistema de excitación. Pequeñas cantidades de hidrógeno pudieran pasar por los sellos de las conexiones. Que pudieran acumularse en los compartimientos de los porta carbones durante salidas de operación de la máquina. El ventilador las expulsa de manera segura antes de aplicar el sistema de excitación. El portacarbón puede inspeccionarse fácilmente mediante una ventana colocada como cubierta. . Un generador de gran capacidad produce normalmente un voltaje de 10 a 50 Volts entre los extremos de la flecha debido a la asimetría del campo magnético. Estos voltajes producen corrientes axiales a los largo del cuerpo del rotor.

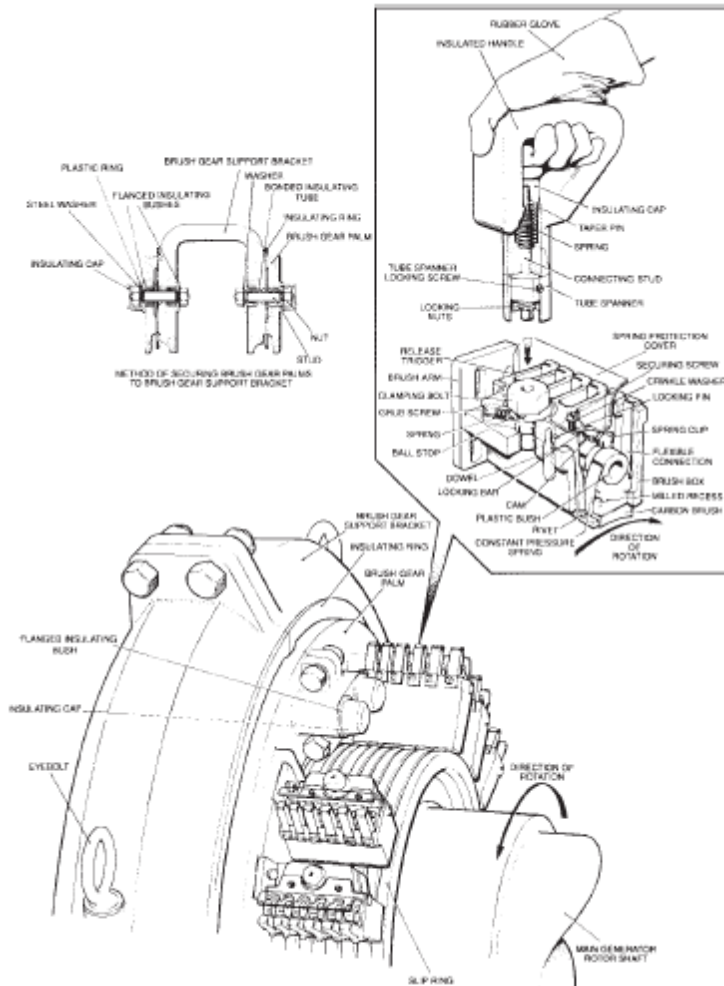


Figura 2.7 Anillos rozantes y carbones

Las Corrientes pueden viajar por los rodamientos causando daño en sus superficies, por lo que barreras aislantes son usadas para prevenir la circulación de dichas corrientes. Los aislantes son colocados en todas las localidades donde la flecha pudiera tener contacto con material aterrizado. Algunos diseños tienen dos capas con un componente metálico flotante entre las capas. La integridad del aislante es revisada mediante medición de resistencia entre los componentes flotantes y la tierra. Si el aislamiento se mantiene limpio e intacto, una diferencia de voltaje existirá entre el final del excitador y la tierra, esto proporciona otro método para confirmar la integridad del aislamiento. El voltaje en la flecha es monitoreada por una escobilla conectada a la flecha, una alarma se activa cuando el voltaje en la flecha cae por debajo de un valor predeterminado. Es importante mantener el rotor en el lado de la turbina del generador a nivel de voltaje de tierra.

II.7 Ventiladores

Los ventiladores mueven el hidrógeno por los conductos de enfriamiento del estator, por dos ventiladores idénticos montados en cada extremo del rotor. Se utilizan ventiladores axiales en cada extremo. Figura 2.8

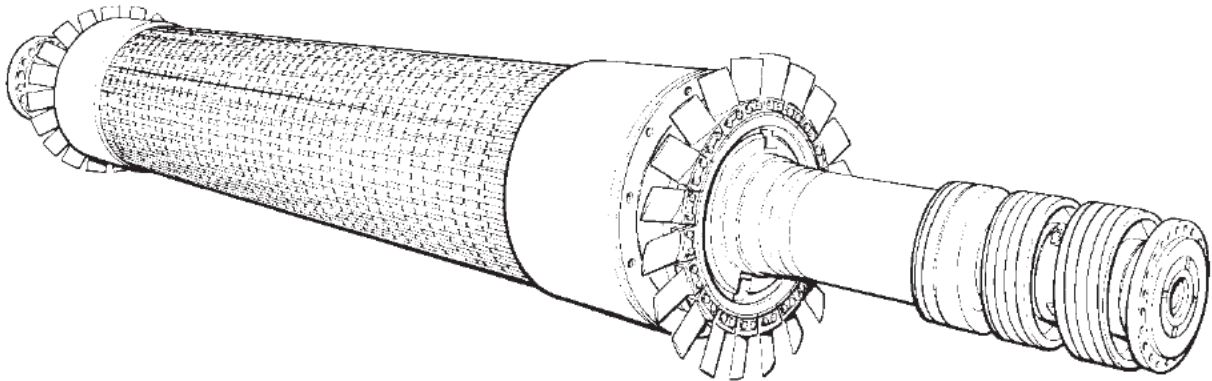


Figura 2.8 Ventiladores

II. 8 Componentes de estator

Núcleo del estator

Las laminaciones del núcleo tienen normalmente un ancho de 0.35 o 0.5 mm. Están recubiertas con barniz aislante. Pruebas de flujo magnético en el núcleo son hechas con una densidad de flujo de 90 a 100 % del valor nominal. Si existe contacto entre dos placas adyacentes, puntos calientes se desarrollarán. El estator es escaneado usando una cámara infrarrojo para identificar áreas con temperatura superior a la normal durante la prueba. Un agente adhesivo es usado en algunos diseños para asegurar que las placas individuales y particularmente los dientes no vibren independientemente.

Algunos diseños del estator usan láminas de acero de grano orientado. Tienen deliberadamente diferentes propiedades magnéticas a lo largo de dos ejes perpendiculares. (figura 2.9) El flujo es orientado en una dirección radial, esto permite más densidad de flujo en la parte trasera del núcleo comparada con el acero no orientado.

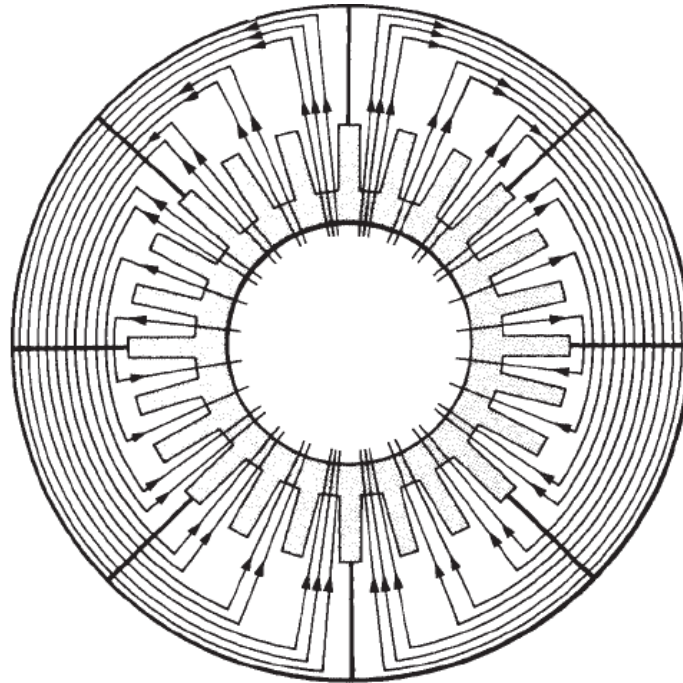


Fig 2.9 Diagrama esquemático de la distribución del flujo magnético en el estator.

La longitud axial neta del acero magnético que el flujo puede usar es menos que el medido para un paquete laminado por factor de 0.9 a 0.95, a esto se le conoce como factor de empaquetamiento, esto es originando por las capas de recubrimiento y los espacio de aire entre las láminas debido a diferencias en el ancho de las láminas y las imperfecciones de terminado. Las pérdidas por corrientes de Eddy en el núcleo constituyen una porción significativa del total de las pérdidas. En algunos diseños, el calor producido por estas pérdidas es removido por hidrógeno que circula radialmente por conductos y axialmente por hoyos. Figura 2.10

Termopares son instalados en las partes más calientes del núcleo. Si un punto caliente se desarrolla en servicio, éste será detectado por los termopares existentes. Una prueba de flujo es la forma de detectar un punto caliente. Si existiera un contacto accidental en los bordes de los dientes del estator o si daño existiera en la superficie de la ranura, corrientes circulantes se pudieran producir. En la mayoría de los diseños todas las barras del estator están aisladas excepto la que aterriza el núcleo del estator están aisladas de la carcasa para reducir la probabilidad de las corrientes circulantes.

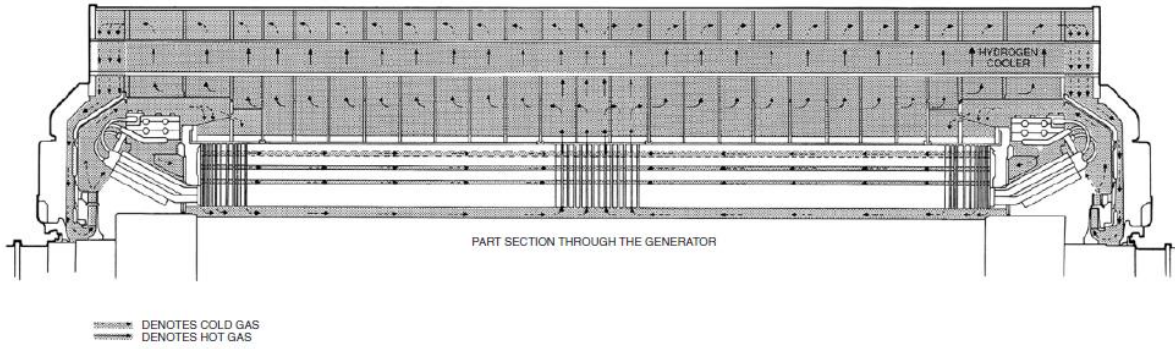


Figura 2.10. Ventilación del estator. (Philip Kiameh, 2011)

II.9 Marco del Estator

La figura 2.11 muestra el marco del estator. La placa de final del estator está normalmente hecha de un disco de acero no magnético. Pantallas conductoras de cobre o aluminio de aproximadamente 10mm de ancho recubren las superficies exteriores de las placas que se instalan al final del estator (figura 2.12). A éstas placas se les conoce como escudos de flujo, los flujos de dispersión crean corrientes circulantes en éstas pantallas. Éstas corrientes previenen la penetración de una cantidad inaceptable de flujo en las placas del final del estator o en los extremos del núcleo.

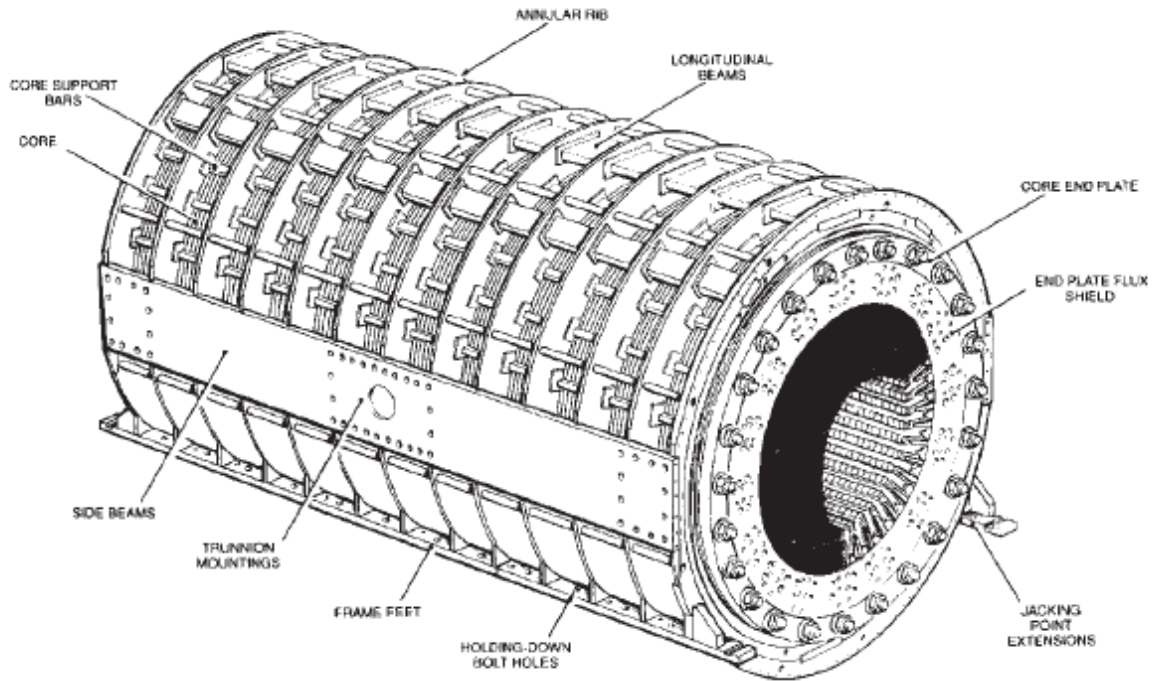


Figura 2.11 Marco del estator (Philip Kiameh, 2011)

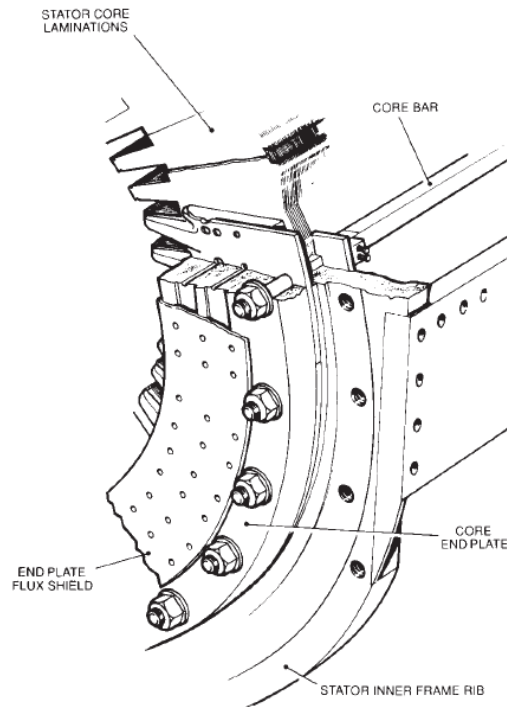


Figura 2.12 Placa del extremo del estator u pantalla (Philip Kiameh, 2011)

II.10 Devanados del Estator

En generadores grandes de dos polos, el devanado de cada fase se arregla en dos circuitos paralelos idénticos, localizados diametralmente opuestos del otro (figura 2.13). Si el conductor está hecho de láminas separadas, la densidad de **flujo de dispersión de cada tira se incrementa linealmente con la distancia desde la tira del fondo (Figura 2.14)**. Éste flujo alternante induce un voltaje alternante a lo largo de toda la longitud de las láminas que varía con el cuadrado de la distancia de la tira ubicada desde en el fondo de la ranura. Si un conductor sólido se hubiera usado, o si las láminas fueran paralelas y conectadas al final del núcleo, las corrientes circularían alrededor de la barra debido al desbalance de voltaje, esto causaría niveles de corrientes de Eddy inaceptables causando pérdidas y calentamiento. Éste efecto es minimizado al dividir el conductor en láminas aisladas eléctricamente. Éstas láminas son arregladas en dos o cuatro paquetes a lo ancho de la barra resultante. Éstas son transpuestas a lo largo de la longitud de la barra usando el método de **Roebel (figura 2.15)**. Cada lámina ocupa cada posición en el paquete para que la distancia axial sea igual. Éste arreglo iguala los voltajes causados por las corrientes de Eddy, además de que las corrientes de Eddy no circulan entre las láminas. Agua desmineralizada circula en las secciones rectangulares de los tubos para remover el calor de las laminaciones (figura 2.16.) Los conductores están hechos de cobre endurecido de alta conductividad. Cada laminación tiene un recubrimiento delgado de aislante de fibra de vidrio. Se coloca otro aislante alrededor de lo largo la barra y consiste de una cinta con polvo de mica cargado con una resina sintética con recubrimiento de fibra de vidrio. Se realizan pruebas eléctricas para confirmar la integridad del aislamiento. Un material semiconductor es usado para

tratar la longitud de la ranura para asegurar que no existan descargas parciales entre la barra y la ranura. La superficie de descarga en los extremos de la ranura es limitada por la aplicación de un acabado final. Las barras experimentan grandes esfuerzos debido a que transportan corrientes grandes y estas está en una zona de alta densidad de flujo.

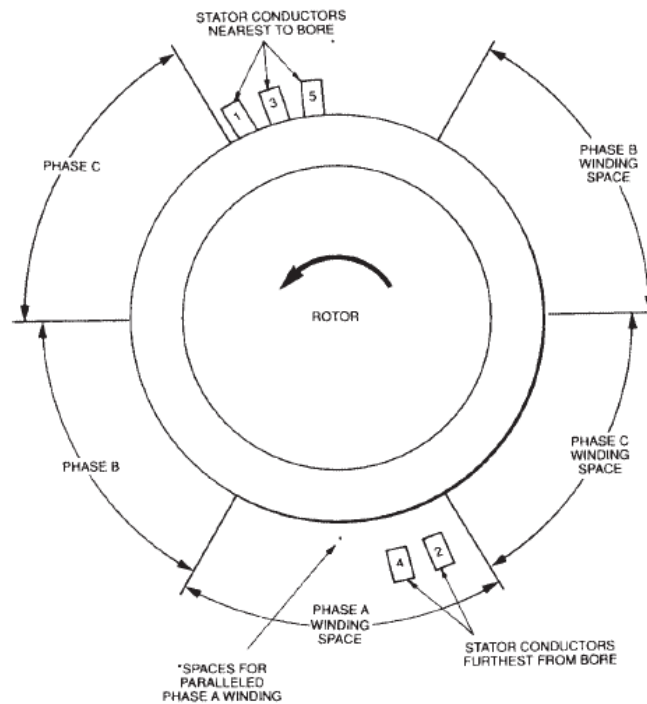


Figura 2.13 Disposición de conductores en las ranuras

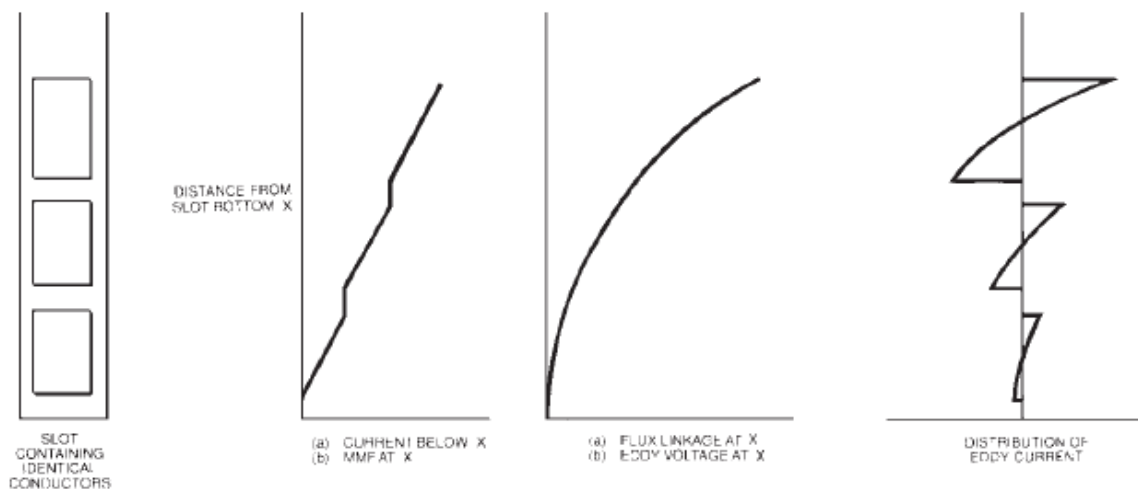


Figura 2.14 Variación de generación de corrientes de Eddy dependiendo de la profundidad de la ranura. (Philip Kiameh, 2011)

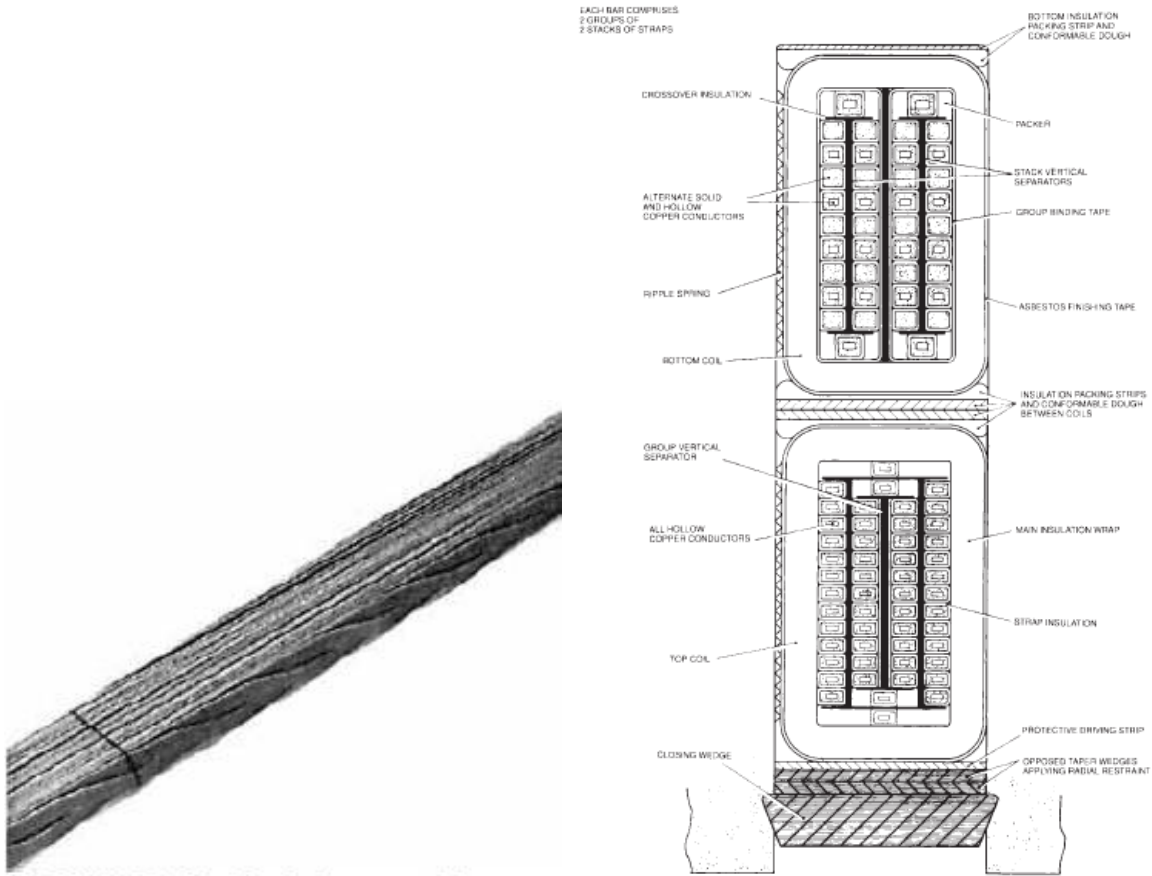


Fig 2.15 Transposiciones de las láminas por el método de Roebel para la conformación del paquete de conductor por ranura. (Philip Kiameh, 2011)

Componentes para el enfriamiento de los devanados del estator

Agua desmineralizada es usada para enfriar los devanados del estator. Debe ser lo suficientemente pura para ser no conductora. El agua es desgasificada y tratada continuamente para alcanzar los siguientes niveles

Conductividad 100 S/m

Oxígeno disuelto: 200 g/L max (en algunos sistemas, 2000 /L es aceptable)

Cobre total: 150 g/L máximo pH valor 9 máximo

Estos niveles han sido probados como no agresivos en los devanados de cobre después de muchos años de servicio. El agua entra en uno o mas de los conductos , los conductos corren de manera circunferencial. (figura 2.16). El hidrógeno se mantiene a mayor presión que el agua, existe una fuga, el hidrógeno entra en el agua. El aislamiento se dañaría si entrara agua en los sistemas de hidrógeno. La temperatura del agua se incrementa por menos de 30 C. la temperatura del agua a la entrada es de 40⁰C, existe un margen significativo antes de hervir a temperatura de

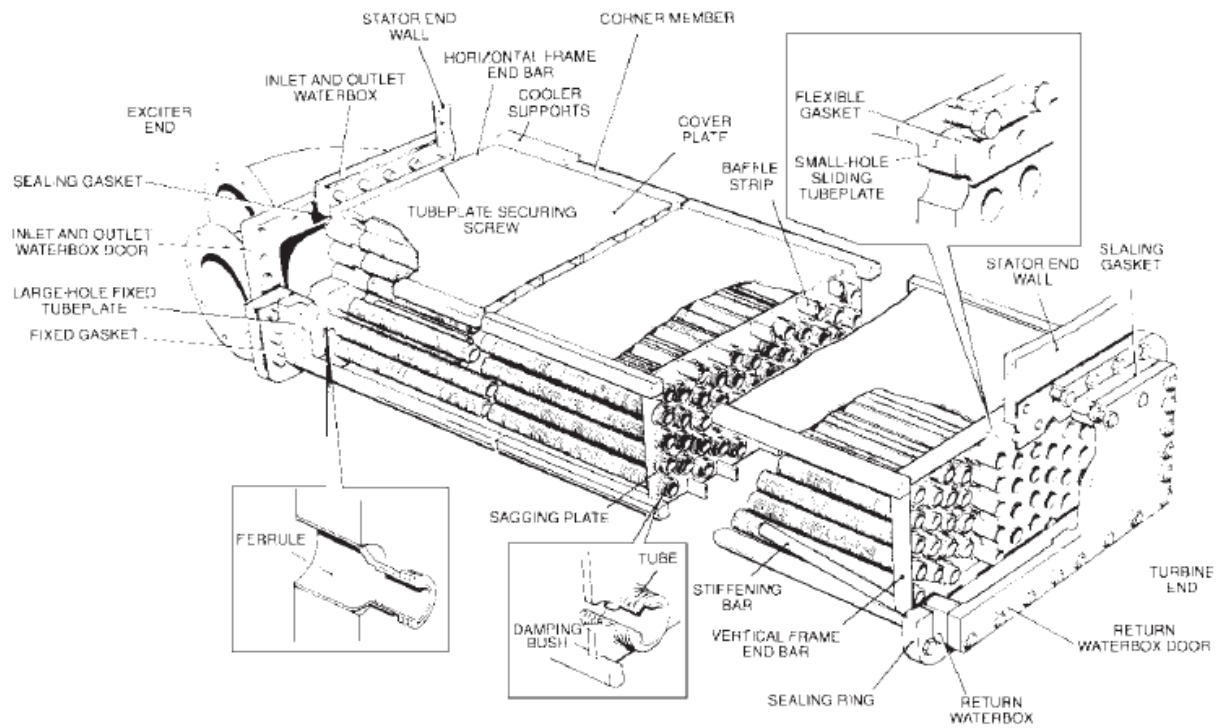
115 a 120⁰C bajo presión de trabajo nominal. La temperatura del agua bajo cada barra es monitoreada por termopares ubicados en las ranuras o en las salidas del agua, esto ayuda a determinar una reducción del flujo de agua.



2.16 Sistema de Ventilación y enfriamiento.

Componentes del sistema de enfriamiento por hidrógeno.

El hidrógeno se inyecta al sistema por medio de tuberías de distribución orientadas axialmente, el dióxido de carbono es usado para retirar el hidrógeno ya que una mezcla explosiva de Hidrógeno-Oxígeno se formaría para ciertos volúmenes de concentración. El dióxido de Carbono es inyectado al sistema de forma similar. Los ventiladores del rotor acarrean el hidrógeno hacia los extremos de los devanados y a través del núcleo del estator, durante operación normal el hidrógeno aumenta su temperatura alrededor de 25 ⁰C. dos o mas enfriadores están montados y consisten de un conjunto de tubos muy delgados. El agua fluye en los tubos mientras el hidrógeno fluye por encima de ellos. (Figura 2.17)



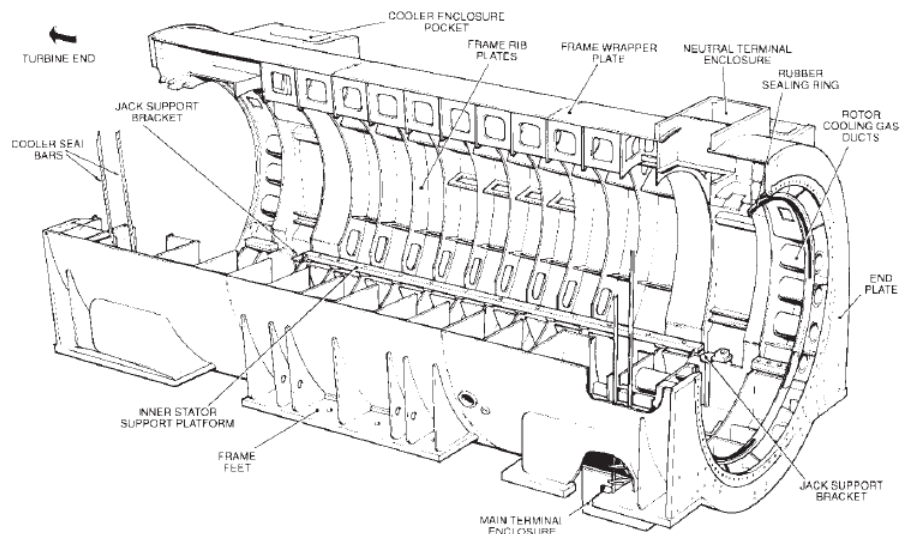
2.17 Sistema de Enfriamiento por hidrógeno.

Los tubos donde circula el hidrógeno se puede limpiar sin desgasificar la carcasa. Los soportes de las tuberías así como los marcos de los enfriadores están diseñados para prevenir la resonancia cerca de las principales frecuencias de excitación de 60 Hz y 120 Hz. Es importante prevenir la condensación de la humedad en los devanados del estator. Durante operación normal los devanados del estator están por encima de los 40 C. Por lo que, si existiera condensación, ésta sería primero en los enfriadores de hidrógeno. Durante el arranque, el agua de enfriamiento de los devanados del estator está fría, por lo que se precalienta eléctricamente, o se hace circular por un periodo de tiempo mientras se incrementa la temperatura de los devanados antes de utilizar el sistema de excitación, esto previene la posibilidad de tener condensación en los devanados.

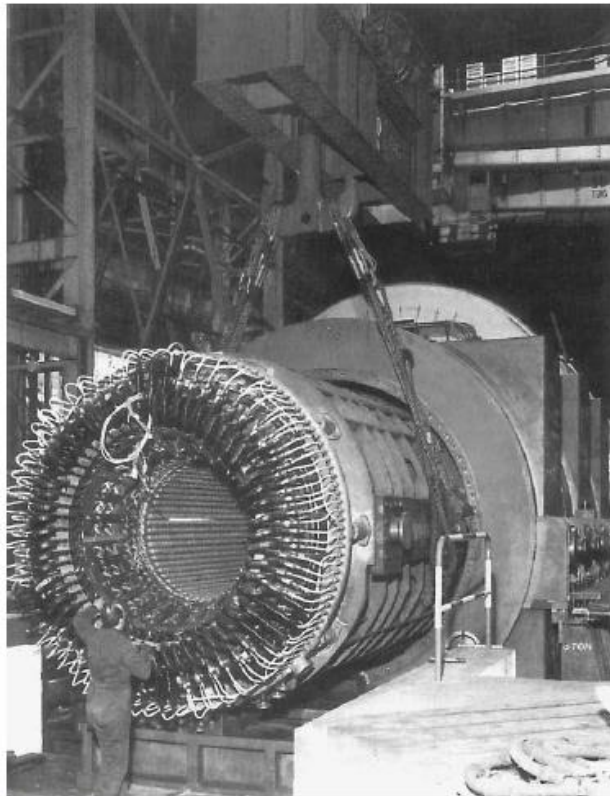
II.11 Carcasa del estator

El núcleo y marco de núcleo de estator se montan dentro de la carcasa. La carcasa debe soportar los esfuerzos por la operación normal así como cuando existe una falla. Además debe funcionar como un sistema para mantener la presión adecuada del hidrógeno.

Se utilizan soportes anulares así como dispositivos axiales que se montan dentro de la carcasa para fortalecerla y permitir la circulación del hidrógeno. Los sellos del estator están hechos de acero y reforzados para soportar la presión y desarrollar la menor deflexión axial. Los sellos y juntas utilizadas deben estar libres de fugas contra la presión del hidrógeno.



12.18 Carcasa del estator.



2.19. Marco del estator siendo montado en la carcasa del estator. (Philip Kiameh, 2011)

II. 12 Sistema de excitación

En la figura 32.38, se muestra un esquema típico de excitación en CA. Se muestra la flecha y los excitadores junto con los portacarbones. Se utilizan imanes permanentes con pilotos para el sistema de excitación y así minimizar la dependencia de fuentes externas de energía. Los pilotos proporcionan la potencia para el Regulador Automático de Voltaje (AVR). Una planta de 660 MW tienen in polo saliente piloto con rangos de cerca de 100 kW. El sistema principal de excitación así como el excitador piloto están enfiados por aire. Los ventiladores ubicados en el rotor proporcionan el enfriamiento. Su desempeño es monitoreado en la salida y entrada del sistema de enfriamiento.

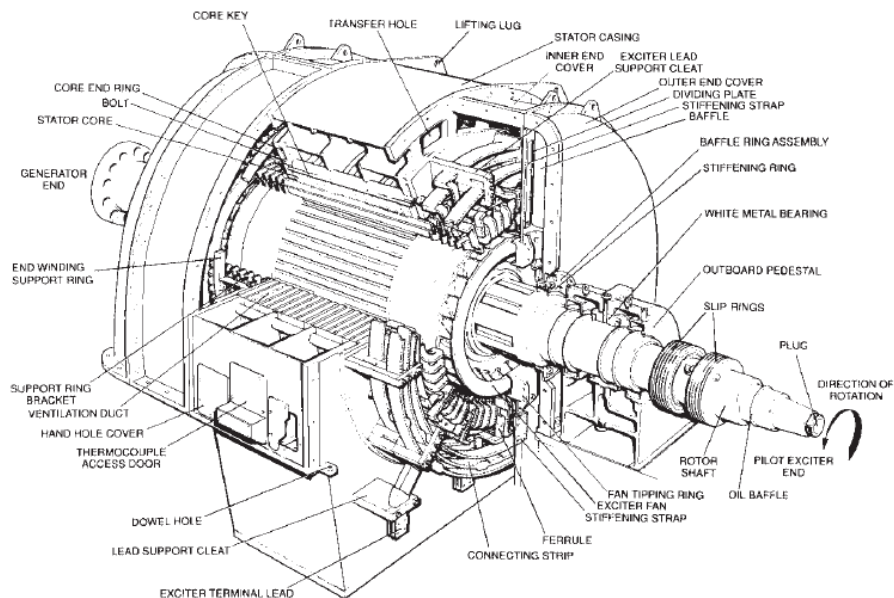


Figura 2.20. Sistema de excitación rotatorio

CAPITULO III

Pruebas Eléctricas

III.1 Introducción

Las pruebas eléctricas son fundamentales para la operación óptima de un alternador; porque ofrece una radiografía (un mapa) de las condiciones en que se encuentra el aislamiento de las bobinas. Es importante recordar que las pruebas pueden ser de rutina o diseño, cada una de éstas tiene un objetivo eléctrico, con el fin de verificar el material dieléctrico. Este capítulo tiene como objetivo presentar las pruebas que indica la IEEE. (IEC-60270)

- **Descargas parciales**

La experiencia en la operación de equipos eléctricos ha mostrado que las **descargas parciales acortan el tiempo de vida de los sistemas de aislamiento y causan una serie de interferencias con las medidas, control y comunicaciones eléctricas**. Por lo tanto, las descargas parciales pueden llegar a ser la causa de serias pérdidas económicas al producir reparaciones y cambios prematuros. (IEC-60270)

En los equipos eléctricos, pérdidas de eficiencia y seguridad en la operación de los sistemas de comunicación y por último la interrupción del servicio de suministro de energía. Las pérdidas económicas de esta naturaleza pueden ser prevenidas mediante pruebas a los sistemas eléctricos y sus equipos en el momento apropiado, y así asegurarse que las descargas parciales no producirán efectos adversos al operar los equipos y sistemas, bajo las condiciones de servicio para las cuales fueron especificadas. (IEC-60270)

Durante el proceso de fabricación de un aislante, pudiera producirse **que queden pequeñas cantidades de gas aprisionadas en el seno del material**, muy diferentes. Por otra parte, al montar un aislante alrededor de piezas conductoras, equipos eléctricos, por descuido, imperfecciones, dificultades constructivas, **pudiera quedar cavidades entre el dieléctrico sólido y conductores o entre diferentes capas del aislamiento sólida**. (IEC-60270)

También al usar aislantes plásticos los que se moldean directamente en equipos eléctricos, en el proceso de fraguado pueden quedar burbujas gaseosas en su interior. **Los fenómenos de origen eléctrico que se producen en estas cavidades (burbujas o espacios con gas) son fundamentalmente los mismos.**

- **Origen del fenómeno**

Cuando un material aislante *es sometido a una diferencia de potencial y debido a la presencia de un campo eléctrico* el cual tiende a concentrarse en la cavidad, **se produce la ionización del gas presente en estas, dando origen a una descarga eléctrica.**

La ionización es un proceso físico, **el cual se inicia cuando un electrón libre o un ion negativo llega a un espacio lleno de algún material ionizable**, por ejemplo gas donde exista un campo eléctrico. **Si un electrón tiene la suficiente libertad para moverse en el gas. Este adquirirá una gran energía cinética tal que en la colisión del electrón y una molécula neutra se liberara un electrón de esta por el impacto.** Así cada vez que esto suceda se liberara un nuevo electrón capaz de producir el mismo efecto, **logrando de esta forma que el número de electrones libres aumente, produciendo así el efecto avalancha inicial para la formación de una descarga parcial.**

Estos electrones, cargados negativamente, se moverán rápidamente en la **dirección del electrodo cargado positivamente**, el cual junto con el electrodo negativo producen el campo eléctrico en el gas ionizable. Las moléculas que pierdan un electrón permanecerán cargados positivamente y se moverán más lentamente que los electrones, en la dirección opuesta, es decir, ***hacia el electrodo negativo***. El movimiento de los iones esta gobernado por la fuerza que ejerce el campo eléctrico entre las cargas libres y la masa de cada ion. La nube de iones positivos representa una carga de espacio la cual reduce **la rigidez del campo eléctrico en la región donde los electrones son liberados por las colisiones**, este y otros efectos desaceleran el proceso de ionización.

Cuando la intensidad del campo alcanza un valor menor al cual se inicio la ionización, no se generaran más electrones por avalancha. La carga de espacio formada por iones positivos en la

vecindad del electrodo negativo y la de los iones negativos y electrones, en la vecindad del electrodo positivo disminuye por la influencia de varios efectos. El material de los límites de la región donde la ionización ocurre, además de la distribución del campo eléctrico y la polaridad de los electrodos, influyen en la velocidad a la cual la carga se recombina.

A medida que la carga de espacio desaparece, la intensidad del campo eléctrico en la región en cuestión aumenta, cuando este alcanza el valor al cual la ionización fue iniciada la primera vez o ligeramente mayor, la avalancha de electrones comienza y el proceso de ionización se vuelve a repetir.

Las tensiones de inicio de estas descargas eléctricas son relativamente bajas debido principalmente a que el campo eléctrico tiende a concentrarse en las cavidades, y que la rigidez dieléctrica del gas es menor que la rigidez dieléctrica del sólido. Este fenómeno puede ocurrir en cualquier gas y en consecuencia, en cualquier material aislante sólido con fisuras o cavidades, líquido con burbujas y también aislamiento sólido desgasificado.

Si se coloca un metal en una zona cercana a la avalancha, las cargas eléctricas se inducirán capacitivamente en este metal o electrodo. Cuando este electrodo se conecta a una línea de transmisión, la forma de onda que puede registrarse en esta línea, corresponderá a la del movimiento de los iones y electrones de la avalancha.

Estas descargas eléctricas afectan solo a la zona en que se producen, es decir no comprometen todo el aislamiento, de allí su nombre genérico de descargas parciales. Se podría definir entonces como pequeñas descargas parciales que se producen en el seno de cavidades con gas presente en un medio aislante sólido o líquido.

III.2 Clasificación de las descargas parciales

En general, se distinguen tres tipos: *internas; superficiales y corona*

Descargas internas ocurren en cavidades, en general gaseosas, al interior de un dieléctrico sólido, estas pueden presentarse de varias formas. En el exterior, es decir, la cavidad se produce entre los revestimientos de dos conductores paralelos. En el interior del dieléctrico, se presentan como una pequeña cavidad de aire. Entre dieléctrico y aislante, generalmente se produce porque el aislamiento se despegó.

- *Descargas superficiales* ocurren en gas, ocasionalmente en líquidos, en la superficie de un dieléctrico o interface entre dos dieléctricos.
- *Descargas corona*, son bastantes diferentes de las ya mencionadas. Las descargas corona ocurren en las superficies metálicas aguzadas o que tienen un pequeño radio de curvatura, en las cuales el campo eléctrico supera la rigidez dieléctrica del gas (en general aire). La descarga limitada a la zona de alto campo se extingue en el medio circundante lo **que no origina una falla franca**.

Por lo recién expuesto, hay autores que prefieren omitir a las descargas corona de la familia de las descargas parciales, en general pasan a ser fuente de interferencia en la medición de descargas parciales. (IEC-60270)

III.3 Descargas parciales asociadas a la degradación

Las formas de onda inducidas por las descargas parciales en muestras que presentan **degradación severas**, se observan formas de **onda del tipo lento**, cuya duración se prolonga **dos ordenes de magnitud mas que en las ondas rápidas**.

Esta descarga lenta esta relacionada con la formación de avalanchas sucesivas, generadas por una abundante cantidad de electrones libres provenientes de carga atrapada en la superficie degradada del aislamiento. Bajo estas condiciones, no se alcanzan niveles significativos de sobre tensión entre cada descarga y la duración de la descarga se extiende mientras la conducción de la superficie degradada permita la difusión de cada descarga anterior. Esta aseveración se confirmo al detectar zonas de inyección de cargas en la superficie, presentadas como áreas luminosas al barrido de un microscopio electrónico. Esto indica que los electrones necesarios para observar la imagen promueven la liberación de más carga inyectada, **que se manifiesta como zonas luminosas**. Esto significa que la zona de mayor degradación tiene menor resistividad superficial y volumétrica, por lo que promueve la difusión de carga dentro del volumen del

aislamiento y con ello la degradación no solo es superficial sino que avanza hacia los electrodos hasta provocar una falla.

III.4 Nocividad de las descargas parciales (IEC-60270)

La degradación de un aislante solido por las descargas parciales es el resultado de un conjunto complejo de fenómenos.

i)-Elevación de la temperatura del gas encerrado provenientes de los choques elásticos entre electrones y moléculas gaseosas.

i i)-Bombardeo iónico y electrónico de las paredes de la cavidad provocando su erosión.

iii)-Acción de rayos ultravioleta producidas por átomos excitados y por la recombinación de portadores.

iv)-Descarga química progresiva del material con producción de gases, particularmente hidrógeno.

v)-Progresión de daño se produce también hacia al electrodo opuesto, la perforación completa del aislante produce una descarga total de una pieza conductora a otra.

III. 5 Auto extinción de una descarga parcial (IEC-60270)

Hay evidencia de que en ocasiones las descargas parciales tras un periodo de existencia se extinguen .Esto resulta muy ventajoso en la practica, pero plantea dificultades en los estudios sobre el fenómeno.

La explicación más aceptada, apela a los depósitos semiconductores que las propias descargas parciales dejan en las paredes de la cavidad, los cuales cortocircuitan la capacidad respectiva de la cavidad, reduciendo la tensión aplicada a ella a valores inferiores al disruptivo. También se ha probado que la auto extinción es tanto mas probable cuanto menor es el espesor de la cavidad.

III.6 Perturbación eléctrica producida por las descargas parciales

La transferencia de carga en la región donde se produce la ionización es acompañada por la correspondiente transferencia de carga en el circuito externo y la fuente de poder asociado. Por lo tanto, como resultado de esta transferencia de carga, momentánea, de corta duración, regular o aleatoria, se producen pulsos de corriente, los cuales se propagan a través del circuito externo, estos pulsos de corriente son de corta duración ya que son el resultado del movimiento extremadamente rápido de portadores de carga.

- **Otros efectos**

La descripción del proceso de ionización muestra que hay transferencia de carga en la región donde se produce la ionización. **Esto significa que hay circulación de corriente en esta región y cierta potencia disipada Como la corriente circula en un espacio restringido, la densidad de corriente local es extremadamente alta, lo que produce en la región un intenso calor. Esto provoca un fuerte incremento de presión en la cavidad, este efecto puede ser comparado con el de una explosión en miniatura.** Así el material que rodea esta zona es comprimido, generándose una onda de pulsos sónica y ultrasónica que se propaga a través del medio.

III.7 Descargas parciales en transformadores

El aumento de las potencias, elevación de los voltajes y necesidades de transmitir a distancias cada vez mayores convierte a los transformadores en equipos eléctricos de la mayor importancia.

En la operación de los transformadores de potencia estos están sujetos a esfuerzos térmicos, eléctricos y mecánicos, los cuales provocan cierta degradación en el sistema de aislamiento. Las causas principalmente del fenómeno de degradación del sistema aislante son la temperatura excesiva, oxígeno, y humedad combinadas con los esfuerzos eléctricos, los cuales actúan como acelerador del proceso de degradación. Las causas secundarias que aceleran el envejecimiento del sistema aislante son los esfuerzos mecánicos, los ácidos y lodos. Un exceso de cualquier de estos

esfuerzos puede acelerar el proceso de degradación. El proceso de degradación del sistema aislante puede evolucionar gradualmente hasta que se presenta una falla en el transformador de potencia, la cual puede ser dañina. Estas fallas algunas veces ocurren sin ningún alarma o señal de que un problema se está presentando. **Pero en otras ocasiones existen pequeños indicios** puede ser la diferencia entre someter el transformador a una reparación, sustituir una pieza dañada o tener un equipo fallado con todos los graves problemas que esto ocasionaría. La existencia de descargas parciales es uno de los problemas más frecuentes que se presentan en los transformadores de potencia.

III. 8 Medida de las descargas parciales en transformadores

Las medidas de descargas parciales en transformadores ha ido asumiendo gran importancia, **ya que estas revelan la existencia de puntos con intensidades de campo excesivamente altas, y defectos en los materiales**, a raíz de esto se han desarrollado métodos, unos más precisos que otros, los cuales pueden entregar información sobre fallas en el aislamiento. Tan importantes como medir la intensidad de las descargas parciales es poder localizarlas, a fin de eliminarlas si así resultase necesario.

- **Objetivos de las mediciones**

- Asegurar que el nivel de descargas parciales, a una tensión superior a la máxima de trabajo no sobrepase valores aceptables.*

- Conocer cambios en el estado del aislamiento como resultado del envejecimiento.*

- **Pruebas de aislamiento a transformadores**

Los ensayos de aislamiento en transformadores y en cualquier equipo eléctrico, se realizan para verificar que el aislamiento posea características óptimas ya sea en el proceso de fabricación, o bien durante los periodos de mantenimiento del equipo una vez que este ha entrado en servicio.

III.9 Detección de descargas parciales en el aislamiento de transformadores

Las descargas parciales en transformadores pueden detectarse por medio de los siguientes métodos:

- **Métodos eléctricos.**

Estas técnicas son empleadas principalmente para detectar la presencia de descargas parciales en transformadores de potencia de alta tensión por medio de dispositivos que registran la magnitud de las descargas. Este tipo de registro resulta de una gran utilidad, sin embargo los métodos eléctricos no pueden determinar el origen o ubicación física de la fuente de descargas parciales, además este tipo de mediciones no pueden ser aplicadas en terreno o en transformadores en servicio debido a los altos niveles de interferencia electromagnética que por lo general están presentes en el entorno en el cual se desempeña el transformador.

- **Métodos Químicos.**

Los métodos químicos aprovechan la información entregada por los gases que aparecen en el aceite del transformador, no obstante, estas técnicas no permiten detectar la presencia de descargas incipientes en el aislamiento del transformador debido a que se produce un gran retardo entre el inicio de la fuente de descargas parciales y la evolución de gas suficiente que delate la presencia de estas. Otro gran defecto de estos métodos es que no entregan una ubicación precisa de la falla, si no, tan solo, la circunscriben a una zona la cual puede ser bastante grande.

- **Métodos Acústicos.**

Las técnicas acústicas detectan la actividad de descargas parciales por medio de sensores que se instalan en el tanque del transformador. Estos métodos además de medir la magnitud de las descargas pueden entregar la ubicación física de las fuentes de descargas parciales.

- **Método Químico análisis cromatográfico.**

El propósito de este análisis es conocer exactamente las diferentes sustancias que componen los gases disueltos extraídos desde el aceite del transformador.

De acuerdo a la naturaleza de los gases disueltos en el aceite aislante, se pueden determinar la causa de la anomalía para prevenir y solucionarla antes que se transforme en falla.

Cuando se detectan gases en cantidad suficiente como para suponer la existencia de una falla, es necesario conocer la severidad de ella, lo cual se determina en base a la tasa de crecimiento por día de cada gas en particular o del total de gases combustibles.

Identificación de una falla de un equipo en servicio con la ayuda del análisis cromatográfico

- **Acetileno (C₂H₂)**

La presencia del acetileno en el gas en solución en el aceite es siempre debido **a una falla eléctrica**. Si el C₂H₂ está **acompañado solamente** de CH₄ se **trata de arco de duración limitada en el aceite**. Si estos elementos son acompañados de CO y CO₂ éste **arco compromete aislamiento sólido**.

Si estos mismos elementos **sin CO ni CO₂ son acompañados de** C₂H₆, C₃H₈, C₂H₄, C₃H₆ **ellos son producto de fuentes descargas parciales o de arcos en el aceite**. Si además se observa CO las descargas se producirán en aislamiento sólido: Si las descargas son realmente grandes los hidrocarburos no saturados predominan sobre los saturados. En el caso de **pequeñas descargas parciales, ellas son más dañinos para el aislamiento sólido cuando más grande es la relación CO/CO₂**.

- **Etileno (C₂H₄)**

Si los productos de degradación contienen C₂H₄ (**sin C₂H₂**), se **trata siempre de una degradación térmica**, si **no hay CO** en el punto caliente **no interviene aislamiento sólido**.

La temperatura de esta falla será superior o inferior a 500°C según sea **mayor la cantidad** de C₂H₄ o de CH₄ respectivamente entre los productos detectados. En general están acompañados de H₂, C₂H₆, C₃H₈, y C₃H₆.

Cuando además de estos compuestos, se constata la presencia de CO_2 y eventualmente de CO , la falla es en un punto caliente igual o superior a 130°C . **Mientras no se alcance la temperatura de 300°C la razón CO/CO_2 permanece del orden de 0.1, el dióxido de carbono (CO_2) está siempre presente en mayor concentración.**

- **Bioxido de carbono (CO_2).**

En ausencia de C_2H_2 y del C_2H_4 el CO_2 solo o acompañado de un poco de CO o de CH_4 es **característico de un envejecimiento térmico normal del papel.**

Cuando se observa además un fuerte predominio de H_2 y de **hidrocarburos saturados** como C_2H_6 , C_3H_8 y C_3H_6 con una **relación de CO/CO_2 superior a 0.1**, se trata de **pequeñas descargas parciales que erosionan por largo tiempo el aislamiento sólido.**

- **Hidrogeno (H_2)**

La presencia de H_2 solo o acompañado eventualmente de una cantidad de CH_4 (metano), es **debida a descargas parciales**; ya sea en el aislamiento, en la superficie libre del aceite, o bien **en la primera manifestación de una falla eléctrica más grave.**

- **Compuestos del aire (O_2 , N_2)**

En el caso de fallas en el relé Buchholz, puede ser que el gas sacado de éste contenga O_2 y N_2 . Si la proporción O_2 , N_2 es similar a la del aire, se puede tratar de una entrada de aire. Si la proporción de O_2 es **mucho menor que la del aire**, esto puede ser **debido a un punto caliente de temperatura superior a 100°** en efecto, el coeficiente de solubilidad del N_2 en **los aceites minerales clásicos pasa por un máximo entre 80 y 100°C .**

III. 10 Ambigüedad de ciertos diagnósticos

La identificación de una falla con ayuda del análisis de los gases formados se da solo para un tipo de falla a la vez. Es común que un transformador en servicio presente **dos fallas simultáneas o simplemente una falla superpuesta al envejecimiento térmico normal.** La

incertidumbre no es siempre fácil de discernir pero puede ser utilizado un cierto número de criterios: en particular, el caso de una **relación $C_0/CO_2 > 0.1$** **deber ser siempre considerado como índice de descarga que compromete el aislamiento**. Desgraciadamente se trata de una **condición suficiente pero no necesaria**.

Una ambigüedad clásica proviene de la superposición de una pequeña falla térmica, un punto caliente del orden de 120°C por ejemplo, y pequeñas descargas parciales en el aislamiento sólida, en este caso, hay C_2H_4 sin C_2H_2 y el diagnostico que se da es “ punto caliente en aislamiento solido”, lo que es verdad **pero ignora la existencia de descargas parciales en el aislamiento sólido**. Si en este caso existe una **relación C_0/CO_2 superior a 0.1** debe pensarse en la superposición de estos dos efectos, igualmente una **relación $C_2H_6/C_2H_4 > 1$** **es siempre índice de descarga parcial**.

En fin, se puede llegar a que gracias a la presencia de C_2H_2 existe un arco eléctrico y que la presencia de una gran cantidad de monóxido de carbono, **ampliamente superior** a la del dióxido de carbono, hace pensar en un arco que compromete el aislamiento a base de celulosa. También puede tratarse a menudo de un arco en el aceite que atacan al pasar un barniz o una pintura.

Concentraciones límites “seguras” en PPM de gas disueltos en aceite

Tabla 3.1 Concentración límites “seguras”

Gas	Fórmula	P mm límite
Hidrogeno	H_2	$20n + 50$
Metano	CH_4	$20n + 50$
Etano	C_2H_6	$20n + 50$
Etileno	C_2H_4	$20n + 50$
Acetileno	C_2H_2	$5n + 10$
Monóxido de carbono	CO	$25n + 500$
Anhídrido carbónico	CO_2	$100n + 1500$
Total de gases combustibles	TGC	$110n + 710$

- n = número de años de servicio

Notas:

- Se considera en buenas condiciones los transformadores que presentan concentraciones de gases iguales o inferiores a los dos lados en la tabla
- Se consideran concentraciones peligrosas las comprendidas entre 5 y 10 los valores de la tabla para transformadores de instrumentos
- Todos los gases disueltos, excepto el nitrógeno el oxígeno y el anhídrido carbónico son combustibles. Por lo tanto debe considerarse el peligro de explosión, en especial en transformadores de potencia pequeños y en transformadores de instrumentos.

III. 11 Método acústico: localización de descargas por ultrasonido

El método de localización por ultrasonido utiliza dos de los fenómenos producidos por las descargas parciales. **El primero**, producto de la rápida transparencia de carga que se produce, provoca una perturbación eléctrica de alta frecuencia que se propaga a través del circuito externo. **El segundo** debido a la disipación de energía la que provoca la generación de ondas de presión sónica y ultrasónica que se propaga a través del medio donde se produce la descarga parcial.

La perturbación eléctrica se propaga a una velocidad cercana a la luz (10 m/s) a través del circuito eléctrico y la velocidad de la onda sonora dependerá del medio por el cual se propague, pero en general mucho menor comparada con la de la perturbación eléctrica, en aceite de transformador por ejemplo, la velocidad es de 1390 m/s. Es justamente esta diferencia la que permite utilizar estos dos fenómenos para la localización de la descarga parcial.

De esta forma, se puede considerar que la señal eléctrica aparece en los terminales de transformador instantáneamente. No así la onda de presión, la que tomará cierto tiempo para llegar a la red exterior del estanque del transformador.

El intervalo de tiempo entre la llegada de las dos señales será una medida de la distancia entre la descarga y el punto en el cual se detectó la señal acústica.

Equipo básico para un sistema de localización de descargas parciales por ultrasonido

Las características básicas de cada elemento son:

- **Procedimiento de medida**

El procedimiento de medida es el siguiente: el osciloscopio deberá ser ajustado para que opere con un solo barrido y que éste ocurra sólo una señal de disparo le sea aplicada a la entrada “trigger externo” del osciloscopio.

Así al inducir la descarga parcial la perturbación eléctrica se acoplará capacitivamente al circuito eléctrico y aparecerá casi instantáneamente el bushing de alta, posteriormente pasará al amplificador de disparo a través del condensador de acoplamiento y luego al “trigger externo” del osciloscopio se producirá casi simultaneo con la ocurrencia de la descarga.

Por otra parte, la onda de presión sonora producto de la descarga parcial que se propagará desde el punto con descarga a la pared externa del transformador, será recibida por el sensor, transformada en señal eléctrica, amplificada y filtrada para luego ser desplegada en la pantalla del osciloscopio.

El tiempo entre el comienzo del barrido y la primera deflexión vertical será una medida de la distancia entre la descarga parcial y sensor.

- **Dificultad del método por ultrasonido**

Considerando el aspecto constructivo de los transformadores, la onda de presión por la descarga parcial, al propagarse debe atravesar diferentes medios (cobre, presspan, aceite, fierro, etc) antes de alcanzar el sensor. Esto se traduce en diferentes velocidades de propagación, reflexiones, atenuaciones y diferentes modos de propagación.

III. 12 Efectos de las descargas parciales sobre el refrigerante del transformador

El aceite del transformador, como la sangre en el cuerpo, pasa por todos los sitios de éste. Si en algún punto se está produciendo un calentamiento anómalo (temperatura superior a 140° C) o una heterogeneidad del aislante que origina descargas eléctricas, el aceite aislante se descompone originando productos que permanecen disueltos en el aceite (**hidrogeno, metano, etano, acetileno, oxido de carbono**).

Las descargas parciales en un transformador producen un aumento de la temperatura en las zonas en las cuales se producen, contribuyendo con esto al aumento de la temperatura del aceite refrigerante.

La temperatura tiene un doble efecto en el envejecimiento, como regulador de la migración del agua entre el papel y el aceite y como activador de reacciones químicas de oxidación del aceite.

El aumento de la temperatura, provocará un aumento de la solubilidad del agua en el aceite que absorbe el agua contenida en la celulosa. En tales circunstancias el aceite pierde rigidez dieléctrica y sufre procesos químicos de formación de compuestos de degradación.

La presencia de gas en el aislamiento de un transformador aislado por aceite, puede dar lugar a descargas parciales, ésta es la razón de la atención particular que debe tenerse al cargar transformadores con aceite bajo vacío. También pueden producirse descargas parciales por fibras húmedas o por cualquier tipo de partículas conductoras pequeñas que distorsionan el campo eléctrico y ocasionan puntos locales de concentración de esfuerzo eléctrico.

III.13 Efectos de las descargas parciales sobre el aislamiento solido del transformador

La geometría de los bobinados del transformador se mantiene con ayuda del encintado de los conductores de cobre, este encintado se realiza con material cuya base es la **celulosa**.

Bajo la acción de la temperatura (por encima de los 60°) esta se degrada, disminuyendo su **grado de polimerización (G.P.)** y **pierde su resistencia a la tracción, hasta hacerse vulnerable mecánicamente (vibraciones)**. Cuando el transformador es nuevo, después de

realizarse la impregnación de los bobinados con aceite, se puede estimar que **el G.P. promedio es de 1000.**

En su degradación térmica se origina un producto como al (2-FAL), que en una pequeña parte pasa al aceite. La determinación de la concentración de 2-FAL en el aceite, esta relacionada con la disminución del G.P. del papel. Se identifican así los defectos térmicos que afectan al aislamiento solido y el grado de envejecimiento del aislante por loa estimación del G.P.

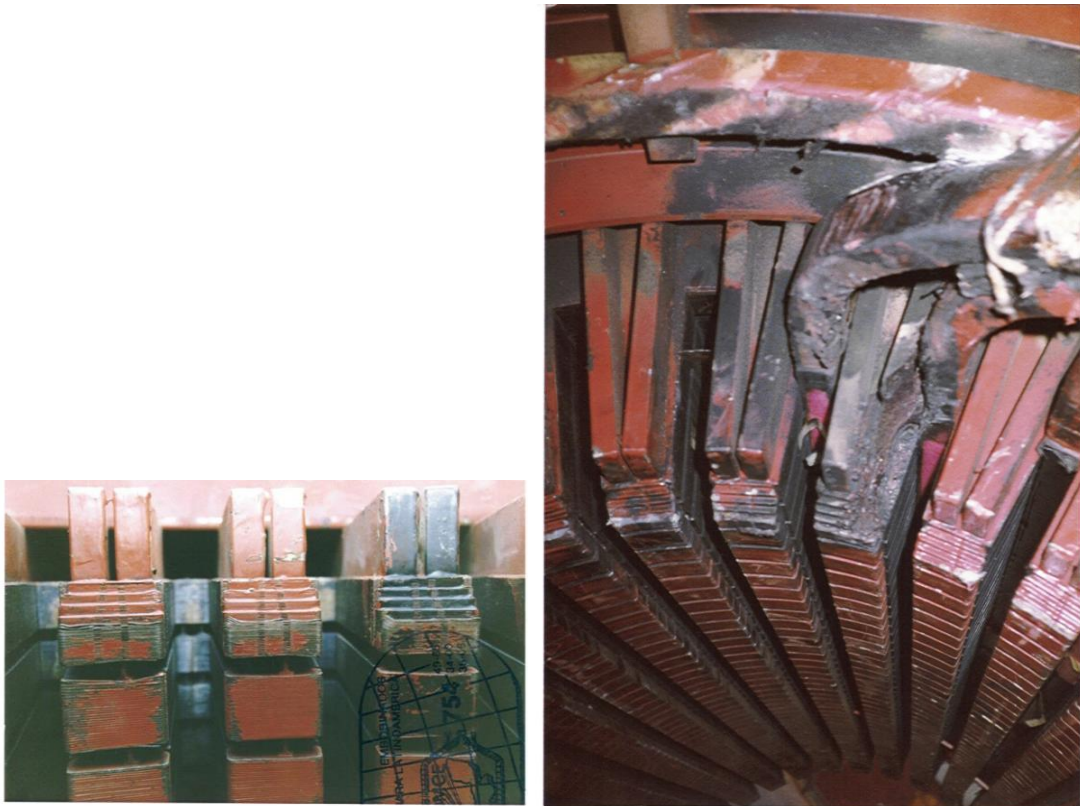


Figura 3.1 Núcleo del estator afectado por una falla en devanado.



Figura 3.2 Central de generación en complejo industrial Pemex..



Figura 3.4. Estator y sistema de enfriamiento, relaminación de devanado de estator.

III.14 Análisis de Falla de un Rotor de Polo Liso de 300 MW, 20 KV con Enfriamiento en Hidrógeno

- **Introducción.**

Se presenta el análisis de la falla de un Rotor de Polo Liso de un Generador Eléctrico de 300 MW, 20 KV, ocurrida el 21 de enero del 2013 con únicamente 1536 horas de operación después de haber sido rebobinado.



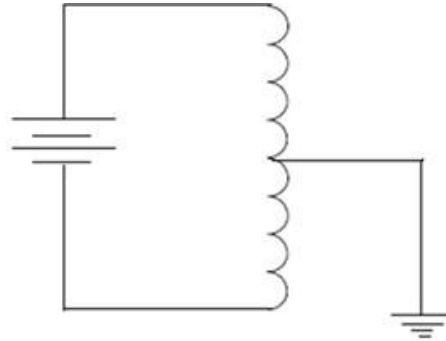
Figura 3.5.- Forja de Rotor de polo liso de 300 MW, sin bobinas y sin anillos de retención.

La Unidad se encontraba sincronizada con 229 MW y 40 MVAR en condiciones normales de operación y operan las protecciones 64 F1 y 64 F2 indicando “Falla a tierra en el Devanado de Campo del Rotor”. La Lógica de Protecciones de esta Unidad mantiene la Operación del relevador 64 F únicamente como alarma, por lo que la Unidad se mantuvo en Línea en tanto se realizaban pruebas al devanado de campo y se tomaban las decisiones correspondientes.

Las pruebas al Devanado de Campo indicaron “Cero Megaohms”, por lo que el 22 de enero del 2013 se tomó la decisión de sacar de línea la Unidad. En las inspecciones con el rotor fuera del estator se encontró la falla en uno de los tornillos de conexión de los anillos rozantes hacia el interior de la flecha hueca así como daños en el aislamiento interno hacia el devanado del campo. Debido a la severidad de esta falla, fue necesario sustituir el rotor por otro de reserva para recuperar la unidad. El rotor fallado se reclamó en garantía y fue reparado por el proveedor.

El devanado de campo del generador eléctrico está eléctricamente aislado de tierra. Por lo tanto, la existencia de una falla a tierra en el devanado no dañará el rotor por lo que la unidad

puede continuar operando. Sin embargo la presencia de dos o más puntos a tierra en el devanado provocarán desbalances magnéticos y efectos térmicos que pueden dañar el devanado, el material magnético y otras partes metálicas del rotor.



Falla a tierra en el devanado del rotor

Figura 3.6.- Circuito del Devanado de Campo del Rotor, 300 MW aterrizado.

Como antecedentes de este rotor se tiene lo siguiente.

El día 05 de Junio del 2012 se presentó falla de la unidad por arco eléctrico en el cabezal lado excitador de las bobinas del estator del generador eléctrico por lo que se procede al retiro del rotor para la reparación de la falla. Debido a la contaminación y ensuciamiento del rotor por efecto de la falla en el estator, y dado que su resistencia de aislamiento estaba en 10 kilo-Ohms, se tomó la decisión de darle mayor confiabilidad a la unidad instalando el rotor de reserva que se tenía en otra central. Este rotor de reserva fue rebobinado en el año 2009 y almacenado hasta el 28 de agosto del 2012 cuando sustituyó al rotor contaminado. En las actividades de rebobinado del contratista se reportó lo siguiente:

- 1.- “Retiro de postes y de las barras de cobre y tubo aislante, de la conexión central”.



Figura 3.6a.- Aislamiento a tierra de la conexión central del Interior de la Flecha hueca.



Foto 3. 7- Tornillos de la conexión central al interior de la flecha con el Devanado.

2.- “Fabricación de los aislamientos a tierra, de la conexión central”.

3.- “Montaje de las barras de cobre y tubo aislante de la conexión central”.

4.- “Montaje de los postes de la conexión central, con empaques nuevos”.

5.- “Prueba de hermeticidad de la conexión central con nitrógeno”.

6.- “Pruebas eléctricas de la conexión central.

o Resistencia de aislamiento

Alta Tensión, aplicando 4.5 KV de CA durante un minuto”.

7.- Al término del rebobinado, “el rotor se balanceó en Túnel a velocidad nominal y a 110 % de la velocidad nominal, con pruebas eléctricas dinámicas”.

8.- Los trabajos de rebobinado incluyeron la sustitución de los Anillos de Retención con aleación de 18 Mn-05 Cr, por otros 18 Mn- 18 Cr con mayor resistencia a SCC.

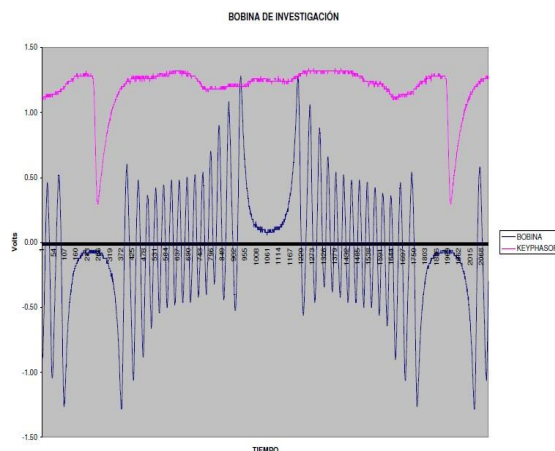


Figura 3.8 .- Prueba de búsqueda de bobinas en corto circuito con bobina exploradora al

% de velocidad en túnel de balanceo.

Al rotor se le realizó todo el protocolo de pruebas por parte de LAPEM antes de ser instalado en el generador con resultados satisfactorios. El día 28 de Agosto del 2012, la unidad quedó sincronizada y se estuvo operando a capacidad de 250 MW con movimientos de carga por el Área de Control, sin presentar problema. El día 14 de Septiembre del 2012, se presentó falla en los sellos de aceite del Generador eléctrico por lo que la unidad salió a reparación y quedó sincronizada de nuevo el 29 de Noviembre del 2012. El 21 de enero del 2013, este rotor falló a tierra con un total de 1536 horas de operación después de su rebobinado completo, razón por la que se reclamó en garantía al proveedor el cual lo trasladó a sus talleres para su reparación.



Foto 3.9 .- Rotor de reserva contaminado por falla en Estator, y su cilindro metálico de transporte.

III. 15 Desarrollo de Pruebas .

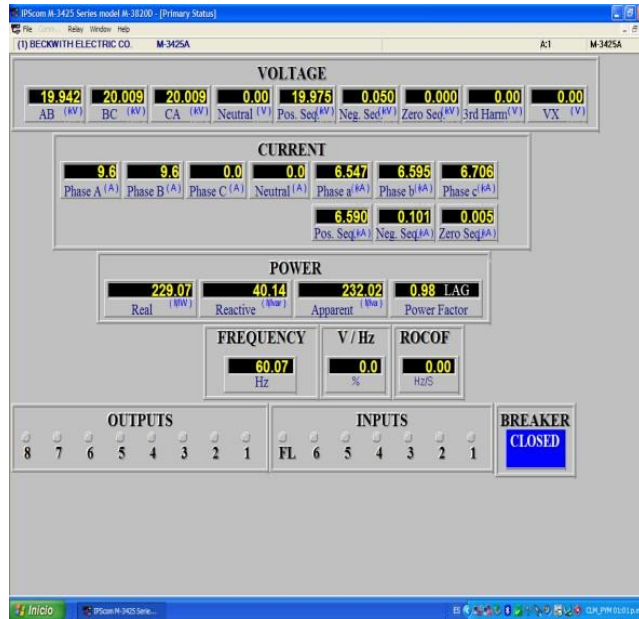


Fig. 3.10 -Condiciones operativas de la Unidad al momento de la falla.

El 21 de enero del 2013 la Unidad se encontraba sincronizada al Sistema Eléctrico Nacional con 229 MW y 40 MVAR en condiciones normales de operación. Se detecta operación de las protecciones 64 F1 y 64 F2 indicando “Falla a tierra en el Devanado de Campo del Rotor”. En las figuras siguientes se muestran las condiciones operativas registradas por el Relevador digital “M-3425”.

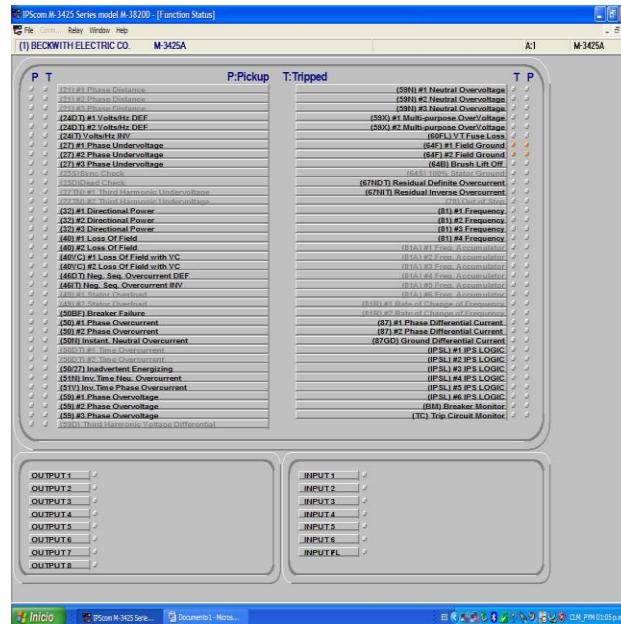


Figura 3.11.- Registro de Relevadores operados.

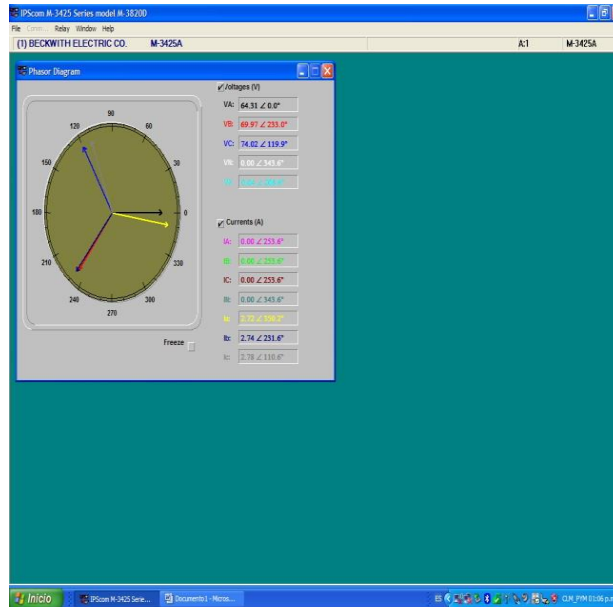


Fig. 3.12.- Diagrama fasorial con desbalance de corrientes y ángulos por la falla.

- **Trabajos de investigación de la falla.**

Para evaluar los aislamientos del devanado de Campo del rotor, realizar pruebas seccionadas de todas las zonas del circuito de excitación y encontrar la falla, se efectuaron los siguientes trabajos.

- a.- Extracción del rotor del estator del generador eléctrico.
- b.- Pruebas al sistema de excitación y bus de conexión a los anillos rozantes.
- c.- Probar el aislamiento entre los anillos rozantes y la flecha.
- d.- Probar el aislamiento interno de la flecha hueca.
- e.- Probar la zona de cabezales del rotor.
- f.- Verificar las cuñas y orificios de enfriamiento del rotor.
- g.- Revisar el relevador de falla a tierra (64F).

En virtud de que las pruebas al devanado de campo permanecían en “Cero Mega- ohms”, se decidió la extracción de los “Anillos de Retención” para tener acceso a la conexión del interior de la flecha hacia el devanado de campo, para desconectarla y separar el aislamiento interior de la flecha del propio devanado y probarlos.

- **Extracción de Anillos de Retención.**

Para la extracción de los anillos de retención, se trasladó una máquina de inducción de baja frecuencia y la herramienta electrohidráulica propiedad de otra central así como su personal operativo. Previo a la extracción de los anillos de retención se efectuaron pruebas de líquidos penetrantes para detectar fisuras en la superficie del metal. En estas pruebas se detectó el anillo de retención lado excitador con 26 micro fisuras principalmente en el lado libre del anillo, siendo la mayor de una longitud de 21 milímetros. Este anillo de retención es de un “Acero Inoxidable ASTM A289-88 clase C”, aleación con 18Mn-18Cr.

Elemento	Porcentaje
Cr	18.07 +- 0.32
Mn	18.21 +- 0.35
Fe	63.37 +- 0.72
Ni	0.30 +- 0.07
Mo	0.04 +- 0.01

Tabla 1.- Composición química del Anillo de Retención.



Figura 3.13.- Anillo de Retención 18Mn-18Cr fisurado con 1536 horas de operación.
Prueba de análisis metalográfico y Microfotografía.

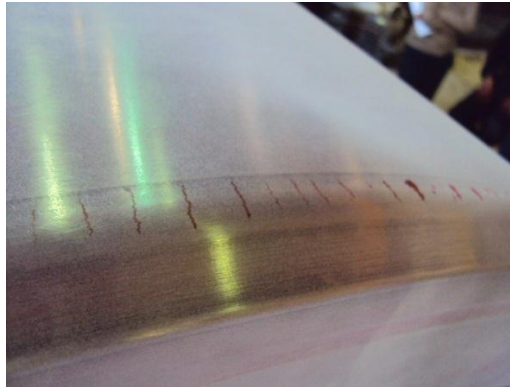


Figura 3.14.- Anillo de Retención 18Mn-18Cr con 26 micro fisuras. Prueba de líquidos penetrantes fluorescentes.

Después de extraer los anillos de retención se les efectuaron pruebas de: Ensayos No Destructivos (END).

- **Análisis Metalográfico.**

Los resultados obtenidos por LAPEM se transcriben a continuación.

“De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio metalográfico, se puede concluir lo siguiente:

1.- Los cuatro anillos de retención corresponden a un acero no magnético ASTM A289-88 Clase C (18Mn-18Cr).

2.- La microestructura del material obtenida en los anillos, está formada por austenita con martensita retenida con presencia de maclas, la cual es adecuada para este tipo de material. Cabe mencionar que los puntos preparados para metalografía se realizaron sobre la superficie externa y los anillos desmontados se inspeccionaron tanto por la superficie externa como por la interna.

3.- El análisis químico realizado al material de los anillos de retención, se realizó vía difracción de rayos X. Los resultados obtenidos indican que se trata de un acero inoxidable austenítico ASTM A 289-88 clase C.

4.- Debido a la inspección realizada y a las evidencias físicas y fractográficas del anillo de retención del rotor del generador eléctrico; Presenta características del mecanismo de Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo (SCC), que es un proceso físico-químico, a través del cual, en los metales, se presenta por una acción conjunta de esfuerzos de tensión, en presencia de

un medio corrosivo y sobre un material susceptible, lo cual dará como resultado, fatiga estructural que origina la aparición o nucleación de micro fisuras y grietas longitudinales y/o transversales, que tienden a generarse en las discontinuidades físicas, tales como picaduras, huellas de golpe, cambios de sección y zonas con esfuerzos residuales, dando como resultado la disminución de su resistencia mecánica. Las indicaciones detectadas con líquidos penetrantes de grietas muy finas, posiblemente tengan una profundidad considerable ya que emanaron bastante líquido penetrante, resultando consecuentemente peligrosas, lo cual implica un riesgo de fractura.

5.- Por la naturaleza irreversible y progresiva de este mecanismo y las dimensiones de las indicaciones encontradas sobre la superficie externa, se considera que la integridad del material se ve afectada, por lo que se recomienda su sustitución”.

En la tabla siguiente se resumen los datos de la extracción de los Anillos de Retención.

Tabla 2.- Datos de la máquina de inducción y temperaturas en Anillos de Retención.

Anillo de Retención	Potencia Máquina Inducción en %	Frecuencia en Hz	Temperatura del Anillo en °C
Lado Excitador	50.6	4.1	340
Lado Turbina	51.6	4.3	320

La máquina de Inducción usada fue.

Modelo----- Induction Heater Evolution 5. Marca ----- Bolt Tech Mannings.



Figura 3.15.- Máquina de Inducción con 51.6 de Potencia a 4.3 Hz. Para calentamiento de los Anillos.

Se considera importante mencionar que en CFE-Generación, ya se tiene la experiencia de 2 Anillos de Retención con Aleación de 18Mn-18Cr los cuales han presentado falla por Micro fisuras. A nivel mundial es poca la experiencia de fallas en este tipo de anillos por su tipo de aleación. Al tener fuera el anillo de retención lado excitador, se revisaron “los postes de la conexión de la flecha al devanado de campo” por debajo del cabezal y se encontró que no se podía acceder para desconectarla.



Figura 3. 16.- Trapo quemado encontrado bajo el anillo de retención lado excitador en el área de conexión.



Figura 3.17.- Tornillo de Conexión al interior de la flecha por debajo del cabezal.

Por lo anterior se decidió inspeccionar de una manera muy minuciosa la sección de los anillos Rozantes hacia esta conexión. “En esta inspección fue que se encontró la parte fallada a tierra en las rondanas aislantes de uno de los tornillos de conexión (postes) de un Anillo Rozante hacia el interior de la flecha”.



Figura 3.18.- Aislamiento quemado por arqueo a tierra en poste de conexión.

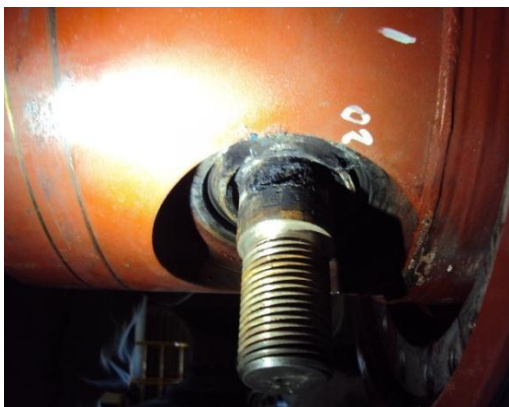


Figura 3. 19.- Punto de falla en tornillo de conexión.



Figura 3.20 Aislamiento quemado en la parte interna de la conexión al interior de la flecha.

La falla afectó asimismo parte del metal de la flecha en el punto de tierra y el aislamiento que está en el interior de la flecha al cual ya no se tiene acceso.



Figura 3.21.- Comparación de Aislamientos sano y fallado del Tornillo de conexión.

Por lo anterior se solicitó la inspección y opinión del personal que rebobinó el Rotor y se acordó la sustitución del aislamiento interno de la flecha así como hacer esta reparación en garantía.



Figura 3.22.- Comparación de Tornillos de conexión, nótese el punto de falla en el tornillo de la izquierda.

- **Reparación en garantía.**

El proveedor llevó a cabo en sus talleres la extracción de la conexión interior de la flecha para su reparación en garantía.



Figura 3.23.- Barra de conexión del interior de la flecha y punto de falla.



Figura 3.23.- Daños en punto de conexión.



Figura 3.24.- Tubo de conexión del interior de la flecha.



Figura 3.25.- Aislamiento del interior de la flecha.

- **Conclusiones.**

- 1.- La falla a tierra del devanado de campo se presentó en el aislamiento que separa al tornillo de conexión entre el anillo rozante y la barra de cobre del interior de la flecha en el propio orificio de la flecha. Por su ubicación fue difícil localizarlo en las primeras pruebas.
- 2.- Este aislamiento del interior de la flecha fue intervenido para revisión en el Rebobinado efectuado con anterioridad por el fabricante - reparador. Sin embargo falló con tan solo 1536 horas de operación.
- 3.- Por lo anterior, se reclamó en garantía esta reparación.
- 4.- El proveedor de servicios sustituyó estos aislamientos en garantía a CFE.
- 5.- Se efectuarán pruebas y análisis con LAPEM en el Anillo de Retención de acero inoxidable austenítico ASTM A 289-88 clase C, con aleación 18Mn-18Cr, ya que presentó 26 Micro fisuras por SCC con muy pocas horas de operación. Este es el segundo anillo de retención que se ha detectado con falla en CFE-Generación.

III.16 Reporte fotográfico durante la realización de pruebas eléctricas.

Se muestra el resumen de resultados y conclusiones obtenidas después de hacer un conjunto de mediciones para corroborar el comportamiento de una unidad de generación.



Figura 3.26a Equipos de prueba.



Figura 3.26b Equipos de prueba.



Figura 3.27 Operadores y equipos de prueba

La alta temperatura del aislamiento es uno de los factores que más impactan en la vida útil de una máquina. Por lo tanto, debemos hacer lo posible por mantener la temperatura del devanado del estator dentro de los límites recomendados en capítulos anteriores. La mejor forma de evitar altas temperaturas en los devanados del estator es el monitoreo frecuente y la toma de acciones

correctivas oportunas. Debemos tomar condiciones de todos los sensores de temperatura del estator del generador, así como las temperaturas de operación de éste y del sistema de enfriamiento desde su inicio de operación con el fin de detectar oportunamente variaciones que nos indiquen algún problema. En la actualidad existen varias pruebas disponibles que ayudan a determinar la condición del aislamiento. Ninguna prueba es sensible a todos los problemas de aislamiento, y ninguna prueba puede dar una indicación absoluta de la condición del aislamiento. Más bien, se sugiere que se efectúe al menos una prueba de CA y CD, y si es posible repetir a intervalos regulares, lo cual hace posible monitorear su tendencia con respecto al tiempo. Ya que ha habido avances significativos en la tecnología de medición en los últimos 10 años, los comités de estudio del IEEE, y otros, han actualizado muchos de los estándares relacionados con estas pruebas. Los resultados obtenidos en la evaluación del aislamiento eléctrico a los devanados del estator del generador de la unidad número uno después del mantenimiento mayor (reacuñado del estator) mediante un programas de pruebas eléctricas no destructivas, nos indican que el aislamiento del estator del generador se encuentra en buenas condiciones para prestar servicio. La resistencia de aislamiento e índice de polarización nos indica que el aislamiento se encuentra limpio y en buenas condiciones para las mediciones a tensión (nominal, los valores obtenidos de las mediciones de factor de disipación ($\tan \delta$) y su variación ($\tan \delta$) están dentro de lo considerado como normal para este tipo de máquinas y se mantienen en niveles similares a los obtenidos en las mediciones anteriores, por lo que, se concluye que el aislamiento no ha sufrido degradamiento anormal, no se tienen antecedentes de mediciones anteriores pero en las mediciones de corriente de descarga a la ranura realizadas, se obtuvieron valores que están arriba del límite considerable como aceptable para máquinas de más de 40 años de operación recomendamos continuar con el monitoreo de las condiciones del aislamiento del devanado durante los próximos mantenimientos y operar la máquina dentro de los límites de elevación de temperaturas permitidas.

CAPITULO IV

Modelado y Simulación de Generadores Síncronos

IV.1 Introducción (Zamora, 2005)

En éste capítulo se estudia el comportamiento de un conjunto de generadores conectados a una barra infinita. Se observa la influencia de los controles de tensión y velocidad para la máquina , por lo que se utiliza el sistema de prueba de la figura 3.1.

Tabla 1 Los datos del sistema de prueba son [zamora]

Potencia nominal (MVA)	1000
Tensión de línea (kV)	315
Constante de Inercia (kg.m ²)	56.290
Factor de amortiguamiento (pu_T/pu_w)	0.3
No. De pares de polos	2
Resistencia Interna (Ohms)	1.9845
Inductancia Interna (H)	0.26315

Tabla 2. Datos del punto de interconexión

Tensión eficaz entre fases (kV)	315
Ángulo de fase	0
Frecuencia	50

IV.2 Modelo del sistema

El modelo desarrollado se muestra en la siguiente [Zamora]

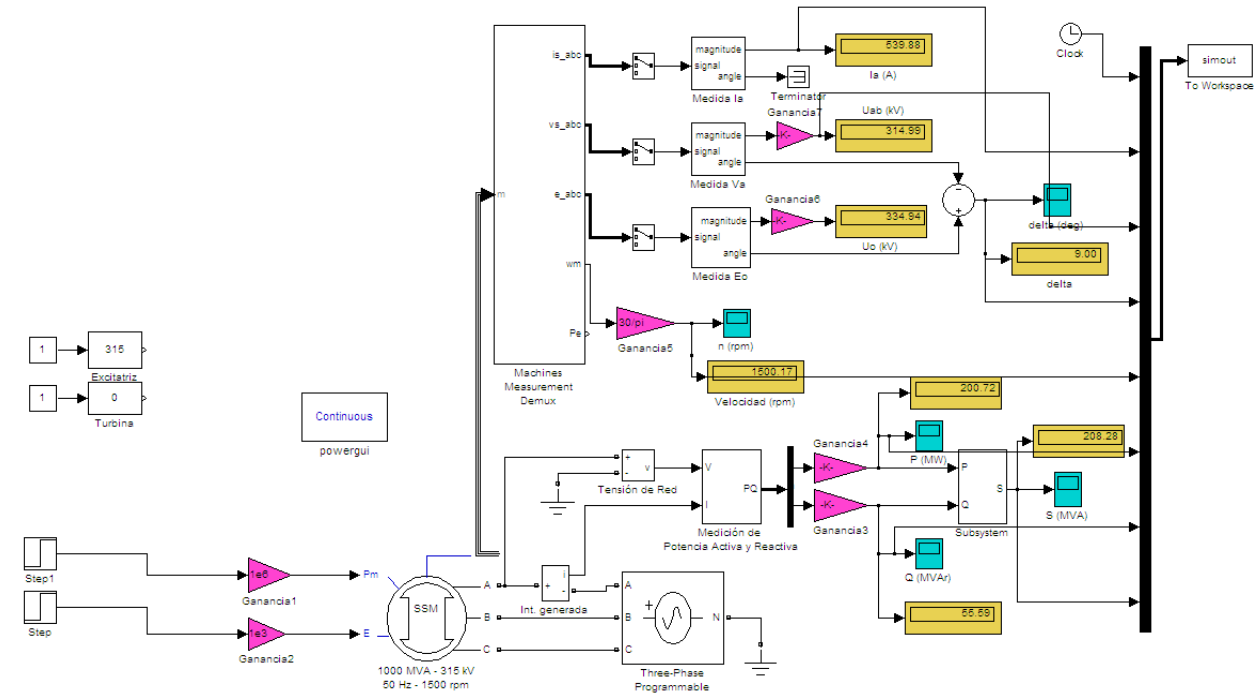


Figura 4.1a. Modelo de prueba utilizado en Simulink.

La máquina síncrona se modeló utilizando el bloque de Simplified Synchronous Machine SI Units que está en la librería de Machines de Simulation Power Systems de Matlab. Este modelo tiene dos entradas correspondientes a:

Pm, Potencia mecánica suministrada a la máquina (control de velocidad).

E, Tensión interna de la máquina (control de tensión)

y cuatro salidas:

Las tres primeras (A;B,C) son las terminales eléctricas del estator. La última (m) es un vector que contiene 12 variables:

1-3: corrientes en el estator

4-6: tensiones de la red

7-9: tensiones del generador

10: ángulo mecánico

11: Velocidad del rotor

12: potencia eléctrica

Estas 12 variables se observan en el modelo, las condiciones iniciales de la máquina se ponen a cero, las condiciones adecuadas de cada punto de operación se calculan a través de una corrida de flujos de potencia. Los datos de la turbina puede variar entre 0 y 1500 (MW), la excitatriz entre 0 y 725 (kv),

- El bus infinito se modela como una fuente de tensión trifásica ideal conectada a tierra, la fuente Three-Phase Programmable Voltage Source que está en la librería de Electrical Sources de SimPowerSystems y se configura con los parámetros indicados en la tabla 2
- Los demás elementos se utilizan para realizar las mediciones del sistema. Se mide la tensión de la red y la corriente del estator para sí poder medir la potencia activa y reactiva con los medidores adecuados. Con la medición de P y Q es posible entonces medir la potencia aparente S .
- Los resultados se pueden ver en pantalla usando los graficadores o se pueden importar a la memoria del programa para después ser analizados.

IV.3 Simulaciones

- Caso 1

Se selecciona el método de integración ode23tb, se modela el comportamiento de la máquina en modo flotante, es decir la máquina ya está sincronizada al sistema pero no existe un envío de la potencia activa o reactiva al sistema, para esto se corre flujos de potencia con P Q igual a cero y se activa el nodo de conexión como un nodo de carga PQ, entonces se determinan las condiciones iniciales de P mecánica y Voltaje. De ésta forma se pueden observar el efecto de los controles de voltaje y potencia de forma independiente o de forma conjunta según se desee.

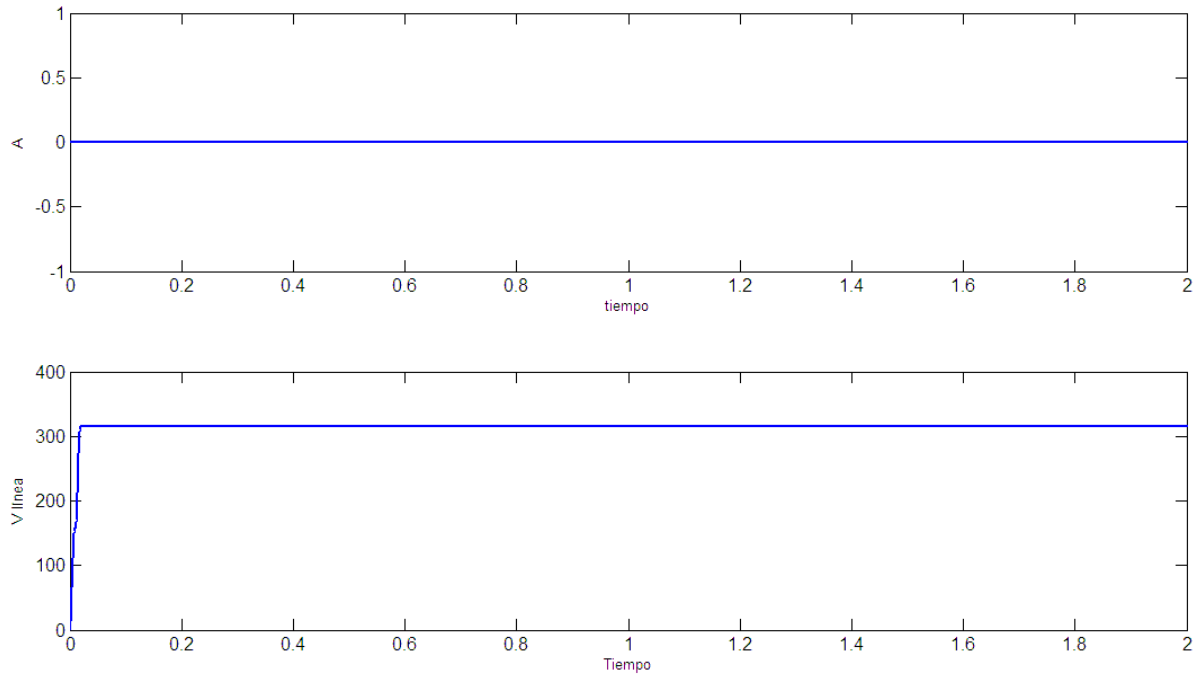


Figura 4.1 Corriente y voltaje en terminales, condición modo flotante.

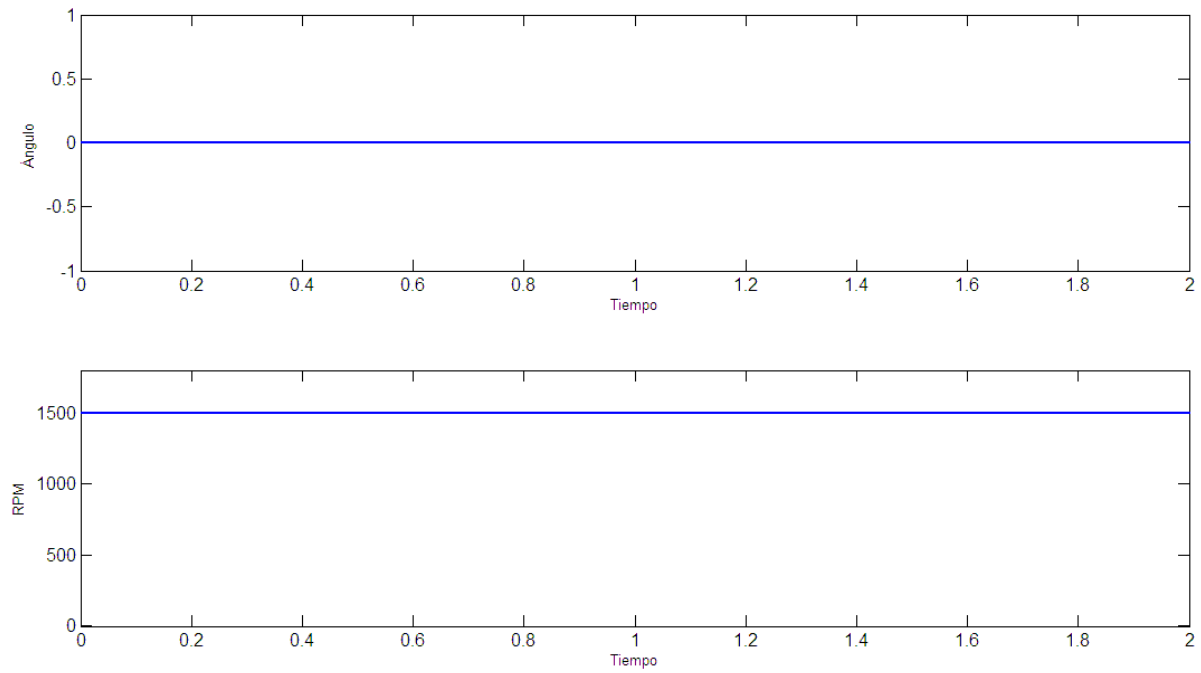


Figura 4.2 Angulo y velocidad, condición modo flotante.

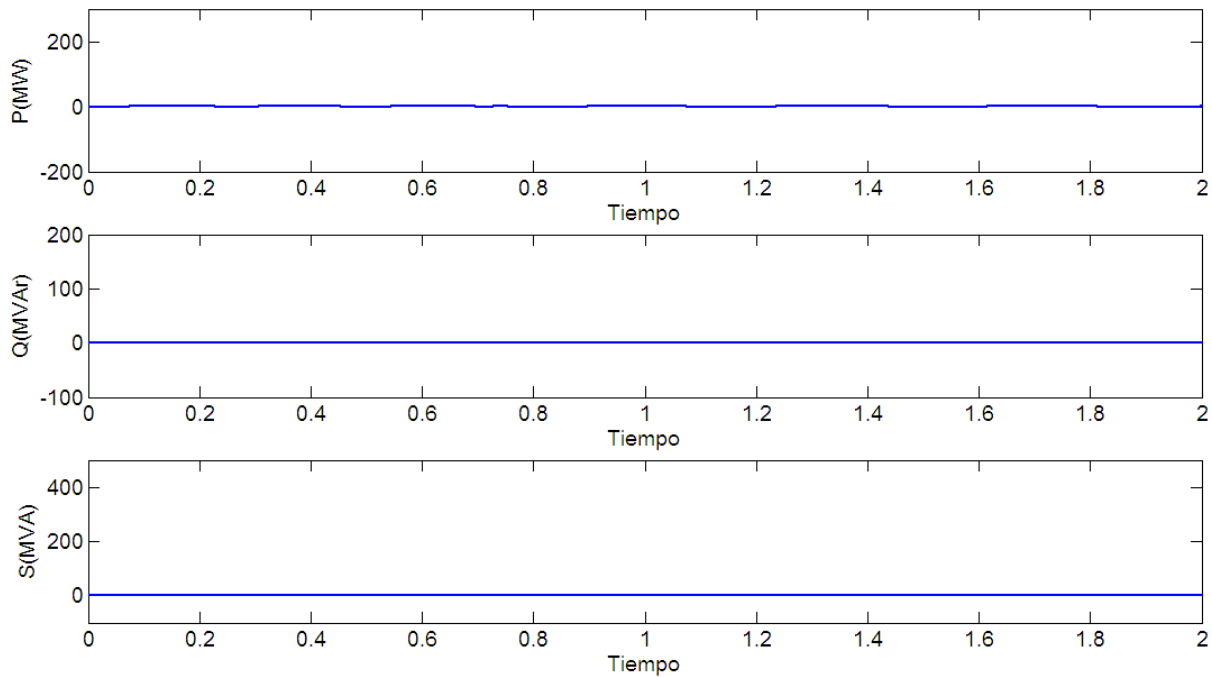


Figura 4.3 Potencia Activa, Reactiva y Aparente, condición modo flotante.

En las gráficas 4.1 se observa que la corriente que inyecta el generador al sistema es cero, la velocidad nominal de la máquina permanece constante, en éste caso para 50Hz la velocidad síncrona es 1500RPM, En la figura 4.2 se observa que el ángulo de carga es cero y la velocidad de la máquina es la de sincronismo 1500 RPM. Finalmente en la gráfica 4.3, se observa que la potencia activa , reactiva y aparente son todas cero. Los valores registrados concuerdan con el comportamiento que se espera de una máquina operando de manera flotante al sistema .

CASO 2.

Con la máquina operando de modo flotante durante 2 segundos, se hace operar en modo sobre excitado, por lo que sólo se mueve el sistema de excitación a 350KV, la simulación tiene una duración de 6 segundos con la finalidad de observar de mejor manera el transitorio electromecánico del sistema.

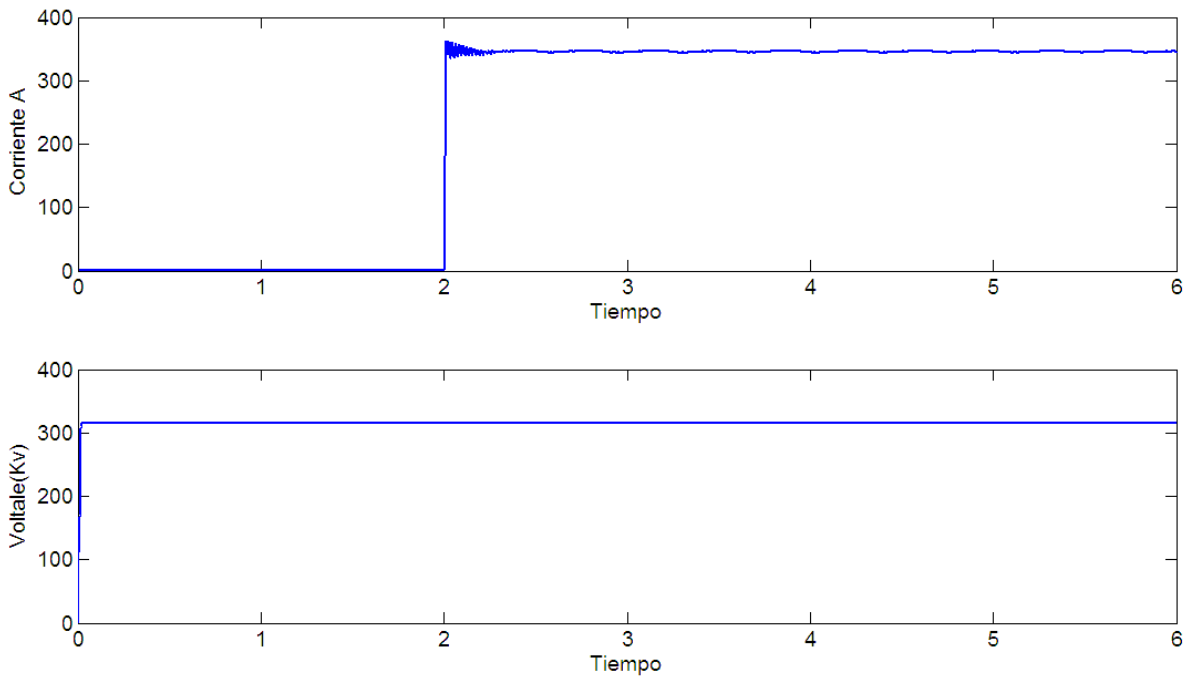


Figura 4.4 Corriente y voltaje, modo sobreexcitado.

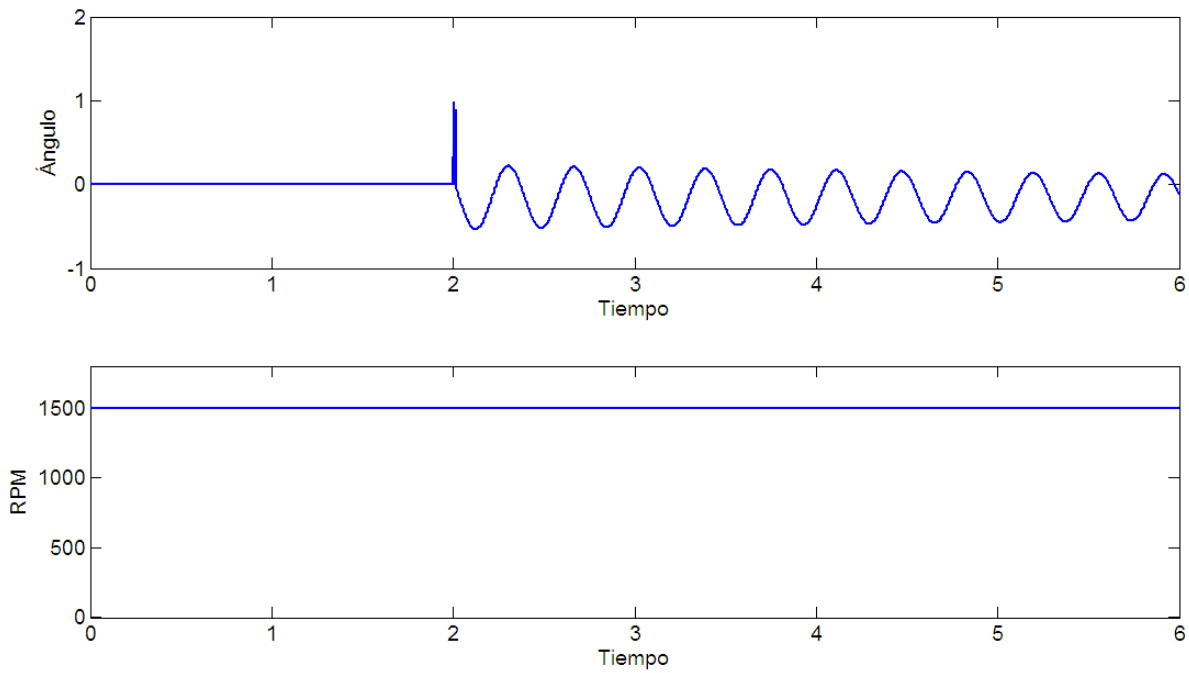


Figura 4.5 Ángulo de carga y velocidad, modo sobreexcitado.

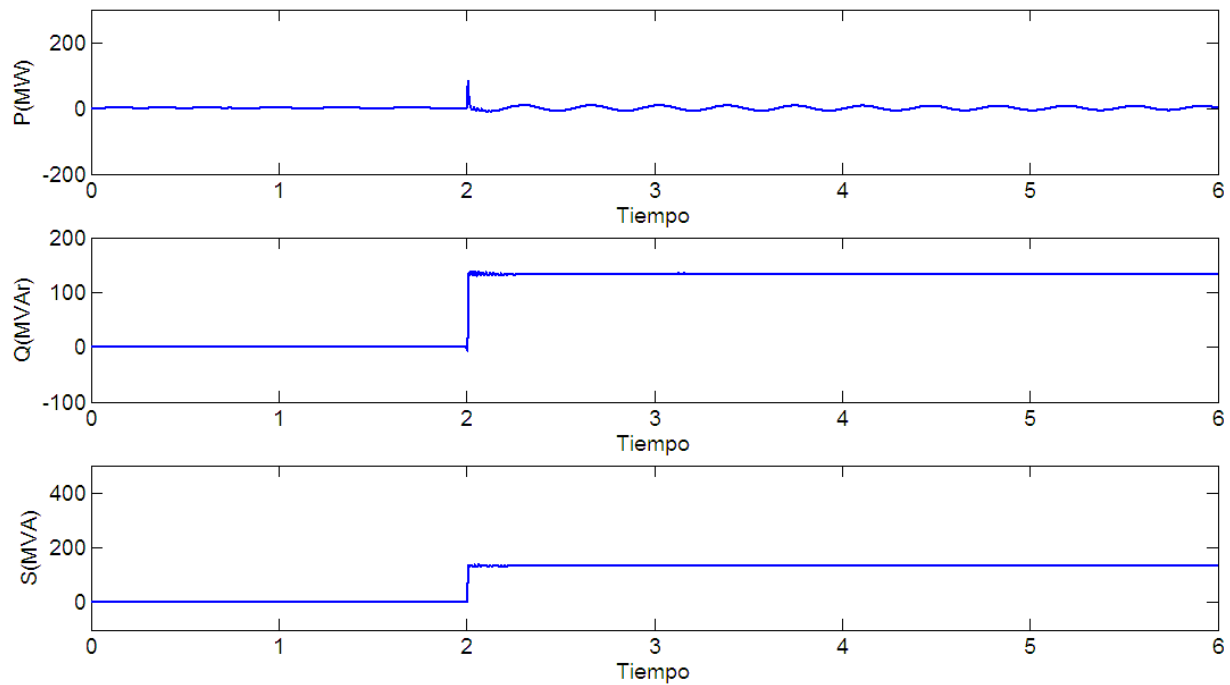


Figura 4.6 Potencia Activa, Reactiva y Aparente, modo sobreexcitado.

En la figura 4.4, se observa el comportamiento de la corriente y voltaje en terminales. Se observa que ahora una inyección de corriente al sistema. En la figura 4.5 se observa el comportamiento del ángulo de carga en donde ahora para de cero a un valor distinto, él ángulo oscila pero se observa la tendencia a ajustarse a un valor constante, distinto de cero, la velocidad de la máquina permanece constante a la velocidad síncrona. En la Figura 4.6 Se observa que hay una pequeña aportación de Potencia activa al sistema, pero no es significativa por lo que se puede considerar cero, por otra parte de observa que el generador está inyectando 120MVA_r al sistema, se conoce que la máquina está inyectando potencia reactiva por que la potencia reactiva es positiva. Finalmente se observa la potencia aparente que se entrega al sistema.

CASO 3

Se hace operar la máquina en modo flotante por 2 segundos, después de mueve sólo el sistema de excitación a 280 KV. Éste es un caso donde se subexcita la máquina. La simulación se realiza para un tiempo de 6 segundos.

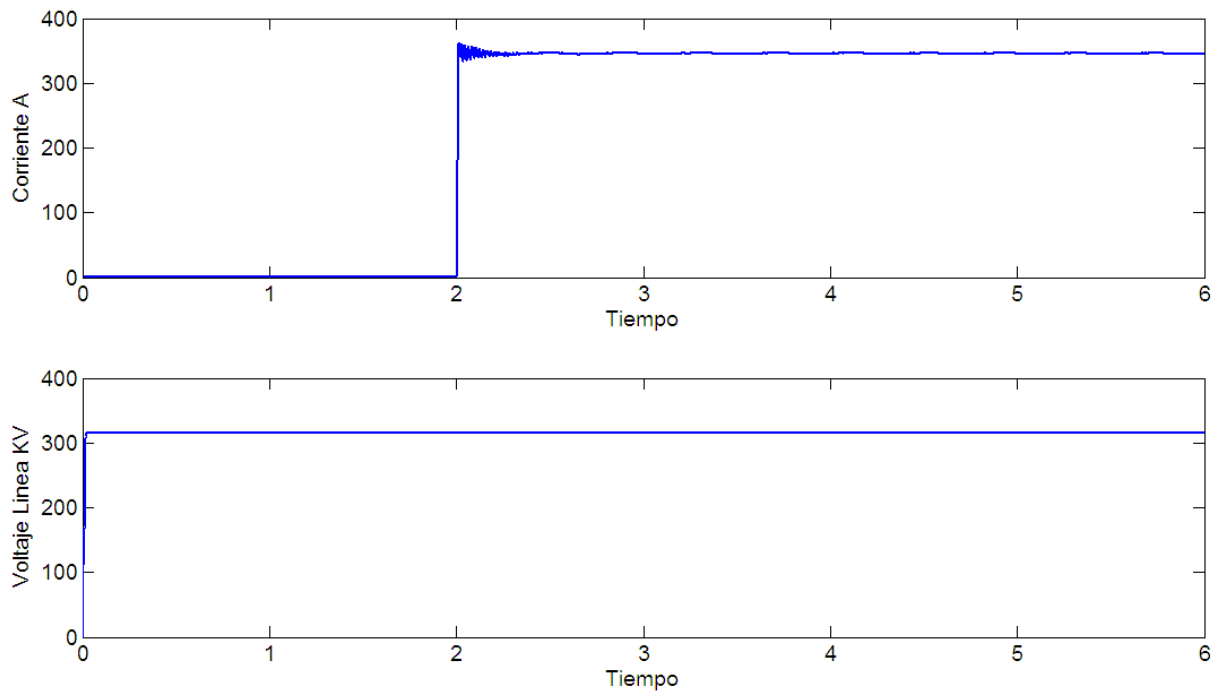


Figura 4.7 Corriente y voltaje, modo subexcitado

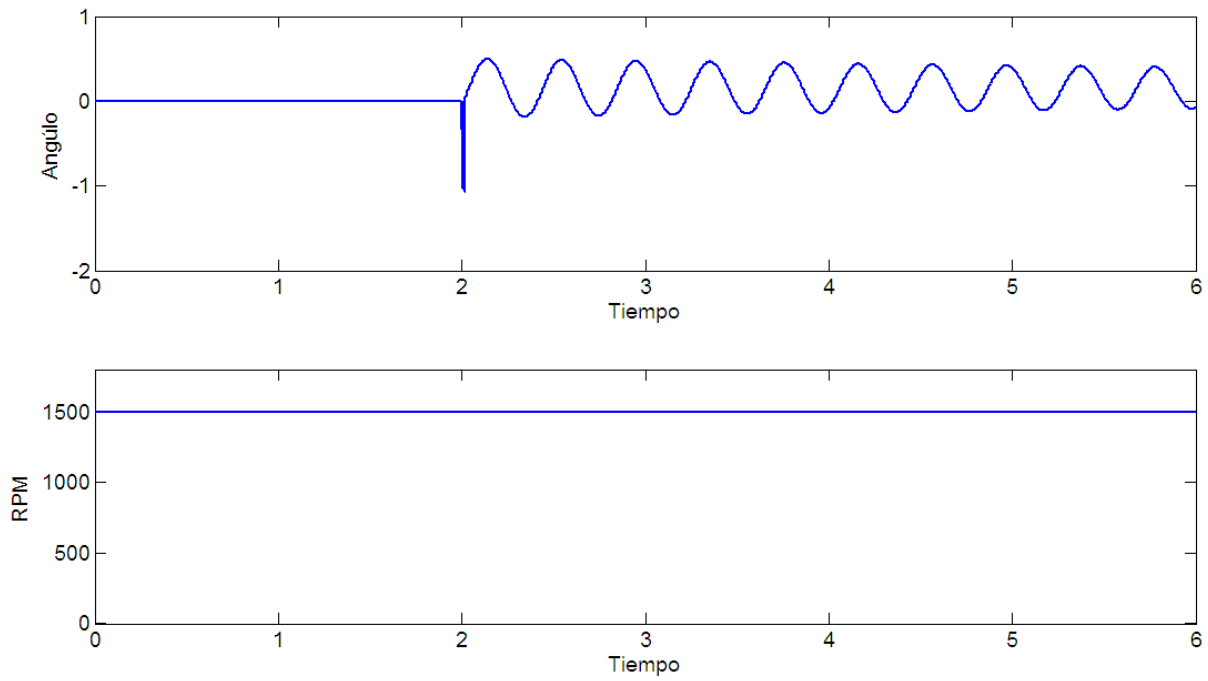


Figura 4.8 Ángulo de carga y velocidad, modo subexcitado.

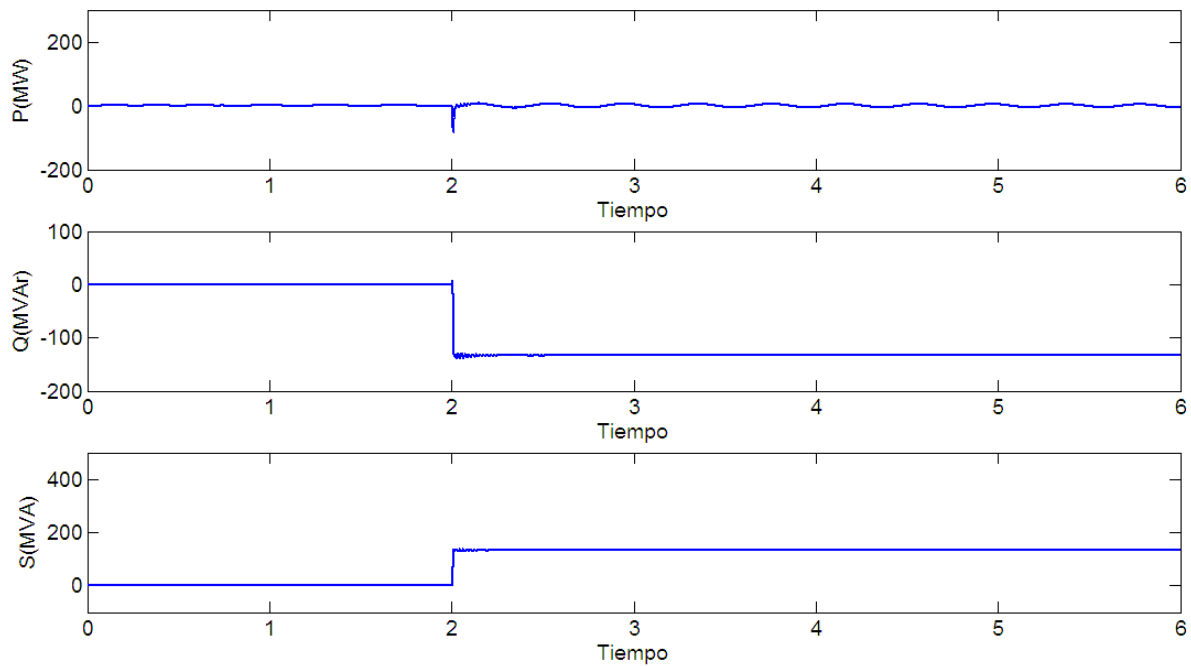


Figura 4.9 –Comportamiento de la potencia activa, reactiva y aparente en modo subexcitado.

En la figura 4.7 Se observa la magnitud de la corriente en terminales del generador. Así como el voltaje en terminales. En al figura 4.8 Se observa el ángulo de carga y la velocidad de la máquina en RPM. En la figura 4.9 se observa un efecto muy pequeño en la potencia activa , mientras que en la potencia reactiva el generador está tomando potencia reactiva del sistema en lugar de estar aportando potencia reactiva al sistema. Éste tipo de acción se utiliza en los sistemas Eléctricos de Potencia para hacer control de voltaje en el sistema. Se observa que el sistema de excitación sólo afecta a la potencia reactiva.

Caso 4.

Con la máquina operando en modo flotante, con tensión interna de 315KV, se mueve el control de potencia activa a 200MW, esto con la finalidad observar el comportamiento del sistema mecánico. El tiempo de simulación se aumenta a 20 segundos, ya que las constantes de tiempo del sistema mecánico son mucho más lentas que el sistema de excitación y por lo tanto se requiera más tiempo para observar el estado estable del sistema.

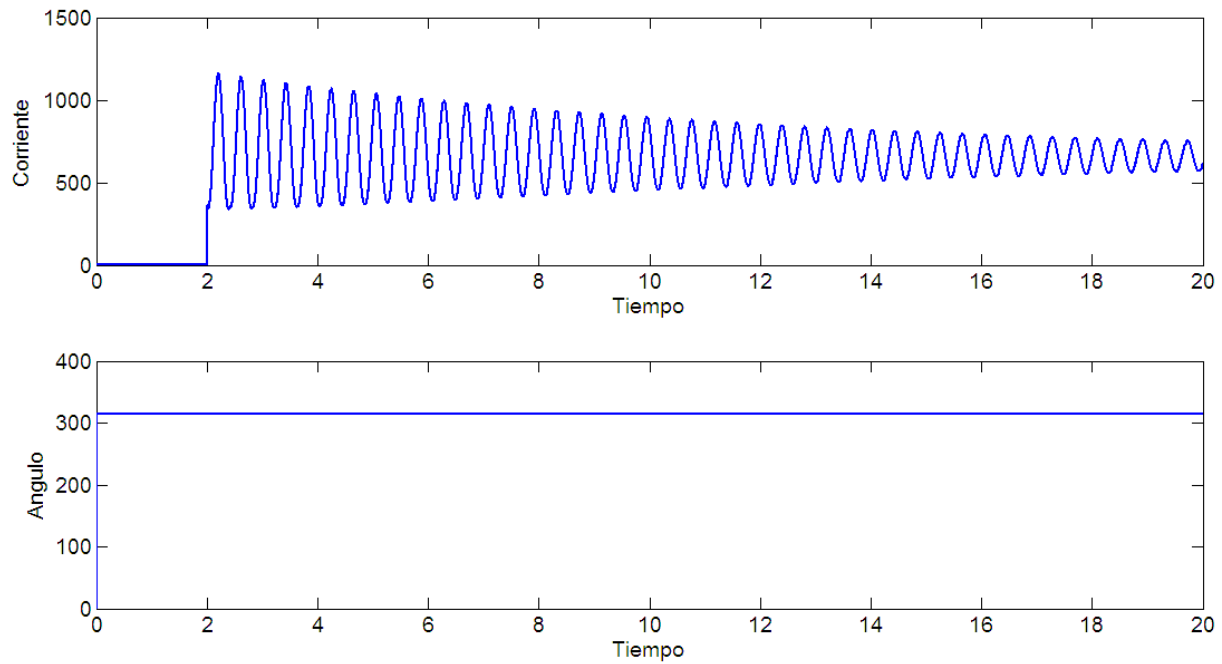


Figura 4.10 Corriente y voltaje, control de potencia activa

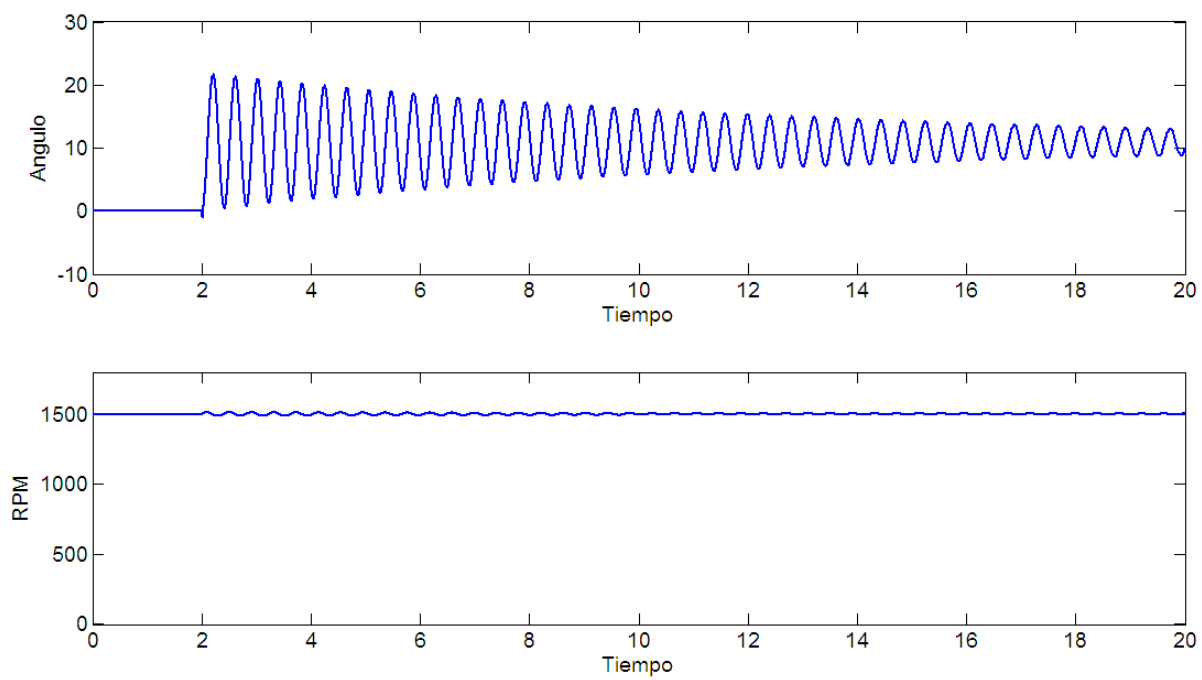


Figura 4.11 Angulo y velocidad, control de potencia reactiva.

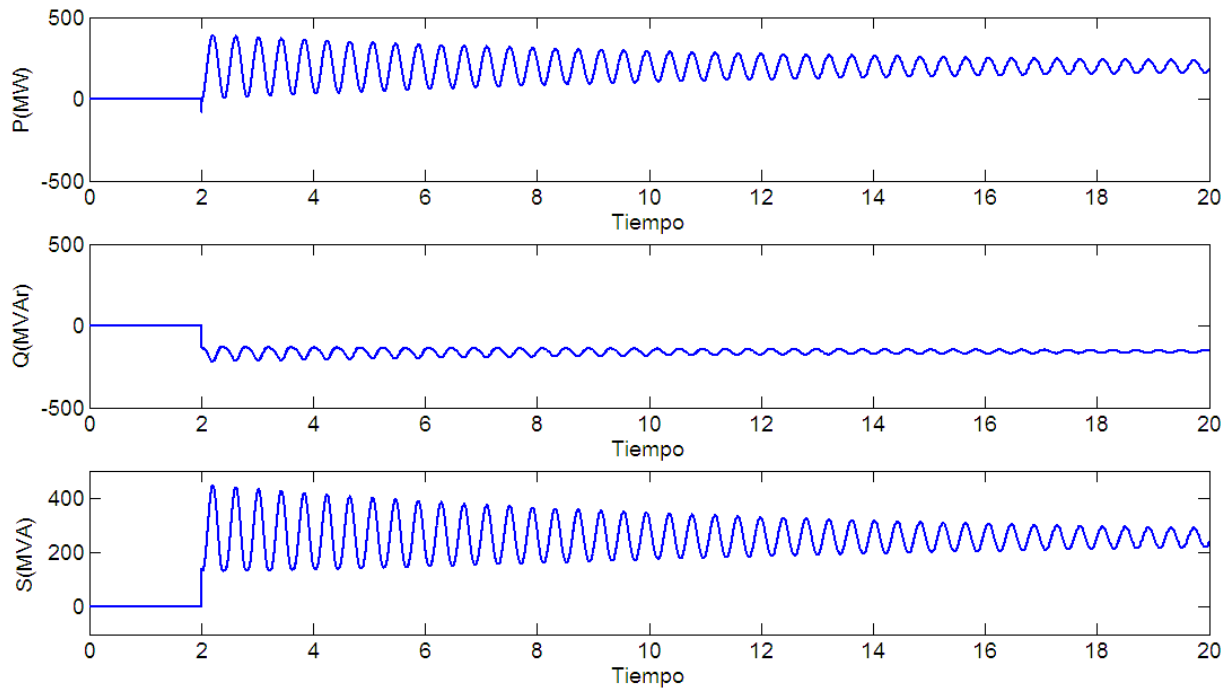


Figura 4.12 Potencia activa, Reactiva y Aparente con control de Potencia activa.

En la figura 4.10 se observa la magnitud de la corriente en terminales de la máquina y el voltaje , en la figura 4.11 se observa el ángulo y la velocidad, en la figura 4.12 se observa la potencia activa, reactiva y aparente. Se puede observar ahora que la potencia activa es distinta de cero, se está aportando potencia activa al sistema, en éste caso como la máquina está conectada al bus infinito toma potencia reactiva del sistema para mantener el voltaje en terminales constante, finalmente se observa la potencia aparente que en terminales de la máquina. El tiempo necesario para observar el estado estable es mayor de 20 segundos, ya que el transitorio electromecánico es más lento.

Caso 5

Se opera la maquina en modo flotante por 2 segundos, y después de reduce la excitación de la máquina de 315kv a 75kv. El tiempo total de la simulación son 20 segundos.

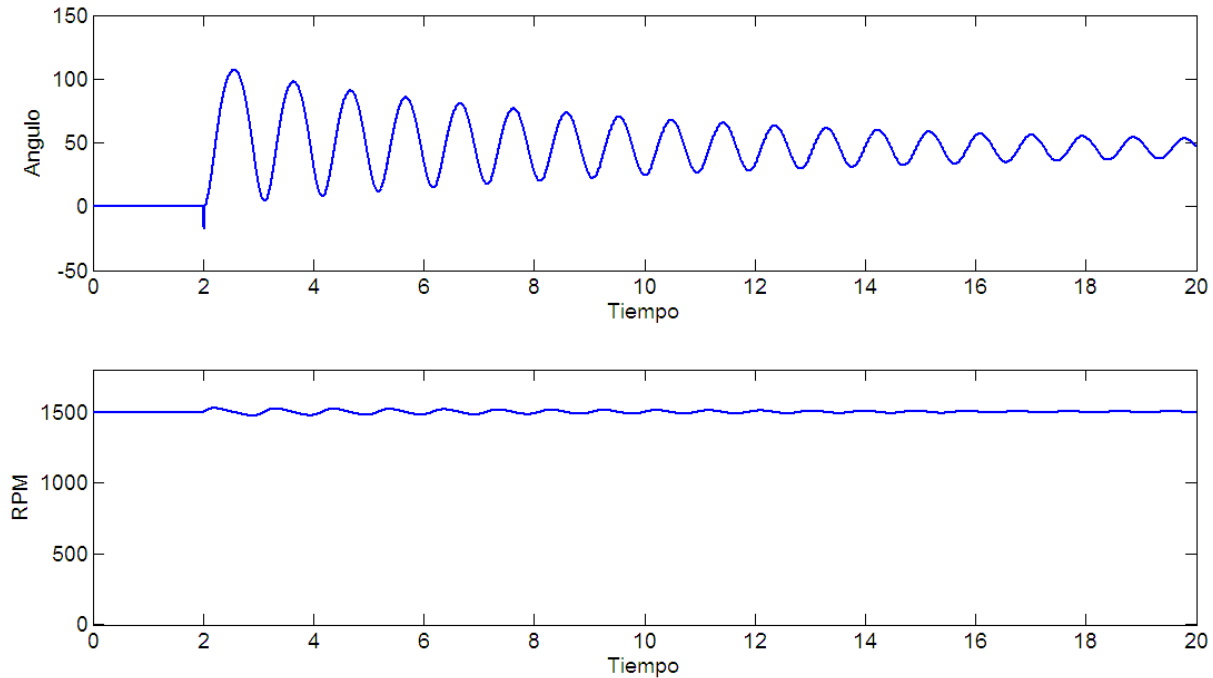


Figura 4.13 Angulo de carga y velocidad de la máquina, con bajo nivel de excitación.

En éste caso en la figura 4.13 se observa que el ángulo de carga empieza a crecer, oscila y se estabiliza en un valor de aproximadamente 50 grados. La velocidad de la máquina oscila.

Caso 6

Se opera la máquina en modo flotante y luego se reduce la excitación de 315 kV a 45 kV. Para la figura 4.14, se observa que el ángulo de la carga empieza a crecer y oscila entre valores de 150 y -150 grados. La velocidad de la máquina se dispara, tiende a crecer y sale de sincronismo, La máquina se hace inestable por la reducción de la excitación.

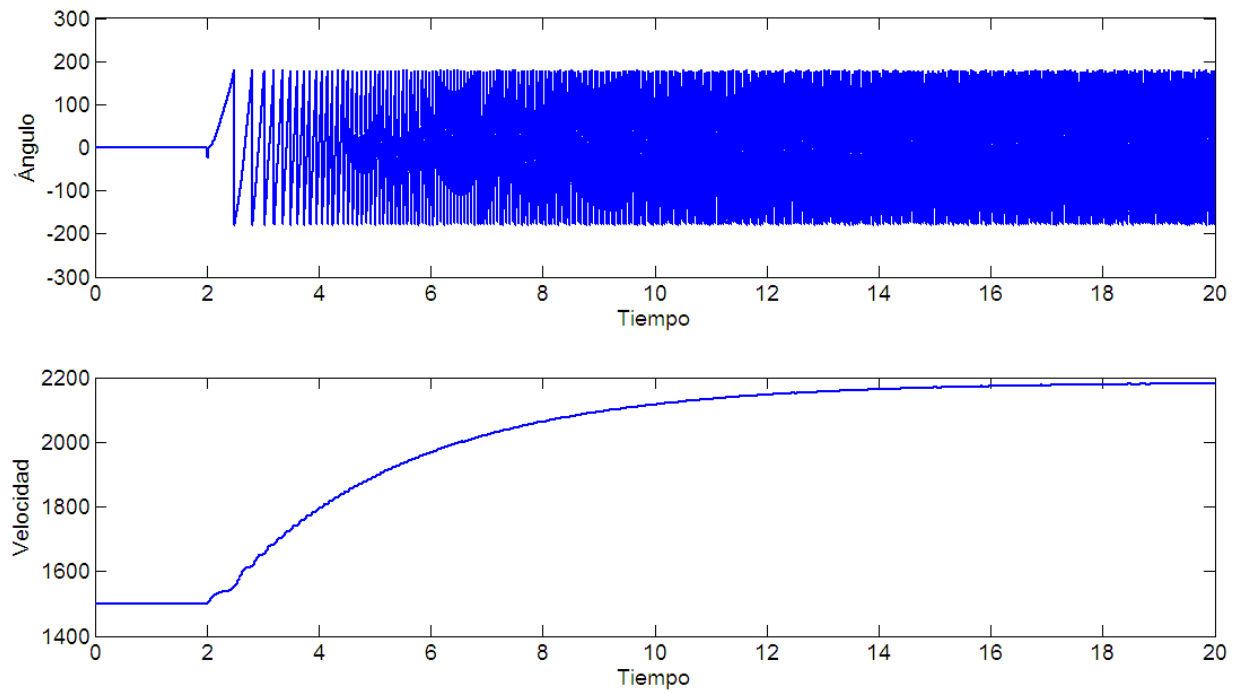


Figura 4.14 Angulo de carga y velocidad.

Caso 7 Para la máquina operando en modo flotante, se realizan ajustes tanto al control de potencia activa como al de potencia reactiva para que la máquina pueda enviar tanto potencia activa como reactiva al sistema.

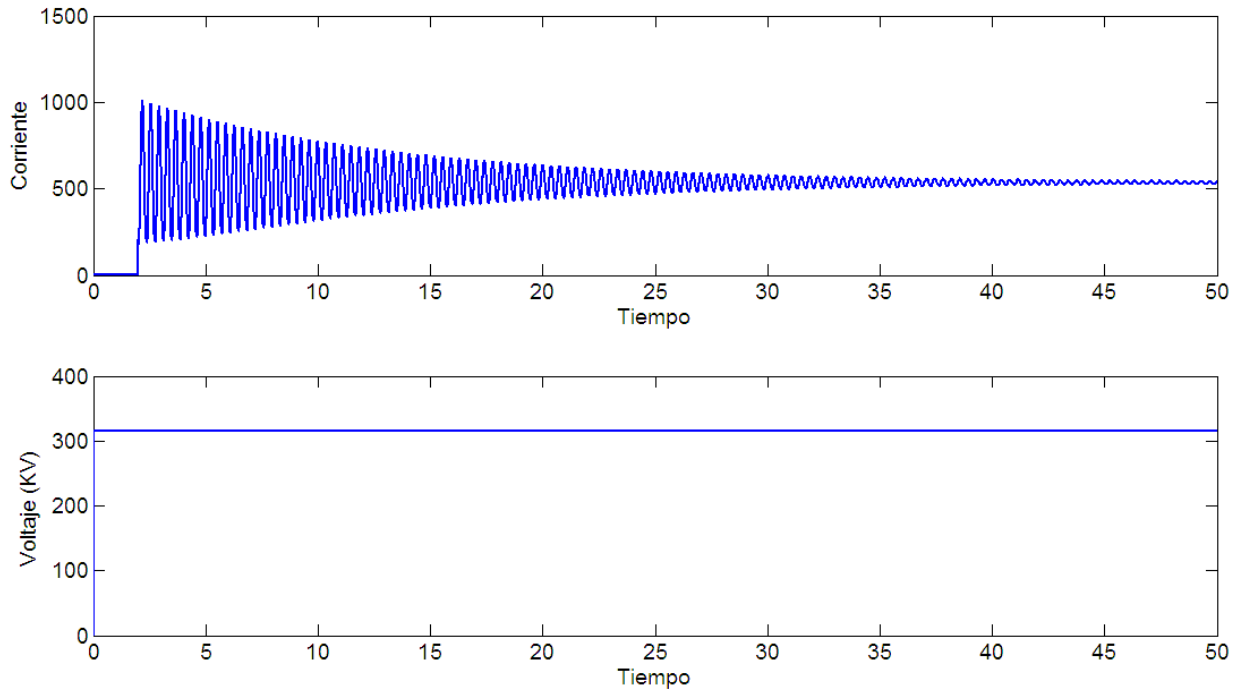


Figura 4.15 corriente y Voltaje , maquina sobreexcitada con control de potencia activa

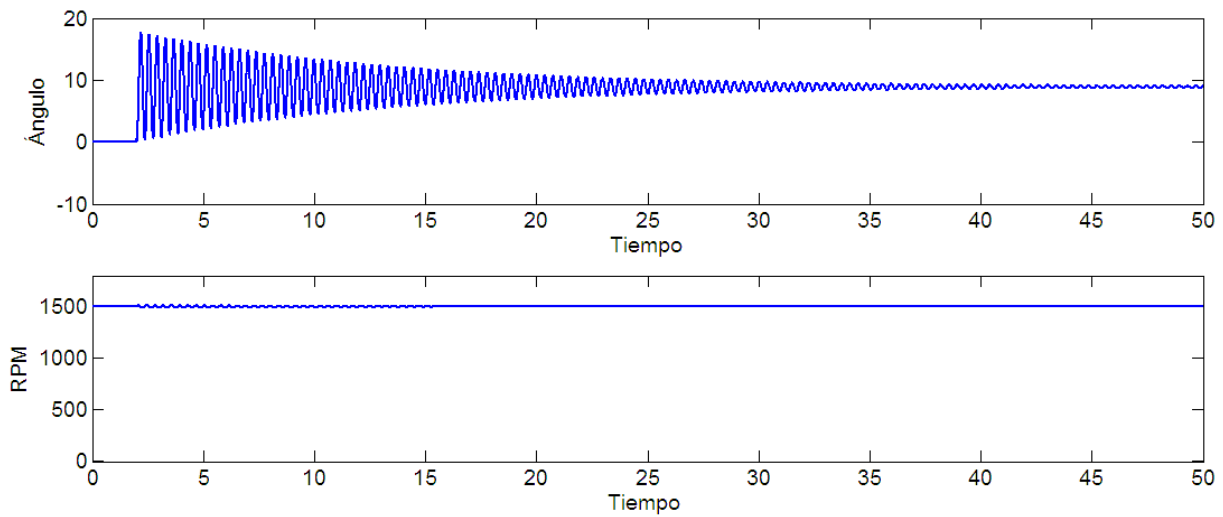


Figura 4.16 Ángulo y velocidad de la máquina con control del sistema de excitación y potencia activa.

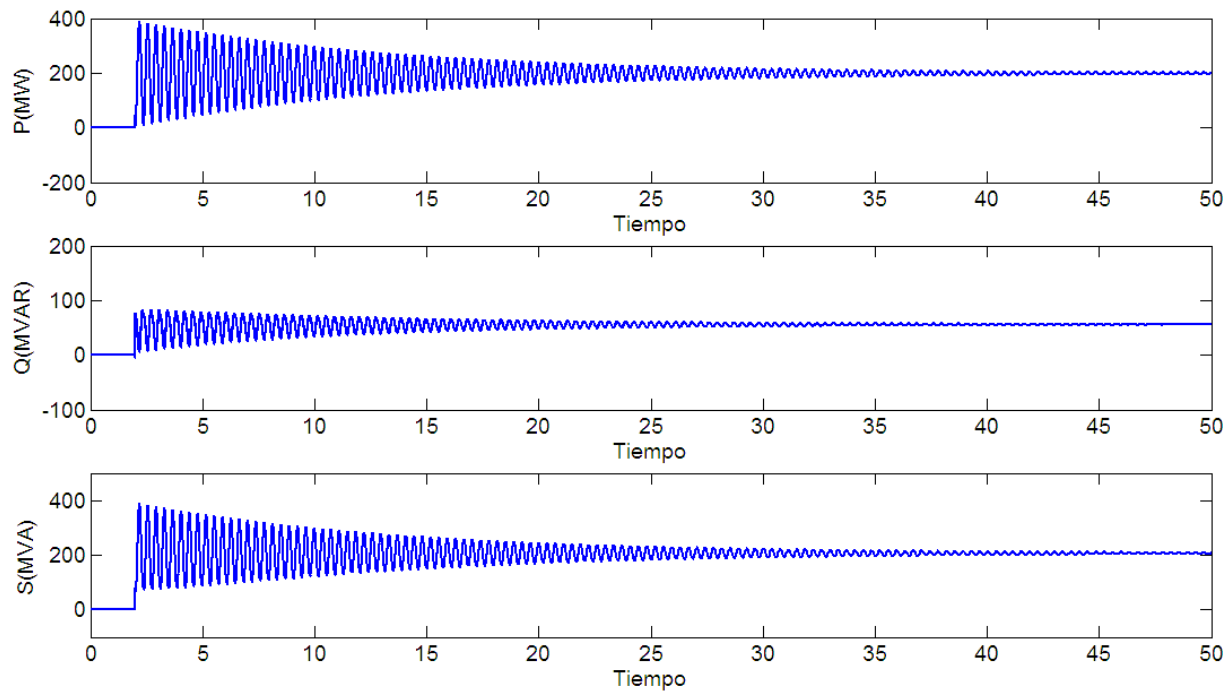


Figura 4.17 Potencia activa (MW) , Reactiva (MVAr) y aparente (MVA)

En la gráfica 4.15 se observa el comportamiento de corriente de la máquina operando sobreexcitada con control de turbina inyectando potencia activa. En la figura 4.16, se observa el ángulo de carga y la velocidad de la máquina, se observa un transitorio en el ángulo de carga que finalmente se estabiliza en un valor positivo. La velocidad de la máquina observa un efecto oscilatorio pero permanece en sincronismo. En la figura 4.17, para la potencia activa se observa una inyección positiva al sistema, el transitorio termina y encuentra un estado estable aceptable. La máquina aporta potencia reactiva al sistema, el sistema observa un transitorio y una vez terminado encuentra el estado estable aceptable. La máquina está operando en modo seguro.

CAPITULO IV

Conclusiones

La máquina síncrona es considerada como el corazón del sistema Eléctrico de Potencia, es sin duda uno de los sistemas de conversión de energía más eficiente que se conoce, es por tal motivo que ésta se encuentra en múltiples centrales generadoras Hidroeléctricas, Nucleoeléctricas, Carboeléctricas etc. Su diseño y construcción es en sí un campo de la Ingeniería que requiere de mucho conocimiento y preparación, es decir se necesita de personal capacitado para realizar las actividades mencionadas anteriormente. Conforme se aumenta la capacidad del generador, los sistemas asociados a su funcionamiento se hacen cada vez más complejos, como por ejemplo el sistema de enfriamiento por hidrógeno. Su mantenimiento también puede destacarse como un área de mucha importancia e interés debido a todos los mecanismos que interviene en la máquina síncrona para que pueda operar de manera segura y eficiente. Por tal motivo se mezclan distintas disciplinas de la ingeniería, como la mecánica, la electrónica, la química, la nuclear y por supuesto la eléctrica. Por otro lado para conocer el efecto de la máquina en el Sistema Eléctrico, se requieren de modelos que permitan hacer funcionar a la máquina en distintos modos de operación , esto con la finalidad de asegurar el funcionamiento correcto tanto de la máquina síncrona, como la del Sistema Eléctrico de Potencia.

Bibliografía.

Marín, F. (1982). *Energía*. Madrid: Alhambra.

Langsdorf, AlexanderS... *Teoría de las máquinas de corriente alterna McGRAW-HILL*.

Hernández L. El problema energético en el desarrollo global y la energía foto voltaica revista iberoamericana de física, 2, 1,2006

Hernández García, Luís Manuel “Energía, energía fotovoltaica y las celdas solares de alta eficiencia”. Revista Digital Universitaria [en línea]. 10 de diciembre 2007, Vol. 8, No. 12. [Consultada: 22 de junio de 2016]. Disponible en Internet: <<http://www.revista.unam.mx/vol.8/num12/art89/int89.htm>>
ISSN: 1607-6079.

Philip Kiameh, Power Generation Handbook. Selection, applications, operation, and maintenance. Mac Graw Hill, 2011

María Inmaculada Zamora (2005), Simulación de Sistemas Eléctricos
International Standard, IEC 60270 High Voltage Test Techniques Partial Discharge
Measurements

Consultas electrónicas

<http://elperiodicodelaenergia.com/las-10-centrales-hidroelectricas-mas-grandes-del-mundo/>;

<http://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-fotovoltaicas-del-mundo/>]

<http://www.fierasdelaingenieria.com/las-centrales-hidroelectricas-mas-grandes-del-mundo/>

<http://www.fierasdelaingenieria.com/las-plantas-de-energia-mareomotriz-mas-grandes-del-mundo/>

<http://www.fierasdelaingenieria.com/las-plantas-de-energia-geotermica-mas-grandes-del-mundo/>

http://www.exitae.es/blog/energias-renovables/la-central-con-pilas-de-combustible-mas-grande-del-mundo_705