



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**GENERACIÓN ELÉCTRICA CON EL  
CICLO PRESSURED WATER  
GENERATION (PWG)**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO**

P R E S E N T A:

**LUIS ALBERTO FLORES ALCALÁ**

TUTOR:

**DR. CÉSAR ANGELES CAMACHO**

**2012**



# **JURADO ASIGNADO**

Presidente: **M.I. RODOLFO LORENZO BAUTIZTA**

Vocal: **DR. CESAR ANGELES CAMACHO**

Secretario: **ING. ALEJANDRO SOSA FUENTES**

1<sup>er</sup>. Suplente: **DR. ARTURO GUILLERMO REINKING CEDUJO**

2<sup>do</sup>. Suplente: **DR. MARTIN SALINAS VAZQUEZ**

Ciudad Universitaria Facultad de Ingeniería UNAM

México distrito Federal

**TUTOR DE TESIS**

**DR. CESAR ANGELES CAMACHO**

---

**FIRMA**

---

|

# ÍNDICE

<b>JURADO ASIGNADO</b> .....	<b>I</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>X</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	2
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	2
1.3 HIPÓTESIS .....	2
1.4 METODOLOGÍA.....	3
1.5 CONTENIDO DE LA TESIS .....	3
<b>2 LA ENERGÍA GEOTÉRMICA</b> .....	<b>5</b>
2.1 GEOTERMIA .....	5
2.1.1 <i>Breve historia de la energía geotérmica</i> .....	8
2.1.2 <i>Situación actual</i> .....	9
2.2 GEOTERMIA EN MÉXICO.....	12
2.2.1 <i>Cerro Prieto</i> .....	13
2.2.2 <i>Los Azufres</i> .....	13
2.2.3 <i>Los Humeros</i> .....	14
2.2.4 <i>Las Tres Vírgenes</i> .....	15
2.3 GEOTERMIA PARA LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA .....	16
2.3.1 <i>Clasificación</i> .....	16

2.3.2	<i>Generación Eléctrica</i>	17
2.3.3	<i>Ciclo a contrapresión</i>	17
2.3.4	<i>Ciclo a condensación</i>	18
2.3.5	<i>Ciclo de una evaporación instantánea</i>	19
2.3.6	<i>Ciclo de doble evaporación instantánea</i>	20
2.3.7	<i>Ciclo binario</i>	21
<b>3</b>	<b>CICLO PRESSURED WATER GENERATION (PWG)</b>	<b>23</b>
3.1	GENERALIDADES DE PWG. DIFERENCIAS CON CICLO BINARIO CONVENCIONAL	23
3.1.1	<i>Ciclo binario convencional</i>	23
3.1.2	<i>Ciclo binario con una evaporación relámpago: Ciclo PWG</i>	24
3.1.3	<i>Ventajas técnicas de ciclo PWG sobre ciclo binario convencional</i>	25
3.2	ANÁLISIS DE PWG: SUS COMPONENTES	27
3.2.1	<i>Ciclo</i>	29
3.2.2	<i>Turbina de alta velocidad</i>	32
3.2.3	<i>Equipos de bombeo</i>	33
<b>4</b>	<b>PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD</b>	<b>35</b>
4.1	TIPOS DE GENERADORES	35
4.1.1	<i>Generador de corriente continua</i>	35
4.1.2	<i>Generador síncrono</i>	37
4.1.3	<i>Generador asíncrono</i>	39
4.2	EL GENERADOR DE ALTAS REVOLUCIONES	41
4.3	DISPONIBILIDAD COMERCIAL	46
<b>5</b>	<b>ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN ELÉCTRICA</b>	<b>49</b>

5.1	ESTUDIO DE CONEXIÓN ELÉCTRICA DE GENERACIÓN USANDO EL CICLO PWG.....	49
5.1.1	<i>Construcción del sistema</i> .....	50
5.1.2	<i>Potencia eléctrica</i> .....	53
5.2	CASO BASE: RED ELÉCTRICA DE CINCO NODOS .....	53
5.3	CASO II: RED DE SEIS NODOS INCLUYENDO GENERACIÓN CON EL CICLO PWG.....	56
5.4	CASO III: RED DE 10 NODOS CON TRANSFORMACIÓN DE VOLTAJE PARA CONECTAR LA GENERACIÓN PWG .....	59
5.5	CASO IV: ARREGLO DE UN HIPOTÉTICO CAMPO GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA CON GENERACIÓN PWG .....	62
5.6	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL .....	66
5.7	ESTUDIO ECONÓMICO.....	69
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....</b>	<b>71</b>
6.1	CONCLUSIONES GENERALES .....	71
6.2	CONCLUSIONES PARTICULARES.....	71
6.3	TRABAJO FUTURO .....	72
	<b>APENDICE A.....</b>	<b>73</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS .....</b>	<b>75</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Localización de recursos geotérmicos en la península de Baja California.....	1
Figura 2.1 Modelos de la estructura de la Tierra.....	6
Figura 2.2 Placas de la corteza terrestre.....	7
Figura 2.3. Primer motor usado para generación eléctrica con vapor geotérmico. .....	9
Figura 2.4 Utilización de los fluidos geotérmicos.....	11
Figura 2.5 Campos geotérmicos en México.....	12
Figura 2.6 Central geotermoeléctrica Cerro Prieto.....	13
Figura 2.7 Central geotermoeléctrica Los Azufres.....	14
Figura 2.8 Central geotermoeléctrica Los Humeros.....	14
Figura 2.9 Central geotermoeléctrica Las Tres Vírgenes.....	15
Figura 2.10 Ciclo a contrapresión.....	18
Figura 2.11 Ciclo a condensación.....	19
Figura 2.12 Ciclo de una evaporación instantánea.....	20
Figura 2.13 Ciclo de doble evaporación instantánea.....	21
Figura 2.14 Ciclo binario.....	22
Figura 3.1 Planta convencional de ciclo binario.....	24
Figura 3.2 Planta de ciclo PWG.....	25
Figura 3.3 Intercambiadores de calor.....	26
Figura 3.4 Acercamiento de temperaturas dentro de intercambiador de placas.....	27
Figura 3.5 Acercamiento de temperaturas dentro de intercambiador de carcasa y tubos.....	27

Figura 3.6 Esquema del ciclo PWG.....	29
Figura 3.7 Diagrama temperatura vs entropía (T-s) del ciclo PWG.....	31
Figura 3.8 Diagrama de estado de velocidad de la turbina. ....	33
Figura 4.1 Componentes principales de la máquina de corriente continua .....	35
Figura 4.2 (A) Forma de onda del generador con una sola espira. (B y C) Forma de onda con más de una espira. ....	36
Figura 4.3 Esquema básico de un generador síncrono con 2 polos excitado mediante corriente continua. ....	37
Figura 4.4 Rotor de polos NO salientes. Se usa para rotores de 2 o 4 polos... ..	38
Figura 4.5 Rotor de polos salientes. Se usa para rotores de 4 o más. ....	38
Figura 4.6 Esquema básico de un generador asíncrono.....	40
Figura 4.7 Rotor tipo jaula de ardilla.....	40
Figura 4.8 Cojinetes magnéticos. ....	42
Figura 4.9 . Eje de apoyo. ....	42
Figura 4.10 Cinco ejes del sistema. ....	43
Figura 4.11 Sin lubricantes. ....	43
Figura 4.12 . Sistema de control de los cojinetes magnéticos 1. ....	44
Figura 4.13 Sistema de control de los cojinetes magnéticos 2. ....	44
Figura 4.14 Sistema de control de los cojinetes magnéticos 3. ....	45
Figura 4.15 Sistema de control de los cojinetes magnéticos 4. ....	45
Figura 4.16 Sistema de control de los cojinetes magnéticos 5. ....	46
Figura 4.17 Principales empresas productoras de generadores de altas revoluciones. ....	47
Figura 4.18 Generador de altas revoluciones, modelo NovaGen™ 400. ....	48

Figura 5.1 Esquema del ciclo PWG. ....	51
Figura 5.2 Diagrama T-s del ciclo PWG modificado. ....	51
Figura 5.3 Red eléctrica de cinco nodos. ....	54
Figura 5.4 Flujo de carga en red eléctrica de cinco nodos. ....	56
Figura 5.5 Red de seis nodos con generación PWG. ....	57
Figura 5.6 Flujo de carga en red de seis nodos con generación PWG. ....	59
Figura 5.7 Red de diez nodos con transformación de voltaje con generación PWG. .....	60
Figura 5.8 Flujos de carga en red de 10 nodos con transformación de voltaje con generación PWG. ....	62
Figura 5.9 Arreglo de un hipotético campo geotérmico de baja entalpía con generación PWG. ....	63
Figura 5.10 Flujos de carga en arreglo de un hipotético campo geotérmico de baja entalpía con generación PWG ....	65
Figura 5.11 Esquema de las principales afectaciones ambientales. ....	66

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Capacidad geotermoeléctrica instalada a nivel mundial .....	10
Tabla 2.2 Clasificación de los recursos geotérmicos según su temperatura....	16
Tabla 3.1 Datos y propiedades de los estados termodinámicos del ciclo PWG.	30
Tabla 3.2 Resumen de potencias y eficiencias. ....	31
Tabla 3.3 Propiedades termodinámicas del punto real a la salida de la turbina.	31
Tabla 3.4 Parámetros de caracterización de turbina de alta velocidad. ....	32
Tabla 3.5 Selección de equipos de bombeo. ....	34
Tabla 4.1 Velocidad de un generador síncrono (rpm). ....	39
Tabla 4.2 Generadores de altas revoluciones producidos por la marca Elektromaschinen und Antriebe. ....	47
Tabla 5.1 Datos y propiedades de los estados termodinámicos del ciclo PWG modificada. ....	52
Tabla 5.2 Parametros nodales para red eléctrica de cinco nodos.....	54
Tabla 5.3 Parametros de las líneas para red eléctrica de cinco nodos. ....	55
Tabla 5.4 Parametros nodales para red de seis nodos incluyendo generación con ciclo PWG.....	57
Tabla 5.5 Parametros principales de las líneas anexadas a la red de seis nodos incluyendo generación con ciclo PWG”.....	57
Tabla 5.6 Parámetros nodales anexados a la red de 10 nodos con transformación de voltaje con generación PWG”.....	60
Tabla 5.7 Parámetros de las líneas anexadas a la red de 10 nodos con transformación de voltaje con generación PWG”.....	61
Tabla 5.8 Parámetros nodales anexados al arreglo de un hipotético campo geotérmico de baja entalpía con generación PWG”.....	63

Tabla 5.9 Parámetros de las líneas anexadas al arreglo de un hipotético campo geotérmico de baja entalpía con generación PWG” .....	64
Tabla 5.10 Factores de emisión de GEI por tipo de combustible (FEc). .....	67
Tabla 5.11 Eficiencias y HR por tecnología de las centrales eléctricas.....	68
Tabla 5.12 Factor de emisiones de GEI para la generación eléctrica. ....	68
Tabla 5.13 Emisiones anuales evitadas por unidad de 400 kW. ....	69
Tabla 5.14 Costo anual de combustible por tecnología y combustible, tomando al vapor geotermico con un costo nulo.....	70

## NOMENCLATURA

IMPULSA	Investigación Multidisciplinaria de Proyectos Universitarios de Liderazgo y Superación Académica
GEI	Gases de Efecto Invernadero
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CIE	Centro de Investigación en Energía
COPAR	Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico
POISE	Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico
BC	Baja California
PWG	Pressured Water Generation
IGA	International Geothermal Association
HT	Heat rate
rpm	Revoluciones por minuto
MW	Mega Watt
MWe	Mega Watt eléctricos
°C	Grados Celsius
km	Kilometro
m	Metro
kW	Kilo Watt
GWh	Giga Watt hora
MPa	Mega Pascal
KJ	Kilo Joule
s	entropía

m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
Hz	Hertz
T	Temperatura
S	Deslizamiento
fem	Fuerza electromotriz
CC	Corriente continua
CA	Corriente alterna
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
N <sub>2</sub> O	Oxido de nitrógeno
H <sub>2</sub> S	Sulfuro de hidrógeno
NH <sub>3</sub>	Amoniaco
CH <sub>4</sub>	Metano

## RESUMEN

El presente estudio hace un análisis de viabilidad técnica, económica y ambiental de la incorporación de un nuevo sistema para la generación de energía eléctrica, utilizando recurso geotérmico de baja entalpía, que se ha localizado en estudios previos en la península de Baja California.

El trabajo considera la aplicación de un ciclo binario modificado, al que se le nombro PWG por sus siglas en inglés Pressured Water Generation, el cual consiste en la modificación de los dispositivos en el sistema de generación de vapor, donde se sustituye el precalentador y evaporador, por un Intercambiador de placas planas, una evaporación *relámpago* y un separador de vapor, principalmente.

Tomando en cuenta que la presión del vapor generado al final del separador es muy poca, se opto por la elección de una microturbina de altas revoluciones, la que será acoplada a un generador eléctrico con las mismas características de velocidad.

De esta forma se analizan los beneficios que se obtienen al generar electricidad utilizando el ciclo PWG, evaluando la capacidad eléctrica que se genera con el sistema y sustituyendo la tecnología propuesta por la producción de las termoeléctricas convencionales, obteniendo los beneficios económicos-ambientales, que nos arroja esta propuesta.

Se incluyen simulaciones eléctricas utilizando el programa computacional NEPLAN, con diferentes arreglos se evaluó el comportamiento del generador en una red de prueba que se fue modificando para obtener distintos ejemplos de implementación.

El estudio indica que generar electricidad con un recurso que generalmente se desecha nos traería beneficios, como ahorro en el costo de combustible y reducción de GEI.



Se analizara la viabilidad del uso de esta tecnología, además de la reducción de emisiones a la atmosfera de GEI, si la generación que tenemos con una tecnología térmica convencional la sustituimos por el ciclo propuesto en este trabajo.

## 1.1 OBJETIVOS

- **Objetivo general:**

Proponer y evaluar la generación de electricidad utilizando recurso geotérmico de baja entalpía, incorporando el uso del ciclo Pressured Water Generation (PWG).

- **Objetivos específicos:**

Evaluar el comportamiento que se tiene en la red eléctrica al inyectar electricidad producida con un generador de altas revoluciones acoplado al ciclo PWG.

Evaluar la posibilidad del rendimiento económico que se obtienen al generar con geotermia en lugar del uso de un combustible de uso común.

Evaluar la viabilidad ambiental de los beneficios que se obtienen al generar electricidad con la implementación del ciclo PWG.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

En México se tiene localizado una gran cantidad de recurso geotérmico de baja entalpía, que generalmente es utilizado para usos directos como lo son: los balnearios de aguas termales y calefacción habitacional, otra forma de poder aprovechar esta energía es generando electricidad, lo que produciría una opción más de diversificación del Sistema Eléctrico Nacional.

## 1.3 HIPÓTESIS

Aprovechar el recurso de baja entalpía para generar electricidad, haciendo uso de tecnología innovadora como lo es el ciclo PWG acoplado a un generador eléctrico

de altas revoluciones, a un costo bajo por el ahorro de combustible y reducción de emisión de GEI hacia la atmosfera

## 1.4 METODOLOGÍA

La metodología que se utilizo para el desarrollo de este trabajo de tesis, fue como primera parte comprender el funcionamiento del ciclo PWG, para poder encontrar las condiciones que satisficieran las necesidades del generador de altas revoluciones, determinando las características principales de los componentes del ciclo, posteriormente ya con el generador seleccionado, hacer una serie de simulaciones, para ver el comportamiento de la maquina conectado a una red de pruebas.

Ya con los resultados obtenidos en las simulaciones, hacer un análisis económico, enfocándonos al ahorro de combustible que se tendría con el uso de esta técnica, seguido por un estudio ambiental orientado a comparar las emisiones de GEI, que se reducirían sí se usa geotermia de baja entalpía para la generación de electricidad en lugar de las tecnologías térmicas convencionales.

## 1.5 CONTENIDO DE LA TESIS

El **capítulo uno**, nos da un panorama introductorio del presenta trabajo de tesis, objetivos, la justificación del trabajo, la hipótesis planteada y la metodología a seguir para obtener los resultados deseados, así como el contenido del trabajo.

En el **capítulo dos**, se describe a manera de antecedentes, la utilización de la energía geotérmica, enfocándonos en su aplicación para la generación de electricidad y mencionando las características de su utilización en México.

Posteriormente en el **capítulo tercero** se hace una comparación entre el ciclo binario y la modificación que propone el proyecto IMPULSA IV del Instituto de Ingeniería, al que nombraron ciclo PWG, haciendo distinciones entre los componentes utilizados y que ventajas traería la utilización del nuevo sistema.

Continuando, en el **cuarto capítulo** se describen de una manera resumida el funcionamiento de las maquinas que se utilizan para la generación de electricidad, terminando con las ventajas que representa el uso de una tecnología innovadora como lo es el generador de altas revoluciones.

En el **quinto capítulo**, se armaron un conjunto de redes de pruebas, donde se incluían diversos arreglos utilizando el generador de altas revoluciones propuesto, a las que se les realizaron diversas simulaciones de flujo de carga para analizar su comportamiento, posteriormente se hizo un análisis de los costos de combustible evitados si se utilizara geotermia y finalmente una comparación de las emisiones de GEI que se evitarían mandar a la atmosfera si se utiliza la propuesta de este trabajo.

Finalmente en el **sexto capítulo**, se presentan las conclusiones correspondientes a este trabajo de tesis, tomando en cuenta el análisis que se realizo a los resultados obtenidos y además de los trabajos que se tienen contemplados para este proyecto en un escenario futuro.

## 2 LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

### 2.1 GEOTERMIA

La palabra geotermia se refiere a la energía térmica natural existente en el interior de la Tierra. En la práctica se le denomina así al estudio y utilización de la energía térmica que es transportada a través de la roca y/o fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma, dando origen a los sistemas geotérmicos.

Para entender cómo se genera la energía geotérmica se tiene que entender la estructura interna de la Tierra y las temperaturas que hay en sus capas y para esto se tienen dos modelos: el modelo geoquímico y el modelo dinámico, dichos modelos son representados en la figura 2.1. [3]

En el modelo geoquímico existen tres capas concéntricas:

- Corteza. Es la capa externa de la tierra y se compone de rocas solidas. Su espesor máximo es de 70 km. Su temperatura en la parte inferior llega a 400 °C.
- Manto. Se divide en dos, el manto superior que sigue a la corteza y llega a 700 km y alcanza una temperatura de 1500°C y el manto inferior que se encuentra a partir del superior y alcanza los 2900 km con una temperatura de 3000°C.
- Núcleo. Se divide en dos núcleo externo que alcanza 5100 km de profundidad y 4000°C; núcleo interno que alcanza el centro de la tierra y su temperatura alcanza 6000°C

En el modelo dinámico la estructura se compone de cuatro capas:

- Litosfera, abarca los 100 km, constituye una parte sólida y rígida.
- Astenosfera, 250 km de profundidad, fundamentalmente es una capa sólida, aunque también contiene parte plástica.
- Mesosfera, abarca parte del manto superior y todo el manto inferior, constituye una capa solida;
- Endosfera, abarca todo el núcleo, tiene parte fluida, correspondiente al núcleo externo, y parte sólida, correspondiente al núcleo interno.

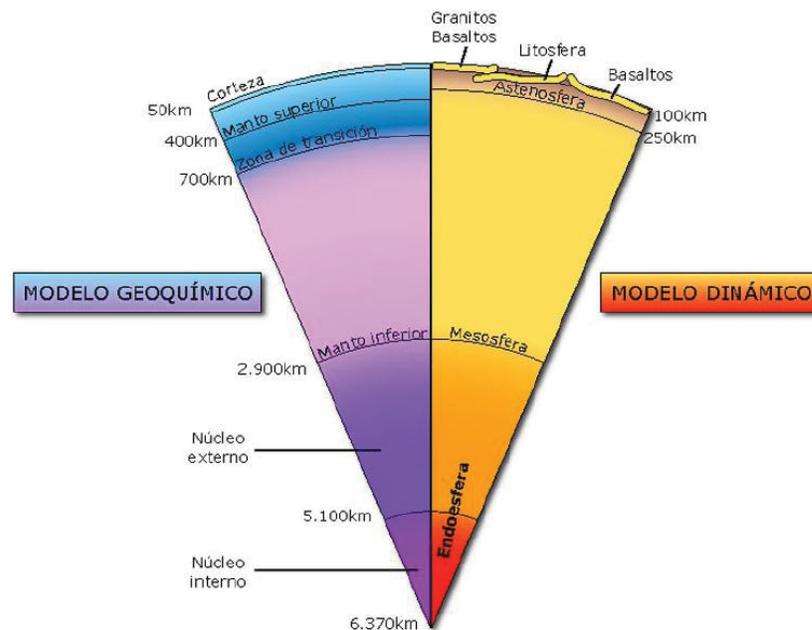


Figura 2.1 Modelos de la estructura de la Tierra. [4]

Las manifestaciones geotérmicas aparecen regularmente cerca de la corteza o litosfera, la corteza está compuesta por placas que se mantienen rígidas y cuando se desplazan ocasionan grandes divisiones en la tectónica terrestre, en la figura 2.1, se muestran las placas y su ubicación en el planisferio.

Son seis las placas o áreas litosféricas en las que está dividida la corteza terrestre, además de varias otras placas más pequeñas. Debido a las grandes tensiones generadas bajo la litosfera, estas placas están cambiando continuamente de posición. Los márgenes de las placas corresponden a zonas de la corteza débiles y densamente fracturadas, caracterizadas por una intensa sismicidad, por un gran número de volcanes y por un alto flujo de calor terrestre, debido al ascenso de materiales muy calientes hacia la superficie. Las áreas geotermales más importantes se ubican alrededor de los márgenes de placas. Las principales manifestaciones geotérmicas son los volcanes, los geiseros, las aguas termales y los volcanes de lodo, que generalmente se ubican cerca de los límites de estas placas. [3]



existir masas de material a gran temperatura que pueden dar lugar a un gradiente de temperatura entre 100°C y 200 °C por kilómetro. En estas zonas se dice que existen yacimientos geotérmicos, los cuales, a veces, se manifiestan en la superficie en forma de emanaciones gaseosas de aguas termales, de erupciones volcánicas u otra manifestación geotérmica.

### **2.1.1 Breve historia de la energía geotérmica**

El aprovechamiento de la energía geotérmica se ha llevado a cabo desde hace más de dos mil años. Se sabe que los romanos usaban las aguas termales de las orillas del río Danubio para la calefacción de sus conocidos baños. En pueblos como Chaudes Aygues, Dax y Ax-les-Thermes. En Francia, se ha distribuido agua caliente a casi 80 °C para usos domésticos desde la edad media. En el siglo XVIII, un gran número de balnearios fueron fundados en Hungría con el fin de comercializar las virtudes terapéuticas de las aguas termales, muchos de los cuales siguen aún en servicio. [5]

El principal adelanto que se logró con el aprovechamiento del calor terrestre se manifestó cuando el Príncipe Piero Ginori Conti promovió por primera vez la generación de energía eléctrica a partir del vapor geotérmico; en Larderello, Italia, en 1904. El sistema diseñado por Conti, mostrado en la figura 2.3, empleaba un motor reciprocante que es aquel que transforman el movimiento rectilíneo “piston”, en movimiento rotacional “cigüeñal”, se hizo accionar por medio del vapor separado del agua geotérmica. Este arreglo permitía producir cerca de 15 kW de potencia eléctrica en un generador de corriente directa. Posteriormente, el equipo fue reemplazado por un turboalternador de 250 kW, en 1913, con lo cual se inició la producción de electricidad a partir de recursos geotérmicos a nivel comercial [6], a esta forma de generación eléctrica a partir de energía geotérmica se le conoce como geotermoeléctricas o centrales geotérmicas.



Figura 2.3. Primer motor usado para generación eléctrica con vapor geotérmico. [6]

Los campos geotérmicos de Larderello poseían vapor como fluido dominante, por lo cual resultaron relativamente fáciles de explotar para la producción de electricidad. Sin embargo, en la gran mayoría de los campos existentes el fluido dominante es líquido. Uno de estos campos fue utilizado en la isla japonesa Kyushu, en 1925, para producir 1.12 kW de electricidad. Después de instalar esta pequeña unidad, los japoneses construyeron una planta de pruebas de 30 kW, en 1951, que estuvo en operación durante algunos años. [7]

La explotación de los campos geotérmicos con líquido como fluido dominante se dio en mayor escala cuando se construyó la planta Wairakei, en Nueva Zelanda, en 1958, la cual contaba con una capacidad instalada de 192.6 MW. Posteriormente, otros países iniciaron con la exploración de sus recursos geotérmicos para la producción de electricidad, como Estados Unidos, Filipinas, entre otros.

### 2.1.2 Situación actual

En la tabla 1.1 se enlistan los países que actualmente utilizan la energía geotérmica para generación eléctrica, y las capacidades que lograron hasta abril del 2010.

El uso de la energía geotérmica en los países en vías de desarrollo ha tenido una interesante tendencia en los últimos años: entre 1975 y 1979, la capacidad geotermoeléctrica instalada en dichos países se incrementó de 75 a 465 MW. Después de 5 años, en 1984, la cifra ascendió a 1495 MW, con unas tasas de incremento de 500% y 223% para esos dos periodos, respectivamente. En los siguientes 16 años, de 1984 a 2000, hubo un incremento de casi 150%.

Tabla 2.1 Capacidad geotermoeléctrica instalada a nivel mundial [8]

País	Capacidad Instalada al 2010
	[MW]
Estados Unidos	3,093
Filipinas	1,904
Indonesia	1,197
México	958
Italia	843
Nueva Zelanda	628
Islandia	575
Japón	536
El Salvador	204
Kenya	167
Costa Rica	166
Resto del Mundo	87.5
<b>Total</b>	<b>10,716</b>

En Abril del 2010, la potencia instalada a nivel mundial de las centrales geotermoeléctricas alcanzó los 10,716 MW, y cuatro años antes, la Asociación

Internacional de Geotermia (IGA, por sus siglas en inglés) pronosticó que para 2010 se tendrían 10,700 MW instalados, la cifra quedó superada un año antes.

Actualmente también se recurre a la geotermia como fuente de energía para usos distintos a la generación eléctrica como se muestra en la figura 2.4, algunos ejemplos son: calefacción, suministro doméstico de agua caliente, acondicionamiento de aire, calentamiento de cultivos agrícolas, criaderos de peces y para procesos industriales que demandan vapor, entre otros.

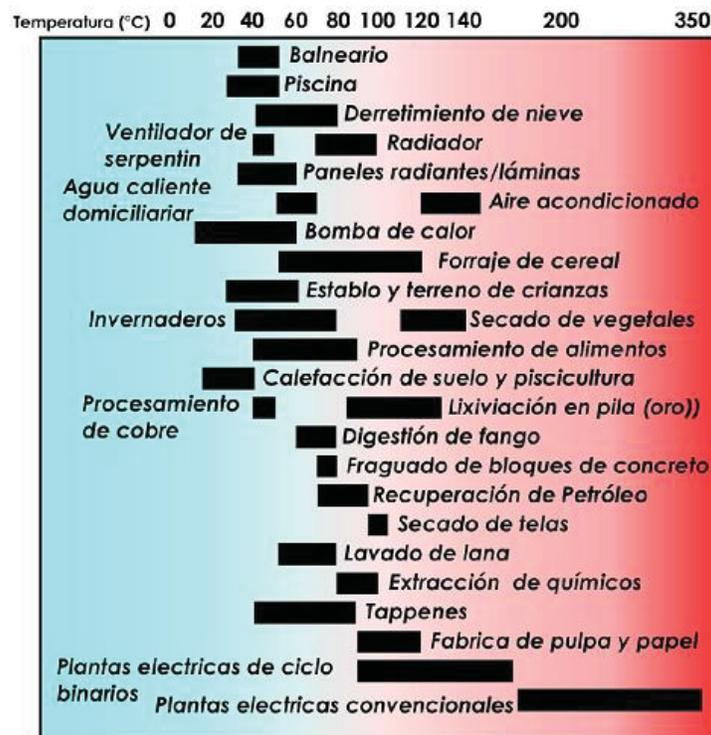


Figura 2.4 Utilización de los fluidos geotérmicos. [6]

Como se observa, la geotermia es una alternativa por la cual muchos países han estado optando, pues resulta una opción efectiva que compite con las demás formas de producción eléctrica, y que además, por ser tan versátil y tener un enorme potencial energético, puede ser empleada en un sinnúmero de procesos.

## 2.2 GEOTERMIA EN MÉXICO

Como puede observarse en la tabla 1.1, México ocupa el cuarto lugar mundial en cuanto al aprovechamiento de los recursos geotérmicos para generación eléctrica, con una capacidad instalada de 958 MW. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) opera actualmente cuatro campos geotérmicos: Cerro Prieto, en Baja California, con 720 MW; Los Azufres, en Michoacán, con 188 MW; Los Humeros, en Puebla, con 40 MW; y Las Tres Vírgenes, en Baja California Sur, con 10 MW, además existe un quinto campo localizado en Cerritos Colorado, Jalisco, donde la CFE ha estimado un potencial de 75 MW, la figura 2.5, muestra la ubicación de estos cinco campos geotérmicos en México.



Figura 2.5 Campos geotérmicos en México. [1]

Las principales características de las centrales geotermoeléctricas instaladas en el país se mencionan a continuación.

### 2.2.1 Cerro Prieto

Con una capacidad instalada de 720 MW y un factor de planta de 85 %, Cerro Prieto es la segunda planta geotermoeléctrica más grande del mundo, solo superada por los Geysers, en California, Estados Unidos, con una capacidad de 1 585 MW, con 26 unidades instaladas [6]. La central Cerro Prieto, se ubica en la parte norte del país, cerca de Mexicali, BC. Asociado a la prolongación sur de la falla de San Andrés, sus primeras unidades turbogeneradoras empezaron a operar desde 1973. Hay un promedio de 164 pozos en producción continua, con profundidades promedio de 2,500 m, que suministran alrededor de 50 millones de toneladas de vapor al año. La figura 2.6, muestra una imagen aérea de la central.



Figura 2.6 Central geotermoeléctrica Cerro Prieto. [9]

### 2.2.2 Los Azufres

Está localizado en la parte central de México, en el estado de Michoacán, a 2,800 metros de altitud, ubicado en la Faja Volcánica Mexicana. Cuenta con una unidad a condensación de 50 MW y cuatro de 25 MW, siete unidades a contrapresión de 5 MW y dos unidades de ciclo binario de 1.5 MW. Estas unidades son alimentadas con un promedio de 14.6 toneladas de vapor al año por 37 pozos productores. La figura 2.7, muestra una de las unidades de los Azufres.



Figura 2.7 Central geotermoelectrica Los Azufres. [2]

### 2.2.3 Los Humeros

Este campo volcánico se ubica en la parte oriental de la Faja Volcánica Mexicana, en los límites de los estados de Puebla y Veracruz, a unos 2,600 metros de altitud. Están instaladas siete unidades turbogeneradoras a contrapresión, con una capacidad total de 40 MW, en la figura 2.8, se muestra uno de los pozos en Los Humeros.



Figura 2.8 Central geotermoelectrica Los Humeros. [2]

#### 2.2.4 Las Tres Vírgenes

Es un campo volcánico, localizado hacia la mitad de la península de Baja California, asociado a un complejo de tres volcanes cuaternarios y a los movimientos tectónicos que separan a la península del resto del continente. En 2001 se instalaron en este campo dos unidades turbogeneradoras a condensación de 5 MW cada una. En la figura 2.9, se muestra parte de la central de Las Tres Vírgenes.



Figura 2.9 Central geotermoeléctrica Las Tres Vírgenes. [2]

El potencial geotérmico de México es todavía mayor: en el campo de Cerritos Colorados, ubicado en la periferia de la ciudad de Guadalajara, Jalisco, la CFE ha perforado varios pozos productores, calculándose un potencial de 75 MW; en el campo geotérmico de Cerro Prieto está programado un proyecto de 100 MW; y en Los Humeros, se planea incrementar la capacidad en 51 MW.

Adicionalmente, en México se conocen otras zonas geotérmicas atractivas, en las que se están llevando a cabo programas de exploración. Entre estas zonas se encuentra Acoculco, en el estado de Puebla; La Soledad, en Jalisco; y la zona del Domo San Pedro, en Nayarit. Otras zonas de interés son las de Maguarichic, en Chihuahua; las de Bahía Concepción, en Baja California Sur; y la del volcán Tacaná, en Chiapas. La CFE tiene otros proyectos por 190 MWe

geotermoeléctricos, que se desarrollaran en diversas etapas [10]. En México se tiene un potencial aproximado de 2 400 MWe, de los que solo se explota un 40%. [11]

Como se observa, el aprovechamiento de los recursos geotérmicos es una alternativa viable y eficaz en la producción eléctrica y otras aplicaciones, pues representan un enorme potencial energético que puede ser explotado a costos cada vez más bajos.

## 2.3 GEOTERMIA PARA LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA

### 2.3.1 Clasificación

Uno de los criterios más utilizados para clasificar los recursos geotérmicos es el que se basa en la temperatura del fluido geotérmico. Con esta clasificación, se pueden dividir en recursos de baja, media o alta entalpía; como se observa en la tabla 1.2, según distintos autores. Este criterio es muy empleado porque permite percibir inmediatamente qué tanta energía podría ser extraída del fluido y en qué aplicaciones podría aprovecharse. En el presente trabajo se adoptarán las clasificaciones hechas por Gunnlaugsson–Axelsson y Nicholson, en la que se consideran dos posibles categorías: recursos de baja o alta entalpía, quedando la temperatura del pozo en estudio, que es de 140 °C, dentro de los rangos de baja entalpía.

Tabla 2.2 Clasificación de los recursos geotérmicos según su temperatura.[12]

CLASIFICACIÓN	Muffler	Gunnlaugsson y	
	y Cataldi	Nicholson	Axelsson
Recursos de baja entalpía	< 90 °C	≤150 °C	≤190 °C
Recursos de entalpía intermedia	90-150 °C	-	-
Recursos de alta entalpía	>150 °C	>150 °C	>190 °C

Otra manera en la que se pueden dividir los recursos geotérmicos es mediante la distinción de la fase en la que se encuentra el fluido; de esta manera pueden clasificarse como recursos geotérmicos con agua líquida como fluido dominante, o recursos geotérmicos con vapor como fluido dominante.

### **2.3.2 Generación Eléctrica**

A pesar de la ineficiencia inherente al proceso de convertir calor en electricidad, impuesta por las restricciones termodinámicas, y del creciente desarrollo que han tenido las aplicaciones directas de los recursos geotérmicos, es probable que la generación eléctrica continúe siendo la forma más común del avance de la geotermia. Los ciclos empleados para tal fin en las plantas geotermoeléctricas se describirán a continuación;

### **2.3.3 Ciclo a contrapresión**

Éste es el más simple y barato en cuanto a inversión inicial de todos los ciclos geotérmicos. El vapor del pozo, ya sea directamente de los pozos secos o después de haber pasado por un separador, en el caso de los pozos húmedos, se hace pasar por una turbina y después se descarga directamente a la atmósfera, la figura 2.10, nos muestra el diagrama del ciclo a contrapresión. Tales ciclos pueden consumir aproximadamente el doble de vapor (para la misma presión de admisión y potencia generada) que los ciclos a condensación; por lo tanto, el número de pozos necesarios es mayor, y los costos involucrados en perforación también.

A pesar de esto, tienen sus aplicaciones como plantas piloto, plantas de reserva, para pequeños suministros locales de pozos aislados e incluso (aunque en grado muy limitado), para cubrir las cargas máximas. También se emplea este ciclo si el contenido de gases no condensables en el vapor es muy elevado (mayor del 50%) y, por lo general, se utilizan con preferencia sobre los ciclos a condensación para

contenidos de gases que exceden el 10%, debido a la alta energía que se requiere para extraer estos gases en un condensador.

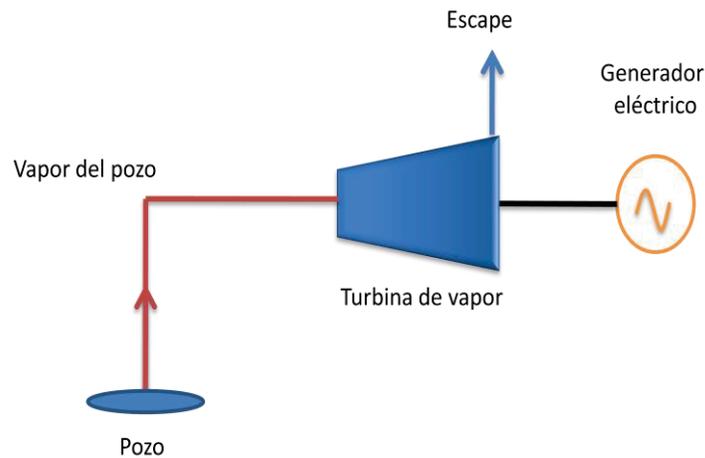


Figura 2.10 Ciclo a contrapresión

### 2.3.4 Ciclo a condensación

En este ciclo, la descarga del vapor, después de haber realizado trabajo, no se hace directamente a la atmósfera. El vapor de escape se hace pasar por un condensador (como no hay necesidad de recuperar el condensado para fines de alimentación, normalmente se usan condensadores de contacto directo) acoplado a la turbina y, después de condensarse, es llevado a una torre de enfriamiento, donde parte de él se pierde por evaporación. El fluido enfriado se emplea posteriormente como agua de enfriamiento en el condensador.

A veces es necesario utilizar condensadores superficiales, en lugar de los de contacto directo, si se considera que la naturaleza y la concentración de los gases no condensables presentan riesgos para el ambiente local. El uso de un condensador hace que la energía extraída del fluido geotérmico sea mayor y que

la eficiencia se incrementa. En la figura 2.11 puede observarse el esquema de este ciclo.

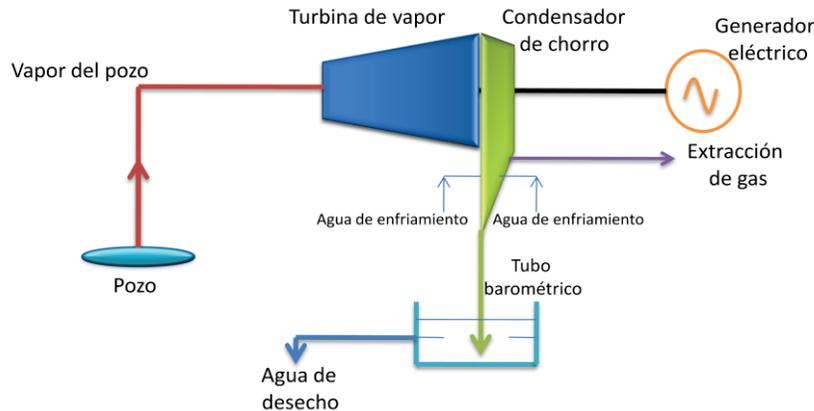


Figura 2.11 Ciclo a condensación

### 2.3.5 Ciclo de una evaporación instantánea

En los campos húmedos es posible extraer una muy buena cantidad de energía adicional del agua líquida caliente, separada previamente de la mezcla del pozo, haciéndola pasar a un recipiente de evaporación instantánea que trabaje a presión menor que aquella a la que se admite el vapor principal a la turbina. El vapor así producido puede hacerse pasar luego por las etapas de menor presión de la o las unidades motrices primarias, tal configuración es la del ciclo con doble evaporación instantánea, este ciclo es mostrado en la figura 2.12.

En teoría, puede obtenerse la máxima producción de energía del agua caliente si el recipiente de evaporación instantánea trabaja a una temperatura que sea aproximadamente el promedio de la del agua caliente recolectada y la del condensador. La fracción del agua caliente no evaporada se dirige luego a la tubería de desecho y se le da algún uso industrial o de otra clase.

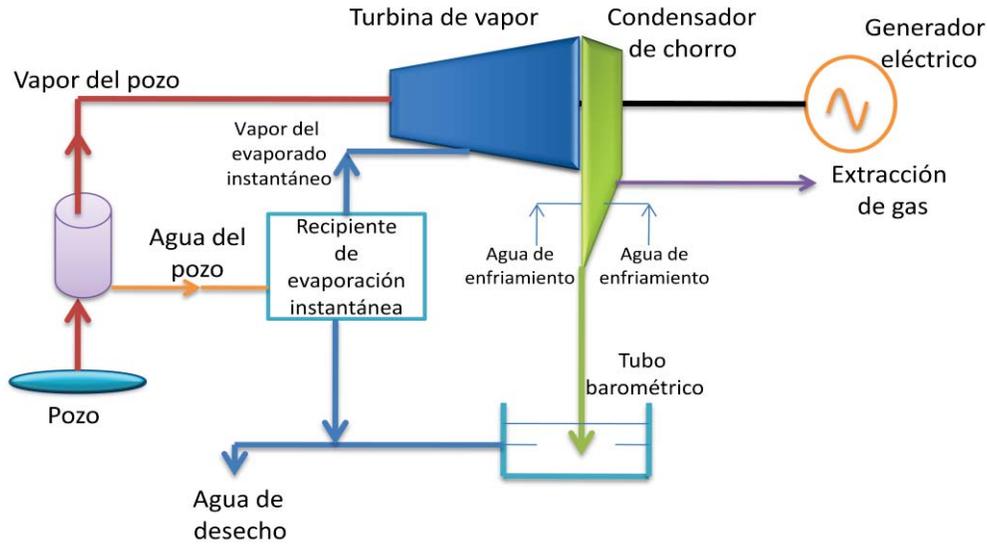


Figura 2.12 Ciclo de una evaporación instantánea

### 2.3.6 Ciclo de doble evaporación instantánea

En condiciones ideales se extraería la energía máxima del agua caliente separada, en un campo húmedo, utilizando un número infinito de recipientes de evaporación instantánea conectados en cascada o en todo caso, utilizando un recipiente de evaporación para cada etapa de las turbinas; pero tal procedimiento sería económicamente absurdo.

Puede ser útil, en ocasiones, tener dos recipientes de evaporación instantánea, como se ilustra en la figura 2.13, trabajando lo más cerca posible a temperaturas iguales a un tercio y a dos tercios del intervalo comprendido entre la temperatura del agua caliente recolectada y la temperatura del condensador. De esta manera se logra una configuración de doble evaporación instantánea.

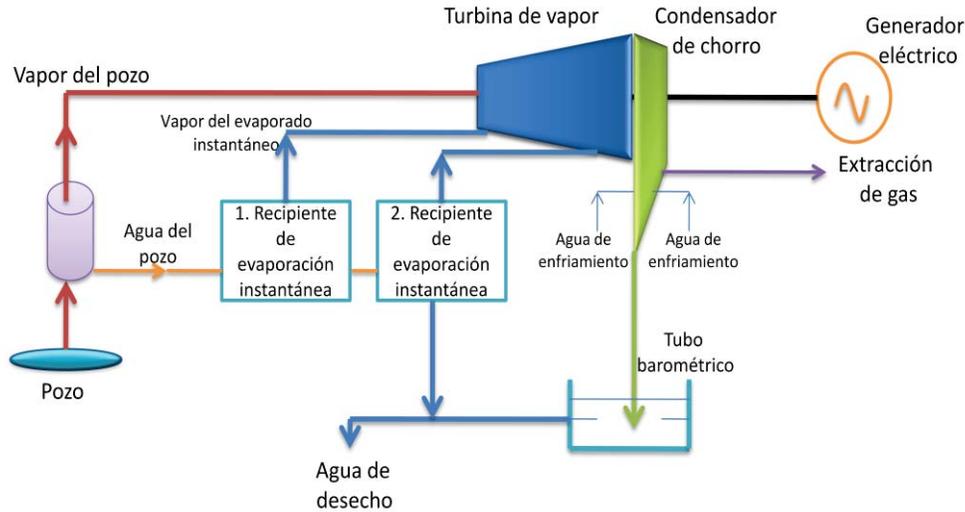


Figura 2.13 Ciclo de doble evaporación instantánea

### 2.3.7 Ciclo binario

En este ciclo, parte de la energía calorífica del fluido geotérmico es cedida en un intercambiador de calor a un fluido secundario, generalmente un refrigerante como isobutano o isopentano, cuyo punto de ebullición es bajo,  $-12$  y  $28^{\circ}\text{C}$  respectivamente.

El fluido secundario transita por un circuito cerrado. Después de ser evaporado se hace pasar por la turbina, realiza trabajo y luego es enfriado en el condensador hasta llegar a la fase líquida, para ser bombeado y reincorporado nuevamente al ciclo, como se observa en la figura 2.14. El agua que se utiliza en el condensador es proporcionada por una torre de enfriamiento, y el fluido geotérmico que ha cedido su calor se manda a un pozo de reinyección.

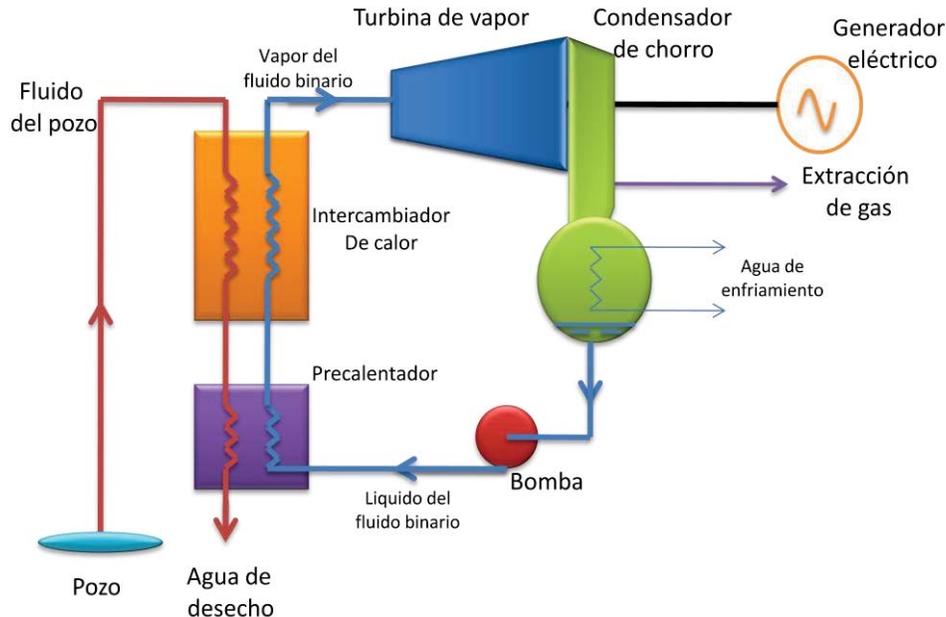


Figura 2.14 Ciclo binario

En muchas plantas geotermoeléctricas se aprovecha la energía residual del agua líquida caliente en unidades de este tipo.

Las ventajas que presenta el ciclo binario son:

- Se pueden aceptar mezclas de agua-vapor sin hacer su separación.
- Los problemas de agresividad química se confinan al intercambiador únicamente.
- Se puede extraer más calor de los fluidos geotérmicos, desechándolos a una temperatura más baja; y, en consecuencia, se pueden emplear yacimientos de temperaturas más bajas que en los ciclos de evaporación instantánea.

Sin embargo, presenta inconvenientes como la necesidad de usar intercambiadores de superficie que son costosos y de baja eficiencia, además de que emplea fluidos refrigerantes volátiles, a veces tóxicos o inflamables, y que necesita grandes cantidades de agua de enfriamiento.

### **3 CICLO PRESSURED WATER GENERATION (PWG)**

Los avances sobre el ciclo PWG, se reciben y comienzan a estudiar de la manera que se presentan en este capítulo, se tuvieron que hacer algunos cambios en los datos, para poder satisfacer las necesidades del generador de altas revoluciones seleccionado, que se presentarán en el tercer y cuarto capítulo de este documento.

#### **3.1 GENERALIDADES DE PWG. DIFERENCIAS CON CICLO BINARIO CONVENCIONAL**

El sistema PWG toma al ciclo binario convencional, lo modifica y resuelve algunos problemas inherentes a éste. A continuación se presentan los dos ciclos por separado. Durante el capítulo se hace una discusión de las conveniencias de utilizar el sistema PWG.

##### **3.1.1 Ciclo binario convencional**

Como se establece en la sección, 2.3.7, en este sistema, el agua geotérmica cede energía en forma de calor al fluido de trabajo hasta evaporarlo, a través de dos intercambiadores de calor de carcasa y tubos: un calentador y un evaporador. Una vez evaporado, el fluido de trabajo acciona la turbina y produce trabajo; después es llevado al condensador, donde cede energía hasta condensarse. El condensado se bombea y lleva al calentador, para iniciar nuevamente el ciclo, este ciclo se muestra en la figura 3.1

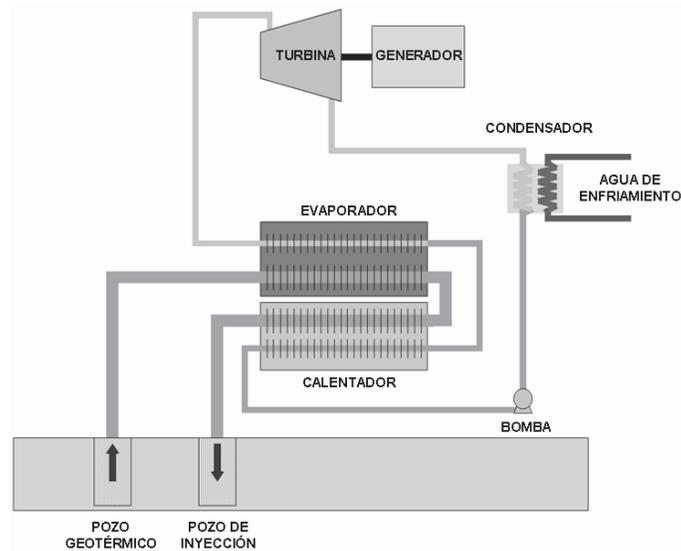


Figura 3.1 Planta convencional de ciclo binario. [13]

Uno de los inconvenientes que presenta el ciclo binario tradicional es que el evaporador y el calentador, al estar en contacto directo con el agua geotérmica, sufren de severos problemas de corrosión e incrustación, por lo que tienen que ser sometidos a mantenimientos constantes que resultan complicados y costosos. Aunado a esto, la eficiencia de tales equipos es baja; y si se desea un mayor acercamiento entre las temperaturas de los fluidos contenidos en ellos, el tamaño de las unidades debe ser mucho mayor.

### 3.1.2 Ciclo binario con una evaporación *relámpago*: Ciclo PWG

Para evitar dichos problemas, en el proyecto IMPULSA IV del Instituto de Ingeniería, se propone el uso de un sistema binario en el cual se sustituya al evaporador y al calentador por un intercambiador de calor de placas, una válvula de estrangulamiento (placa orificio) y un separador de vapor. De esta manera, sólo el intercambiador de placas entrará en contacto con el fluido geotérmico.

Tal sistema, mostrado en la figura 3.2, el agua geotérmica calienta al fluido de trabajo, a través del intercambiador de calor de placas, hasta llevarlo a la

condición de líquido saturado. Posteriormente, el fluido de trabajo se hace pasar a través de la placa orificio, donde disminuye su energía de presión y como consecuencia, parte de él se evapora. El vapor generado es separado del líquido (en un separador centrífugo o del tipo *Webre*) [14] y se dirige hacia la turbina. A continuación, el vapor se condensa, se bombea hasta alcanzar la presión del separador y se mezcla con el líquido separado por éste en un dispositivo llamado colector, para finalmente ser bombeado a la presión del intercambiador de placas, dónde se cierra el ciclo.

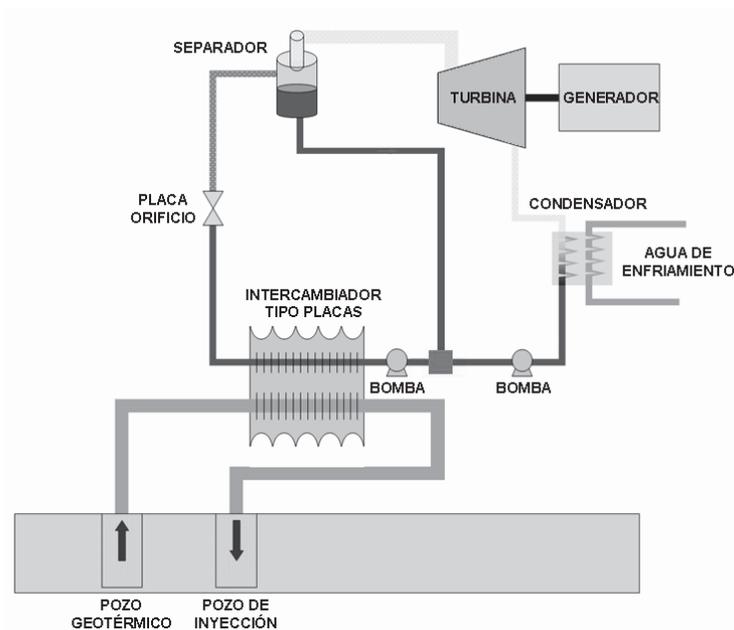


Figura 3.2 Planta de ciclo PWG. [13]

A pesar de parecer un sistema más aparatoso por la cantidad de equipos utilizados, los elementos complementarios son sencillos en su mantenimiento.

### 3.1.3 Ventajas técnicas de ciclo PWG sobre ciclo binario convencional

La principal ventaja que presenta el sistema PWG sobre una planta de ciclo binario convencional es que, al emplear un intercambiador de calor de placas, la

eficiencia en la generación de vapor se incrementa, ya que este tipo de equipos permiten acercamientos de hasta  $1^{\circ}\text{C}$  entre los fluidos; además, sus pérdidas son bajas, lo cual es sumamente importante en el aprovechamiento de la energía geotérmica. Además, el espacio ocupado por estos intercambiadores es menor y su mantenimiento es más sencillo, comparado con los de carcasa y tubos.

En la figura 3.3, se muestran ambos intercambiadores: puede observarse que el área de intercambio en el de placas es extensa, en un volumen reducido. Si se deseara incrementar el área de un intercambiador de placas, bastaría con agregar más láminas, sin necesidad de comprar un nuevo equipo.

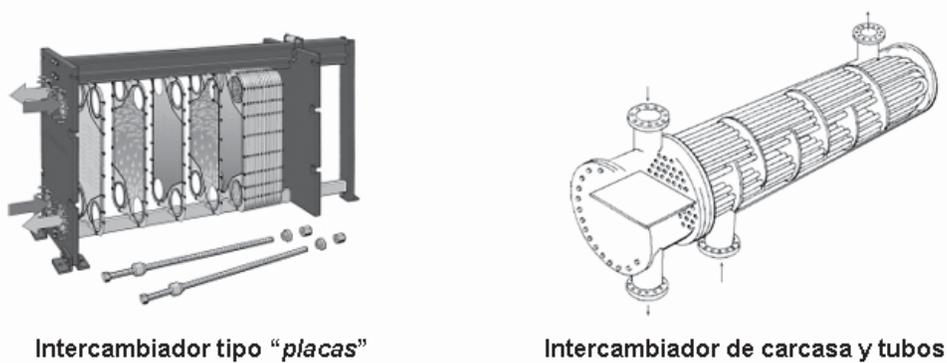


Figura 3.3 Intercambiadores de calor. [15]

El acercamiento de temperaturas logrado por ambos intercambiadores se puede observar en la figura 3.4 en un intercambiador de placas donde el fluido frío puede alcanzar una temperatura mayor que la de salida del fluido caliente, lo cual no sería posible con un intercambiador de carcasa y tubos que se muestra en la figura 3.5.

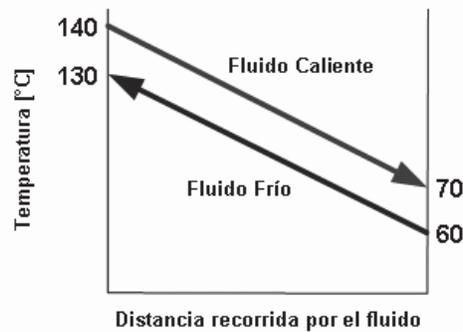


Figura 3.4 Acercamiento de temperaturas dentro de intercambiador de placas. [14]

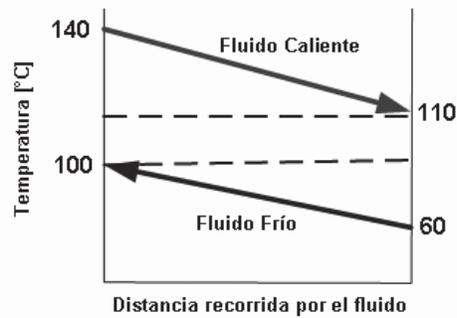


Figura 3.5 Acercamiento de temperaturas dentro de intercambiador de carcasa y tubos. [14]

En este nuevo sistema con evaporación *relámpago*, y con la intención de reducir el espacio total de la planta, se considera el uso de una turbina de alta velocidad, ya que proporcionan altas eficiencias [16]. El separador de vapor empleado puede ser del tipo Webre, con el cual se logra una separación de, incluso, el 99.9% del líquido. [14]

### 3.2 ANÁLISIS DE PWG: SUS COMPONENTES

En este apartado se presentan los parámetros utilizados en el diseño del ciclo en estudio, las propiedades termodinámicas en cada uno de los puntos de interés y, por último, los resultados del diseño de cada uno de los equipos que intervienen en el sistema.

Para el análisis de PWG se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Sobre el recurso geotérmico:

Se simulará el uso de un recurso geotérmico en el que la profundidad del acuífero no sobrepase los 1000 m, y cuya temperatura sea mayor a 130 °C, en yacimientos con estas características es más fácil perforar pozos delgados de bajo costo.

- Sobre el ciclo:

La planta eléctrica será diseñada para trabajar con un recurso geotérmico que se encuentre en fase líquida.

El fluido de trabajo a utilizar será agua desmineralizada, debido a que el manejo de fluidos orgánicos es complicado y requiere de personal especializado; además de que las pérdidas por fugas de tales fluidos (7% por año, aproximadamente) incrementan de manera significativa los costos y el impacto ambiental.

Los procesos de admisión/rechazo de calor se consideran a presión constante.

En los procesos de bombeo, los cambios de presión son tan pequeños que se consideran a entropía constante sin efectos significativos.

La expansión en la turbina se considera, en un principio, a entropía constante, y se obtienen sus parámetros y desempeño. Para la "SECCIÓN RESULTADOS", se calcula un punto de salida llamado, que toma en cuenta la eficiencia obtenida en su caracterización.

La expansión en la válvula es a entalpía constante.

La caída de presión del fluido geotérmico en el intercambiador se considera nula; en cambio las pérdidas de presión por fricción del fluido refrigerante en el condensador se consideran del orden de un bar. Ambas consideraciones se corroboran al diseñar ambos cambiadores de calor.

### 3.2.1 Ciclo

Con las consideraciones previas, se diseñó el ciclo, cuyo esquema se observa en la figura 3.6 y propiedades de los estados termodinámicos se muestran a continuación en la tabla 2.1. Se utilizó una hoja de cálculo electrónica para facilitar la variación de parámetros.

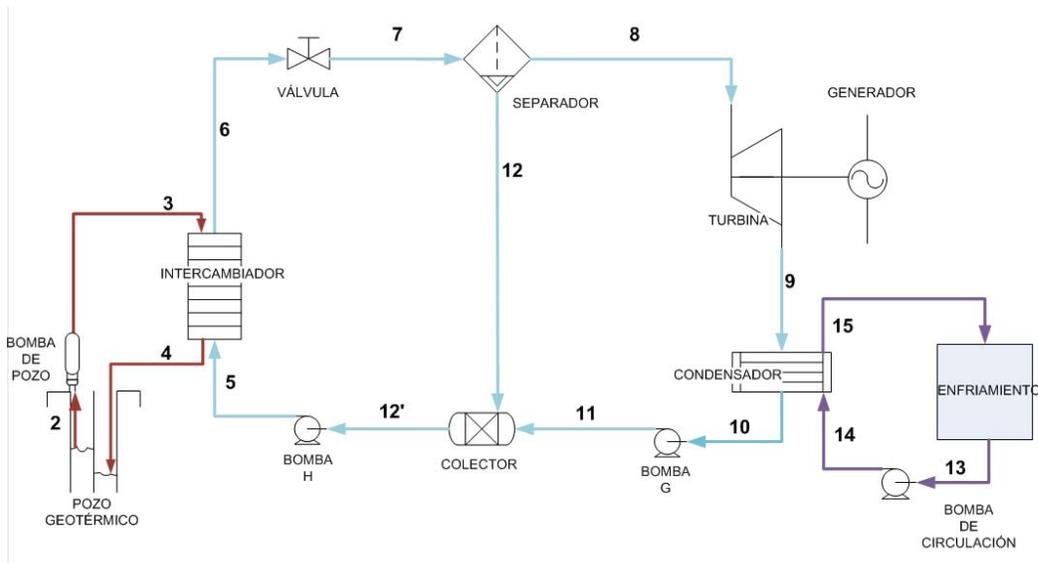


Figura 3.6 Esquema del ciclo PWG. [2]

La tabla 2.1, muestra las propiedades básicas en cada punto termodinámico del sistema. Los procesos en los que intervienen admisión/rechazo de calor, o consumo/generación de energía eléctrica, se presentan en los dos últimos renglones de la tabla.

El diagrama temperatura vs entropía (T-s), nos sirve identificar el comportamiento de los procesos termodinámicos que forman parte del ciclo, mostrado en la figura 3.7, las propiedades termodinámicas en el punto real a la salida de la turbina se presentan en la tabla 3.3, con el que se calculan: potencia de generación bruta, potencia neta (potencia bruta – los usos propios), y la eficiencia térmica del ciclo, en la tabla 3.2.

Tabla 3.1 Datos y propiedades de los estados termodinámicos del ciclo PWG. [2]

Punto	Recurso geotérmico						Fluido de trabajo					
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12'
T(°C)	120,000	120,034	94,447	91,447	117,000	93,486	93,486	45,806	45,806	45,817	93,486	91,411
P(MPa)	0,199	0,499	0,199	0,481	0,181	0,080	0,080	0,010	0,010	0,180	0,080	0,080
Gasto(kg/s)	3,267	3,267	3,267	2,959	2,959	2,959	0,129	0,129	0,129	0,129	2,829	2,959
Gasto(m <sup>3</sup> /s)	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,273	0,270	1,839	0,000	0,000	0,003	0,003
Densidad(kg/m <sup>3</sup> )	943,107	943,230	962,317	964,505	945,505	10,845	0,479	0,070	989,833	989,903	962,927	964,343
Entalpia Lq(kJ/kg)	503,812	504,165	395,849	383,443	491,076			191,806	191,806	191,997	391,710	382,982
Entalpia Gas(kJ/kg)							2665,176					
Entalpia Mezcla (kJ/kg)						491,076		2510,510				
Calidad(%)	0,000				0,000	0,044	1,000	0,969	0,000		0,000	0,000
Entropia Lq(kJ/K·kg)	1,528	1,528	1,244	1,209	1,495	1,233	1,233	0,649	0,649	0,649	1,233	1,209
Entropia Gas(kJ/K·kg)							7,434					
Entropia Mezcla (kJ/K·kg)						1,504		7,919				
Carga Térmica(kW)		353,822							299,830			
Potencia Bomba(kW)	1,154			1,365						0,025		

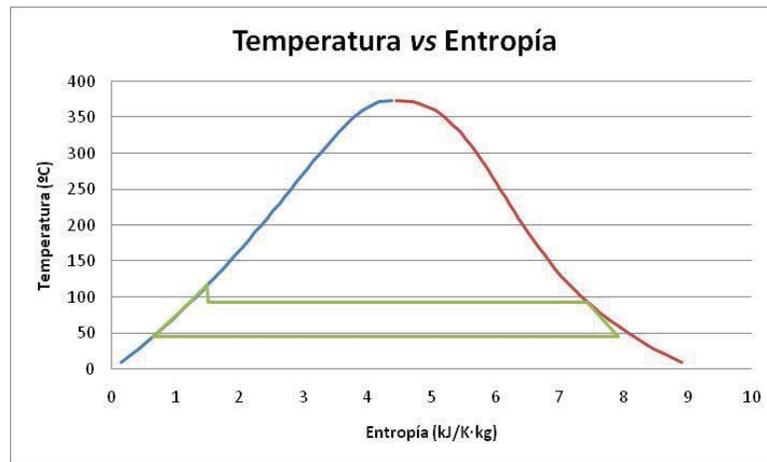


Figura 3.7 Diagrama temperatura vs entropía (T-s) del ciclo PWG. [2]

Tabla 3.2 Resumen de potencias y eficiencias. [2]

Potencia	
Bruta kW	Neta kW
20,00	14,81
Eficiencia termica %	
4,184	

Tabla 3.3 Propiedades termodinámicas del punto real a la salida de la turbina. [2]

	Punto 9
Temperatura (°C)	45,806
Presión (MPa)	0,01
Gasto (kg/s)	0,129
Gasto (m <sup>3</sup> /s)	1,838
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	0,070
Entalpía Liq (kJ/kg)	191,805
Entalpía Mezcla (kJ/kg)	2510,510
Calidad (%)	0,969
Entropía Liq (kJ/K·kg)	0,649
Entropía Mezcla (kJ/K·kg)	7,918

Con los estados termodinámicos ya definidos, se procede al diseño y caracterización de cada uno de los equipos involucrados.

### 3.2.2 Turbina de alta velocidad

Para producir la potencia calculada, se realizó un estudio para determinar las dimensiones de la turbina, la tabla 3.4 muestra los parámetros de caracterización que requiere la turbina de alta velocidad, mientras que la figura 3.8 muestra el diagrama de estado de velocidad de la turbina.

Tabla 3.4 Parámetros de caracterización de turbina de alta velocidad.[2]

<b>Datos</b>			
Fluido de Trabajo	agua		
Unidades	C		
Diámetro Inicial [m]	0,2		
Velocidad del Sonido [m/s]	468,805		
<b>Datos Geométricos</b>		°	rad
Ángulo de entrada al álabe $\beta_2$	20		0,349
Ángulo de salida del álabe $\beta_3$	20		0,349
Ángulo $\alpha_2$	40		0,698
Ángulo $\alpha_3$	10		0,174
Ángulo de entrada tobera $\alpha_1$			0
<b>Parámetros Termodinámicos</b>			
Trabajo específico	175178,5407		
Eficiencia Total-total %	56,63047081		
potencia [Kw]	22,65218833		
Nº de Pearsons	3,773865928		
Relacion de Presiones	8		
<b>Triángulos de Velocidad</b>			
$C_2$ y	505,6194372		
$C_3$ y	106,2500154		
$C_2$ x	602,5737808		
$W_2$	641,2456238		
U	286,3005171		
$W_3$	641,2456238		
$C_3$	611,8694526		
Ángulo $\alpha_3$ p [rad]	1,396263402		
ángulo $\gamma$ [rad]	1,745329252		
Ángulo $\delta$ [rad]	1,221730476		
$C_3$ x	602,5737808		
<b>Magnitudes Propuestas</b>			
Radio del Rotor [cm]	30	25038,3895	<--- [rpm]
Velocidad del Rotor [rpm]	3600	208,653246	<---[cm]

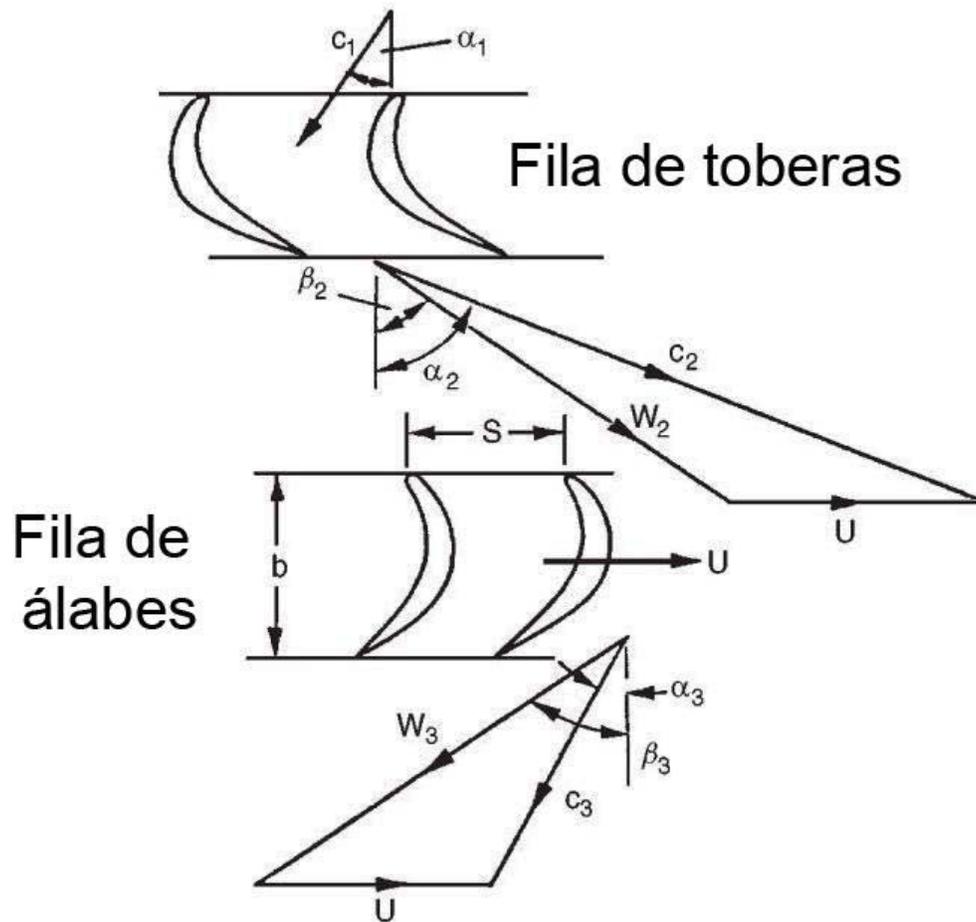


Figura 3.8 Diagrama de estado de velocidad de la turbina. [17]

### 3.2.3 Equipos de bombeo

En este apartado se seleccionan las bombas de acuerdo a sus variables más importantes: potencia, gasto volumétrico, carga hidráulica, temperatura (para procesos comunes de bombeo, la temperatura de operación no es un parámetro significativo en la selección de una bomba) y eficiencia. A partir de esta información se pueden encontrar en el mercado un sinnúmero de productos que satisfagan las condiciones establecidas. En la tabla 3.5, se concentran la

información necesaria para la óptima selección de los equipos de bombeo, basándonos en el esquema de la figura 3.6.

Tabla 3.5 Selección de equipos de bombeo. [2]

	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>11</b>	<b>13</b>
<b>Potencia Bomba(KW)</b>	1,154	1,365	0,024	2,648

Los generadores eléctricos y la interconexión se debaten en el cuarto capítulo.

## 4 PRINCIPALES TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD.

### 4.1 TIPOS DE GENERADORES

Los generadores eléctricos, son máquinas que tienen como función principal transformar la energía mecánica en energía eléctrica, ya que son capaces de generar una diferencia de potencial entre dos de sus puntos, por medio de la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos colocados sobre una armadura (estator), estas máquinas producen un efecto contrario al de un motor eléctrico.

#### 4.1.1 Generador de corriente continua

Utilizando el principio de inducción electromagnética de Faraday, un generador de corriente continua (CC) es una máquina que produce energía eléctrica en forma de corriente continua. El generador está compuesto por un estator, que es un armazón fijo, que tiene como función principal el crear un campo magnético fijo, al girar a cierta velocidad el rotor, que es un cilindro enrollado con bobinas de cobre, en el se producirán las fuerzas electromotrices inducidas, la figura 4.1 muestra los componentes de una maquina de CC.

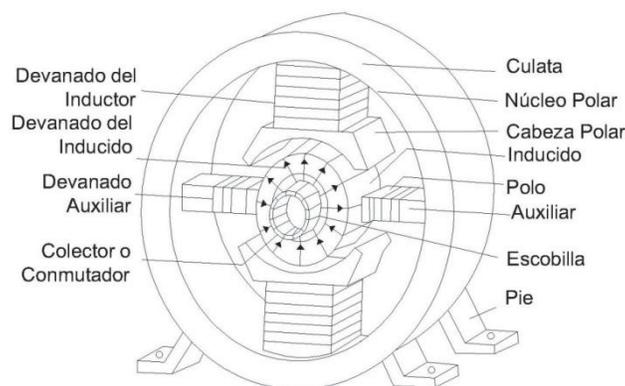


Figura 4.1 Componentes principales de la máquina de corriente continua

Cuando el rotor realiza medio giro se obtiene una tensión alterna y en el siguiente medio giro o semiperiodo se invierte la conexión semiciclo negativo en positivo.

El rotor o inducido suelen tener un número considerable de espiras y el anillo colector está dividido en delgas compuestas por un conductor, aisladas entre sí, generalmente por una mica, a este arreglo se le denomina, colector.

Al aumentar el número de delgas, la tensión obtenida va a tener menor ondulación acercándonos más a la tensión continua que se desea obtener.

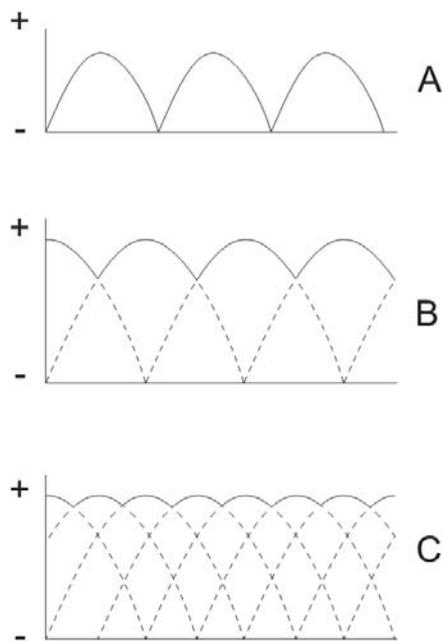


Figura 4.2 (A) Forma de onda del generador con una sola espira. (B y C) Forma de onda con más de una espira.

En su mayoría los generadores de corriente continua funcionan con voltajes bastantes bajos, esto para evitar las chispas que se producen entre las escobillas y el conmutador a voltajes mayores, por lo que están descartados para ser usados en la generación de alta potencia, además de que solo se pueden conectar a red eléctrica mediante un inversor (convertido de continua a alterna). Únicamente son utilizados en aplicaciones aisladas de baja potencia. Aunado al alto costo de la

maquina, de mantenimiento hacen también que su uso sea escaso y sean sustituidos por alternadores junto con un puente rectificador, que son muy útiles para aplicaciones en corriente continua.

#### 4.1.2 Generador síncrono

Son máquinas que se utilizan para transformar la energía mecánica en energía eléctrica de corriente alterna (CA), también son llamados alternadores. La razón por la que se llama motor síncrono es que el imán del centro girará a una velocidad constante “*síncrona*” con la rotación del campo magnético (girando exactamente como la frecuencia de la red). Más del 99% de la potencia eléctrica esta generada por máquinas síncronas, ya que una de sus principales ventajas es que se puede extraer la corriente alterna de bornes fijos y de escobillas que se encuentran en constante rozamiento, la figura 4.3 nos muestra el esquema básico de un generador síncrono.

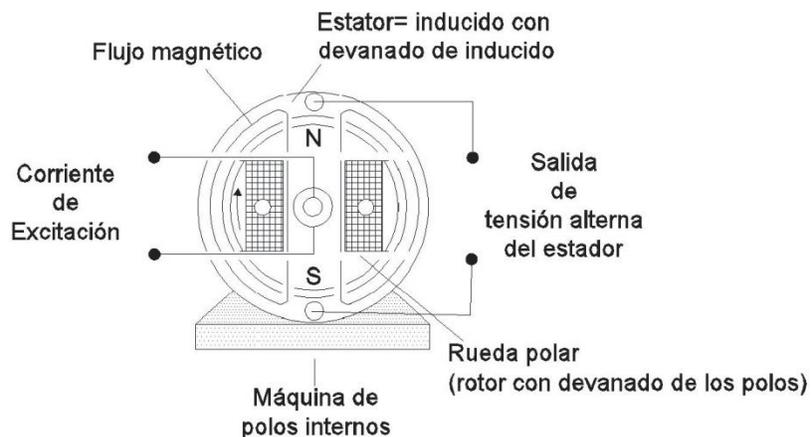


Figura 4.3 Esquema básico de un generador síncrono con 2 polos excitado mediante corriente continua.

Una de las características de las máquinas síncronas es que los devanados del campo están en el rotor, por lo que los devanados del rotor y devanados de campo se pueden usar imparcialmente, por esta razón el rotor es un electroimán grande, puede haber de dos tipos, de polos salientes o no salientes.

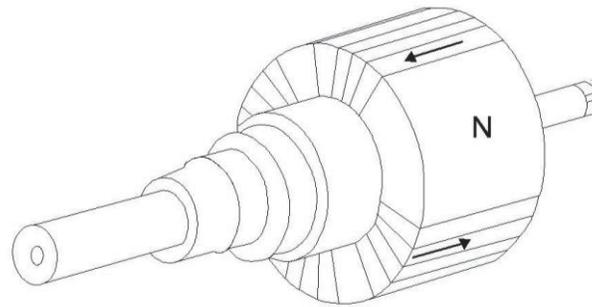


Figura 4.4 Rotor de polos NO salientes. Se usa para rotores de 2 o 4 polos

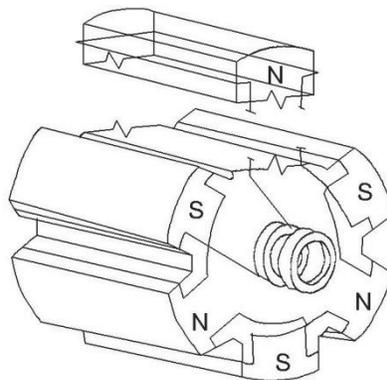


Figura 4.5 Rotor de polos salientes. Se usa para rotores de 4 o más.

Al rotor se le debe suministrar corriente directa, para generar la corriente de campo, esto se puede hacer desde una fuente de potencia en CC externa por medio de anillos rozantes y escobillas o bien se puede suministrar la corriente desde una fuente DC montada directamente en el eje del generador síncrono.

Los devanados del inducido se localizan en el estator, por lo que también los términos devanados del estator y devanados del inducido se usan indistintamente.

Habitualmente, los generadores síncronos son trifásicos, por lo que se compone de tres devanados iguales en el estator, desplazados entre sí  $120^\circ$ . En el proceso de una vuelta del rotor, los polos Norte y Sur recorren los tres devanados, por ellos se le conoce como campo magnético giratorio. En cada uno de los devanados se

genera una tensión alterna monofásica, las tres tensiones cuentan con el mismo ciclo, pero desplazadas entre sí una tercera parte de vuelta.

La velocidad de rotación de los campos magnéticos, esta obligadamente relacionada con la frecuencia eléctrica a la que está trabajando el estator, por medio de la siguiente ecuación:

$$n_m = \frac{120 \cdot f_e}{P} \quad (1)$$

Donde, “ $P$ ” son los polos que genera el campo magnético, “ $n_m$ ” el número de revoluciones por minuto (rpm) que da el eje del rotor del generador y “ $f_e$ ” la frecuencia de la señal de salida (Hz).

La potencia eléctrica se genera a 50 o 60 Hz, por lo que el generador debe girar a una velocidad fija, esto dependiendo del número de polos de la máquina.

Tabla 4.1 Velocidad de un generador síncrono (rpm).

<b>Velocidad de un generador síncrono (rpm)</b>		
<b>Número de polos</b>	<b>50 Hz</b>	<b>60 Hz</b>
<b>2</b>	3000	3600
<b>4</b>	1500	1800
<b>6</b>	1000	1200
<b>8</b>	750	900
<b>10</b>	600	720
<b>12</b>	500	600

#### 4.1.3 Generador asíncrono

A diferencia del generador síncrono, en estas máquinas eléctricas el campo magnético giratorio se crea en el estator, en donde los devanados tendrán que estar conectados a una fuente de potencia de corriente alterna. Por esta razón las máquinas alternas son consumidoras de potencia reactiva, la figura 4.6 muestra el esquema básico de un generador asíncrono.

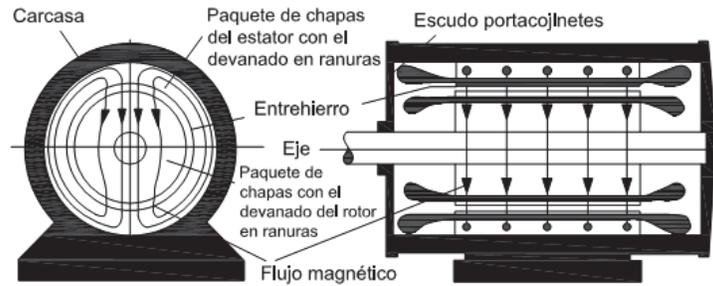


Figura 4.6 Esquema básico de un generador asíncrono

En una máquina síncrona con el motor en reposo, la acción que ejerce el campo magnético sobre las bobinas de rotor induce una fuerza electromotriz (fem) en las mismas. La fem inducida provoca el paso de corriente por la bobina del rotor, las que por lo general se encuentran en corto circuito, presentando una pequeña resistencia. Cuando el rotor es de tipo jaula de ardilla, se origina un par de giro que pone en movimiento al rotor en el mismo sentido del campo magnético giratorio. El rotor comenzará a girar más rápido hasta reducir la diferencia con el campo magnético. Las tensiones y la corriente en el rotor llegan a ser nulas cuando alcanzan la velocidad de sincronismo, el rotor tipo jaula de ardilla se ilustra en la figura 4.7.

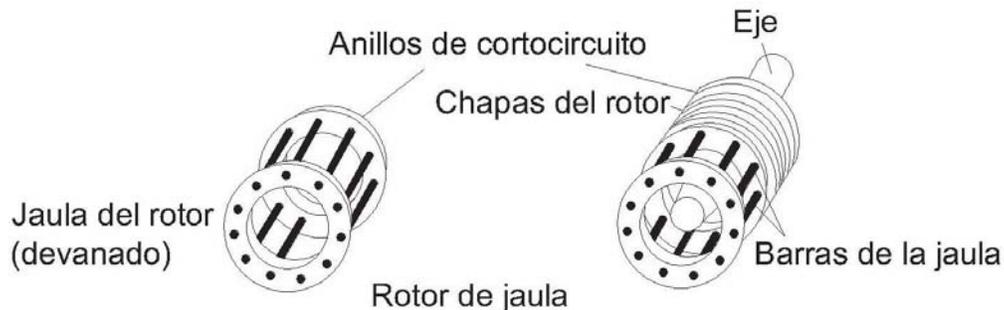


Figura 4.7 Rotor tipo jaula de ardilla.

Al igual que en las máquinas síncronas, la velocidad de sincronismo dependerá de la frecuencia eléctrica y el número de polos en el estator.

A la diferencia de velocidad entre el giro del campo magnético y el rotor se le conoce como deslizamiento (S).

Si se utiliza la máquina como generador, haciendo girar el rotor en el mismo sentido del campo giratorio con una fuerza mecánica externa y a una velocidad mayor a la de sincronismo (hipersincronismo), se presentara un cambio de signo en el deslizamiento, también el sentido de la fem inducida en el rotor se invierte, al igual que la corriente, las que tendrán una frecuencia igual a la diferencia de velocidades, de esta forma la maquina pasara a funcionar como generador y cederá potencia eléctrica a la red que se encuentre conectada.

Previamente debe existir un campo magnético giratorio, para que las circunstancias anteriores puedan desarrollarse, lo que provoca que la red en un principio brinde corriente que excite el campo magnético, por lo que lo definimos como autoexcitable.

## 4.2 EL GENERADOR DE ALTAS REVOLUCIONES

Desde finales del siglo XIX, se han aplicado los principios básicos del electromagnetismo para la construcción de maquinas eléctricas y hasta principios de los 40's se demostraron los principios de la levitación magnética. Esta tecnología se ha venido desarrollando con mejoras en aspectos como estabilidad, la miniaturización, la simplificación y la rentabilidad de los cojinetes magnéticos, por lo que, los avances recientes han permitido el uso de la tecnología del cojinete magnético para una amplia variedad de equipos rotativos.

Los principios básicos de los cojinetes magnéticos comienzan con los electroimanes fijos, colocados alrededor del ensamble de rotación (**rotor**) en un componente fijo (**estator**).

El rotor gira dentro de un campo magnético en el estator, y los dos componentes no están en contacto unos con otros, figura 4.8. [18]

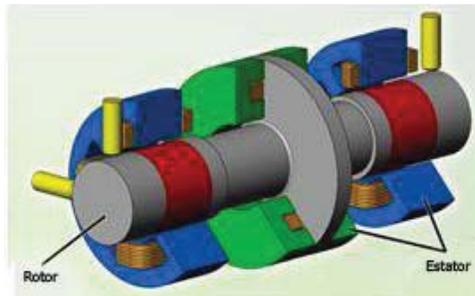


Figura 4.8 Cojinetes magnéticos. [18]

Por lo regular, dos soportes radiales apoyan y colocan el eje en direcciones laterales (radiales) y un apoyo de cojinetes de empuje, coloca el eje en la dirección longitudinal (axial), figura 4.9.

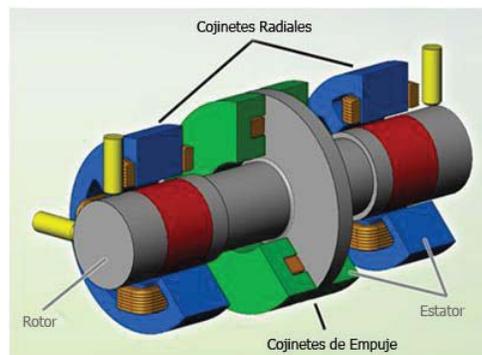


Figura 4.9 . Eje de apoyo. [18]

Se le llama un eje completo, al arreglo de **cinco ejes** apoyados en los cojinetes magnéticos. Los rodamientos reaccionan al movimiento, detectado por **sensores de posición**, a lo largo de los tres ejes de traslación y dos ejes angulares, figura 4.10.

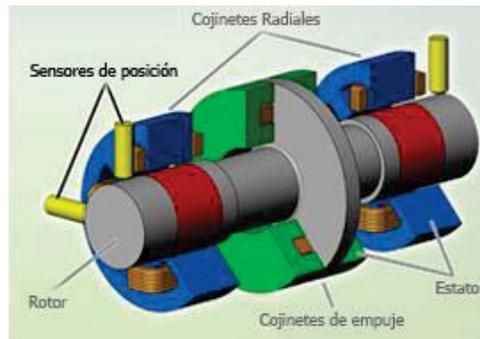


Figura 4.10 Cinco ejes del sistema. [18]

Las propiedades de los **electroimanes** permiten que los cojinetes electromagnéticos ofrezcan poca resistencia por fricción al movimiento a lo largo del eje de rotación, lo que elimina la necesidad de lubricantes y sistemas de lubricación (bombas, colectores, válvulas, etc.), figura 4.11.

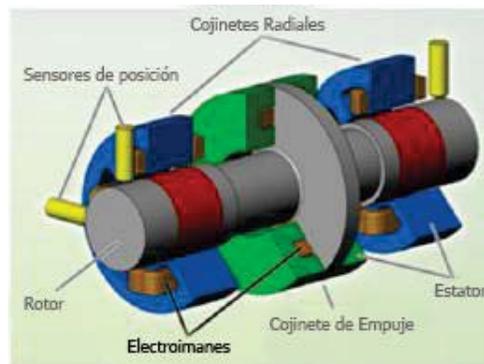


Figura 4.11 Sin lubricantes. [18]

La precisión de soportar los sistemas de control, son las principales características que se han cambiado en los cojinetes electromagnéticos, durante los últimos años, figura 4.12.

La posición del eje se centra siempre en el estator, por lo que el contacto no puede ocurrir, esto ocurre a través de un sistema de retroalimentación de bucle cerrado que consiste en:

- Sensores de posición

- Controlador digital
- Amplificadores de potencia

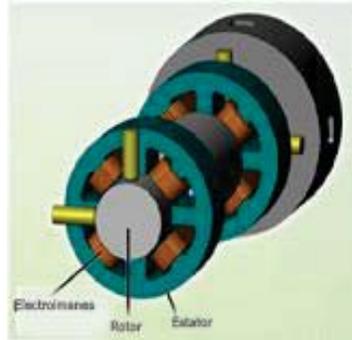


Figura 4.12 . Sistema de control de los cojinetes magnéticos 1. [18]

Los sensores de posición en el estator, detectan los desplazamientos locales sobre el eje, figura 4.13.

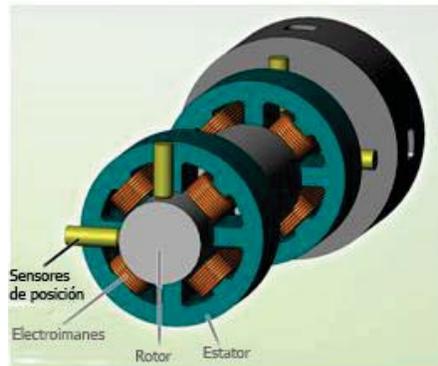


Figura 4.13 Sistema de control de los cojinetes magnéticos 2. [18]

Un regulador digital recibe señales del sensor de posición y los procesa, calculando como redistribuir corrientes electromagnéticas para mantener el eje centrado, figura 4.14.

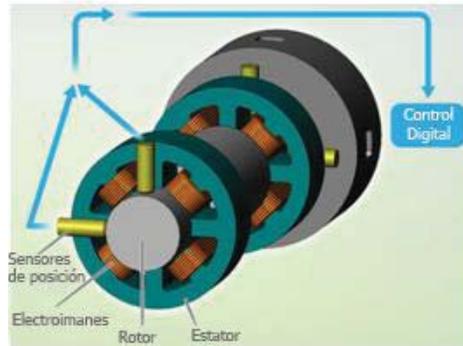


Figura 4.14 Sistema de control de los cojinetes magnéticos 3. [18]

Los amplificadores de potencia en el regulador ajustan las corrientes electromagnéticas para realizar los cálculos del regulador por poco que se mueva el eje, figura 4.15.

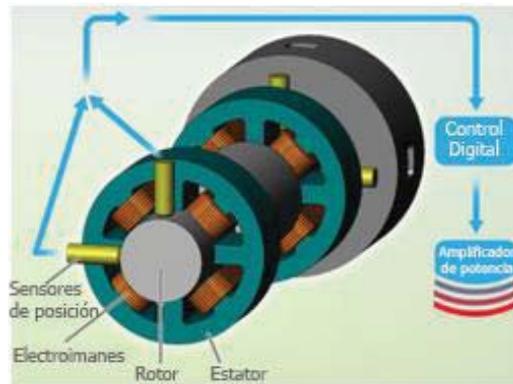


Figura 4.15 Sistema de control de los cojinetes magnéticos 4. [18]

Un algoritmo de control determina los cálculos que el controlador tendrá que realizar. El ciclo de control se repite 15 000 veces por segundo, en el "sensor de control de amplificador", figura 4.16.

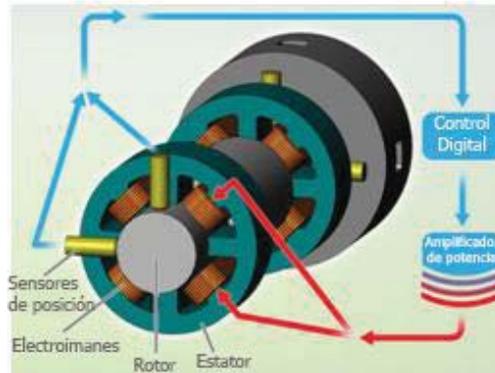


Figura 4.16 Sistema de control de los cojinetes magnéticos 5. [18]

Los cojinetes magnéticos actuales, presentan un mayor costo-eficiencia, que hace unos años. La decisión de utilizar los cojinetes magnéticos en lugar de cojinetes lubricados con aceite se pueden justificar económicamente sólo por la eliminación del sistema de lubricación de aceite. Se eliminan costos por la eliminación de equipo para monitoreo de vibración y la eliminación de las pérdidas por fricción, al reducir el mantenimiento y fiabilidad de la máquina.

### 4.3 DISPONIBILIDAD COMERCIAL

Se encontraron cuatro empresas productoras de generadores de altas revoluciones. En la figura 4.17 se muestran los logos de la marca Alemana Elektromaschinen und Antriebe, las marcas norteamericanas Synchrony™ e Infinity Turbine y la Francesa Magnetic Bearings and High Speed Motors.



Figura 4.17 Principales empresas productoras de generadores de altas revoluciones.

La marca Elektromaschinen und Antriebe, en su sitio web, publica una tabla, en la que muestra la gama de generadores de altas revoluciones que ha producido, sin embargo no todos están puestos a la venta.

Tabla 4.2 Generadores de altas revoluciones producidos por la marca Elektromaschinen und Antriebe. [19]

Potencia [kW]	Velocidad [rpm]
0,5	500 000
12	100 000
35	90 000
45	45 000
75	42 000
100	60 000
120	16 000
125	28 000
200	21 000
320	28 000

Se escogió el generador de altas revoluciones, NovaGen™ 400 de la marca Synchrony, mostrado en la figura 4.18. Que funciona a una velocidad de 20 000 rpm y genera una potencia eléctrica de 400 kW, que cubre con la condición de una

mayor producción eléctrica, en comparación de las otras marcas mencionadas, se presenta un folleto del generador con mayor información en el **APENDICE A**.



Figura 4.18 Generador de altas revoluciones, modelo NovaGen™ 400. [18]

## 5 ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN ELÉCTRICA.

### 5.1 ESTUDIO DE CONEXIÓN ELÉCTRICA DE GENERACIÓN USANDO EL CICLO PWG.

En el capítulo dos se presentaron los valores con los que se ha venido desarrollando el ciclo para las pruebas experimentales dentro del Instituto de Ingeniería, en el proyecto IMPULSA IV, en las que se tiene contemplado trabajar con una generación eléctrica de 1kWe a 20 000 rpm, por la turbina que se tiene en proceso de diseño y manufactura.

Para nuestro estudio, estamos estimando una generación de 400 kWe, acoplado a una microturbina que también estará girando a 20 000 rpm, que posteriormente serán inyectados a una red eléctrica de pruebas.

Analizaremos cuatro casos de estudios que se explican de forma resumida a continuación:

- i) El primer caso de estudio es el caso base y se usa una **red eléctrica de cinco nodos**, la cual conciste, de cinco nodos conectados entre ellos por siete líneas, con cuatro cargas y dos generadores.
- ii) En el segundo caso se analizó una **red eléctrica de seis nodos incluyendo generación con el ciclo PWG**, en el que se tomó la red base con la modificación que a la línea #7, se dividió con un nuevo nodo en dos segmentos de la misma distancia, a este nodo se le nombro PWG y se le conectaron 4 generadores de 400 kW, sugeridos para el estudio del ciclo.
- iii) El tercer caso plantea una **red de diez nodos con transformación de voltaje para conectar la generación PWG**, de la misma forma se toma la red base, pero esta vez la línea #7 se divide con cuatro nodos en longitudes iguales.y la línea #5 en dos, a cada uno de estos nuevos nodos se le

conecto un generador de altas revoluciones mediante un transformador de voltaje.

- iv) En el cuarto y último caso se presenta un **arreglo de un hipotético campo geotérmico de baja entalpía con generación PWG**, tomando como base el tercer caso a cada uno de los nodos PWG's, se les conectó una etapa de transformación de voltaje, seguidos de arreglos de tres o cuatro nodos, cada uno con su respectivo generador y dos nodos a los que se le conectaron dos generadores a cada uno.

### 5.1.1 Construcción del sistema.

Se muestra de nuevo el diseño del ciclo PWG en la figura 5.1, al que se le realizaron cambios para estimar el cálculo de las propiedades termodinámicas del ciclo PWG, con respecto a los valores que se tenían originalmente, para obtener los parámetros que satisficieran las condiciones necesarias para el grupo turbina-generador seleccionado.

Para obtener los valores requeridos, se utilizó la tabla 3.1, sin embargo se hicieron cambios en la potencia bruta, por ser la potencia que se obtiene al final de la turbina, la tabla 5.1 muestra los resultados de los diferentes parámetros del sistema.

Se muestra el resultado de la gráfica temperatura *vs* entropía (T-s) del ciclo PWG con las modificaciones pertinentes en la figura 5.2, los resultados de potencia correspondientes son de 400 kW y 347.32 kW para potencia bruta y neta respectivamente, mientras que la eficiencia térmica es del 8.15%. Cabe mencionar que las propiedades termodinámicas a la salida de la turbina corresponden al punto 9 de la figura 5.1 y columna 9 de la tabla 5.1.

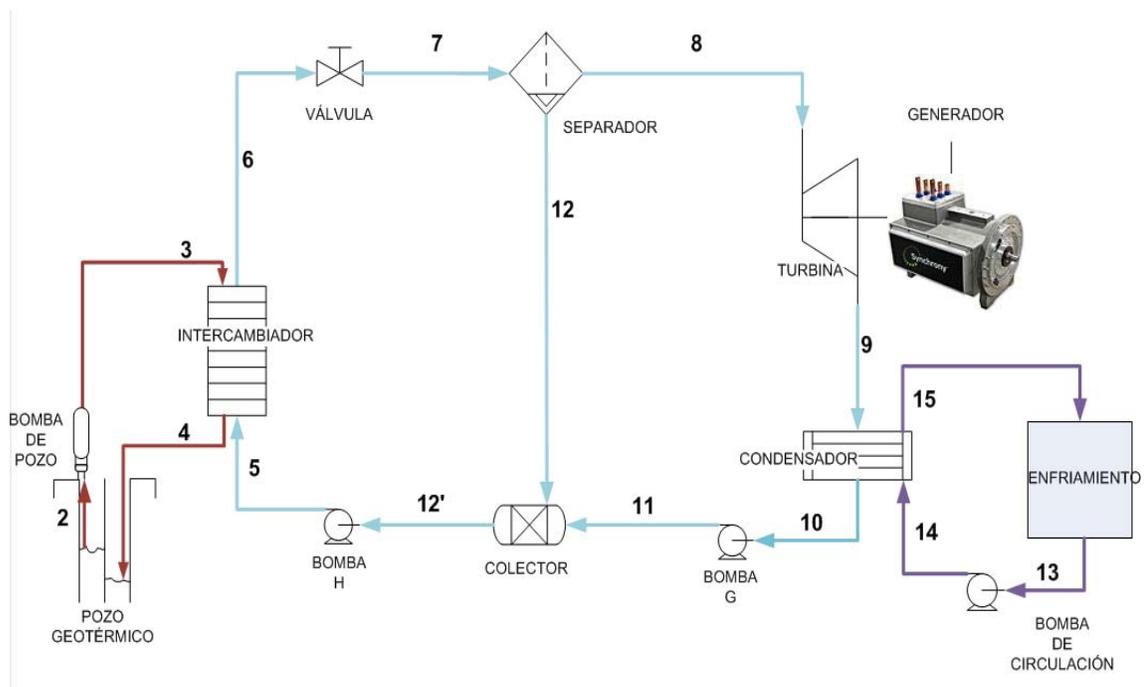


Figura 5.1 Esquema del ciclo PWG. [2]

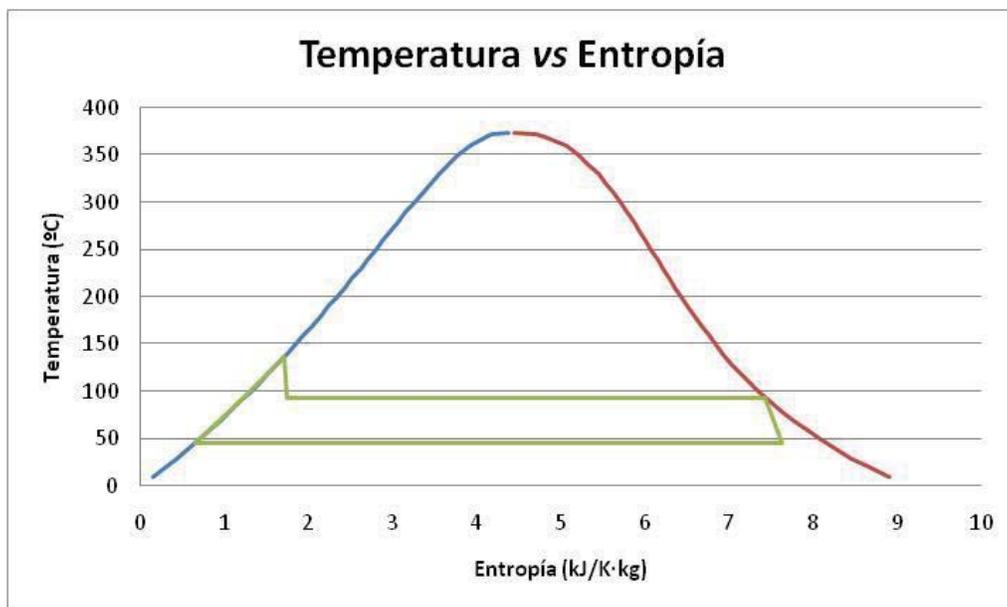


Figura 5.2 Diagrama T-s del ciclo PWG modificado. [2]

Tabla 5.1 Datos y propiedades de los estados termodinámicos del ciclo PWG modificada. [2]

Punto	Recurso geotérmico					Fluido de trabajo						
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12'
T(°C)	140,000	140,039	94,461	91,461	137,000	93,486	93,486	45,806	45,806	45,817	93,486	91,411
P(MPa)	0,362	0,662	0,362	0,632	0,332	0,080	0,080	0,010	0,010	0,180	0,080	0,080
Gasto(kg/s)	22,027	22,027	22,027	19,907	19,907	19,907	1,616	1,616	1,616	1,616	18,291	19,907
Gasto(m <sup>3</sup> /s)	0,024	0,024	0,023	0,021	0,021	3,392	3,373	22,065	0,002	0,002	0,019	0,021
Densidad(kg/m <sup>3</sup> )	926,134	926,263	962,303	964,566	928,789	5,868	0,479	0,073	989,833	989,903	962,927	964,343
Entalpia Liq(kJ/kg)	589,162	589,522	396,032	383,617	576,305			191,806	191,806	191,997	391,710	382,982
Entalpia Gas(kJ/kg)							2665,178					
Entalpia Mezcla (kJ/kg)						576,305		2417,709				
Calidad(%)	0,000				0,000	0,081	1,000	0,931	0,000		0,000	0,000
Entropia Liq(kJ/K·kg)	1,739	1,739	1,244	1,209	1,708	1,233	1,233	0,649	0,649	0,649	1,233	1,209
Entropia Gas(kJ/K·kg)							7,434					
Entropia Mezcla (kJ/K·kg)						1,737		7,628				
Carga Térmica(kW)		4262,068							3597,871			
Potencia Bomba(kW)	7,927			12,657						0,308		

### 5.1.2 Potencia eléctrica

Para la extracción de potencia eléctrica se propuso un generador eléctrico de altas revoluciones modelo NovaGen™ 400 de la marca Synchrony, con una potencia nominal de 400 kW a 20 000 rpm, como se planteo, obtendremos una potencia de 400 kW de potencia bruta al final de la turbina donde se acoplara nuestro generador eléctrico, que cuenta con una eficiencia pico del 97%, por lo que estaremos generando aproximadamente 388 kW.

## 5.2 CASO BASE: RED ELÉCTRICA DE CINCO NODOS

Se realizaron un conjunto de simulaciones con la finalidad de analizar el comportamiento y operación de distintos arreglos de conexión con generadores para el ciclo PWG.

Para el desarrollo de estas simulaciones se utilizo el programa computacional, NEPLAN® Versión 5.4.3..R4, desarrollado por “Busarello + Cott +Partner Inc.” Compañía fundada en Zurich, Suiza que se ha especializado en el campo de la ingeniería de sistemas eléctricos de potencia. [20]

NEPLAN® es una herramienta de análisis de sistemas de potencia de gama alta para aplicación de transmisión, distribución, generación, redes industriales, gas, agua y calefacción, facilitándonos una amigable documentación gráfica de la red, independiente a su extensión.

Empleando el programa computacional que se ha descrito con anterioridad, se analizo el comportamiento de una pequeña red base, la red utilizada es la presentada en el libro “FACTS, *Modelling and Simulation in Power Networks*”, pp. 118 [21], la cual está compuesta por cinco nodos interconectados por medio de siete líneas de transmisión, dos generadores y cuatros cargas conectadas en los nodos, tal como se muestra en la figura 5.3. La red se encuentra operando a 60

Hz y sus respectivos parámetros fueron ajustados para un equivalente de sistema de distribución.

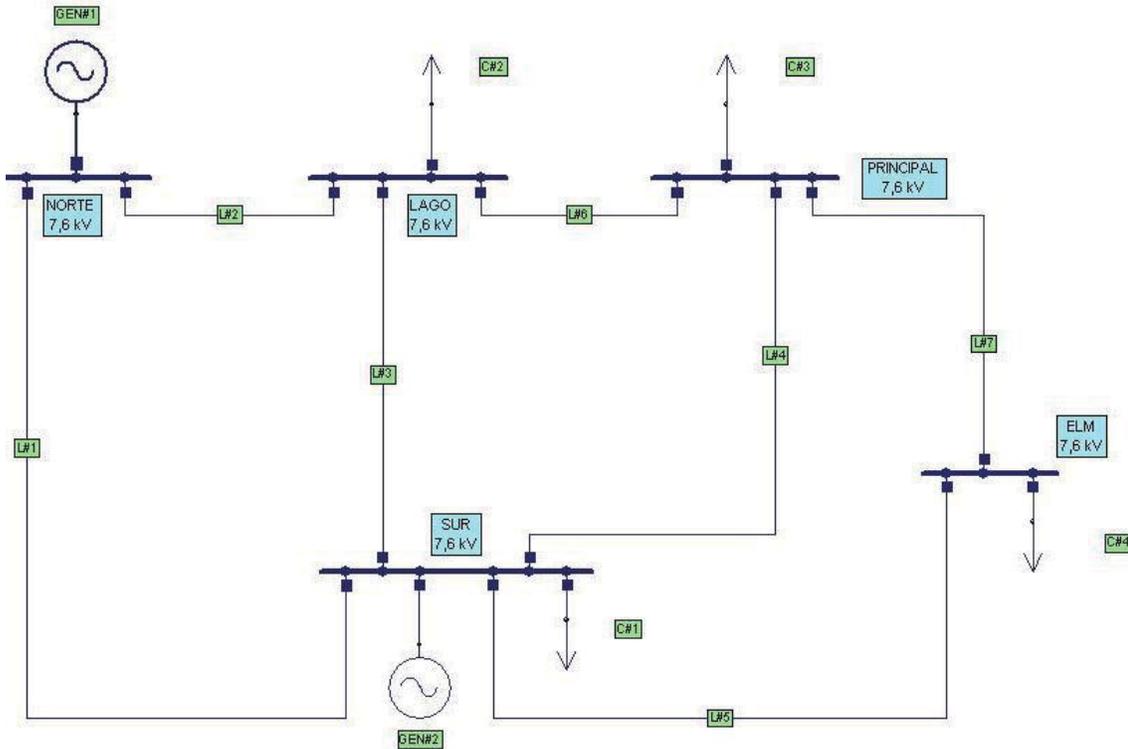


Figura 5.3 Red eléctrica de cinco nodos. [22]

Los datos que conforman las características de cada uno de los elementos de la red, se encuentran en las tablas siguientes, es importante señalar que se ha manejado un voltaje en la red de 7.6 kV y una carga de 13 MW y 3MVars de potencia activa y reactiva respectivamente, así mismo el generador #2 conectado en el nodo SUR, entrega 4 MW de potencia activa de manera constante

Tabla 5.2 Parametros nodales para red eléctrica de cinco nodos.

Nodo	Tipo	$P_0$	$Q_0$	$Q_{max}$	$Q_{min}$	$V_{nom}(\%)$	$P_L$	$Q_L$
NORTE	Slack	0	0	5	-5	106	-	-
SUR	PV	4	0	3	-3	104,75	2	1
LAGO	PQ	-	-	-	-	-	3	1
PRINCIPAL	PQ	-	-	-	-	-	3	0,25

ELM	PQ	-	-	-	-	-	5	0,75
-----	----	---	---	---	---	---	---	------

Donde;  $P_0$ =Potencia activa programada en el generador,  $Q_0$ =Potencia reactiva programada en el generador,  $Q_{max}$ =Límite máximo de potencia reactiva en el generador,  $Q_{min}$ =Límite mínimo de potencia reactiva en el generador,  $V_{nom}$ =Voltaje nominal en el nodo,  $P_L$ =Potencia activa en la carga,  $Q_L$ =Potencia reactiva en la carga.

Tabla 5.3 Parametros de las líneas para red eléctrica de cinco nodos.

Línea	Interconexión	Resistencia	Reactancia	Distancia [Km]
L#1	NORTE-SUR	0,32	0,96	2
L#2	NORTE-LAGO	1,28	3,84	8
L#3	SUR-LAGO	0,96	2,88	6
L#4	SUR-PRINCIPAL	0,96	2,88	6
L#5	SUR-ELM	0,64	1,92	4
L#6	LAGO-PRINCIPAL	0,16	0,48	1
L#7	PRINCIPAL-ELM	1,28	3,84	8

- **Análisis de flujos de potencia.**

El análisis de flujos de potencia es la denominación que se da a la solución de estado estacionario de un Sistema Eléctrico de Potencia bajo ciertas condiciones preestablecidas de generación, carga y configuración de la red, más específico, si se tienen los consumos en cada nodo, y la potencia que entregan los generadores, se encontraran los voltajes en los nodos y los flujos de potencia a través de las líneas. Con ayuda del software NEPLAN® y con los valores que se mencionaron anteriormente, se realizó la simulación para observar el comportamiento de la red bajo el concepto de flujos de potencia, de modo que se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 5.4.

El mínimo valor de voltaje es 96.16%, encontrándose dentro de los límites permitidos, para este caso  $\pm 6\%$ . Los generadores entregan 106 y 104.75%, que es un valor fijo propuesto por el ejercicio seleccionado. Los valores en ángulos desde los  $0^\circ$  hasta los  $-13.94^\circ$ , cabe señalar que para ambos casos, los valores mínimos de magnitud y ángulo se generan en el nodo ELM, lo que muestra que

este nodo es el más alejado de la generación, eléctricamente hablando. Por otro lado encontramos que la línea menos cargada es la #7 con 0.654 MW y 0.025 MVar, fluyendo de PRINCIPAL a ELM. La aportación total de ambos generadores es de 13.814 MW y las pérdidas globales de potencia activa suman el 6.26% (814 kW). El nodo Slack inyecta 9.814 MW para satisfacer las cargas del sistema y las respectivas pérdidas.

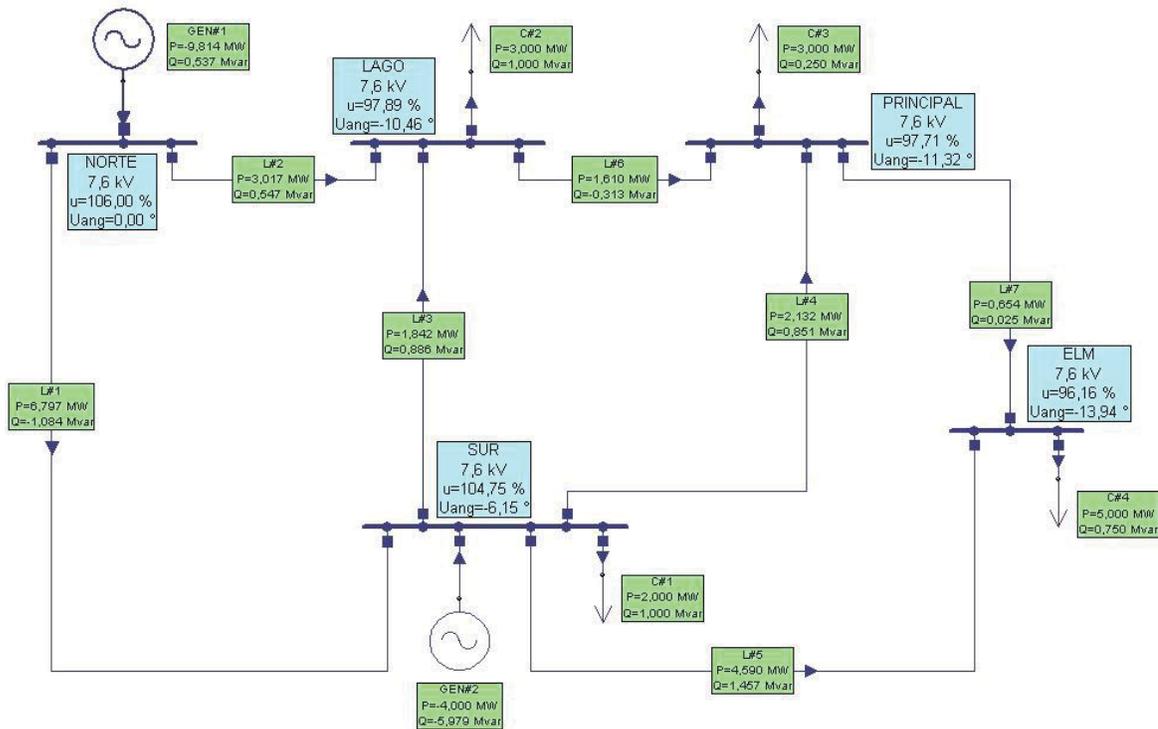


Figura 5.4 Flujo de carga en red eléctrica de cinco nodos. [22]

### 5.3 CASO II: RED DE SEIS NODOS INCLUYENDO GENERACIÓN CON EL CICLO PWG

En este caso de estudio al que nombraremos “Red de seis nodos incluyendo generación con el ciclo PWG”, se dividió la línea L#7 en dos de la misma distancia y con los mismos parámetros, para unirlos se anexo un nuevo nodo al que llamamos PWG y posteriormente conectamos 4 generadores al mismo nodo con

las características del que se ha seleccionado con anterioridad en la sección 4.3, usando el modelo NovaGen™ 400 de la marca Synchrony. La figura 5.5 muestra la nueva red con inyección de potencia en un sistema de generación PWG.

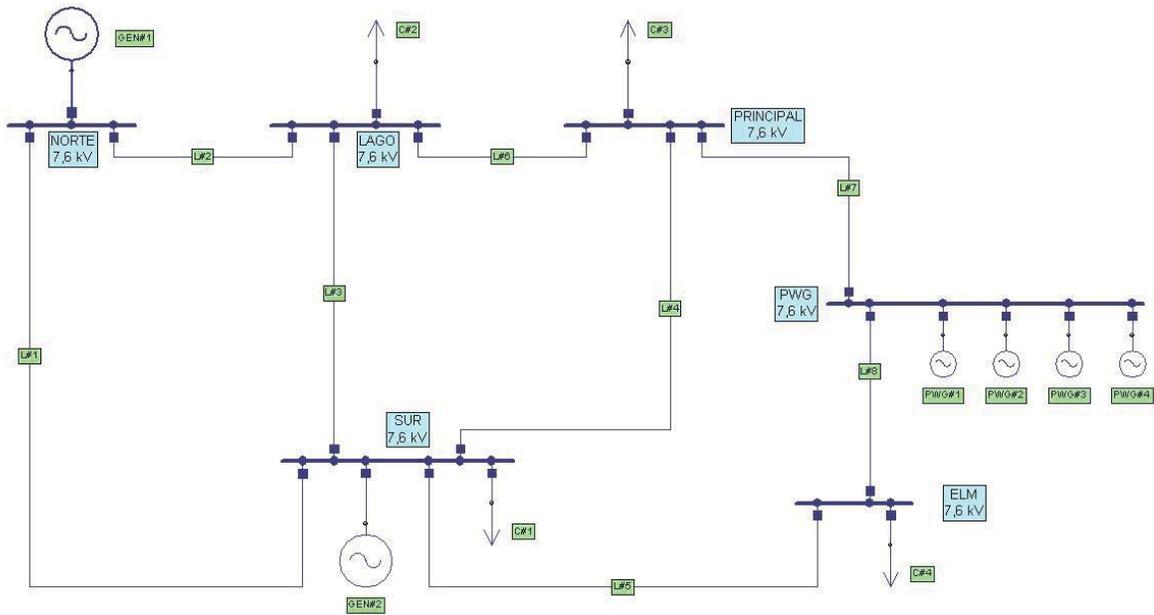


Figura 5.5 Red de seis nodos con generación PWG. [22]

Se muestran las características de los elementos adicionales que fueron agregados a la red base, en las tablas 5.4 y 5.5.

Tabla 5.4 Parámetros nodales para red de seis nodos incluyendo generación con ciclo PWG.

Nodo	Tipo	$P_o$	$Q_o$	$Q_{max}$	$Q_{min}$	$V_{nom}(\%)$	$P_L$	$Q_L$
PWG	PQ	1,6	0	6	-6	-	-	-

Tabla 5.5 Parámetros principales de las líneas anexadas a la red de seis nodos incluyendo generación con ciclo PWG”.

Línea	Interconexión	Resistencia	Reactancia	Distancia [Km]
L#7	PRINCIPAL-PWG	0,64	1,92	4
L#8	PWG-ELM	0,64	1,92	4

- **Análisis de flujos de potencia**

En la figura 5.6 se muestra el resultado del análisis de flujos de potencia, en el que resalta un valor mínimo de voltaje de 97.26 %, los valores del ángulo van de  $0^{\circ}$  a  $-11.30^{\circ}$ , nuevamente presente en el nodo ELM que no deja de ser el nodo más alejado de los puntos de mayor generación eléctrica, sin embargo ahora sus voltaje es mas elevado 1.1% respecto al caso base y el ángulo ha reducido  $2.64^{\circ}$ , en general todos los nodos presentan una disminución de los valores de voltaje y ángulo, debido a la presencia de los generadores anexados, lo anterior representa un perfil mas plano de voltaje en el sistema, esto representa un mejor margen de estabilidad en estado estable del mismo. Por otro lado, encontramos que la línea #7 vuelve a presentar el valor mínimo de potencia transmitida con valores de 0.261 MW y 0.041 MVar, pero esta vez el sentido del flujo cambia de dirección del nodo PWG a PRINCIPAL, mientras que la nueva línea "#8" mantiene el flujo de la línea de la que proviene hacia el nodo ELM.

El total de la generación aportada para este caso es de 13.578 MW de los cuales ahora el generador Slack aporta 7.978 MW, es decir, redujo 1.836 MW, aunque solo se instalaron 1.6 MW de PWG, la diferencia corresponde a la reducción de las perdidas. En este caso estas son del 4.446% (578 MW), esto implica que con la presencia de generación PWG actuando como generación distribuida, el sistema de transmisión es más eficiente 1.814% o bien 236 kW dejan de perderse, con respecto al primer caso en donde no se contaba con el nodo PWG y sus generadores conectados.

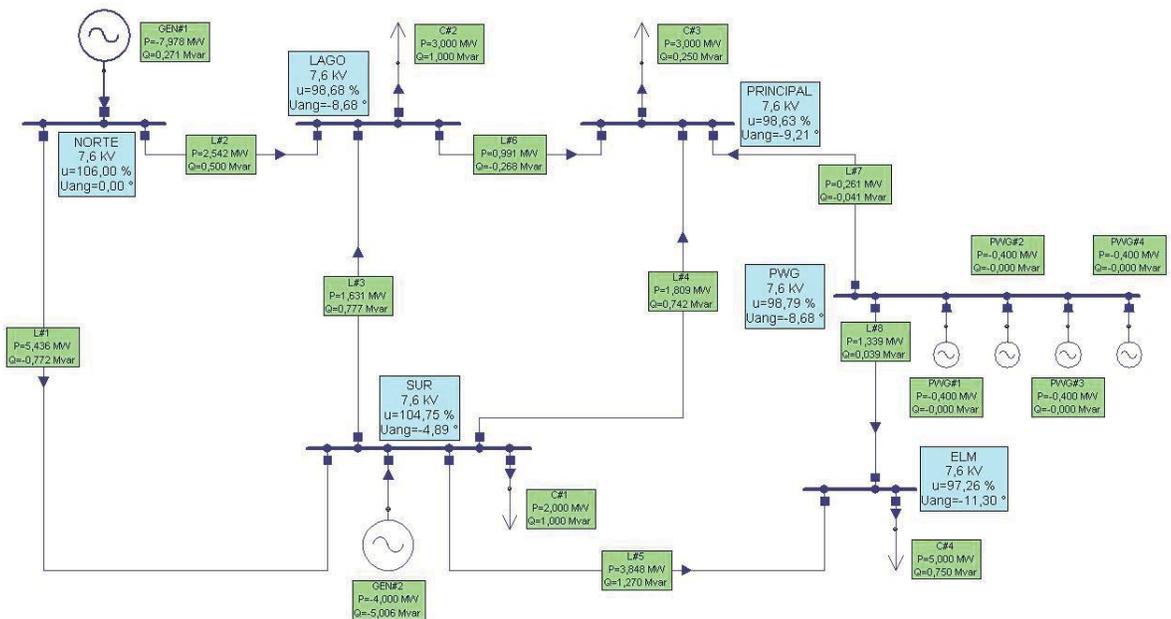


Figura 5.6 Flujo de carga en red de seis nodos con generación PWG. [22]

## 5.4 CASO III: RED DE 10 NODOS CON TRANSFORMACIÓN DE VOLTAJE PARA CONECTAR LA GENERACIÓN PWG

Para el siguiente caso de estudio al que llamaremos “Red de 10 nodos con transformación de voltaje en generación PWG”, se realizaron modificaciones, en la línea L#7 del caso base, esta vez se dividió en 5 líneas de la misma distancia, por lo que se crearon 4 nuevos nodos, a cada uno se le conectó su respectivo generador, pasando por una etapa de transformación de voltaje, también se dividió la L#5 en dos partes una de 3 m y otra de 1 m, por lo que se insertó un nodo más, al que se le colocó de la misma forma su generador con su etapa de transformación de voltaje, como se muestra en la figura 5.7, los transformadores usados son del tipo elevadores, de 0.480/7.5 kV y el total de aporte de potencia activa del sistema PWG es de 2 MW.

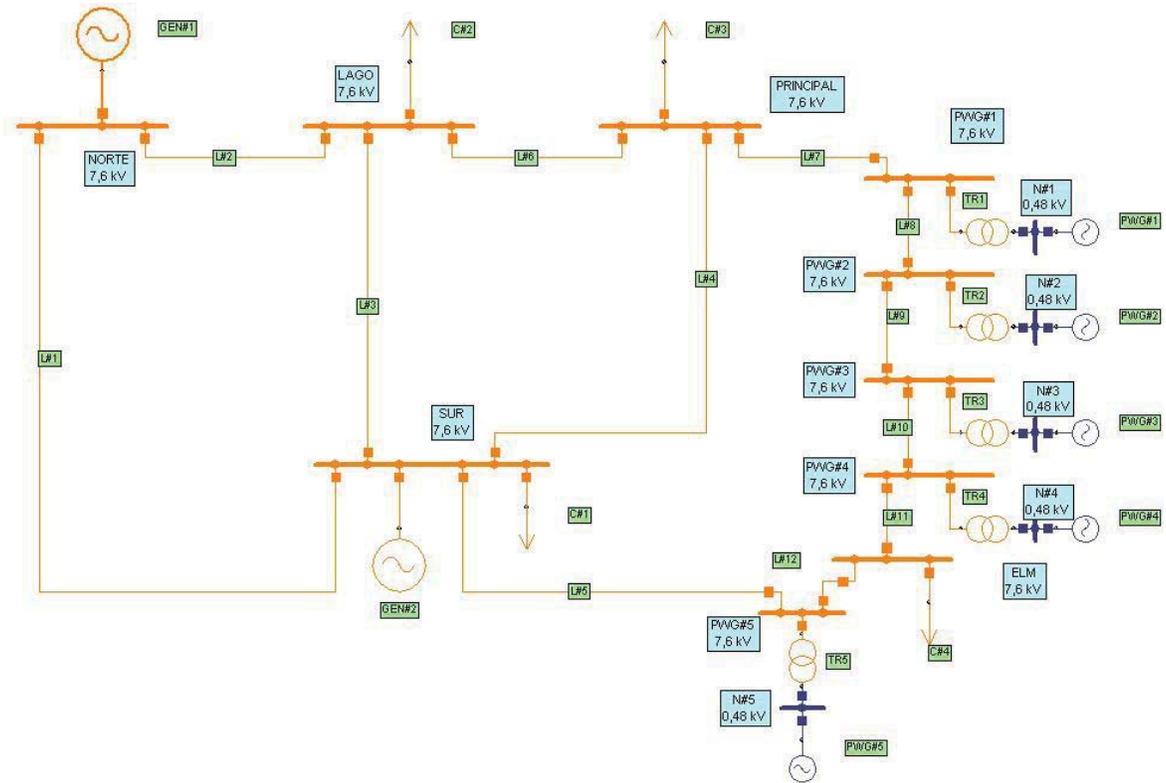


Figura 5.7 Red de diez nodos con transformación de voltaje con generación PWG. [22]

Se muestran a continuación en las tablas 5.6 y 5.7, las características principales de los elementos anexados, para la construcción de dicho sistema.

Tabla 5.6 Parámetros nodales anexados a la red de 10 nodos con transformación de voltaje con generación PWG”.

Nodo	Tipo	$P_0$	$Q_0$	$Q_{max}$	$Q_{min}$	$V_{nom}(\%)$	$P_L$	$Q_L$
PWG#1	PQ	-	-	-	-	-	-	-
PWG#2	PQ	-	-	-	-	-	-	-
PWG#3	PQ	-	-	-	-	-	-	-
PWG#4	PQ	-	-	-	-	-	-	-
PWG#5	PQ	-	-	-	-	-	-	-
N#1	PQ	0,4	0	3	-3	-	-	-
N#2	PQ	0,4	0	3	-3	-	-	-
N#3	PQ	0,4	0	3	-3	-	-	-
N#4	PQ	0,4	0	3	-3	-	-	-
N#5	PQ	0,4	0	3	-3	-	-	-

Tabla 5.7 Parámetros de las líneas anexadas a la red de 10 nodos con transformación de voltaje con generación PWG".

Línea	Interconexión	Resistencia	Reactancia	Distancia [Km]
L#5	SUR—PWG#5	0,48	1,44	3
L#7	PRINCIPAL—PWG#1	0,256	0,768	1,6
L#8	PWG#1—PWG#2	0,256	0,768	1,6
L#9	PWG#2—PWG#3	0,256	0,768	1,6
L#10	PWG#3—PWG#4	0,256	0,768	1,6
L#11	PWG#4—ELM	0,256	0,768	1,6
L#12	ELM—PWG#5	0,16	0,48	1

- **Análisis de flujos de potencia.**

En la figura 5.8 se muestra la simulación de flujos de potencia para el presente caso, donde el valor mínimo del voltaje en magnitud y ángulo nuevamente se presentan en el nodo ELM con 97.62% y  $-10.55^\circ$  respectivamente, se nota mejoría en los demás voltajes. Con respecto a la potencia activa la línea #8 es ahora la que presenta menor carga con 0.042 MW y 0.027 MVar, que fluye del PWG#1 a PWG#2, con dirección hacia la carga más grande presente en el nodo ELM.

El total de aportación de los generados es de 13.52 MW, donde el Slack ahora aporta 7.520 MW es decir, aun con las “nuevas” pérdidas ocasionadas por los transformadores, incrementando la generación PWG 0.4 MW distribuida, esta reemplaza 0.458 MW o lo que es lo mismo 58 kW menos de pérdidas, en general ahora las pérdidas pasan a un 4% (520 kW) reduciéndose del caso base un 2.26%, en esta ocasión la aportación de los generadores es menor con respecto al caso anterior y las pérdidas son menores.

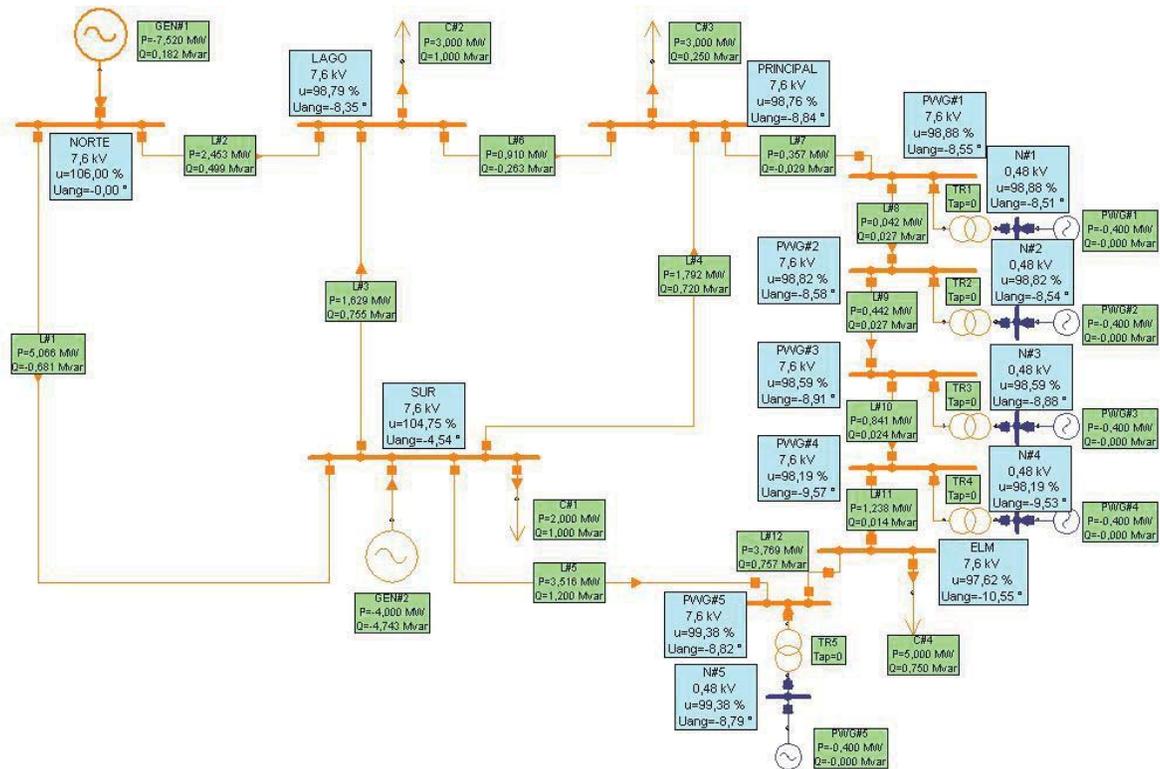


Figura 5.8 Flujos de carga en red de 10 nodos con transformación de voltaje con generación PWG. [22]

## 5.5 CASO IV: ARREGLO DE UN HIPOTÉTICO CAMPO GEOTÉRMICO DE BAJA ENTALPÍA CON GENERACIÓN PWG

Se modificó nuevamente el diagrama, esta vez se simuló un campo geotérmico de baja entalpía y se conectó a la red base, por lo que se instalaron un total de 19 unidades de generación, en el arreglo que se ve en la figura 5.9, lo que nos da una capacidad instalada total de 7,6 MWe de generación tipo PWG. Para este caso se tomó como base el ejemplo anterior y en cada uno de los nodos se le agregaron un mayor número de generadores, variando la cantidad en cada uno de ellos y la distancia entre las líneas que conectarían los nodos.

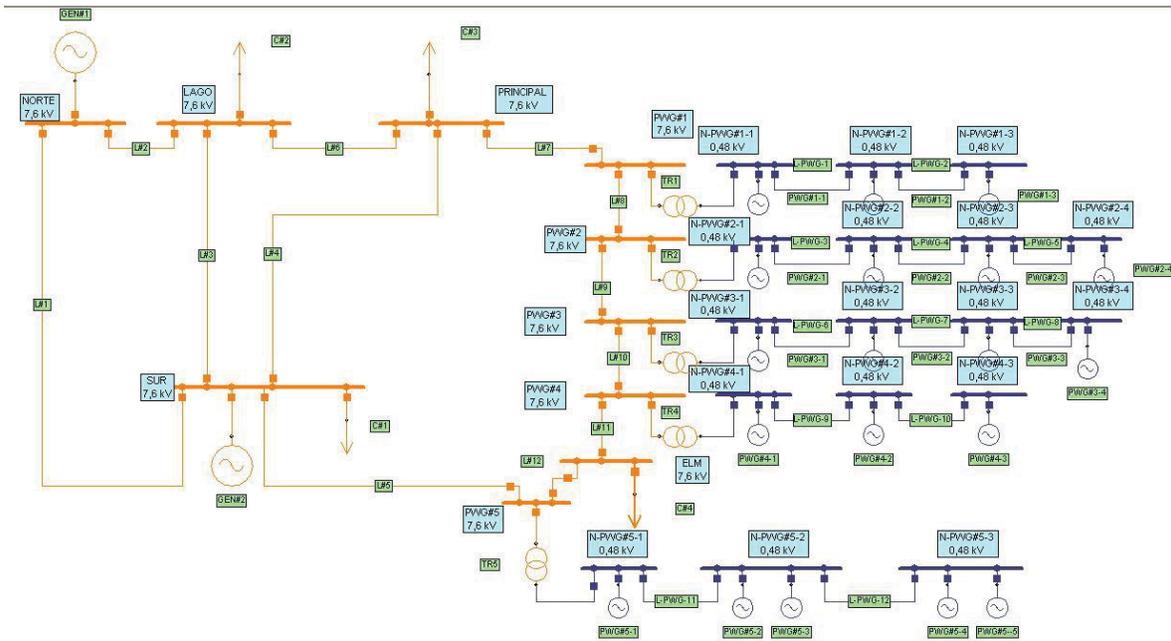


Figura 5.9 Arreglo de un hipotético campo geotérmico de baja entalpía con generación PWG. [22]

En las siguientes tablas se muestran los parámetros de los elementos que se tuvieron que anexar. Esta vez se necesitó de 19 generadores con las características de un NovaGen™ 400 de la marca Synchrony, 17 nodos y 12 líneas de distintas características para poder armar este diagrama. Además los nodos de conexión son tipo PV, con un valor de voltaje nominal de 100% en la magnitud del voltaje, en la tabla 5.8 también se incluyen los valores de  $Q_0$  para que el voltaje alcance el valor programado.

Tabla 5.8 Parámetros nodales anexados al arreglo de un hipotético campo geotérmico de baja entalpía con generación PWG”.

Nodo	Tipo	$P_0$	$Q_0$	$Q_{max}$	$Q_{min}$	$V_{nom}(\%)$	$P_L$	$Q_L$
N-PWG#1-1	PV	0,4	0,478	3	-3	100	-	-
N-PWG#1-2	PV	0,4	0,129	3	-3	100	-	-
N-PWG#1-3	PV	0,4	0,076	3	-3	100	-	-
N-PWG#2-1	PV	0,4	0,609	3	-3	100	-	-
N-PWG#2-2	PV	0,4	0,313	3	-3	100	-	-
N-PWG#2-3	PV	0,4	0,179	3	-3	100	-	-
N-PWG#2-4	PV	0,4	0,076	3	-3	100	-	-

N-PWG#3-1	PV	0,4	0,232	3	-3	100	-	-
N-PWG#3-2	PV	0,4	0,334	3	-3	100	-	-
N-PWG#3-3	PV	0,4	0,116	3	-3	100	-	-
N-PWG#3-4	PV	0,4	0,094	3	-3	100	-	-
N-PWG#4-1	PV	0,4	0,77	3	-3	100	-	-
N-PWG#4-2	PV	0,4	0,037	3	-3	100	-	-
N-PWG#4-3	PV	0,4	0,113	3	-3	100	-	-
N-PWG#5-1	PV	0,4	0,237	3	-3	100	-	-
N-PWG#5-2	PV	0,8	0,37	6	-6	100	-	-
N-PWG#5-3	PV	0,8	0,188	6	-6	100	-	-

Tabla 5.9 Parámetros de las líneas anexadas al arreglo de un hipotético campo geotérmico de baja entalpía con generación PWG<sup>o</sup>.

Línea	Interconexión	Resistencia	Reactancia	Distancia [Km]
L-PWG-1	N-PWG#1-1 -- N-PWG#1-2	0,048	0,144	0,3
L-PWG-2	N-PWG#1-2 -- N-PWG#1-3	0,048	0,144	0,3
L-PWG-3	N-PWG#2-1 -- N-PWG#2-2	0,032	0,096	0,2
L-PWG-4	N-PWG#2-2 -- N-PWG#2-3	0,016	0,048	0,1
L-PWG-5	N-PWG#2-3 -- N-PWG#2-4	0,048	0,144	0,3
L-PWG-6	N-PWG#3-1 -- N-PWG#3-2	0,032	0,096	0,2
L-PWG-7	N-PWG#3-2 -- N-PWG#3-3	0,048	0,144	0,3
L-PWG-8	N-PWG#3-3 -- N-PWG#3-4	0,032	0,096	0,2
L-PWG-9	N-PWG#4-1 -- N-PWG#4-2	0,016	0,048	0,1
L-PWG-10	N-PWG#4-2 -- N-PWG#4-3	0,016	0,048	0,1
L-PWG-11	N-PWG#5-1 -- N-PWG#5-2	0,032	0,096	0,2
L-PWG-12	N-PWG#5-2 -- N-PWG#5-3	0,016	0,048	0,1

- **Análisis de flujos de potencia.**

Se ilustra en la figura 5.10 el análisis de flujos de potencia del presente caso de estudio, la menor magnitud de voltaje es de 98.76%, presente en el nodo ELM y el menor valor de ángulo de  $-3.91^\circ$  esta vez en el nodo PRINCIPAL y el valor más alto de  $66.59^\circ$  en el nodo N-PWG#3-4, que es el punto de generación PWG más

alejado de la red, la línea menos cargada es la #9 con 0.082 MW y 0.030 MVar que fluye del PWG#3 al PWG#2, justo en medio de la línea que fue dividida, por lo tanto al centro de nuestro arreglo de generación.

Las aportaciones del total de los generadores es 14.197 MW y esta vez el nodo Slack solo necesito contribuir con 2.785 MW para satisfacer las necesidades de carga y perdidas de la red, comparando con el caso anterior que fue de 7.520 MW y el caso base que fue de 9.814 MW. Esta ocasión la generación PWG es de 7.6 MW con el arreglo que se propuso. Las pérdidas presentes en la red son del 9.207% (1.197 MW) aumentando con respecto al caso base 2.94% o bien se pierden 382 kW y con respecto al caso iii, que fue el que presento menores perdidas presenta una disminución en la eficiencia del 5.207% (676.91 kW), por lo que la generación distribuida en el nuevo sistema propuesto con un exceso de generación PWG, es menos eficiente que las casos planteados anteriormente

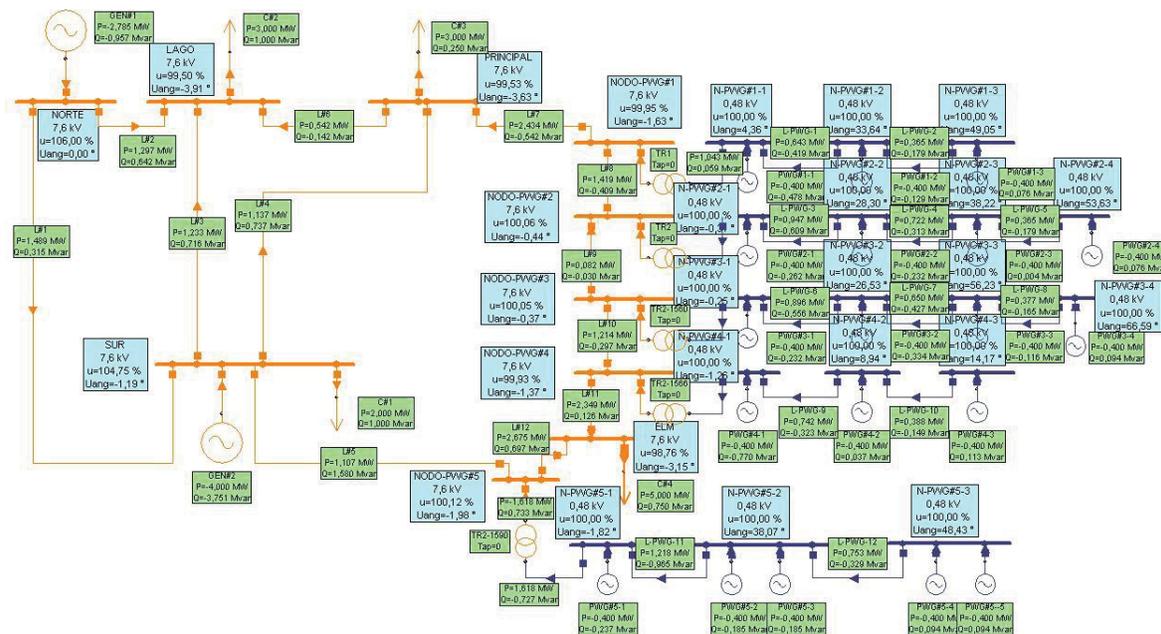


Figura 5.10 Flujos de carga en arreglo de un hipotético campo geotérmico de baja entalpía con generación PWG [22]

## 5.6 ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

Comparado con otras centrales de generación eléctrica, las geotermoeléctricas tienen una mínima cantidad de emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y otros gases como lo son el sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ) debido a los fluidos hidrotermales. Aun así, las plantas geotermoeléctricas generan aproximadamente 221,19 kg/MWh de  $\text{CO}_2$ , y 2,92 kg/MWh de  $\text{H}_2\text{S}$  [10]. Así mismo el umbral de olor para el azufre en el aire es del orden de 5 partes por billón de volumen; concentraciones ligeramente superiores pueden causar efectos fisiológicos leves. La figura 5.11 esquematiza las principales afectaciones al ambiente producidas por la energía geotérmica.

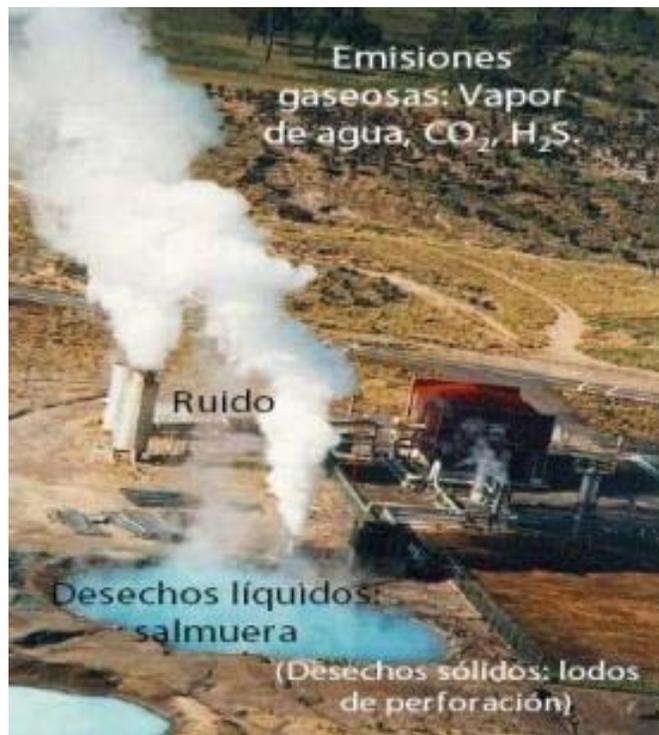


Figura 5.11 Esquema de las principales afectaciones ambientales. [2]

Tomando en cuenta un factor de planta de 85% para una planta geotérmica base, tenemos una capacidad de 388 kW·8760 horas/año obtendremos 3 398 MWha y

multiplicandolo por el factor de planta de 85% que se a tomado como base de una central geotermoeléctrica multiplicado por 0.85, obtendremos una generación anual por unidad instalada de 2889.048 MWha. Tomando en cuenta los datos de la tabla 5.10. que nos muestra los factores de emisión de GEI por tipo de combustible.

Tabla 5.10 Factores de emisión de GEI por tipo de combustible (FEc). [23]

<b>Combustible</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> [kg/TJ]	<b>CH<sub>4</sub></b> [kg/TJ]	<b>N<sub>2</sub>O</b> [kg/TJ]
<b>Carbón</b>	94600	1	1.5
<b>Diesel</b>	74100	3	0.6
<b>Combustóleo</b>	77400	3	0.6
<b>Gas Natural</b>	56100	1	0.1

Se procederá a calcular el factor de emisiones de GEI emitidas durante el proceso de generación de eléctrica, para esto es necesario utilizar la siguiente expresión [24].

..... (II)

Dónde:

$FEp$  = Factor de emisión de la planta,  $t_{GEI}/MWh$

$HR$  = Hate rate de la planta,  $kJ/kWh$

$FEc$  = Factor de emisión del combustible,  $kg/kJ$

$FC$  = Factor de conversión de unidades, para este caso  $1/1 \times 10^9$  TJ/kJ

El consumo térmico específico o *Hate rate*, es otra forma de expresar la eficiencia de una unidad de generación térmica en términos de la cantidad de calor del combustible requerido para generar un kWh, para calcularlo se utilizó la siguiente fórmula.

—.....(III)

Dónde:

$\eta$  = eficiencia de la planta eléctrica

Para obtener los valores de eficiencia por tipo de planta se recurrió al Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2010-2024 (POISE 2010-2024) [25], en la tabla 5.11 se observan las eficiencias y el cálculo del HR por tecnología de las centrales eléctricas.

Tabla 5.11 Eficiencias y HR por tecnología de las centrales eléctricas.

<b>Tecnología</b>	<b>Eficiencias</b> [%]	<b>HR</b> [kJ/kWh]
<b>Carboeléctrica</b>	37.87	9506.21
<b>Combustión interna</b>	42.36	8499.27
<b>Termica convencional</b>	34.28	10502.52
<b>Ciclo combinado</b>	50.89	7073.53

Finalmente haciendo uso de la fórmula para el cálculo del factor de emisiones de GEI para la generación eléctrica, como se muestra en la tabla 5.12.

Tabla 5.12 Factor de emisiones de GEI para la generación eléctrica.

<b>COMBUSTIBLE</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> [t CO <sub>2</sub> /MWh]	<b>CH<sub>4</sub></b> [kg CH <sub>4</sub> /MWh]	<b>N<sub>2</sub>O</b> [kg N <sub>2</sub> O/MWh]
<b>Carbón</b>	0.899	0.010	0.014
<b>Diesel</b>	0.630	0.025	0.005
<b>Combustóleo</b>	0.813	0.032	0.006
<b>Gas Natural</b>	0.397	0.007	0.0007

Se estarán evitando un total de emisiones anuales por cada unidad instalada como se muestra en la tabla 5.13, si en lugar de usar las tecnologías térmicas convencionales, se genera con geotermia de baja entalpía.

Tabla 5.13 Emisiones anuales evitadas por unidad de 400 kW.

COMBUSTIBLE	CO <sub>2</sub> [t]	CH <sub>4</sub> [kg]	N <sub>2</sub> O [kg]
<b>Carbón</b>	2.598	0.027	0.041
<b>Diesel</b>	1.820	0.074	0.015
<b>Combustóleo</b>	2.348	0.091	0.018
<b>Gas Natural</b>	1.146	0.020	0.002

Para el caso de estudio presentado en este capítulo de arreglo de posible campo geotérmico, que cuenta con 19 generadores de 400kW, se evitaran anualmente, 49.36 t de dióxido de carbono, 0.513 kg de metano y 0.779 kg de oxido de nitrógeno, si sustituimos la generación con carbón por geotermia de baja entalpía y el ciclo PWG.

## 5.7 ESTUDIO ECONÓMICO.

Para este estudio, se tomó al recurso geotérmico como un combustible renovable que no tiene ningún costo por su uso, además de contemplar que estamos usando geotermia de baja entalpía, que es un recurso que normalmente se desecha y no se le da un uso para aprovechamiento de transformación de energía.

Para obtener el costo de los combustibles, en la generación de la energía eléctrica se tomará en cuenta, la tecnología con la que se trabaja y el tipo de combustible que utiliza, obtendremos un promedio de los precios tomados del documento publicado por la CFE “Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico 2008” (COPAR 2008). [26]

Como un ejemplo tomando en cuenta que si generáramos 2 889.04 MWh con una central termoeléctrica convencional, si esta generación es reemplazada por geotermia de baja entalpía y el ciclo PWG, el ahorro anual sería de 3.134 millones de pesos. La tabla 5.14 muestra los ahorros para el desplazamiento de diferentes tipos de generación comunmente usada en México.

Tabla 5.14 Costo anual de combustible por tecnología y combustible, tomando al vapor geotermico con un costo nulo.

TECNOLOGÍA	COMBUSTIBLE	COSTO DEL COMBUSTIBLE ANUAL [\\$]
<b>Termoeléctrica convencional</b>	Combustóleo doméstico	3 134 154.83
<b>Turbogás</b>	Gas natural doméstico	2 687 051.54
<b>Turbogás aeroderivada diesel</b>	Diesel doméstico	4 894 249.54
<b>Ciclo combinado</b>	Gas natural doméstico	1 814 408.81
<b>Combustión interna</b>	Combustóleo doméstico	2 540 465.09
<b>Carboeléctrica</b>	Carbón doméstico	1 387 364.18
<b>Geotermoeléctrica</b>	Vapor geotérmico	ND

Para el caso de estudio de un complejo geotérmico, nos estaríamos evitando para el costo del combustible un total de \$ 59 548 941.77, si generamos con geotermia de baja entalpía haciendo uso del ciclo PWG, en lugar de la tecnología termoeléctrica convencional.

Se pueden buscar algún tipo de retribuciones, que harían más factible nuestro proyecto, como lo pueden ser los bonos de carbono.

Además recordando los casos *ii* y *iii*, también habrá que considerar el caso de la reducción de las pérdidas globales del sistema y la disminución del flujo de potencia en el sistema de transmisión.

## **6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.**

### **6.1 CONCLUSIONES GENERALES**

La opción de utilizar un sistema de generación eléctrica, alimentado por geotermia de baja entalpía, se presenta en este estudio como una opción para diversificar la producción eléctrica, además aprovechar el recurso geotérmico con el que cuenta nuestro país.

Se calcularon los datos termodinámicos necesarios para poder satisfacer las necesidades del ciclo PWG y que pudiera ser acoplado al generador de altas revoluciones, enfocado a obtener los resultados de generación eléctrica.

Se escogió un generador de altas revoluciones por representar ventajas como la eliminación de una caja de cambios necesaria para la reducción de la velocidad a la salida de la turbina, por lo tanto se obtienen beneficios tales como reducción de espacio, eliminación de sistemas de lubricación, cambios de aceite inflamables y contaminantes, costos de mantenimiento, asimismo presenta mejoras al momento de la conversión mecánica-eléctrica.

Se planteó una serie de casos de estudio, usando una red eléctrica para evaluar el impacto técnico, ambiental y económico que trae la generación con geotermia y el ciclo PWG.

La generación eléctrica usando geotermia de baja entalpía es una opción viable para desplazar la generación convencional.

### **6.2 CONCLUSIONES PARTICULARES**

Con los distintos arreglos que se simularon, se puede obtener generación eléctrica suficiente para cubrir una demanda de aproximadamente 7 MW, este resultado utilizando el modelo de posible campo geotérmico.

Se evaluaron las posibilidades de sustituir la generación equivalente a una unidad de generación de una térmica convencional por la tecnología presentada en este

estudio, lo que representa un gran beneficio ya que después de instalada la central geotermoeléctrica, el costo del combustible es casi nulo.

Se estudio de manera breve la producción de GEI que emiten las tecnologías térmicas convencionales, con respecto a las emisiones casi nulas de la geotermia, notándose una considerable reducción de más de 1.146 t de CO<sub>2</sub>, si produjéramos esa electricidad con gas natural que es el combustible que menos emisiones tiene y de aproximadamente 2.598 t de CO<sub>2</sub> se evitarían sí se producen con carbón, que es el combustible fósil que más GEI produce.

### 6.3 TRABAJO FUTURO

Se proponen como trabajo futuro los siguientes puntos:

- Analizar el comportamiento de la generación con el ciclo PWG en una red eléctrica real.
- Incluir valores de potencia reactiva a los generadores de altas revoluciones.
- Contemplar los costos de implementación y mantenimiento para el estudio económico.
- Buscar retribuciones como los bonos de carbono, que pueden hacer más costeable nuestro proyecto.
- Tomar en cuenta algún tipo de financiamiento que haga más rentable y atractivo económicamente la implementación del ciclo PWG.

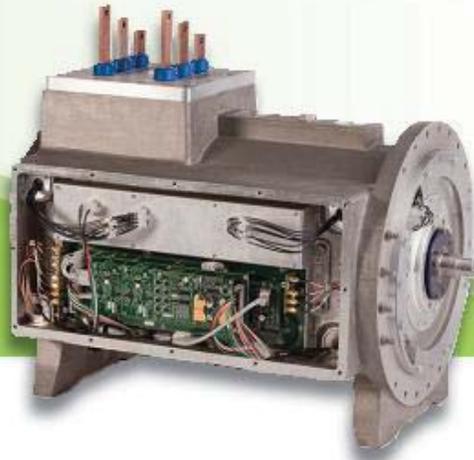
## APENDICE A



### NovaDrive™ 400 NovaGen™ 400 Oil-less Drive Train

These oil-less drive trains offer high performance without a gearbox at rotational speeds up to 20,000 rpm. The NovaDrive™ motors and NovaGen™ generators use permanent magnet rotors supported on magnetic bearings to achieve increased efficiency and high torque density. To simplify integration into a system, the control electronics for the magnetic bearings are seamlessly incorporated into the drive train, greatly reducing the field wiring. These design innovations decrease the size and complexity, improve the dynamic performance, and increase the economic value of the system.

- 400 kW
- 20,000 rpm
- 480 VAC



#### Features

- Applications include gas compression and power generation
- Two configurations:
  - NovaDrive™ 400 as a motor
  - NovaGen™ 400 as a generator
- Permanent magnet rotor with low-loss, steel retention band (patent pending)
- Shaft supported on magnetic bearings with controls embedded in the machine housing
- Compact length (28 in) and lightweight aluminum housing
- Rated at 400 kW at 20,000 rpm
- Compressor or turbine can be mounted on shaft
- Can be directly coupled to a high speed machine
- Remote health monitoring via Ethernet port
- Peak efficiency: > 97%
- MTBF: > 110,000 hrs
- Internal components cooled with air or process gas
- Stator and housing cooled with liquid
- Can be supplied with power conversion electronics

#### Benefits

- Elimination of gearbox
- Mechanically durable rotor with no composite materials
- Elimination of oil lubrication system
- Elimination of hazardous, flammable, and contaminating lubricants
- Reduced integration and installation costs
- Improved electrical-mechanical conversion efficiency
- Improved reliability and reduced maintenance
- Reduced life cycle cost
- Quiet, vibration-free operation

#### Industries

- Oil and Gas
- Air Separation
- HVAC
- Power Generation
- Renewable Energy
- Aerospace and Defense

[www.synchrony.com](http://www.synchrony.com)

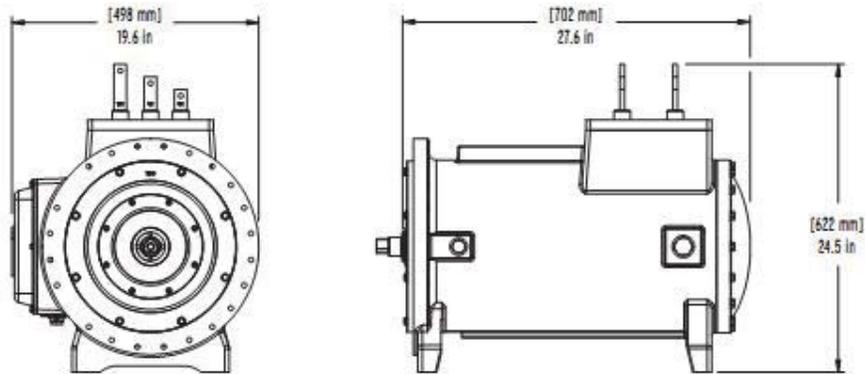


NovaDrive™ 400 shown with high frequency Variable Frequency Drive (VFD)

## Synchrony®

Setting the standard for performance, size, simplicity and value.

### NovaDrive™ 400 and NovaGen™ 400 Dimensions



\*Dimensions are for reference only



4655 Technology Drive  
Salem, Virginia 24153  
540-444-4200  
www.synchrony.com

SHC400RHSP 0109

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

---

- 1 Asociación Geotérmica Mexicana, <http://www.geotermia.org.mx/geotermia/>
- 2 Proyecto IMPULSA IV, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- 3 Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), Gerencia de Geotermia, <http://www.iie.org.mx/geotermia/>
- 4 Fernández Díez, Pedro, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria España.
- 5 Climatización Geotérmica, <http://www.climatizaciongeotermica.com/geotermia/historia.html>
- 6 International Geothermal Association, (IGA), <http://www.geothermal-energy.org/>
- 7 International Energy Agency (IEA), Geothermal Implementing Agreement (GIA), <http://www.iea-gia.org/documents/>
- 8 Secretaría de Energía, “Prospectiva del Sector Eléctrico 2010 – 2025”.
- 9 Comisión Federal de Electricidad (CFE), <http://www.cfe.org.mx>
- 10 Maya Raúl, Gutiérrez Luis, “Recursos geotérmicos para generar electricidad en México”, Revista Digital Universitaria, 10 de diciembre 2007, volumen 8, número 12.
- 11 García Alfonso, Barragán Rosa Ma., Arellano Víctor, “Situación y prospectiva de la energía geotermoeléctrica”, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2009.
- 12 Muffler y Cataldi, 1978. Nicholson, 1993. Gunnlaugsson y Axelsson, 2000.
- 13 García, Oziel (2008), “Los recursos geotérmicos de baja entalpía: una opción en la generación eléctrica y la desalación de agua de mar”, tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- 14 Design Approach of Steam-Water Separators and Steam Dryers for Geothermal Applications, Armando Aceves. September 1984.
- 15 Alfa Laval, <http://www.alfalaval.com>
- 16 Barber-Nichols, <http://www.barber-nichols.com>
- 17 S.L. Dixon. Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery.

---

18 Synchrony, <http://www.synchrony.com>

19 Elektromaschinen und Antriebe, <http://www.eunda.ch>

20 NEPLAN® Power System Analysis and Engineerin, Zurich. <http://www.neplan.ch>

21 Acha Enrique, Fuerte-Esquivel Claudio R., Ambriz-Pérez Hugo, Angeles-Camacho César, “FACTS, Modelling and Simulation in Power Networks”, Edit. John Wiley & SONS, LTD.

22 Software, NEPLAN® Versión 5.4.3..R4.

23 IPCC, 2006. “2006 IPCC Guidelines for Nacional Greenhouse Inventories”, volumen 2. [Capítulo2 – Combustión estacionaria, Tabla 2.2]

24 Coto Chinchilla Oscar, Salinas Zenia, “Factor de Emisiones de CO<sub>2</sub> para Proyectos MDL de Energía Renovable de Pequeña Escala Interconectados a la Red Eléctrica Costarricense”, CATIE, Turriabal, Costa Rica, 2005.

25 CFE, Subdirección de Programación, Coordinación de Planificación, “Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2010-2024” (POISE 2010-2024).

26 CFE, Subdirección de Programación, Coordinación de Evaluación, “Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico 2008” (COPAR 2008), 28° edición.