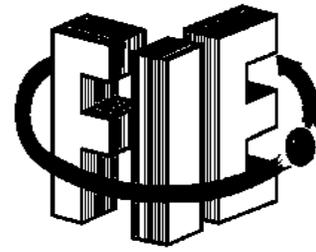




**UNIVERSIDAD
MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“MODELADO DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN DE CICLO
COMBINADO GAS-CALEFACCIÓN”**

T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTA:
ILMER MORALES VARGAS**

**ASESOR:
DR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
Dr. GILBERTO GONZÁLEZ ÁVALOS**

Morelia Michoacán, Marzo 2019.

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo de felicidad.

A mis padres

Le doy gracias a mis padres Héctor Morales Orozco y Reyna Vargas Velázquez por apoyarme incondicionalmente en todo momento, por sus consejos, por siempre inculcarme el camino del estudio y superación, por sus valores que me transmitieron, por siempre creer en mí y tener una palabra de ánimo en momentos complicados, gracias a ellos soy una persona de bien. Sobre todo, les agradezco su gran amor incondicional.

A mis hermanos

A mis hermanos José Roberto, Calos, Héctor, y mis demás hermanos, por ser parte importante en mi vida y representar la unidad familiar, quienes siempre me han brindado su apoyo en aquellos momentos de necesidad y tener las palabras de ánimo para seguir adelante.

A mis abuelos

A mi bisabuela Concepción que aun que no se encuentra entre nosotros físicamente, en su momento siempre me motivo para lograr mis sueños, sus sabios consejos los llevo en mi mente y su gran amor en mi corazón. A mis abuelas Albina y Eliza por siempre saber darme los consejos correctos, por sus oraciones y bendiciones, y su gran ejemplo de vida.

A mi novia

Aquella mujer muy especial, a quien amo mucho, mi novia, Cynthia Corey Zalapa Martínez, que con su valor y entrega ha sido una persona incondicional en mi vida, ha sido mi soporte, mi mejor amiga, mi consejera, por su apoyo para no bajar los brazos en momentos difíciles. A la familia Zalapa Martínez por su apoyo y siempre creer en mí.

A mi asesor

A mi asesor de tesis el Dr. Gilberto González Ávalos, por la orientación y ayuda que me brindó para la realización de esta tesis, por gran apoyo y paciencia en este proyecto, y brindarme sus conocimientos.

A mis profesores

A todos mis profesores de la licenciatura en ingeniería eléctrica que me enseñaron tanto de la profesión como de la vida, impulsándome siempre a seguir adelante.

A mis sinodales

A la mesa sinodal quienes se dieron el tiempo de leer y aprobar esta tesis.

A la facultad

A la Facultad de Ingeniería Eléctrica (FIE).

A la universidad

A la Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo (UMSNH).

DEDICATORIA

A dios

A Dios, que me ha brindado una vida llena de alegrías y aprendizaje, permitiéndome vivir una muy grata experiencia en mi etapa universitaria y brindarme todo lo necesario para poder llegar al día de hoy.

A mis padres

A mis padres Héctor Morales Orozco y Reyna Vargas Velázquez por ser el motor de mi vida, por creer siempre en mí, por el invaluable apoyo que me brindaron para poder culminar mi carrera profesional.

A mis hermanos

A mis hermanos José Roberto, Carlos, Héctor, por su apoyo incondicional que me brindaron en momentos clave de mi vida como estudiante universitario.

A mis abuelos

A mis abuelos por sus sabios consejos, sus oraciones y su gran amor.

A mi novia

A mi novia, Cynthia Corey Zalapa, por ser mi apoyo fundamental e incondicional en los momentos muy difíciles de mi vida como estudiante y emocional, por haber dedicado de su tiempo y esfuerzo para culminar una meta más juntos, por ser un ejemplo a seguir.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	iii
INDICE	iv
RESUMEN	vii
PALABRAS CLAVE	viii
ABSTRACT	ix
KEY WORDS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	xiii
CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.- Los gases de escape de una turbina de gas	1
1.2.- Objetivo	3
1.3.- Justificación	4
1.4.- Metodología.....	6
1.5.- Contenido de la tesis	6
CAPÍTULO 2.- ANTECEDENTES DE CENTRALES ELÉCTRICAS	8
2.1.- Introducción	8
2.2.- Definición de Energía Eléctrica.....	9
2.3.- Centrales Eléctricas.....	10
2.4.- Clasificación de centrales eléctricas	11
2.5.- Centrales termoeléctricas	12
2.5.1.- Turbina de vapor	14
2.5.2.- Turbina de gas	15
2.5.3.- Geotérmicas.....	18
	iv

2.5.4.- Nucleoeléctricas.....	21
2.6.- Hidroeléctricas.....	24
2.7.- Centrales Eólicas.....	28
2.8.- Plantas Fotovoltaicas.....	31
2.9.- Centrales Mareomotrices.....	35
CAPÍTULO 3.- MODELADO DE UNA CENTRAL TURBINA DE GAS PARA UNA CAPACIDAD BASE.....	38
3.1.- Introducción.....	38
3.2.- Modelado de una Planta Turbina de Gas.....	41
3.2.1.- Turbina a Gas.....	42
3.2.2.- Caldera de Recuperación.....	46
3.3.- Ciclo Termodinámico Brayton.....	47
3.4.- Rendimiento térmico del ciclo simple Brayton.....	49
3.5.- Expresión del trabajo en una planta de Turbina de Gas.....	52
3.6.- Turbinas de Gas con Recuperación.....	53
CAPÍTULO 4.- CONEXIÓN CENTRAL DE UNA TURBINA DE GAS CON UN CIRCUITO DE CALEFACCIÓN.....	56
4.1.- Introducción.....	56
4.2.- Calor.....	57
4.2.1.- Antecedentes históricos del calor.....	59
4.3.- Calefacción.....	60
4.3.1.- Calefacción central.....	61
4.4.- Circuitos de calefacción.....	63
4.4.1.- Circuitos de calefacción Mono-tubular para radiadores de agua.....	63

4.4.2.- Circuitos de calefacción Bitubular para radiadores de agua.	65
4.4.3.- Circuitos de calefacción Bitubular para radiadores de agua, anillo de Tichelmann.....	67
4.5.- Proyecto a proponer	68
4.5.1.- Compresores	70
4.5.2.- Compresores centrífugos.....	71
4.5.3.- Compresor axial.....	72
4.5.4.- Rendimiento Térmico real de la Turbina de Gas.....	73
4.5.5.- Calefacción por gas	76
4.5.6.- Intercambiador de calor	77
4.6.- Aplicaciones diversas	82
4.6.1.- Ciclo con retroalimentación para generar electricidad	82
4.6.2.- Cogeneración.....	83
CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	85
5.1.- Conclusiones	85
5.2.- Recomendaciones	87
BIBLIOGRAFÍA.....	88

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, presenta el modelado de una unidad de generación de ciclo combinado gas-calefacción. Se comienza con una breve descripción sobre los gases de escape que salen de una turbina de gas después de haber realizado trabajo. Se investigan los antecedentes históricos de las centrales eléctricas existentes, como así mismo, su principio de funcionamiento y operación de cada una de ellas.

Se da a conocer detalladamente las partes que componen a una central eléctrica con turbina de gas, juntamente con las ecuaciones que rigen el rendimiento térmico del ciclo Brayton con la cual opera dicha central. sobre esto nos basamos para realizar un modelado de una central que contiene la capacidad de sostener una cierta demanda eléctrica y además los gases de escape son aprovechados conectándolos a un circuito de calefacción que dará confort en invierno a un cierto grupo de personas.

Se define calefacción y se da a conocer los tipos de circuitos de calefacción existentes, para así, elegir el circuito que más nos convenga según nuestras necesidades. Se elige una unidad de generación la cual es la SGT-A05, extrayendo sus datos de fábrica para realizar los cálculos correspondientes, se escriben las ecuaciones del rendimiento térmico real para una turbina de gas, y se realizan los cálculos para obtener la superficie que dará confort la unidad de ciclo combinado gas-calefacción.

PALABRAS CLAVES

Generación de energía eléctrica, circuito de calefacción, isentrópica, calor, trabajo, ciclo Brayton, compresor, energía eléctrica, gases de escape, turbina de gas, generador eléctrico, caldera, gas natural.

ABSTRACT

In the present research work, the modeling of a gas-heating combined cycle generation unit is presented. It begins with a brief description of the exhaust gases that come out of a gas turbine after having done work. The historical background of existing power plants is investigated, as well as the principle of operation and operation of each of them.

The parts that make up a gas turbine power plant are disclosed in detail, together with the equations that govern the thermal performance of the Brayton cycle with which the power plant operates. on this we base ourselves to perform a modeling of a plant that contains the capacity to sustain a certain electrical demand and also the exhaust gases are used by connecting them to a heating circuit that will give comfort in winter to a certain group of people.

Heating is defined and the types of existing heating circuits are disclosed, in order to choose the circuit that best suits our needs. We choose a generation unit which is SGT-A05, extracting its factory data to perform the corresponding calculations, write the equations of the real thermal efficiency for a gas turbine, and perform the calculations to obtain the surface that will give comfort the gas-heating combined cycle unit.

KEY WORDS

Generation of electric power, heating circuit, isentropic, heat, work, Brayton cycle, compressor, electric power, exhaust gases, gas turbine, electric generator, boiler, natural gas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema básico de una central termoeléctrica convencional.....	13
Figura 2.2 Aeolipilo de Herón.....	15
Figura 2.3 Central térmica.....	19
Figura 2.4 Esquema básico de una central geotérmica.....	20
Figura 2.5 Central nuclear.....	22
Figura 2.6 Central hidroeléctrica.....	26
Figura 2.7 Central eólica.....	31
Figura 2.8 Central fotovoltaica.....	33
Figura 2.9 Celda fotovoltaica.....	34
Figura 2.10 Esquema de una central mareomotriz.....	37
Figura 3.1 Esquema básico de una central termoeléctrica convencional de un ciclo combinado.....	40
Figura 3.2 Un motor de turbina de gas de ciclo abierto.....	42
Figura 3.3 Un motor de turbina de gas de ciclo cerrado.....	43
Figura 3.4 Quemador de bajo NOx.....	46
Figura 3.5 Ciclo Brayton Idealizado.....	48
Figura 3.6 Ciclo Brayton con recuperación perfecta.....	54
Figura 4.1 Durante un proceso adiabático, un sistema no intercambia calor con el exterior.....	58
Figura 4.2 A principios del siglo XIX, se consideraba al calor como un fluido invisible llamado calórico que fluía de los cuerpos más calientes a los fríos.....	59
Figura 4.3 Circuito de calefacción monotubular.....	64
Figura 4.4 Circuito de calefacción Bitubular.....	66
Figura 4.5 Circuito de calefacción Bitubular, anillo de Tichelmann.....	67
Figura 4.6 Ciclo Brayton simple.....	69
Figura 4.7 Compresor centrífugo.....	72
Figura 4.8 Compresor axial.....	73

Figura 4.9 Sistema de calefacción Bitubo	76
Figura 4.10 Intercambiador de calor y gráfica	77
Figura 4.11 Intercambiador térmico.....	77
Figura 4.12 Esquema de un ciclo combinado gas-calefacción.....	79

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

°C	Grados Centígrados
°F	Grados Fahrenheit
CFE	Comisión federal de electricidad
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
COV	Compuestos orgánicos volátiles
C_p	Calor específico
C_{pc}	Calor específico del compresor
C_{Rf}	Calor específico del aire
e	Rendimiento térmico
h_1	Entalpía 1
h_{ce}	Entalpía del compresor
HRSG	Recuperador de calor generador de vapor (Heat Recovery Steam Generator)
HVAC	Sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (Heating Ventilation and Air Conditioning)
Hz	Hertz

k	Constante del aire
Kg	Kilogramo
KJ	Kilojoules
Km	Kilómetro
KW	Kilowatts
\dot{m}	Flujo másico
\dot{m}_{ft}	Flujo másico del aire de la turbina
m	Metro
m_c	Cantidad de vapor en el compresor
m_f	Cantidad de vapor
m_{fr}	Cantidad de vapor real
MP	Material particulado
NOx	Óxido de nitrógeno
P_1	Presión el punto 1
P_{rt}	Potencia real de la turbina
\dot{Q}_{4-5}	Potencia calórica
Q_{5-3}	Calor del punto 5 al 3

q_A	Calor de entrada
Q_{en}	Calor de entrada
q_R	Calor de salida
Seg	Segundo
SOx	Dióxido de azufre
T_1	Temperatura en el punto 1
T_4	Temperatura de salida
T_{ce}	Temperatura del compresor
T_{cs}	Temperatura del compresor
T_{fe}	Temperatura del aire
T_{fs}	Temperatura del aire
V_1	Volumen en el punto 1
ω	Velocidad angular
W_{com}	Trabajo en el compresor
W_{neto}	Trabajo neto
W_{rc}	Trabajo real del compresor

W_{rt}	Trabajo real de la turbina
W_{ru}	Trabajo real útil
W_{tc}	Trabajo teórico del compresor
W_{tu}	Trabajo teórico de la turbina
W_{turb}	Trabajo en la turbina
W_{tt}	Trabajo teórico de la turbina
ZCE	Zona de carga de escape
β	Relación de compresión
η_c	Rendimiento del compresor
η_e	Rendimiento real o efectivo
η_I	Eficiencia del intercambiador
η_t	Rendimiento de la turbina

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Los gases de escape de una turbina de gas

Las turbinas de gas operan bajo el ciclo Brayton, el cual, idealmente, consta de tres fases. En la primera se realiza trabajo para la compresión isoentrópica de un fluido (aire) en un compresor; en la segunda se agrega calor al fluido a presión constante en una cámara de combustión; finalmente, el fluido caliente y comprimido es expandido isoentrópicamente, hasta su presión inicial, en una turbina. Durante la fase de expansión, mucha de la energía impartida al fluido, para comprimirlo y calentarlo, es recuperada en forma de trabajo útil. Sin embargo, una parte importante de esta energía permanece en los gases de escape a una, relativa, alta temperatura y baja presión, no siendo posible recuperarla más allá de la expansión en la turbina. En un ciclo simple, esa energía se pierde cuando los gases de escape de la turbina son descargados a la atmósfera.

Para aproximar la eficiencia Brayton a la eficiencia termodinámica del ciclo de Carnot, es necesario elevar la temperatura de los gases a la entrada de la turbina. Sin embargo, al incrementar esta temperatura se corre el riesgo de provocar el rompimiento prematuro de los álabes y de inducir deformaciones en algunos componentes. A fin de garantizar la integridad y confiabilidad de las piezas ubicadas en el recorrido de los gases calientes, se han desarrollado materiales con propiedades capaces de soportar condiciones extremas y sistemas de enfriamiento que han permitido un incremento considerable en la eficiencia de las turbinas de gas.

En cuanto al impacto ambiental, la principal preocupación que despiertan las turbinas de gas es la emisión de óxidos de nitrógeno. La disociación de las

moléculas de nitrógeno del aire ocurre principalmente por razones: las elevadas temperaturas de combustión y los prolongados tiempos de exposición a tales temperaturas. A fin de controlar y minimizar este problema se han desarrollado diferentes alternativas. Dos de las más importantes son: la inyección de vapor sobrecalentado dentro de la cámara de combustión que, en proporciones y a temperaturas particulares, busca disminuir las temperaturas de combustión, y la combustión secuencial de la mezcla con la que se alcanzan elevadas temperaturas de quemado con cortos tiempos de exposición a tales temperaturas. Se debe indicar, además, que se han logrado grandes avances en el diseño de los combustores, lo que permite en la actualidad un control muy eficiente de las emisiones de NOx.

Desde el punto de vista operativo, las turbinas de gas poseen una gran habilidad para responder de manera rápida a fluctuaciones imprevistas para estar en línea con el sistema, entregando su capacidad nominal en menos de 15 minutos. Esta capacidad las hace insuperables al momento de cubrir picos de demanda y situaciones de emergencia, característica que resulta de gran relevancia para un sistema eléctrico de potencia.

La magnitud de la energía pérdida en un ciclo simple típico puede ser apreciada notando que el aire que entra al compresor es calentado por encima de 1100°C (2012°F) en la cámara de combustión previo a su expansión en la turbina, pero solo es enfriado hasta 540°C (1004°F), aproximadamente, cuando es descargado a la atmósfera después de su expansión en la turbina. Por tanto, la porción de combustible quemado en la cámara de combustión usado para incrementar la temperatura del aire en 540°C es desperdiciada.

Uno de los métodos más exitosos para recuperar dicha energía consiste en transferir el calor sensible de los gases de escape de la turbina a gas al agua de alimentación, comprimida, de un recuperador de calor generador de vapor. El HRSG (de las siglas en inglés Heat Recovery Steam Generator) genera vapor

que es expandido en una turbina de vapor, lo cual produce, consecuentemente, trabajo de flecha adicional.

Dado que las turbinas a vapor operan bajo el ciclo Rankine y que las turbinas de gas obedecen el ciclo Brayton, las unidades que operan con este tipo de configuración reciben el nombre de ciclos combinados.

Para obtener la máxima eficiencia de la turbina de vapor, es deseable generar vapor a la mayor temperatura y presión posible. Sin embargo, a menos que se quemara combustible adicional en el recuperador de calor, la temperatura del vapor generado está limitada por la temperatura de los gases de combustión que entran al recuperador de calor. La máxima presión del vapor está también limitada por la temperatura de los gases de la turbina de gas, ya que la temperatura de saturación del agua se incrementa con su presión. Como solo la porción de calor en los gases de escape que está por encima de la temperatura de saturación del agua es capaz de generar vapor, aunque aumenta la eficiencia de la turbina de vapor, disminuye la cantidad de vapor que puede ser producido en el recuperador de calor.

1.2.- Objetivo

El objetivo de esta investigación es modelar una central térmica (turbina de gas) para producir electricidad, de tal manera que sea un sistema en el cual el calor desperdiciado sea aprovechado para conectar un sistema de calefacción. Dicho sistema está pensado implementarse en zonas marginadas del país, casas residenciales e industrias en donde las temperaturas son muy bajas la mayor parte del año.

1.3.- Justificación

En determinadas zonas geográficas de México como Chihuahua, Durango, Zacatecas, Sonora, entre otros estados, se viven temperaturas extremadamente bajas durante gran parte del año, en donde incluso el agua se congela, los motores de los autos no arrancan. Para mitigar el frío realizan fogatas dentro de los hogares lo cual puede ser peligroso si hay algún descuido, y bien es sabido que al respirar el dióxido de carbono que expide al quemar la leña muy frecuentemente es perjudicial para la salud de las personas, padeciendo de enfermedades crónicas respiratorias y hasta pueden llegar a desarrollar cáncer de pulmón.

La investigación está pensada para los dos sectores tanto público como privado. En el sector público, la empresa suministradora de energía eléctrica Comisión Federal de Electricidad (CFE), realiza proyectos de generación de energía eléctrica con ciclo combinado gas-calefacción en las regiones del país en donde las temperaturas son muy bajas, para aprovechar el gas con temperatura elevada que sale de la turbina y conectarlo a un circuito de calefacción que llegue a los hogares, o bien, en conjunto de un generador de vapor de recuperación de calor (HRSG siglas en inglés), generar el vapor necesario para hacer funcionar una turbina de vapor de baja presión para suministrar energía mecánica a un generador eléctrico, tal como se lleva a cabo en las centrales eléctricas de ciclo combinado, conectando al final de este ciclo el circuito de calefacción.

En el sector privado, actualmente cualquier pequeña, mediana o gran empresa puede generar y abastecerse de su propia energía eléctrica, inclusive comercializarla. Partiendo de aquí, se piensa en una empresa que genere electricidad la consuma y la restante se comercialice a la empresa distribuidora de energía conectándose a la red nacional y además hacer uso de los gases que

salen a altas temperaturas de la turbina para conectarlo a un circuito de calefacción para calentar sus edificios en invierno.

Las turbinas de gas son equipos de generación de energía eléctrica más limpias que usan combustibles fósiles comercialmente disponibles, sin embargo, las turbinas de gas tienen una alta pérdida de calor que se desecha hacia el ambiente, que se traduce por la alta temperatura de salida de los gases de escape por chimenea, entre 500°C a 600°C.

Las turbinas de gas por lo general operan con ciclo abierto, en donde el fluido de trabajo se renueva al final de cada ciclo en vez de recircularse, desperdiciándose grandes cantidades de energía térmica. Un ejemplo de ciclo abierto sucede en los motores de automóvil, los gases de combustión escapan y se reemplazan con nueva mezcla aire-combustible al final de cada ciclo. Es importante mencionar que estas turbinas también pueden operar en un ciclo cerrado lo cual también es denominado ciclo combinado, esta es una de las tecnologías más prometedoras que hay disponibles para producir energía eléctrica de manera económica, limpia para el ambiente y eficiente, mediante la utilización de cualquier combustible fósil económicamente disponible: gas natural, carbón o petróleo.

Típicamente, el funcionamiento de una central de ciclo combinado es algo más complejo que el de las centrales convencionales. En primer lugar, se quema gas natural en una cámara de combustión y se hace pasar por una turbina de gas conectada a un alternador. Los gases calientes que ya fueron utilizados se aprovechan para calentar agua y convertirla en vapor en un recuperador de calor. Este vapor se hace pasar por una segunda turbina conectada a otro alternador, de forma que ambos generan energía eléctrica.

Una planta de energía de ciclo combinado adopta una turbina de combustión con una turbina de vapor, operando ambas en una sola instalación

para una eficiencia máxima. Los gases calientes de escape procedentes de la turbina de combustión en vez de ser ventilados a la atmósfera se canalizan por un intercambiador de calor llamado generador de vapor por recuperación de calor.

1.4.- Metodología

En este trabajo de investigación, iniciaremos con una breve reseña histórica de las centrales eléctricas existentes, así mismo, explicaremos el principio de funcionamiento de cada una de ellas. Enseguida, nos enfocaremos en un modelo de una central turbina de gas de tal forma que genere una potencia eléctrica que satisfaga la demanda de una población o una industria.

Una vez obtenido el modelado de la central eléctrica turbina de gas se buscará el método más adecuado para realizar un ciclo combinado, conectándolo a un circuito de calefacción, de tal modo que se transporte el calor a ciertas distancias haciéndolo llegar a los hogares y/o edificios de una industria, de esta manera estaremos realizando el ciclo combinado Gas-Calefacción.

1.5.- Contenido de la tesis

En la presente investigación se estructura en cinco capítulos los cuales se describen a continuación:

En el Capítulo 1 se hace una introducción de la investigación, se habla sobre los gases que salen de la turbina después de haber realizado trabajo y que se desperdician enviándolos a la atmósfera.

En el Capítulo 2 se describe brevemente los antecedentes históricos de las centrales eléctricas convencionales existentes y las que se encuentran en

desarrollo. Además, se describe de forma general su funcionamiento de cada una de ellas.

En el Capítulo 3 se plantea modelar una central eléctrica con una turbina de gas generando electricidad para una cierta demanda eléctrica, colocándola en un área estratégica y de esa manera aprovechar los gases que salen de la turbina para conectar a un circuito de calefacción que llegará a los hogares y/o edificios de una industria.

En el Capítulo 4 se definirá la conexión que llevará la central eléctrica al circuito, una vez calculada la presión y temperatura en la cual debe salir a la distribución de la energía calorífica.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones de la investigación, así como sugerencias para llevar electricidad y calor a las zonas más marginas y frías de nuestro país.

CAPÍTULO 2.- ANTECEDENTES DE CENTRALES ELÉCTRICAS

2.1.- Introducción

En el presente capítulo se muestra una breve reseña histórica de las centrales eléctricas, así mismo, como el funcionamiento de cada una de ellas dependiendo de la fuente de energía primaria que utiliza para transformarla a energía eléctrica, es decir, las fuentes de generación de energía eléctrica en forma general. De igual manera, se dan a conocer los diferentes tipos de centrales eléctricas que existen y su funcionamiento dependiendo el tipo de generador.

La generación de electricidad, en términos generales, consiste en transformar alguna clase de energía, no eléctrica, sea esta química, mecánica, térmica, etc. en energía eléctrica.

Para la generación industrial se recurre a instalaciones denominadas centrales eléctricas, que ejecutan alguna de las transformaciones citadas. Estas constituyen el primer escalón del sistema de suministro eléctrico. La generación eléctrica se realiza, básicamente, mediante un generador eléctrico; si bien estos no difieren entre sí en cuanto a su principio de funcionamiento, varían en función a la forma en que se accionan [1].

La demanda de energía eléctrica de una ciudad, región o país tiene una variación a lo largo del día. Esta variación es función de muchos factores, entre los que destacan: tipos de industrias existentes en la zona y turnos que realizan en su producción, climatología extrema de frío o calor, tipo de electrodomésticos

que se utilizan más frecuentemente, tipo de calentador de agua que haya instalado en los hogares, la estación del año y la hora del día en que se considera la demanda. La generación de energía eléctrica debe seguir la curva de demanda y, a medida que aumenta la potencia demandada, se debe incrementar la potencia suministrada. Esto conlleva el tener que iniciar la generación con unidades adicionales, ubicadas en la misma central o en centrales reservadas para estos períodos. En general, los sistemas de generación se diferencian por el periodo del ciclo en el que está planificado que sean utilizados; se consideran de base la nuclear y la eólica, de valle la termoeléctrica de combustibles fósiles, y de pico la hidroeléctrica principalmente (los combustibles fósiles y la hidroeléctrica también pueden usarse como base si es necesario) [2].

Dependiendo de la fuente primaria de energía utilizada, las centrales generadoras se clasifican en químicas cuando se utilizan plantas de radioactividad, que generan energía eléctrica con el contacto de esta, termoeléctricas (de carbón, petróleo, gas, nucleares y solares termoeléctricas), hidroeléctricas (aprovechando las corrientes de los ríos o del mar: mareomotrices), eólicas y solares fotovoltaicas. La mayor parte de la energía eléctrica generada a nivel mundial proviene de los dos primeros tipos de centrales reseñados. Todas estas centrales, excepto las fotovoltaicas, tienen en común el elemento generador, constituido por un alternador de corriente, movido mediante una turbina que será distinta dependiendo del tipo de energía primaria utilizada [1].

2.2.- Definición de Energía Eléctrica.

Se denomina energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos (cuando se les pone en contacto por medio de un conductor eléctrico) y obtener trabajo. La energía eléctrica puede

transformarse en muchas otras formas de energía, tales como la energía luminosa o luz, la energía mecánica y la energía térmica.

La energía eléctrica se manifiesta como corriente eléctrica, es decir, como el movimiento de cargas eléctricas negativas, o electrones, a través de un cable conductor metálico como consecuencia de la diferencia de potencial que un generador presente en sus extremos [3].

La energía eléctrica es una forma de energía de transición (ni primaria ni final) extremadamente difundida actualmente y cómodamente debido a sus posibilidades de conversión (calefacción, iluminación, energía mecánica, etc.) y de transporte. Proviene, en general, de la conversión, en centrales, de energía mecánica por medio de generadores (o alternadores).

Cada vez que se acciona un interruptor, se cierra un circuito eléctrico y se genera el movimiento de electrones a través de cable conductor, las cargas que se desplazan forman parte de los átomos del material del cable, que suele ser metálico, ya que los metales (disponen de mayor cantidad de electrones libres que otros materiales) siendo los mejores conductores de electricidad. La mayor parte de la energía eléctrica que se consume en la vida diaria proviene de la red eléctrica a través de tomas llamadas enchufes, a través de los cuales llega la energía suministrada por las compañías eléctricas a los distintos aparatos eléctricos (lavadoras, radio, televisión, etc.) que se desea utilizar, mediante las correspondientes transformaciones [3].

2.3.- Centrales Eléctricas

Uno de los problemas más importantes de la ingeniería es la transformación de las fuentes de energía que ofrece la naturaleza en aquellas formas que sean más fácilmente aprovechables. La energía mecánica es la que se considera más adecuada para satisfacer las necesidades del hombre, sin

embargo, la naturaleza suministra la energía en forma que la mayoría de los casos se requiere una serie de transformaciones antes de contar con la energía mecánica para realizar trabajo.

La energía mecánica se puede obtener por ejemplo a partir de la energía cinética del viento, de la potencia de una caída de agua, de la energía liberada al quemar un combustible fósil, etc. Sin embargo, no es práctico tener una central de energía mecánica para llevar este tipo de energía a los centros de consumo, esto además de ser muy costoso sería sumamente ineficiente. Este problema se ha resuelto mediante el uso de energía eléctrica, ya que esta se puede transmitir y distribuir con menores costos y con menos pérdidas, de lo anterior se infiere la necesidad de tener centrales de energía, llamada centrales o plantas eléctricas, que se puede definir como el conjunto de instalaciones que partiendo de algún tipo de energía están destinadas a la generación de energía eléctrica.

La energía se puede clasificar en:

1. Primaria: Tal como se obtiene de la naturaleza como: petróleo, carbón, gas, etc.
2. Secundaria: Ya transformada como: Energía eléctrica, gasolina, etc.

2.4.- Clasificación de centrales eléctricas

De acuerdo con el tipo de energía primaria para de allí transformarla en energía eléctrica, las centrales se clasifican en:

1. Termoeléctrica
 - De vapor
 - De turbina de gas
 - Geotérmicas
 - Nucleoeléctricas
2. Hidroeléctricas

3. Eólicas

Existen otras alternativas que en el futuro pueden tener mucha importancia, alguna de ellas se espera desarrollarlas a escala industrial a mediados del XXI, dentro de estas futuras alternativas están:

1. Plantas solares térmicas o fotovoltaicas
2. Mareomotrices

2.5.- Centrales termoeléctricas

Las centrales eléctricas son las que utilizan generalmente un combustible como fuente de calor para transformar este calor a energía mecánica y finalmente está en energía eléctrica. Es importante señalar que este tipo de centrales eléctricas son de las más utilizadas en la industria de la generación de la electricidad por su eficiencia, aprovechando los ciclos combinados.

El combustible se quema en la caldera, lo que provoca que se desprenda la energía calorífica que contiene. Ésta se usa para calentar agua y transformarla en vapor a una presión y temperatura muy elevadas. A su vez, el vapor a elevada presión y temperatura transfiere su energía haciendo girar una turbina y un alternador para que éste genere electricidad. La electricidad generada pasa por un transformador para aumentar su tensión y así transportarla a distancia reduciendo las pérdidas en los cables conductores [4].

El vapor que sale de la turbina después de haber cedido en ella su energía se recupera en un elemento llamado condensador para convertirlo de nuevo en agua y así retornarlo a la caldera para empezar un nuevo ciclo de generación de vapor [4].

Sin embargo, el costo de ponerla en marcha es mayor, la cantidad y las características de las emisiones a la atmósfera dependen de factores como el combustible, el tipo y el diseño de la unidad de combustión, las prácticas operacionales, las medidas de control de las emisiones y su estado de mantenimiento (por ejemplo, control primario de la combustión, tratamiento secundario del gas de combustión) y la eficiencia general del sistema.

Las principales emisiones atmosféricas generadas por la combustión de combustibles fósiles (o biomasa) corresponden a dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado (MP), monóxido de carbono (CO) y gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2). Cabe señalar que el dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno son precursores de lluvia ácida. Además, dependiendo del tipo y la calidad del combustible empleado (carbón y petcoke, por ejemplo), el proceso de combustión puede emitir otros contaminantes, tales como metales pesados (mercurio, arsénico, cadmio, vanadio, níquel, etc.), halógenos (como el fluoruro de hidrógeno), hidrocarburos no quemados y otros compuestos orgánicos volátiles (COV) [5].

La figura 2.1 muestra un diagrama elemental de una planta termoeléctrica convencional.

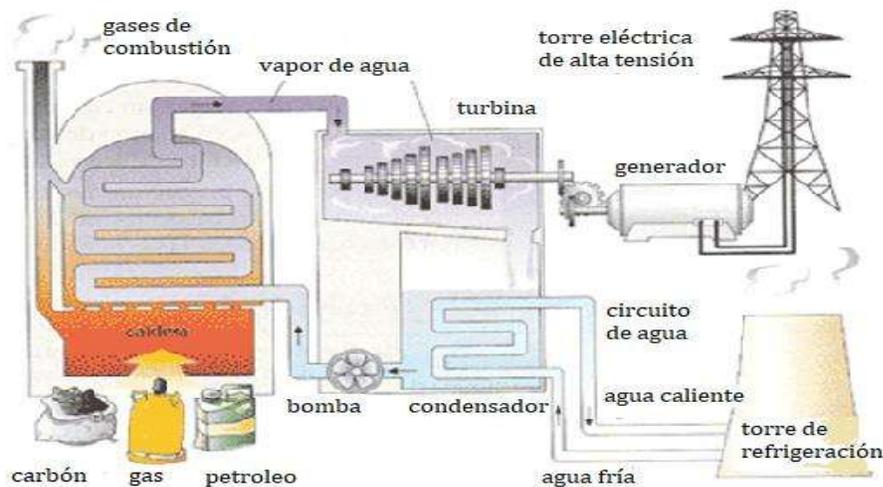


Figura 2.1 Esquema básico de una central termoeléctrica convencional

2.5.1.- Turbina de vapor

Una turbina de vapor es una turbomáquina motora, que transforma la energía de un flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo (el vapor) y el rodete, órgano principal de la turbina, que cuenta con palas o álabes los cuales tienen una forma particular para poder realizar el intercambio energético. Las turbinas de vapor están presentes en diversos ciclos de potencia que utilizan un fluido que pueda cambiar de fase, entre éstos el más importante es el Ciclo Rankine, el cual genera el vapor en una caldera, de la cual sale en unas condiciones de elevada temperatura y presión. En la turbina se transforma la energía interna del vapor en energía mecánica que, típicamente, es aprovechada por un generador para generar electricidad. En una turbina se pueden distinguir dos partes, el rotor y el estator. El rotor está formado por ruedas de álabes unidas al eje y que constituyen la parte móvil de la turbina. El estator también está formado por álabes, no unidos al eje sino a la carcasa de la turbina.

El término turbina de vapor es muy utilizado para referirse a una máquina motora la cual cuenta con un conjunto de turbinas para transformar la energía del vapor, también al conjunto del rodete y los álabes directores [6].

Históricamente, las primeras turbinas de vapor de la que se tiene constancia fueron construidas por Herón de Alejandría alrededor del año 175 A.C., la cual consistía en una esfera metálica con dos toberas de sus polos y orientadas en el mismo sentido por donde escapaba el vapor. La esfera giraba diametralmente, apoyada sobre la caldera por los conductos de entrada del vapor, como se muestra en la figura 2.2.

A través de dos espiras situadas según su eje diametral perpendicular al giro de la esfera, salía vapor, en sentido opuesto a cada una. Este ingenio que

transforma la presión de vapor en un movimiento mecánico constituye la primera turbina de vapor [6].



Figura 2.2 Aeolipilo de Herón

Otra turbina de vapor aparece en 1629, cuando Giovanni Brance experimentó con una rueda de agua modificada, dirigiéndole un chorro de vapor. La rueda giró, pero no tuvo la suficiente potencia como para obtener trabajo útil. Hasta finales del siglo XIX no se encontró ninguna aplicación práctica a la turbina de vapor, por lo tanto, el desarrollo tecnológico de la misma fue nulo. Sin embargo, es a finales del siglo XIX cuando empieza la verdadera historia de la turbina de vapor. El primero en encontrar un aprovechamiento de la turbina de vapor fue el inventor sueco de Laval (1845-1913), quien patentó un desnatador centrífugo impulsado por una turbina de vapor de acción de una sola etapa. En esta turbina el vapor era impelido a una velocidad súper sónica, a través de una tobera convergente-divergente, hacia los álabes del rodete de la turbina [6].

2.5.2.- Turbina de gas

Una turbina de gas es una máquina térmica que transforma la energía química contenida en el combustible en energía mecánica, esa energía mecánica habitualmente se tiene a disposición en un eje, en ese eje podemos conectar

mecánicamente un generador eléctrico, un compresor, una bomba, una hélice de un barco, para aprovechar esta energía mecánica, que ha producido la turbina de gas.

La turbina de gas no debe su nombre al combustible que utiliza puesto que puede utilizar varios, puede utilizar combustibles líquidos, gasóleo, queroseno o puede utilizar su combustible más habitual que es el gas natural. Su nombre debe al fluido que circula a través de la turbina, entra aire, ese aire tiene un proceso de elevación de presión y elevación de temperatura, sale a una temperatura determinada, pero siempre es un fluido gaseoso que se mueve a través de la turbina.

Las turbinas de gas son turbo máquinas que de modo general pertenecen al grupo de máquinas térmicas generadoras y cuya franja de operación va desde pequeñas potencias 5 KW para micro turbinas, hasta 500 MW para los últimos desarrollos.

Una de las principales ventajas que tiene este tipo de generadores es el pequeño peso y volumen en relación con su potencia y la flexibilidad de su operación. Esto hace que sean máquinas cuyo uso para determinadas aplicaciones, especialmente referidas a la electricidad y a la propulsión de buques y aviones esté en claro aumento. Al ser máquinas rotativas presentan una clara ventaja frente a los motores alternativos (motores de pistón) por la ausencia de movimientos alternativos y de rozamientos entre superficies sólidas, lo que se traduce en menores problemas de equilibrio y menores consumos de aceites lubricantes que además no están en contacto con superficies calientes y con productos de combustión, comparadas con las turbinas de vapor. Las turbinas de gas apenas tienen necesidades de refrigeración lo que facilita enormemente su instalación además de su baja operación térmica, lo cual, les permite alcanzar su plena carga en periodos de tiempo muy cortos lo que la hace

ideales para determinadas aplicaciones en las que se requiere variaciones de carga rápidas, regulación de redes o abastecimientos de picos de demanda.

Esta simplicidad comparadas con las turbinas de vapor y con motores alternativos otorga a las turbinas de gas dos ventajas adicionales, un mantenimiento sencillo comparado con otras máquinas térmicas y una elevada fiabilidad, en efecto la reducción en las necesidades de lubricación y refrigeración la continuidad del proceso de combustión y la ausencia de movimientos alternativos hace que la probabilidad de fallos disminuya, una instalación de generación eléctrica basada en una turbina de gas puede alcanzar con facilidad valores de disponibilidad superiores al 95 % y valores de fiabilidad cercanos al 99% si la instalación está bien diseñada, bien construida, bien operada y con un adecuado mantenimiento.

No obstante, también tiene algunos inconvenientes importantes en los que hay que destacar dos, la alta velocidad de rotación y su bajo rendimiento entre el 30 y el 40% comparado contra los motores alternativos diésel, algunos desarrollados alcanzan el 50% de rendimiento o contra las turbinas de vapor que tienen valores desde el 40% siendo estos valores muy típicos y normales. Normalmente se entiende por turbina de gas el conjunto formado por los siguientes elementos, filtro de aire de admisión, compresor responsable de la elevación de presión del fluido de trabajo, sistema de aporte de calor al fluido, elemento esparzo o turbina propiamente dicha, escape, rotor, carcasa, cojinetes, rodamientos y sistemas auxiliares. Sus aplicaciones son muy variadas siendo el más amplio campo de aplicación entre los motores térmicos. Inicialmente se utilizaron para la realización de trabajo mecánico, posteriormente se trasladaron al campo de la aeronáutica como elemento propulsor sobre todo a partir de la segunda guerra mundial, más tarde se utilizaron masivamente como elemento motor para la generación de energía eléctrica, aplicación para la que se ha desarrollado modelos específicos que han tratado de adaptarse a las exigencias de este mercado, la posibilidad de aprovechar el calor de los gases de escape

para producir vapor aprovechable en la industria como energía térmica o para producir más energía eléctrica de los denominados ciclos combinados gas-vapor ha provocado una auténtica revolución en el mercado de la generación eléctrica donde la turbina de vapor había sido la reina indiscutible durante muchos años.

Una turbina de gas tiene partes claramente diferenciadas. La primera parte es el compresor, en el cual se produce la elevación de la presión del gas, esa es la utilizada virtualmente en un compresor de tipo axial, hay turbinas que utilizan otro tipo de compresor, pero el más habitual en casi todos los modelos es un compresor de tipo axial que va a producir esta elevación normalmente con elevaciones de presión que va a ir entre 1–10 o 1-30 estos son rangos más habituales. Se eleva ligeramente la temperatura [7]

2.5.3.- Geotérmicas

En muchos lugares de la Tierra se producen fenómenos geotérmicos que pueden ser aprovechados para generar energía útil para el consumo. Estas fuerzas se desarrollan en el interior de la corteza terrestre, normalmente a profundidades de 50 km, en una franja llamada sima o sial; algunas de sus manifestaciones sobre la superficie son los volcanes activos.

Conforme descendemos hacia el interior de la corteza terrestre se produce un aumento gradual de temperatura, estimado en 1 grado cada 37 metros de profundidad. Sin embargo, en determinadas zonas de nuestro planeta, por ejemplo, en algunas islas volcánicas de las islas Canarias, las altas temperaturas se encuentran a nivel de la superficie. En estos casos, es cuando una instalación geotérmica resulta más rentable.

Para aprovechar la energía geotérmica se recurre a sistemas similares a los empleados en la energía solar con turbina, es decir, calentamiento de un líquido que puede tener distintas aplicaciones, pero que habitualmente se destina

a generar vapor con el que se da impulso a la turbina, que a su vez mueve un generador eléctrico.

Los sistemas geotérmicos producen un rendimiento mayor con respecto a otros sistemas, y además tienen un costo de mantenimiento menor. De hecho, la única pieza móvil de una central geotérmica es el sistema de turbina-generador, y por tanto todo el conjunto tiene una vida útil más larga. Además, la energía utilizada está siempre presente, lo cual apenas implica variaciones, como sucedería en otros sistemas que dependen, por ejemplo, del caudal de un río o del nivel de radiación solar.

El funcionamiento de una central geotérmica es bastante simple: consta de una perforación practicada a gran profundidad sobre la corteza terrestre (unos 5 km), con objeto de obtener una temperatura mínima de 150° C, y en la cual se han introducido dos tubos en circuito cerrado en contacto directo con la fuente de calor, como se muestra en figura 2.3.



Figura 2.3 Central térmica

Desde la superficie se inyecta agua fría a través de uno de los extremos del tubo, la cual se calienta al llegar al fondo formando vapor de agua y regresando a chorro a la superficie a través del otro tubo. En el extremo de éste está acoplada una turbina-generador que suministra la energía eléctrica para su

distribución. El agua enfriada es devuelta de nuevo al interior por el primer tubo para repetir el ciclo.

La figura 2.4 muestra un esquema general de una Central Geotérmica.

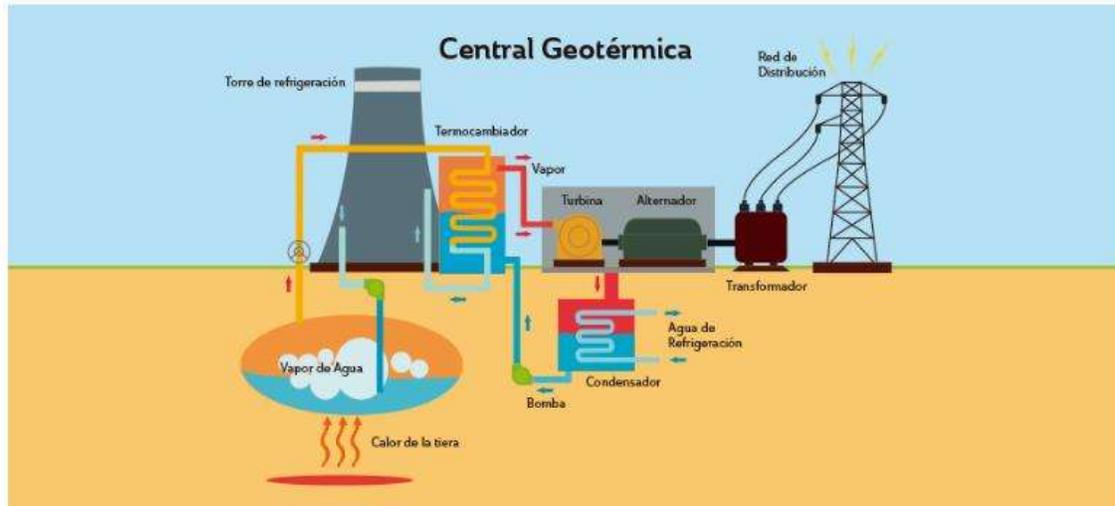


Figura 2.4 Esquema básico de una central geotérmica

A pesar de su sencillez, el sistema está pensado fundamentalmente para aplicaciones que no requieran un suministro de energía a gran escala, debido a las características geotérmicas de las rocas. Al contrario de lo que sucede con los metales, las rocas o la arena no tienen capacidad conductora del calor, es decir, la conservan, por eso si se utilizase una central geotérmica con intención de producir energía a gran escala llegaría un momento en que el proceso se detendría. El motivo, es que la sima del interior de la corteza terrestre donde está el calor aprovechable se va enfriando progresivamente conforme se le inyecta agua fría, y si el régimen de inyección es alto llegará un momento en que la sima ha cedido más calor del que puede recuperar, precisamente por su baja capacidad de conducir la temperatura. Este inconveniente impide el funcionamiento continuo de la central, deteniéndose a determinados intervalos hasta que la roca recupera una temperatura suficiente para reanudar el funcionamiento normal.

En algunas regiones de la tierra este inconveniente no se presenta, porque las altas temperaturas están casi a flor de tierra, lo que permite extender tuberías en horizontal, en vez de en vertical, garantizándose que la recuperación de la temperatura de la roca o de la arena se realice casi a la par que su enfriamiento [8].

2.5.4.- Nucleoeléctricas

Para explicar la historia de la energía nuclear podríamos distinguir tres grandes etapas:

- Estudios científicos físicos y químicos de los elementos.
- El desarrollo de la bomba nuclear durante la Segunda Guerra Mundial.
- Utilización de la energía nuclear en el ámbito civil.

Los estudios científicos engloban todo este período desde que los primeros filósofos griegos empezaron a definir los átomos, hasta el desarrollo de la primera bomba nuclear. En este proceso, diferentes científicos descubrieron la presencia de los electrones, los neutrones y los protones y las propiedades que hacen que un átomo sea más radioactivo que otro.

Durante la Segunda Guerra Mundial EEUU, animado por Albert Einstein, impulsa la primera bomba nuclear. Ésta será la primera vez que se usa la tecnología nuclear fuera del contexto de la investigación. Posteriormente y viendo la peligrosidad de las armas nucleares se empezaron a establecer tratados para regular su desarrollo e impulsar el uso de la energía nuclear en el ámbito civil. Es en este momento, en el que empiezan a aparecer las primeras centrales nucleares para la generación de electricidad [9].

Una central nuclear es una instalación para la generación de energía eléctrica utilizando energía nuclear. Su funcionamiento es similar al de una central térmica o el de una planta solar termoeléctrica: a partir de una fuente de energía se utiliza la termodinámica para obtener calor, con el calor vapor y con el vapor accionar una turbina que generará electricidad. En la figura 2.5 muestra el proceso de funcionamiento de una central nuclear.

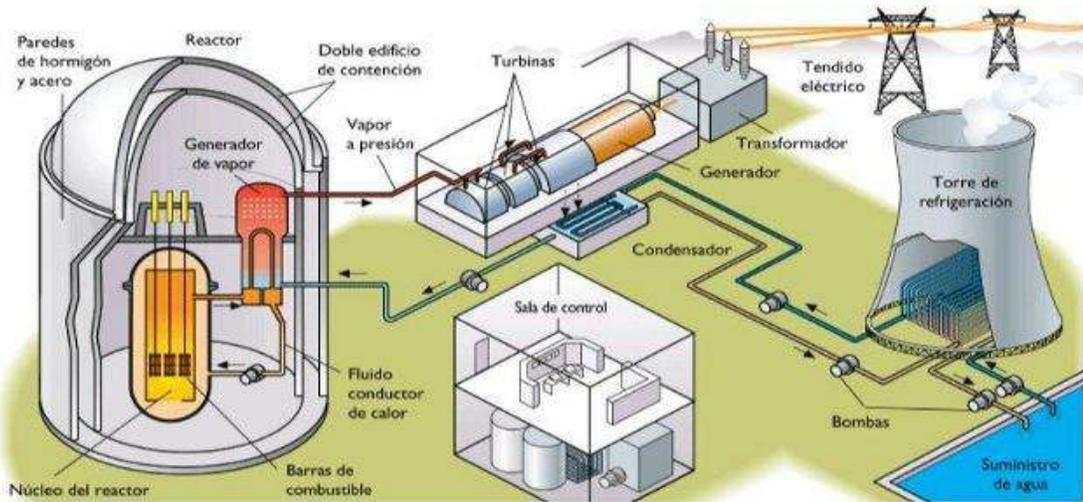


Figura 2.5 Central nuclear

La diferencia entre los diferentes tipos de instalaciones eléctricas está en la fuente de energía: una central nuclear aprovecha el calor liberado en las reacciones de fisión nuclear de determinados átomos, en una central térmica la fuente de calor (energía térmica) proviene de la combustión de uno o más combustibles fósiles (carbón, gas natural, fuel). Finalmente, en las plantas solares termoeléctricas, la fuente de energía es la radiación solar.

Al igual que en una central térmica convencional el calor se utiliza para generar vapor de agua que impulsa una turbina de vapor conectada mecánicamente a un generador eléctrico.

La energía térmica que utiliza la central nuclear para generar energía eléctrica es generada por un reactor nuclear. Dentro del reactor se producen, de

forma controlada, reacciones de fisión en cadena. El elemento que se fisiona, el combustible nuclear, es uranio natural o de uranio enriquecido. El uranio enriquecido es el uranio natural con una proporción del isótopo uranio-235 más alta.

Además del reactor, una central nuclear consta siempre de una turbina de vapor, un alternador, dos o tres circuitos -primario, secundario y terciario- y una o varias torres de refrigeración del fluido condensador, que suele ser agua. La eficiencia total es de entre el 30% y el 40%.

Se suele considerar el tiempo de vida de funcionamiento de una central nuclear en unos treinta años. El principal problema que presentan es la gestión de los residuos nucleares que generan [10].

El principal uso que se le da actualmente a la energía nuclear es el de la generación de energía eléctrica. Las centrales nucleares son las instalaciones encargadas de este proceso.

Prácticamente, todas las centrales nucleares en producción utilizan la fisión nuclear ya que la fusión nuclear actualmente es inviable a pesar de estar en proceso de investigación y desarrollo.

El funcionamiento de una central nuclear es idéntico al de una central térmica que funcione con carbón, petróleo o gas excepto en la forma de proporcionar energía calorífica (calor) en el agua para convertirla en vapor. En el caso de los reactores nucleares este calor se obtiene mediante las reacciones de fisión nuclear de los átomos del combustible nuclear, mientras que en las otras centrales térmicas se obtiene energía térmica mediante la quema de uno o varios combustibles fósiles.

A nivel mundial el 90% de los reactores nucleares de potencia, es decir, los reactores destinados a la generación de energía eléctrica son reactores de

agua ligera (en las versiones de agua a presión o de agua en ebullición). En ingeniería nuclear se denomina agua ligera al agua corriente.

Para hacer funcionar una central nuclear se dispone de una gran variedad de tipos de reactores nucleares. Sin embargo, todos los tipos de reactores nucleares tienen un mismo objetivo: utilizar el calor de las reacciones de fisión nuclear para accionar las turbinas que generan electricidad [11].

2.6.- Hidroeléctricas

La energía hidráulica se basa en aprovechar la caída del agua desde cierta altura. La energía potencial, durante la caída, se convierte en cinética. El agua pasa por las turbinas a gran velocidad, provocando un movimiento de rotación que finalmente, se transforma en energía eléctrica por medio de los generadores. Es un recurso natural disponible en las zonas que presentan suficiente cantidad de agua, y una vez utilizada, es devuelta río abajo. Su desarrollo requiere construir presas, canales de derivación, y la instalación de grandes turbinas y equipamiento para generar electricidad. Todo ello implica la inversión de grandes sumas de dinero, por lo que no resulta competitiva en regiones donde el carbón o el petróleo son baratos. Sin embargo, el peso de las consideraciones medioambientales y el bajo mantenimiento que precisan una vez estén en funcionamiento centran la atención en esta fuente de energía.

La fuerza del agua ha sido utilizada durante mucho tiempo para moler trigo, pero fue con la Revolución Industrial, y especialmente a partir del siglo XIX, cuando comenzó a tener gran importancia con la aparición de las ruedas hidráulicas para la generación de energía eléctrica. Poco a poco la demanda de electricidad fue en aumento. El bajo caudal del verano y otoño, unido a los hielos del invierno hacían necesaria la construcción de grandes presas de contención, por lo que las ruedas hidráulicas fueron sustituidas por máquinas de vapor con en cuanto se pudo disponer de carbón.

La primera central hidroeléctrica se construyó en 1880 en Northumberland, Gran Bretaña. El principal impulsor de la energía hidráulica se produjo por el desarrollo del generador eléctrico, seguido del perfeccionamiento de la turbina hidráulica y debido al aumento de la demanda de electricidad a principios del siglo XX. En 1920 las centrales hidroeléctricas generaban ya una parte importante de la generación total de electricidad. A principios de la década de los noventa, las primeras potencias productoras de energía hidroeléctrica eran Canadá y Estados Unidos [12].

La energía eléctrica no se puede almacenar como tal, debe ser consumida en el mismo instante en el que se genera esto significa que se debe conocer en todo momento la cuantía en la que va a ser requerida, o al menos tener una previsión lo más aproximada posible, para estar en condiciones de generarla. La evolución de la demanda de energía eléctrica en función del tiempo se denomina curva de demanda, presentando máximos y mínimos que corresponden a las horas de mayor y menor consumo, respectivamente, denominados horas punta y horas valle. La forma de la curva se puede generalizar para los distintos días del año, aunque la cifra asociada a los puntos que representan la misma, lógicamente, varía de un día a otro. Independientemente del mes y del día, siempre hay que ajustarse a la demanda y generar, mediante los diferentes tipos de centrales que se disponga, la energía solicitada en cada instante. En este ajuste continuo de la producción a la demanda es necesario disponer de centrales cuya potencia pueda ser fácilmente regulable, con una gran flexibilidad de operación. Las centrales hidroeléctricas presentan estas características jugando un papel muy importante en el conjunto del parque de centrales de generación de energía eléctrica de cualquier país. Son instalaciones con una alta velocidad de respuesta ante los cambios de demanda, lo que quiere decir que en unos minutos (2-3 en los grupos más modernos) pasan de estar paradas a suministrar su potencia nominal. Esto no ocurre con las centrales de combustible fósil o nuclear, que necesitan desde 6-8 horas hasta más de 18, dependiendo de las

condiciones en las que se produzca el arranque de las mismas. Por todo esto, las centrales hidroeléctricas se convierten en instalaciones más adecuadas para cubrir las puntas de demanda, así como para cubrir las bajas imprevistas de otras centrales. La función de una central hidroeléctrica es utilizar la energía potencial del agua almacenada y convertirla, primero en energía mecánica y luego en eléctrica [12].

El aprovechamiento de las fuerzas naturales fue constante preocupación de la humanidad que vio en ellas un medio de aliviar el trabajo muscular con el ahorro consiguiente de las energías del hombre, quien de este modo podría realizar cantidades de trabajos importantes que hubieran precisado abundante mano de obra.

Refiriéndonos a las caídas de las masas de agua, producidas por los desniveles existentes en los cauces por los que aquellas discurren, fueron de antiguo utilizadas para generar energía mecánica por medio de ruedas de paletas y de cajones que, aunque eran artefactos rudimentarios, tenían adecuadas aplicaciones, entre otras, para elevar agua en los riegos, para mover molinos harineros. La figura 2.6 ilustra el esquema de una central hidroeléctrica.

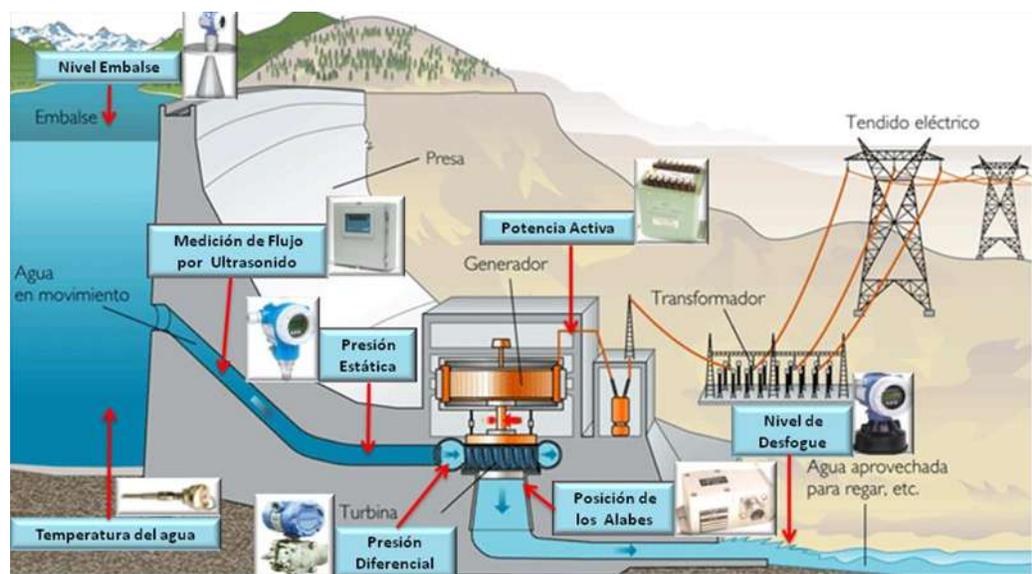


Figura 2.6 Central hidroeléctrica

Desde luego esta energía no es toda útil porque existen pérdidas en la misma con el funcionamiento del receptor y por ello, los antiguos artefactos solamente aprovechaban una reducida fracción de la energía obtenida por la caída del agua.

A medida que la técnica fue progresando, se perfeccionaron los equipos para aprovechar el salto de agua en su generación de energía y con ellos se logró que se perdiese de esta la menor cantidad posible. Anteriormente y con artefactos primitivos se llegaba a perder hasta 70% de la energía potencial, mientras que en la actualidad las turbinas modernas permiten rendimiento del 85 al 91%.

Resulta, que la potencia realmente útil se obtendrá multiplicando la potencia teórica por un coeficiente, menor que la unidad, al cual se le denomina rendimiento.

La función de una central hidroeléctrica es utilizar la energía potencial del agua almacenada y convertirla, primero en energía mecánica y luego en eléctrica. Un sistema de captación de agua provoca un desnivel que origina una cierta cantidad de energía potencial acumulada. El paso del agua por la turbina desarrolla en la misma un movimiento giratorio que acciona el alternador y genera la circulación de la corriente eléctrica [11].

Una planta hidroeléctrica es la que aprovecha la energía hidráulica para generar energía eléctrica. Si se concentra gran cantidad de agua en un embalse, se obtiene inicialmente, energía potencial, la que por la acción de la gravedad adquiere energía cinética o de movimiento pasa de un nivel superior a otro muy bajo, a través de las obras de conducción (la energía desarrollada por el agua al caer se le conoce como energía hidráulica), por su masa y velocidad, el agua aplica un empuje a los álabes de las turbinas, las cuales transforman la energía hidráulica en energía mecánica.

Esta energía mecánica rotacional se aplica a los generadores que se encuentran acoplados a las turbinas, los que la transforman en energía eléctrica, la cual pasa a la subestación contigua o cerca de la planta. La subestación eleva la tensión o voltaje para disminuir las pérdidas en la red de transmisión y que la energía llegue a los centros de consumo con la debida eficiencia y calidad.

Las turbinas pueden ser de varios tipos, según los tipos de centrales:

- **Pelton:** Saltos grandes y caudales pequeños.
- **Francis:** Saltos más reducidos y mayor caudal.
- **Kaplan:** Saltos muy pequeños y caudal muy grande.

La energía hidroeléctrica es una de las más rentables, aunque el costo inicial de construcción es elevado, ya que sus gastos de explotación y mantenimiento son relativamente bajos.

En las plantas hidroeléctricas el caudal de agua es controlado y se mantiene casi constante, transportándola por unos conductos, controlados con válvulas para así adecuar el flujo de agua que pasa por las turbinas, teniendo en consideración la demanda de electricidad, el agua luego sale por los canales de descarga de la planta.

2.7.- Centrales Eólicas

La energía eólica no es algo nuevo, es una de las energías más antiguas junto a la energía térmica. El viento como fuerza motriz se ha utilizado desde la antigüedad. Así, ha movido a barcos impulsados por velas o ha hecho funcionar la maquinaria de los molinos al mover sus aspas. Sin embargo, tras una época en la que se fue abandonando, a partir de los años ochenta del siglo XX este tipo de energía limpia experimentó un renacimiento [13].

La energía eólica crece de manera muy rápida en el siglo XXI, en algunos países más que en otros, sin duda alguna en México existe un gran crecimiento en generar energía eléctrica de esta forma, se estima que para el 2024 el 15 % de la energía eléctrica producida en nuestro país sea por medio de centrales eólicas. El auge del aumento de parques eólicos se debe a las condiciones favorables de viento, sobre todo en Oaxaca, el alto volumen del recurso aprovechable indica que México es un país dotado con un gran potencial para el uso de energía eólica.

La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan desde zonas de alta presión atmosférica hacia zonas adyacentes de menor presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

Los vientos se generan a causa del calentamiento no uniforme de la superficie terrestre debido a la radiación solar; entre el 1 y el 2 % de la energía proveniente del Sol se convierte en viento. Durante el día, los continentes transfieren una mayor cantidad de energía solar al aire que las masas de agua, haciendo que este se caliente y se expanda, por lo que se vuelve menos denso y se eleva. El aire más frío y pesado que proviene de los mares, océanos y grandes lagos se pone en movimiento para ocupar el lugar dejado por el aire caliente.

Para poder aprovechar la energía eólica es importante conocer las variaciones diurnas, nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo, la entidad de las ráfagas en espacios de tiempo breves, y los valores máximos ocurridos en series históricas de datos con una duración mínima de 20 años. Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que este alcance una velocidad mínima que depende del aerogenerador que se vaya a utilizar pero que suele empezar entre los 3 m/s (10

km/h) y los 4 m/s (14,4 km/h), velocidad llamada "cut-in speed", y que no supere los 25 m/s (90 km/h), velocidad llamada cut-out speed.

La energía del viento se aprovecha mediante el uso de máquinas eólicas o aeromotores capaces de transformar la energía eólica en energía mecánica de rotación utilizable, ya sea para accionar directamente las máquinas operatrices o para la generación de energía eléctrica. En este último caso, el más ampliamente utilizado en la actualidad, el sistema de conversión, que comprende un generador eléctrico con sus sistemas de control y de conexión a la red, es conocido como aerogenerador. En estos la energía eólica mueve una hélice y mediante un sistema mecánico se hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador, que genera energía eléctrica. Para que su instalación resulte rentable, suelen agruparse en concentraciones denominadas parques eólicos.

Una turbina eólica o aerogenerador es una máquina que transforma la energía del viento en energía mecánica mediante unas aspas oblicuas unidas a un eje común. El eje giratorio puede conectarse a varios tipos de maquinaria, sea para moler grano (molinos), bombear agua o generar electricidad. Cuando se usa para producir electricidad se le denomina generador de turbina de viento. Las máquinas movidas por el viento tienen un origen remoto, siendo las más antiguas las que funcionaban como molinos [14].

La energía eólica es una energía renovable que utiliza la fuerza del viento para generar electricidad. El principal medio para obtenerla son los aerogeneradores, correspondientes a "molinos de viento" de tamaño variable que transforman con sus aspas la energía cinética del viento en energía mecánica. La energía del viento puede obtenerse instalando los aerogeneradores tanto en suelo firme como en el suelo marino. En la figura 2.7 se ilustra un parque eólico en suelo firme.

El potencial eólico se calcula en función de la distribución de la velocidad del viento. Los aerogeneradores situados en sitios donde las medias de velocidad del viento son de 8 metros por segundo en la altura del eje del rotor generan entre el 75% y el 100% más de electricidad que aquellas donde el viento sopla a una velocidad media de 6 metros por segundo. Un aerogenerador de 1.8 MW situado en un buen emplazamiento genera más de 4.7 millones de unidades de electricidad cada año. Esto es suficiente para satisfacer las necesidades de más de 1,500 hogares [15]

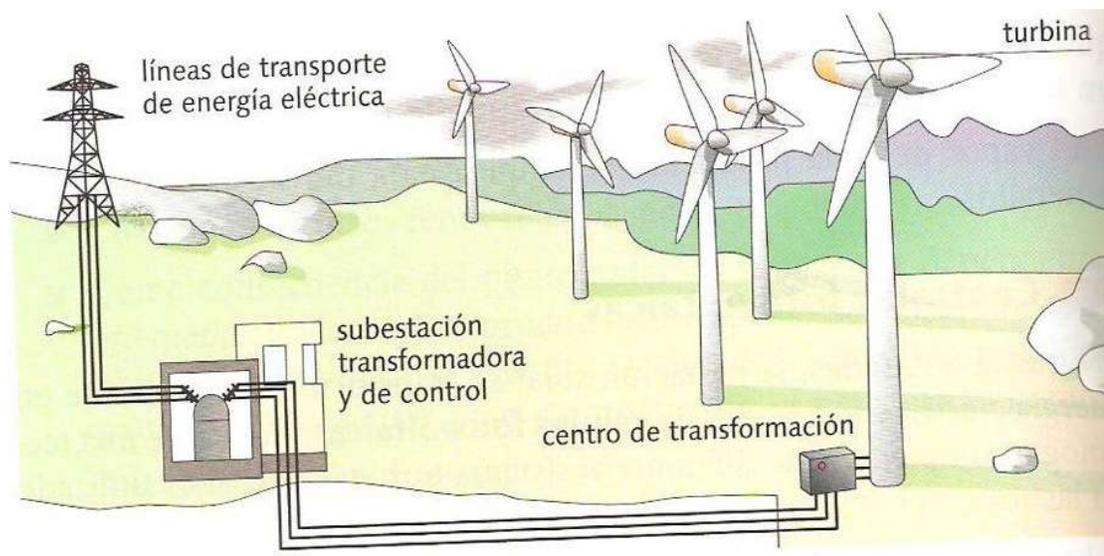


Figura 2.7 Central eólica

2.8.- Plantas Fotovoltaicas

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica, o bien mediante una deposición de metales sobre un sustrato denominada célula solar de película fina.

El efecto fotovoltaico fue reconocido por primera vez unos diez años antes, en 1839, por el físico francés Alexandre-Edmond Becquerel, pero la primera

célula solar no se fabricó hasta 1883. Su creador fue Charles Fritts, quien recubrió una muestra de selenio semiconductor con pan de oro para formar la unión. Este primitivo dispositivo presentaba una eficiencia menor del 1%, pero demostró de forma práctica que, efectivamente, generar electricidad mediante luz era posible. Los estudios realizados en el siglo XIX por Michael Faraday, James Clerk Maxwell, Nikola Tesla y Heinrich Hertz sobre inducción electromagnética, fuerzas eléctricas y ondas electromagnéticas, y sobre todo los de Albert Einstein en 1905, proporcionaron la base teórica al efecto fotoeléctrico, que es el fundamento de la conversión de energía solar a electricidad [13].

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que genera electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica, o bien mediante una deposición de metales sobre un sustrato denominada célula solar de película fina.

Este tipo de energía se usa principalmente para generar electricidad a gran escala a través de redes de distribución, aunque también permite alimentar innumerables aplicaciones y aparatos autónomos, así como abastecer refugios de montaña o viviendas aisladas de la red eléctrica. Debido a la creciente demanda de energías renovables, la fabricación de células solares e instalaciones fotovoltaicas ha avanzado considerablemente en los últimos años. Comenzaron a producirse en masa a partir del año 2000, cuando medioambientalistas alemanes y la organización Eurosolar obtuvo financiación para la creación de diez millones de tejados solares.

La energía fotovoltaica no emite ningún tipo de contaminación durante su funcionamiento, contribuyendo a evitar la emisión de gases de efecto invernadero. Su principal desventaja consiste en que su producción depende de la radiación solar, por lo que si la célula no se encuentra alineada perpendicularmente al Sol se pierde entre un 10-25 % de la energía incidente.

Debido a ello, en las plantas de conexión a red se ha popularizado el uso de seguidores solares para maximizar la generación de energía eléctrica. La generación se ve afectada asimismo por las condiciones meteorológicas adversas, como la falta de sol, nubes o la suciedad que se deposita sobre los paneles. Esto implica que para garantizar el suministro eléctrico es necesario complementar esta energía con otras fuentes de energía gestionables como las centrales basadas en la quema de combustibles fósiles, la energía hidroeléctrica o la energía nuclear [13].

Cuando un semiconductor dopado se expone a radiación electromagnética, se desprende del mismo un fotón, que golpea a un electrón y lo arranca, creando un hueco en el átomo. Normalmente, el electrón encuentra rápidamente otro hueco para volver a llenarlo, y la energía proporcionada por el fotón, por tanto, se disipa en forma de calor. El principio de una célula fotovoltaica es obligar a los electrones y a los huecos a avanzar hacia el lado opuesto del material en lugar de simplemente recombinarse en él: así, se producirá una diferencia de potencial y por lo tanto tensión entre las dos partes del material, como ocurre en una pila. En la figura 2.8 se ilustra las partes de que conforman a una central fotovoltaica.

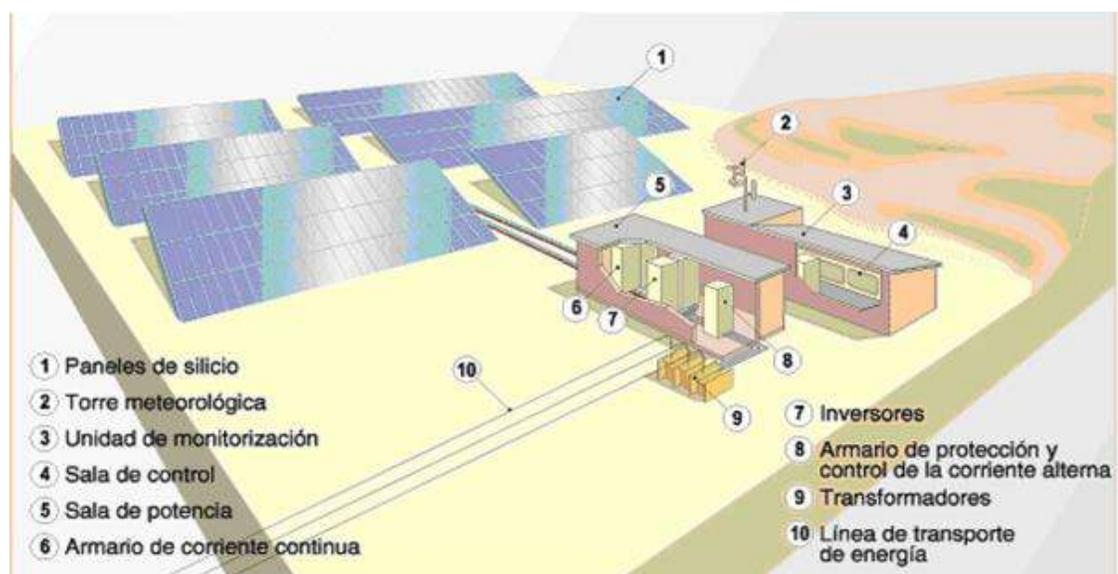


Figura 2.8 Central fotovoltaica

Para ello, se crea un campo eléctrico permanente, a través de una unión pn, entre dos capas dopadas respectivamente, p y n. En las células de silicio, que son mayoritariamente utilizadas, se encuentran, por tanto:

- La capa superior de la celda, que se compone de silicio dopado de tipo n. En esta capa, hay un número de electrones libres mayor que en una capa de silicio puro, de ahí el nombre del dopaje n, negativo. El material permanece eléctricamente neutro, ya que tanto los átomos de silicio como los del material dopante son neutros: pero la red cristalina tiene globalmente una mayor presencia de electrones que en una red de silicio puro.
- La capa inferior de la celda, que se compone de silicio dopado de tipo p. Esta capa tiene por lo tanto una cantidad media de electrones libres menor que una capa de silicio puro. Los electrones están ligados a la red cristalina que, en consecuencia, es eléctricamente neutra, pero presenta huecos, positivos (p). La conducción eléctrica está asegurada por estos portadores de carga, que se desplazan por todo el material.

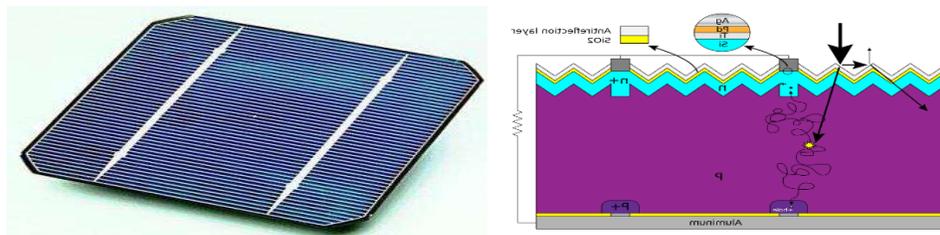


Figura 2.9 Celda fotovoltaica

En el momento de la creación de la unión pn, los electrones libres de la capa n entran instantáneamente en la capa p y se recombinan con los huecos en la región p. Existirá así durante toda la vida de la unión, una carga positiva en la región n a lo largo de la unión (porque faltan electrones) y una carga negativa en la región en p a lo largo de la unión (porque los huecos han desaparecido); el conjunto forma la Zona de Carga de Espacio (ZCE) y existe un campo eléctrico

entre las dos, de n hacia p. Este campo eléctrico hace de la ZCE un diodo, que sólo permite el flujo de corriente en una dirección: los electrones pueden moverse de la región p a la n, pero no en la dirección opuesta y por el contrario los huecos no pasan más que de n hacia p.

En funcionamiento, cuando un fotón arranca un electrón a la matriz, creando un electrón libre y un hueco, bajo el efecto de este campo eléctrico cada uno va en dirección opuesta: los electrones se acumulan en la región n (para convertirse en polo negativo), mientras que los huecos se acumulan en la región dopada p (que se convierte en el polo positivo). Este fenómeno es más eficaz en la ZCE, donde casi no hay portadores de carga (electrones o huecos), ya que son anulados, o en la cercanía inmediata a la ZCE: cuando un fotón crea un par electrón-hueco, se separaron y es improbable que encuentren a su opuesto, pero si la creación tiene lugar en un sitio más alejado de la unión, el electrón (convertido en hueco) mantiene una gran oportunidad para recombinarse antes de llegar a la zona n. Pero la ZCE es necesariamente muy delgada, así que no es útil dar un gran espesor a la célula. Efectivamente, el grosor de la capa n es muy pequeño, ya que esta capa sólo se necesita básicamente para crear la ZCE que hace funcionar la célula. En cambio, el grosor de la capa p es mayor: depende de un compromiso entre la necesidad de minimizar las recombinaciones electrón-hueco, y por el contrario permitir la captación del mayor número de fotones posible, para lo que se requiere cierto mínimo espesor [13].

2.9.- Centrales Mareomotrices

La energía mareomotriz es la que se obtiene aprovechando las mareas, transformando la energía mareomotriz en energía eléctrica.

Las mareas, es decir, el movimiento de las aguas en el mar, producen una energía que se transforma en electricidad en las centrales mareomotrices. Se aprovecha la energía liberada por el agua de mar en sus movimientos de ascenso

y descenso de las mareas (flujo y refluo). El sistema consiste en aprisionar el agua en el momento de la alta marea y liberarla, obligándola a pasar por las turbinas durante la bajamar. Cuando la marea sube, el nivel del mar es superior al del agua del interior. Abriendo las compuertas, el agua pasa de un lado a otro del dique, y sus movimientos hacen que también se muevan las turbinas de unos generadores de corriente situados junto a los conductos por los que circula el agua.

Cuando, por el contrario, la marea baja, el nivel de la mar es inferior porque el movimiento del agua es en sentido contrario que el anterior, pero también se aprovecha para generar electricidad.

La energía mareomotriz forma parte del grupo de las energías renovables y se obtiene a través de las energía cinética y potencial de las mareas es decir, aprovecha la fuerza de las olas del mar y de los cambios entre las mareas alta y baja que convierten su variación en energía eléctrica.

Mares y océanos cubren las tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta. En la superficie los vientos provocan las olas que pueden alcanzar hasta 12 metros de altura, 20 metros debajo de la superficie, las diferencias de temperatura engendran corrientes; por último, tanto en la superficie como en el fondo, la conjugación de las atracciones solar y lunar. Las mareas, es decir, el movimiento de las aguas del mar, producen una energía que se transforma en electricidad en las centrales mareomotrices.

Se aprovecha la energía liberada por el agua de mar en sus movimientos de ascenso y descenso. Ésta es una de las nuevas formas de generar energía eléctrica.

El sistema consiste en aprisionar el agua en el momento de la alta marea y liberarla, obligándola a pasar por las turbinas durante la bajamar y en algunas

centrales también se aprovecha el proceso contrario para generar energía, la figura 2.9 muestra un esquema de una central mareomotriz. La energía gravitatoria terrestre y lunar, la energía solar y la eólica dan lugar, respectivamente, a tres manifestaciones de la energía del mar: mareas, gradientes térmicos y olas. De ella se podrá extraer energía mediante los dispositivos adecuados.

La energía de las mareas o mareomotriz se aprovecha embalsando agua del mar en ensenadas naturales y haciéndola pasar a través de turbinas hidráulicas.

La leve diferencia de temperaturas llega entre la superficie y las profundidades del mar (gradiente térmico), constituye una fuente de energía llamada mareomotérmica.

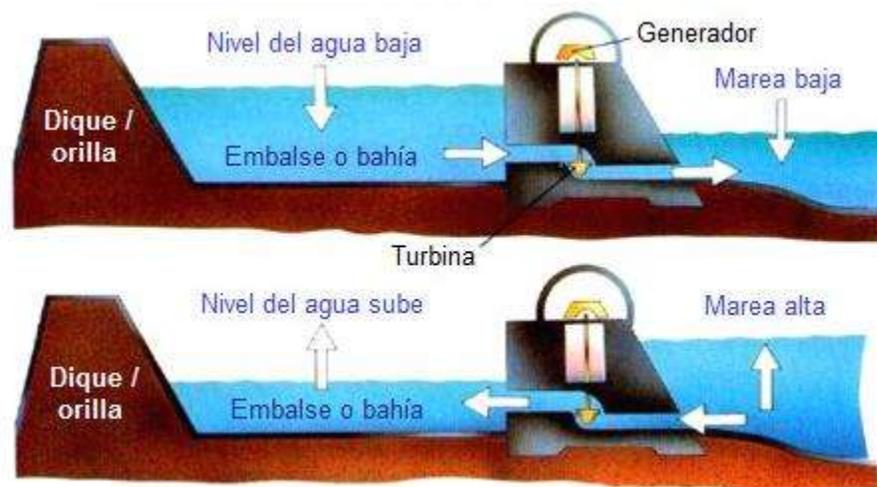


Figura 2.10 Esquema de una central mareomotriz

La energía de las olas es producida por los vientos y resulta muy irregular. Ello ha llevado a la construcción de múltiples tipos de máquinas para hacer posible su aprovechamiento [16].

CAPÍTULO 3.- MODELADO DE UNA CENTRAL TURBINA DE GAS PARA UNA CAPACIDAD BASE

3.1.- Introducción

La creciente necesidad de proveer potencia eléctrica y calorífica al sector comercial, público y residencial ha derivado en la creación de sistemas combinados de potencia y calor basados en turbinas de gas. En particular, estos sistemas serían de gran uso en localidades aisladas de nuestro territorio nacional. En este capítulo, se pretende modelar una central de turbina a gas para una capacidad base con fines de utilizar un ciclo combinado gas-calefacción.

Se denomina ciclo combinado a la integración de dos o más ciclos termodinámicos de generación de potencia de modo que interactúen para obtener una mejora del rendimiento. El antecedente más antiguo se remonta a principios del siglo, atribuyéndose la idea a Charles Bradley [17]. En la práctica, la denominación queda coloquialmente restringida al ciclo compuesto por un ciclo de gas y uno de vapor Brayton y Rankine respectivamente, quedando desechadas otras alternativas como puede ser el ciclo de mercurio-agua o ciclos triples gas-agua-amoniaco.

Básicamente, la integración de los dos ciclos combinados consiste en un intercambio de calor de forma que el ciclo de mayor temperatura cede el calor no convertido en trabajo al de baja, es decir, se aprovecha parte del calor que se cedería al ambiente para producir trabajo en el segundo ciclo. Un análisis desde el Primer Principio de la Termodinámica explica mediante balances de energía

por qué aumenta el rendimiento al combinar dos ciclos. Por otro lado, con el segundo principio se establece el límite del valor del rendimiento que se podría alcanzar y se cuantifican las pérdidas que aparecen en ambos ciclos y en el intercambio de calor entre ellos. De esa manera permite mejorar el rendimiento global al conocerse las principales fuentes de pérdidas.

Existen numerosas posibilidades de combinar entre sí dos ciclos que evolucionan a diferentes temperaturas. El principio termodinámico de la combinación está basado en la estrategia de aumentar la temperatura máxima que corresponde al ciclo de baja temperatura y disminuir la temperatura mínima del ciclo de alta temperatura. Es fácil demostrar que el rendimiento de esas instalaciones combinadas es mejor que el de cada una de las plantas que las componen por separado.

Una planta de ciclo combinado implica la existencia casi siempre de una turbina de gas, una caldera y una turbina de vapor. Los ciclos combinados de turbina de gas y vapor como el que se observa en la Figura 3.1, aprovechan parte de la energía térmica de los gases de escape del ciclo Brayton, que de otro modo sería residual, en una caldera de recuperación de calor para obtener vapor destinado a la producción de potencia en un ciclo Rankine.

Básicamente, se trata de generar electricidad a partir de la combustión de un gas o de fuel. Para el circuito aire-gases, los gases provenientes de la combustión se envían a la turbina que gira como consecuencia del paso de los gases por sus álabes. Esta energía mecánica mueve el alternador que va unido a la turbina de gas transformando esa energía en energía eléctrica.

A la salida de la turbina, los gases de escape, a temperaturas superiores a los 500 °C, han perdido temperatura y presión, pero aún contienen la suficiente energía como para que valga la pena aprovecharla en la caldera de recuperación de calor. Esta caldera actúa como un intercambiador de calor a contracorriente

donde el gas calienta un grupo de tubos por donde circula agua o vapor cuya energía se aprovecha en la turbina de vapor que a su vez acciona un alternador. La energía obtenida en estas instalaciones puede ser utilizada, además de la generación eléctrica, para calefacción a distancia y para la obtención de vapor de proceso.

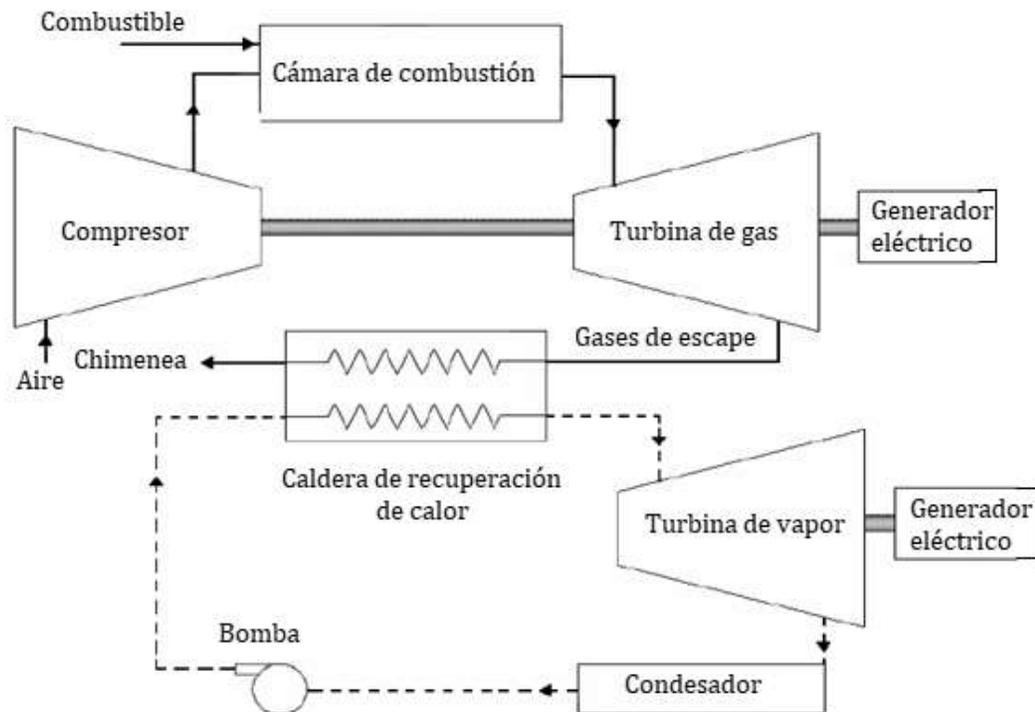


Figura 3.1 Esquema básico de una central termoeléctrica convencional de un ciclo combinado

La unión de los dos ciclos permite producir más energía que un ciclo abierto y, por supuesto, con un rendimiento energético mayor. De esta forma, el rendimiento supera el 55%, cuando una turbina de gas rara vez supera el 40%, los valores normales están en torno al 35%.

Los aumentos de potencia y rendimiento de los ciclos combinados han estado muy ligados a los de la turbina de gas, ya que es el que configura el ciclo inicial y, por ello, la nueva temperatura máxima del ciclo. La complejidad del ciclo crece cuando se pretende mejorar el rendimiento, lo que se justifica tanto más

cuanto mayor es el tamaño de la planta. Los sistemas más complejos tienen tres niveles de presión en la caldera, con un recalentamiento intermedio y refrigeración de álabes de turbina de gas con agua o vapor procedente de la caldera de recuperación de calor. En potencias menores se emplean alternativas menos complejas como los ciclos de dos niveles de presión sin recalentamiento.

Las turbinas de gas son las más recientes, y difieren de las de vapor en el sentido de que se realiza combustión dentro de la máquina. Por lo tanto, el fluido de trabajo son gases de combustión. Las mayores diferencias están en las presiones y temperaturas de trabajo de estas máquinas.

En las turbinas de vapor, la temperatura máxima oscila entre los 500 a 600°C, en las turbinas de gas en cambio, la temperatura de ingreso de los gases a la turbina es de unos 1000°C para las de uso industrial e incluso llega a los 1300°C para turbinas de gas de uso aeronáutico. Las presiones máximas son de unos 35 bares para turbinas de vapor, y entre 4 y 2 bares para turbinas de gas. Las altas presiones de admisión requieren de una construcción robusta para las turbinas de vapor, en cambio las turbinas de gas son de construcción más liviana.

La razón de emplear vapor como fluido de trabajo se debe a la elevada energía disponible por unidad de kg de fluido de trabajo. Para dos turbinas, una de vapor y otra de gas con la misma potencia de salida se tiene que el gasto másico de la turbina de vapor es tres veces menor que el de la turbina de gas.

3.2.- Modelado de una Planta Turbina de Gas

La Planta Turbina de Gas objeto del presente trabajo, está pensado para sector público, industrial y residencial, el combustible que quemará es gas natural, tanto en la turbina de gas como en el quemador de post-combustión.

3.2.1.- Turbina a Gas

Es un conjunto de equipos turbina-compresor axiales dispuestas de forma tal que su funcionamiento convierte el poder calorífico del combustible utilizado en energía mecánica, la cual se utiliza para mover un generador, convirtiendo ésta en energía eléctrica. Las dos principales áreas de aplicación de las turbinas de gas son la propulsión de aviones y la generación de energía eléctrica.

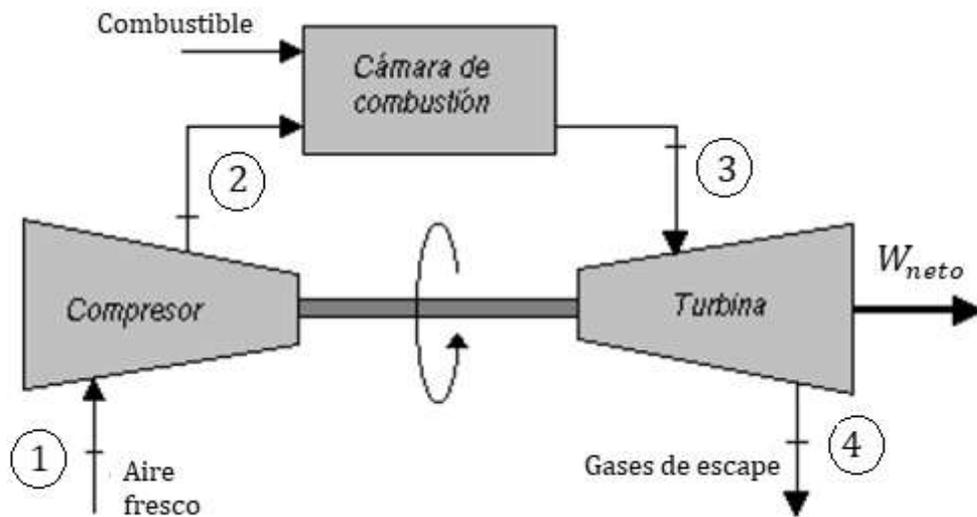


Figura 3.2 Un motor de turbina de gas de ciclo abierto

Las turbinas de gas usualmente operan en un ciclo abierto, como muestra la figura 3.2. Aire fresco en condiciones ambiente se introduce dentro del compresor donde su temperatura y presión se eleva. El aire a alta presión va a la cámara de combustión donde el combustible se quema a presión constante. Luego los gases resultantes a alta temperatura entran a la turbina, donde se expanden hasta la presión atmosférica, de tal forma que producen potencia. Los gases de escape que salen de la turbina se expulsan hacia fuera (no se recirculan), por ello el ciclo se clasifica como un ciclo abierto. Este ciclo de turbina de gas abierto puede modelarse como un ciclo cerrado, del modo que se muestra en la figura 3.3, mediante las suposiciones de aire estándar.

En este caso los procesos de compresión y expansión permanecen iguales, pero el proceso de combustión se sustituye por un proceso de adición de calor a presión constante de una fuente externa, y el proceso de escape se reemplaza por uno de rechazo de calor a presión constante hacia el aire ambiente. El ciclo ideal que el fluido de trabajo experimenta en este ciclo cerrado es el ciclo Brayton, que está integrado por cuatro procesos internamente reversibles:

- 1-2 Compresión isoentrópica (en un compresor).
- 2-3 Adición de calor a presión constante.
- 3-4 Expansión isoentrópica (en una turbina).
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante.

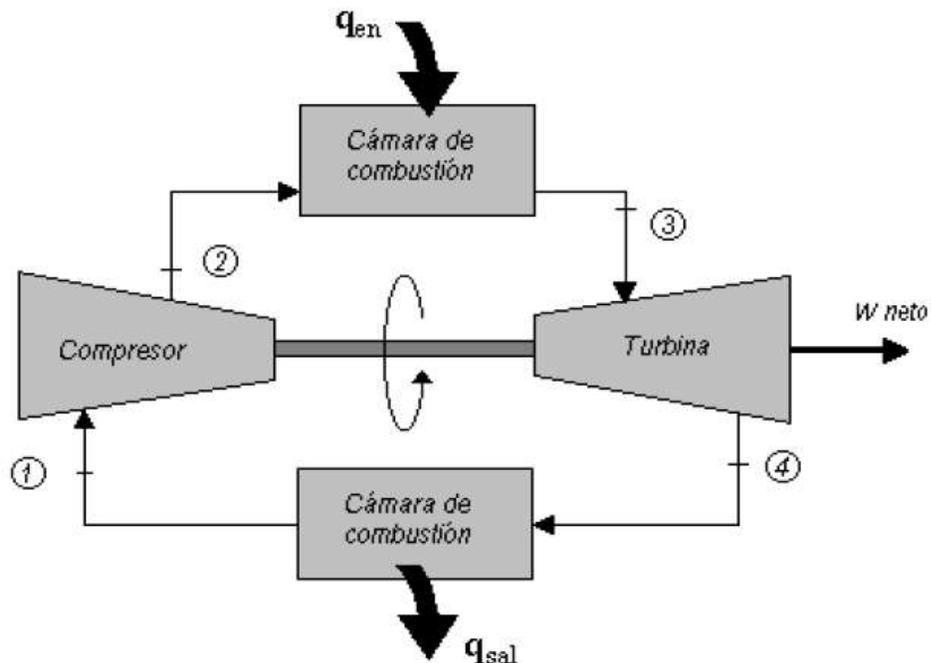


Figura 3.3 Un motor de turbina de gas de ciclo cerrado

El fluido de trabajo en ciclo cerrado entra al intercambiador de calor de temperatura elevada en el estado 2, donde se le agrega energía a un proceso de presión constante, hasta que alcanza la temperatura elevada del estado 3. Entonces, el fluido entra a la turbina y tiene lugar una expansión isoentrópica,

produciendo cierto trabajo. El fluido sale de la turbina al estado 4 y pasa a ser enfriado, en un proceso a presión constante, en el intercambiador de calor de baja temperatura, de donde sale al estado 1, listo para entrar al compresor, y el ciclo se repite.

a) Sistema de filtrado de aire de combustión

La calidad del aire de combustión es un factor muy importante para un buen funcionamiento de la turbina de gas. Para garantizar dicha calidad del aire, se instala un filtro de aire que tiene la función de eliminar las partículas pesadas y finas presentes en el mismo y que producen erosión de los alabes y precipitaciones sobre ellas.

b) Sistema de enfriamiento de aire de combustión

Para aumentar las prestaciones de la turbina, y en particular su potencia y su rendimiento, se instala un enfriador que consiste en un tramo de conducto después del filtro, donde el aire experimenta un descenso de temperatura. Siendo el compresor una máquina volumétrica, este descenso de temperatura da lugar a un caudal másico mayor debido al aumento de la densidad del aire dando un incremento de la potencia entregada por la máquina. Otra razón, es que el trabajo realizado por un compresor por unidad de masa de aire es menor cuando la temperatura de entrada es menor, lo que incrementa la potencia y rendimiento del equipo.

c) Compresor de aire

El compresor comprime el aire entrante hasta cerca de 5 o 6 veces la presión atmosférica. Generalmente en turbinas grandes, se utilizan compresores axiales, en lugar de los compresores radiales o centrífugos. Se comprime el aire

pues la combustión del aire comprimido y del combustible es más eficiente que la combustión del aire sin comprimir y del combustible.

d) Cámara de combustión

En ella tiene lugar la combustión del gas de combustión junto con el aire. Debido a las altas temperaturas que pueden alcanzarse en la combustión y para no reducir demasiado la vida útil de los componentes de la cámara, se trabaja con un alto exceso de aire, con lo que se consigue reducir la temperatura de la llama y refrigerar las partes más calientes de la cámara.

El quemador es uno de los dispositivos más importantes de un sistema de combustión, y debe satisfacer las condiciones necesarias para lograr una buena combustión. El diseño o selección del quemador debe realizarse de acuerdo a la forma, dimensiones y temperaturas de la cámara de combustión, el tipo de combustible y exceso de aire requerido.

La cámara de combustión está compuesta por unos quemadores de bajo NOx y bajo nivel de ruido. Un ejemplo de estos quemadores se muestra en la figura 3.4. Este quemador puede alcanzar niveles de NOx inferiores a 15 ppm, esto se logra con una adecuada geometría del quemador, combustión en dos etapas y una adecuada mezcla de los gases de combustión. La primera etapa de combustión se realiza con una mezcla rica de aire primario-gas natural con la finalidad de evitar la formación de componentes de NOx térmico debido a las altas temperaturas que alcanza la llama, en la segunda etapa los productos de la combustión son forzados a recircular con el fin de tener una mezcla homogénea con un aire secundario para así realizar la segunda etapa de combustión, y lograr completar el proceso de combustión con bajas emisiones de NOx.

El combustible usado en el sistema de generación de vapor es el gas natural, el cual está constituido principalmente por metano, el más simple y ligero

de todos los hidrocarburos. Junto con el metano, el gas natural contiene también etano, propano, y pequeña cantidad de nitrógeno.

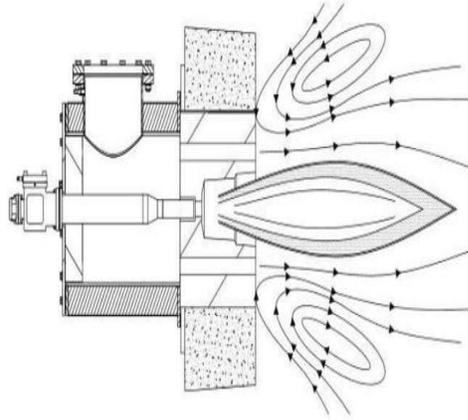


Figura 3.4 Quemador de bajo NOx

e) Turbina de gas

En la turbina, la energía contenida en los gases de combustión en forma de presión y temperatura elevada se convierte a potencia mecánica en forma de rotación de un eje y gran parte de esta potencia se absorbe por el compresor.

Los gases de combustión que entran a la turbina a elevadas temperaturas y presión pasan a través de las ruedas de la turbina y salen por la sección de gases de escape, después son enviados a la caldera de recuperación.

3.2.2.- Caldera de Recuperación

La energía en forma de calor de los gases calientes que proceden de la turbina de gas se transfiere a los circuitos de agua-vapor a través de los intercambiadores de calor en el HRSG. El régimen de transferencia de calor predominante en el HRSG es la convección forzada, la cual ocurre entre las superficies fijas y el flujo de gases del escape de la turbina sobre la superficie de los tubos. La convección forzada es gobernada por la temperatura y velocidad de

los gases, temperatura final del vapor, temperatura inicial del vapor, la presión de operación y el área superficial. La temperatura y presión de vapor se definen en base a los parámetros de diseño de la turbina de vapor. El área superficial es establecida durante la fase de diseño del HRSG a fin de lograr las condiciones de vapor final.

La convección forzada es mejorada a través del uso de superficies extendidas y velocidad superficial adecuada de los gases. Mientras que la superficie extendida en el HRSG se logra usando tubos aleteados que absorben la energía calorífica del flujo de gas por convección. El calor no se almacena en las aletas, sino que se transfiere por conducción a las paredes externas del tubo, de la pared externa hacia la interna también se transfiere por conducción y finalmente se transfiere el calor por convección desde la superficie interna de los tubos hacia el agua o vapor que fluye en su interior.

3.3.- Ciclo Termodinámico Brayton

El Ciclo Brayton es un proceso cíclico asociado generalmente a una turbina a gas. Al igual que otros ciclos de potencia de combustión interna, el ciclo Brayton es un sistema abierto, aunque para un análisis termodinámico es conveniente asumir que los gases de escape son reutilizados en el ingreso, permitiendo el análisis como sistema cerrado.

Un motor Brayton está compuesto por tres componentes:

- Un compresor
- Un quemador (o cámara de combustión)
- Una turbina

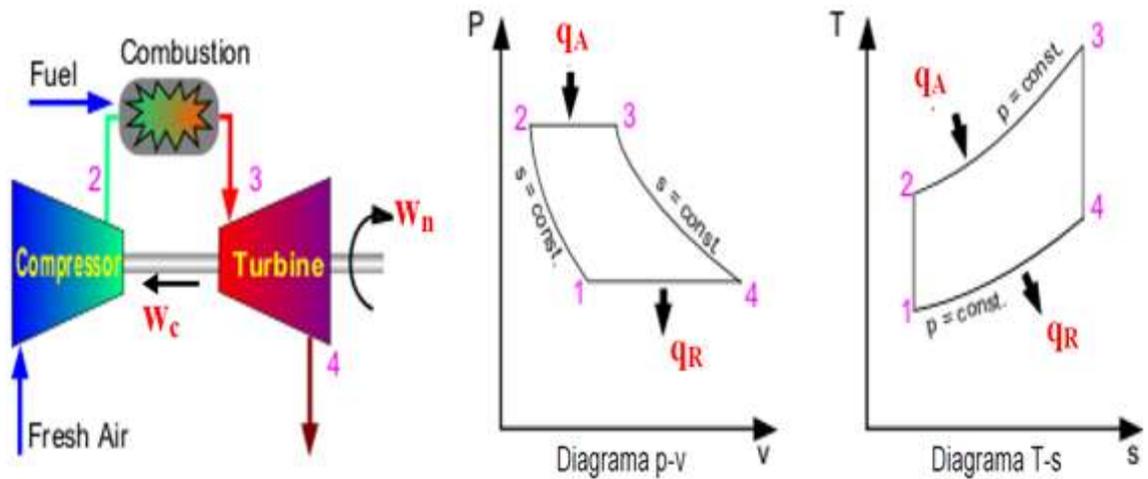


Figura 3.5 Ciclo Brayton Idealizado

Proceso y descripción de la figura 3.5:

1-2 Compresión isoentrópica del aire que se introduce en la cámara de combustión del motor.

2-3 Combustión a presión constante del combustible inyectado en la cámara de combustión.

3-4 Expansión isoentrópica en la sección de la turbina. Ésta es la parte del ciclo que hace el trabajo positivo.

4-1 Calor a presión constante es evacuado en el aire.

El aire ambiente se introduce dentro de compresor, donde se presuriza en un proceso teóricamente isoentrópica. El aire comprimido entonces ingresa a través de una cámara de combustión, en donde se quema un combustible, calentando ese aire en un proceso a presión constante, puesto que la cámara está abierta para el flujo de entrada y salida. El aire caliente, presurizado cede entonces su energía, al expandirse en una turbina (o la serie de turbinas), otro

proceso teóricamente isoentrópico. Una parte del trabajo extraído por la turbina se utiliza para accionar el compresor.

Desde ya ni la compresión ni la expansión pueden ser realmente isoentrópicos, las pérdidas de energía a través del compresor y la turbina representan fuentes inevitables de las ineficacias en el funcionamiento.

En general, el incremento de la relación de compresión es la manera más directa de aumentar la salida de energía total de un Sistema de Brayton.

3.4.- Rendimiento térmico del ciclo simple Brayton

El rendimiento del ciclo de Brayton de aire estándar está dado por:

$$e = \frac{q_A - q_R}{q_A} \quad (3.1)$$

$$e = 1 - \frac{q_R}{q_A}$$

Considerando que:

$$q = C_p \Delta T$$

Se tendrá entonces:

$$e = 1 - \frac{C_p (T_4 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)}$$

$$e = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

Dividiendo todos los términos de la fracción por T_1

$$e = 1 - \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{\left(\frac{T_3}{T_1} - \frac{T_2}{T_1}\right)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1}\right) \quad (3.2)$$

Pero según la figura 3.5 diagrama T-s para la transformación adiabática de compresión entre 1 y 2 se tiene:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.3)$$

y

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

También de la misma figura se tiene:

$$P_1 = P_4 \quad y \quad P_2 = P_3$$

Por lo tanto:

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1}$$

O lo que es lo mismo:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$$

O sea, también:

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

Sustituyendo en (3.2):

$$e = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (3.4)$$

O también:

$$e = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.5)$$

Pero se sabe por termodinámica que:

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.6)$$

Sustituyendo (3.6) en (3.5), se llega a:

$$e = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}}$$

Si se llama grado o relación de compresión a:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1}$$

Se tiene:

$$e = 1 - \frac{1}{(\beta)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (3.7)$$

De (3.7) se deduce fácilmente que el rendimiento térmico del ciclo ideal puede aumentarse si se incrementa la relación de compresión β , en la práctica β no puede aumentarse más allá de ciertos límites ya que a presiones muy elevadas las pérdidas en el compresor resultan demasiado elevadas y, además, los materiales actuales no pueden soportar los esfuerzos a que se ven sometidos debido a las altas presiones y temperaturas al operarse en estas condiciones.

3.5.- Expresión del trabajo en una planta de Turbina de Gas

Si se desprecian diferencias de energía cinética y potencial, de la primera ley de la termodinámica es fácil deducir la expresión del trabajo consumido por el compresor.

El trabajo neto durante el ciclo está dado por:

$$W_{neto} = W_{turb} - W_{comp}$$

Donde:

$$W_{comp} = h_1 - h_2 \quad \text{por unidad de masa} \quad (3.8)$$

O también se puede escribir de la siguiente forma:

$$W_{comp} = C_p(T_1 - T_2) \quad (3.9)$$

Y el trabajo desarrollado en la turbina es:

$$W_{turb} = C_p(T_3 - T_4) \quad (3.10)$$

Donde C_p es el calor específico, el trabajo es por unidad de masa.

En el trabajo útil en el ciclo ideal es la suma algebraica de los trabajos del compresor y la turbina. Los valores obtenidos para el compresor son negativos y positivos para la turbina. Por lo tanto, el trabajo útil es:

$$W_{neto} = W_{turb} - W_{comp} = C_p(T_3 - T_4) - C_p(T_1 - T_2)$$

$$W_{neto} = C_p(T_3 - T_4 + T_2 - T_1) \quad (3.11)$$

3.6.- Turbinas de Gas con Recuperación

Como ya se mencionó anteriormente, es posible mejorar la eficiencia del ciclo Brayton simple precalentando el aire que sale del compresor antes de que ingrese a la cámara de combustión con los gases calientes que salen de la turbina (gases de escape), lo que permite un menor consumo de combustible. En la figura 3.6 se muestra un ciclo de Brayton con recuperación perfecta, es decir que idealmente el calor absorbido por el aire que sale del compresor es igual al calor que ceden los gases de escape de la turbina.

Para este ciclo el trabajo está dado por:

$$W_{neto} = C_p(T_3 - T_4) - C_p(T_1 - T_2) \quad (3.12)$$

y

$$Q_{ent} = Q_{5-3} = C_p(T_3 - T_4) \quad (3.13)$$

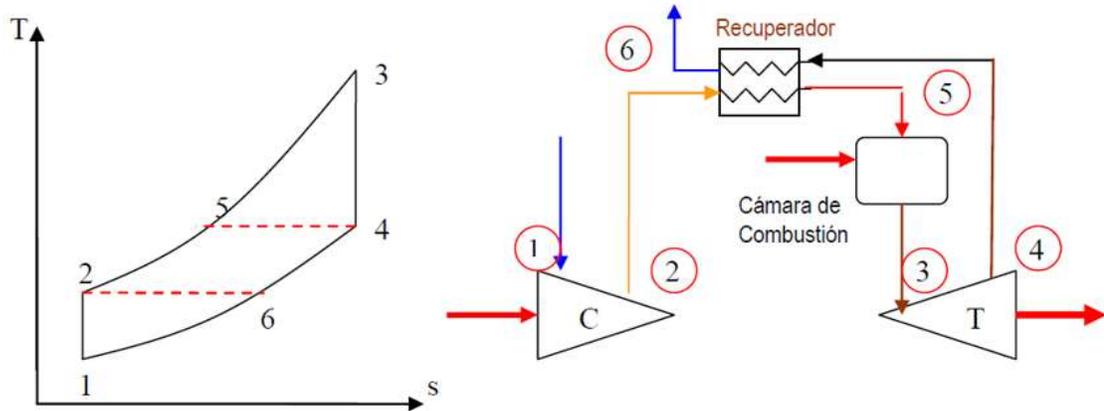


Figura 3.6 Ciclo Brayton con recuperación perfecta

Pero además para el caso de recuperación perfecta (ideal), $T_4 = T_5$ y, por tanto:

$$Q_{ent} = Q_{5-3} = C_p(T_3 - T_4) \quad (3.14)$$

En consecuencia, la eficiencia del ciclo está dada por:

$$e = \frac{C_p(T_3 - T_4) - C_p(T_1 - T_2)}{C_p(T_3 - T_4)} = \frac{(T_3 - T_4) - (T_1 - T_2)}{(T_3 - T_4)}$$

Reordenando adecuadamente tenemos

$$e = 1 - \frac{(T_2 - T_1)}{(T_3 - T_4)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}{T_3 \left(1 - \frac{T_4}{T_3} \right)}$$

$$e = 1 - \frac{T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{T_3 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

Además $P_2 = P_3$ y $P_1 = P_4$ por lo que la ecuación anterior resulta:

$$e = 1 - \frac{T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{T_3 \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = 1 - \frac{T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{T_3 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}$$

Finalmente

$$e = 1 - \frac{T_1}{T_3} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 1 - \frac{T_1}{T_3} (\beta)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3.15)$$

CAPÍTULO 4.- CONEXIÓN CENTRAL DE UNA TURBINA DE GAS CON UN CIRCUITO DE CALEFACCIÓN

4.1.- Introducción

La búsqueda de confort climático es una necesidad que ha preocupado desde siempre. La tecnología y las investigaciones han conducido a desarrollar equipos que funcionen de manera diversa para conseguir estos objetivos, pero también aprovechando lo que la naturaleza ofrece.

A través del tiempo, el hombre siempre ha buscado calentarse en climas fríos y enfriar o refrescarse en climas cálidos, para lograr el confort. En el caso del calentamiento, primero lo hizo por medio del descubrimiento y uso del fuego y después utilizando vestimentas de piel de animales o de telas hechas de diferentes materiales, como algodón, seda, etcétera. En lo referente al enfriamiento, primero fue mediante el uso del hielo y ventilación natural, y después con la invención y aplicación de aire acondicionado (AA), gracias a Willis Carrier en 1902.

Los edificios en climas extremadamente fríos no han quedado de lado, como lo demuestran las viviendas de los esquimales, que funcionan como sistemas aislantes y evita que el calor interno se pierda. En el caso del enfriamiento, se tiene como ejemplos el enfriamiento evaporativo en el desierto de Egipto, las torres de viento en la arquitectura musulmana, el muro Trombe, en sus inicios como sistema de calentamiento de aire, y más recientemente para la descarga el calor, evitando el efecto de la inercia térmica.

Estas estrategias son conocidas como sistemas pasivos de climatización, pero con el paso del tiempo y el avance de la tecnología, han aparecido y fomentado la utilización del sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado HVAC (siglas del inglés, *Heating, Ventilation and Air Conditioning*) artificiales de los edificios, también conocidos como activos para la climatización. En México y gran parte del mundo, la energía utilizada para ponerlos en operación es del origen fósil.

4.2.- Calor

El **calor** se define como la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas (o entre un sistema y el exterior) debido a una diferencia de temperatura. Es decir, una interacción de energía será calor sólo si ocurre debido a una diferencia de temperatura. Entonces se deduce que no puede haber ninguna transferencia de calor entre dos sistemas que se hallan a la misma temperatura.

Varias frases de uso común como flujo de calor, adición de calor, rechazo de calor, absorción de calor, eliminación de calor, ganancia de calor, pérdida de calor, almacenamiento de calor, generación de calor, calentamiento eléctrico, calentamiento mediante resistencias, calentamiento por fricción, calentamiento por gas, calor de reacción, liberación de calor, calor específico, calor sensible, calor latente, calor de desecho, calor del cuerpo, calor de proceso, sumidero de calor y fuente de calor, no son congruentes con el estricto significado termodinámico de calor, término cuyo uso se limita a la transferencia de energía térmica durante un proceso. Sin embargo, estas frases tan arraigadas en el vocabulario de científicos y personas comunes generalmente no producen malentendidos, ya que por lo común son interpretadas apropiadamente y no de manera literal. (Además, no existen alternativas aceptables para algunas de estas frases.) Por ejemplo, se entiende que “calor corporal” significa el contenido de energía térmica de un cuerpo. De igual modo, “flujo de calor” se interpreta

como la transferencia de energía térmica no como el flujo de una sustancia similar a un líquido llamada calor. Aunque incorrecta, esta última interpretación fue la base de la teoría calórica, la cual dio origen a la frase. Asimismo, la transferencia de calor hacia un sistema se conoce como adición de calor mientras que rechazo de calor es la transferencia hacia afuera. Quizá haya una razón termodinámica para ser tan reacio en sustituir calor por energía térmica y es que el primero requiere menos tiempo y esfuerzo que el segundo para decirlo, escribirlo y entenderlo.

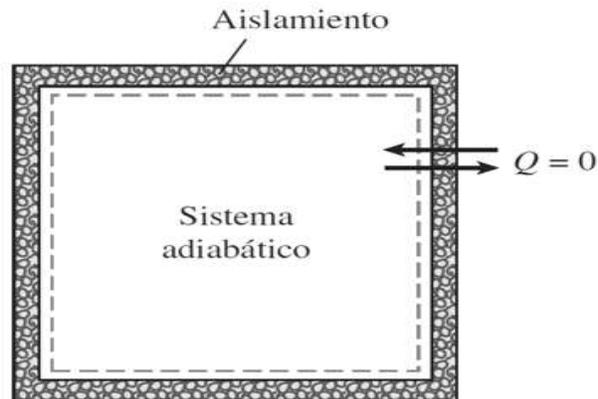


Figura 4.1 Durante un proceso adiabático, un sistema no intercambia calor con el exterior

Un proceso durante el cual no hay transferencia de calor se denomina proceso adiabático (figura 4.1). El término adiabático proviene de la palabra griega adiabatos, que significa “no pasar”. Hay dos maneras en que un proceso puede ser adiabático: el sistema está bien aislado de modo que sólo una cantidad insignificante de calor cruza la frontera, o bien, tanto el sistema como el exterior están a la misma temperatura y por lo tanto no hay fuerza impulsora (diferencia de temperatura) para la transferencia de calor. Hay que distinguir entre un proceso adiabático y uno isotérmico: aunque no hay transferencia de calor durante un proceso adiabático, otros medios como el trabajo pueden cambiar el contenido de energía y, en consecuencia, la temperatura de un sistema. [18]

4.2.1.- Antecedentes históricos del calor

El calor siempre se ha percibido como algo que produce una sensación de calidez, por lo que se podría pensar que su naturaleza fue una de las primeras cosas que la humanidad entendió. No obstante, a mediados del siglo XIX se llegó a una verdadera comprensión física sobre la naturaleza del calor, gracias al desarrollo en ese tiempo de la teoría cinética, la cual considera a las moléculas como diminutas esferas que se encuentran en movimiento y que por lo tanto poseen energía cinética. De esta manera, el calor se define como la energía relacionada con el movimiento aleatorio de átomos y moléculas. A pesar de que entre el siglo XVIII y principios del XIX se sugirió que el calor es la manifestación del movimiento a nivel molecular, la opinión prevaleciente sobre el calor hasta la mitad del siglo XIX se basó en la teoría calórica propuesta en 1789 por el químico francés Antoine Lavoisier (1744-1794). Esta teoría sostiene que el calor es una sustancia llamada **calórico** similar a un fluido que no tiene masa, es incoloro, inodoro e insípido y que puede pasar de un cuerpo a otro (figura. 4.2). Cuando se añadía calórico a un cuerpo, se incrementaba su temperatura; cuando se extraía, entonces disminuía. Cuando un cuerpo ya no podía contener más calórico, de modo similar a cuando en un vaso con agua ya no es posible disolver más sal o azúcar, se decía que el cuerpo estaba saturado con calórico. Esta interpretación dio lugar a los términos líquido saturado y vapor saturado que aún se usan en la actualidad.

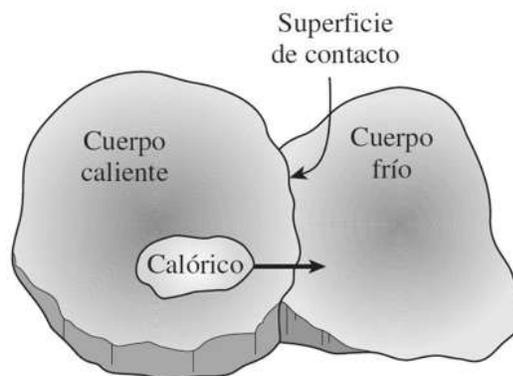


Figura 4.2 A principios del siglo XIX, se consideraba al calor como un fluido invisible llamado calórico que fluía de los cuerpos más calientes a los fríos

La teoría del calórico experimentó críticas inmediatamente después de su introducción. Sostenía que el calor es una sustancia que no podía ser creada ni destruida; sin embargo, se sabía que el calor podía ser generado de modo indefinido al frotar entre sí las manos o dos trozos de madera. En 1798, el estadounidense Benjamin Thompson (conde Rumford) (1754-1814) demostró en sus artículos que el calor se genera en forma continua por rozamiento. Muchos otros pusieron en duda la validez de la teoría del calórico, pero fueron los cuidadosos experimentos del inglés James P. Joule (1818-1889) publicados en 1843, los que finalmente convencieron a los escépticos de que el calor no era una sustancia, así que se desechó la teoría del calórico. A pesar de ser abandonada por completo a mediados del siglo XIX, esta teoría contribuyó en gran medida al desarrollo de la termodinámica y la transferencia de calor.

El calor se transfiere mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación. La **conducción** es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia a las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción entre partículas. La **convección** es la transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente que se encuentra en movimiento, y tiene que ver con los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido. La **radiación** es la transferencia de energía debida a la emisión de ondas electromagnéticas (o fotones).

4.3.- Calefacción

La calefacción es un sistema que tiene como función calentar el interior de las casas o edificios cuando el clima está frío, un sistema de calefacción siempre es requerido para pasar el invierno, aunque en tiempos remotos se utilizaba el fuego para calentar el hogar, pero este ha sido desplazado por este sistema, pero en algunos hogares aún se utilizan las famosas chimeneas para calentar la habitación. Se puede decir que existen cuatro tipos de calefacción que son: De

caldera con radiadores de agua, De caldera con suelo radiante, Calefacción eléctrica por acumulación, Calefacción eléctrica por sistemas directos.

Ahora bien, las calefacciones con radiadores de agua pueden ser tanto colectivas como individuales, la diferencia es que en las colectivas el coste de la instalación es menor al de las calderas individuales, al igual que su combustible que es más barato, el rendimiento de las calderas grandes es mucho mayor que las calderas individuales y los contadores permiten adaptar las necesidades a cada vivienda. Por otra parte; las individuales pueden ser tanto de condensación como estándar, la diferencia está en que la de condensación su nivel de rendimiento es superior, lo que lleva a un 25% de ahorro. Otro tipo de caldera es la de suelo radiante, en esta son sustituidos los radiadores por tubos que son colocados en el suelo de la casa. Lo bueno de este tipo de calefacción es que ahorra mucho, ya que solo se debe de calentar el agua a 40 grados para que funcione el sistema, pero el tiempo de calentado del hogar tarda mucho. La calefacción eléctrica por acumulación posee unos acumuladores que calientan el material refractado mediante electricidad aprovechando las horas nocturnas. La calefacción eléctrica por sistemas directos son los convectores y los radiadores, estos son adecuados para casas pequeñas que no cuentan con los sistemas los sistemas de calefacción colectivo [19].

4.3.1.- Calefacción central

En los sistemas de calefacción central un solo centro calorífico calienta muchas habitaciones o un edificio entero. Este sistema ya lo utilizaban los romanos, pero en el siglo XIX aún se usaba muy poco: solo algunos sistemas de agua caliente en Inglaterra. En 1835 se perfeccionó el primer sistema central óptimo, que utilizaba aire caliente y se instaló de forma generalizada en Estados Unidos. Los sistemas de vapor se desarrollaron hacia el año 1850. Los sistemas de calefacción central actuales suelen distribuir calor de una caldera central a un edificio o a un grupo de ellos. Los sistemas más extensos suelen funcionar con

vapor o agua caliente. Este sistema se utiliza además en muchas viviendas, en casi todos los edificios de oficinas, hoteles y en grandes superficies como centros comerciales o grandes almacenes. Las calderas de estos sistemas utilizan combustibles como fuel-oil, gas o carbón. Cuando se quema el combustible se calientan las paredes metálicas de la caldera, y el calor se transfiere al agua, vapor o aire. La mayoría de las calderas son de funcionamiento automático, controladas por termostatos situados en las habitaciones que se van a calentar. Las que funcionan con fuel-oil o gas sólo precisan el control de los quemadores para regular el calor, pero los que funcionan con combustibles sólidos requieren un mantenimiento mayor. Precisan la admisión de combustible adicional y la eliminación de cenizas del alimentador o la parrilla. La cámara de combustión y la caldera están situados en un recinto aislado.

Los dispositivos que transfieren el calor que genera la caldera central a las habitaciones son los radiadores y convectores. Los radiadores consisten en una serie de rejillas o bloques de hierro forjado que presentan una gran superficie para disipar más el calor. Los convectores consisten en una red de tubos de un reducido espesor, de acero o de metales no ferrosos. Esta red se coloca en los recintos de manera que permita la circulación del aire, y efectúan el proceso de calentamiento por convección más que por radiación. Los almacenes, industrias y fábricas suelen llevar este tipo de convectores, que incorporan unos ventiladores eléctricos que desvían el aire a la superficie radiante. Aunque el calor se transfiere al menos en parte por radiación en todos los métodos de calefacción directa, el término “calor radiante” se aplica a los sistemas en los que el suelo, paredes o techo se utilizan como superficies radiantes. En estos casos se colocan tuberías de vapor o agua caliente en las paredes y techos durante la construcción del edificio. Los sistemas eléctricos funcionan a través de paneles que contienen los elementos caloríficos. Estos paneles se introducen en las paredes, el techo o suelo de las habitaciones. Los sistemas radiantes proporcionan un reparto uniforme de calor a un costo comparativamente bajo. Su rendimiento es alto, ya

que calientan las superficies desde su interior y proporcionan confort sin elevar en exceso la temperatura del aire [20].

4.4.- Circuitos de calefacción.

Circuito de calefacción para radiadores de agua, su diseño tiene influencia directa sobre el funcionamiento del sistema de calefacción, confort, consumo de energía y la vida de la bomba de la caldera, directos beneficiados o perjudicados por el diseño del circuito de calefacción.

A continuación, se muestran 3 tipos de circuitos de calefacción individual, los más comunes en la industria. Generalmente el circuito de calefacción está empotrado y oculto a la vista, bajo el suelo de la vivienda pasan desapercibidos.

4.4.1.- Circuitos de calefacción Mono-tubular para radiadores de agua.

Se trata de un circuito de calefacción para distribución hidráulica muy habitual en viviendas edificadas en la década de los años 80 y principios de los años 90.

El circuito de calefacción parte de la caldera hasta el primer radiador, el más cercano a la caldera y a partir de éste primer radiador se produce la conexión hidráulica de la ida y el retorno al resto de radiadores del circuito de calefacción existiendo un orden de 1º, 2º, 3º radiador, respecto de la ubicación de la caldera. El retorno del 1º radiador del circuito hace de colector de impulsión (ida) para llegar a la entrada del 2º radiador y así sucesivamente hasta llegar al último radiador del circuito de calefacción, lugar desde donde se hace el retorno general a la caldera para repetir el ciclo y aportar calor al agua que hace circular la bomba de la caldera por el circuito de calefacción.

El diseño Mono-tubular en el circuito de calefacción plantea problemas del tipo:

Toda la potencia térmica desarrollada por la caldera para calentar el circuito de calefacción tiene que pasar obligatoriamente por el primer radiador, siendo necesario dimensionar el circuito de radiadores de manera que los radiadores al principio son más pequeños para a continuación ir aumentando de tamaño a medida que se alejan de la caldera.

En las viviendas con este tipo de circuito de calefacción mono-tubular que todavía mantienen los paneles de chapa originales puede comprobarse este detalle, pequeños paneles al principio del circuito y más grandes a medida que nos alejamos de la caldera.

En la figura 4.3 muestra un diagrama del circuito de calefacción Monotubular.

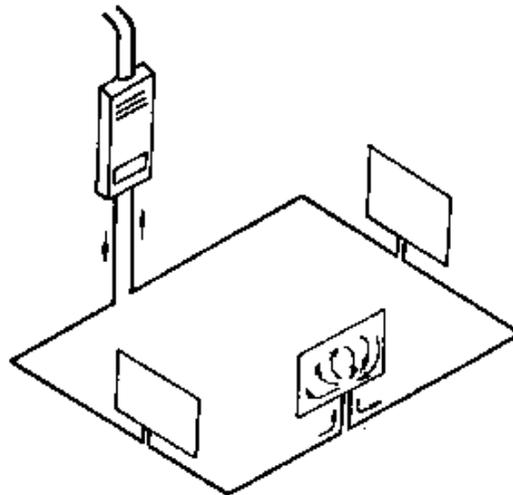


Figura 4.3 Circuito de calefacción monotubular

El circuito de calefacción mono-tubular tiene mayores pérdidas de carga que obligan a trabajar a la bomba de la caldera en condiciones más severas, las diferencias de temperatura entre la ida y el retorno del circuito de calefacción son

notables, esto perjudica igualmente la vida de la bomba y el sistema hidráulico de producción de calefacción de la caldera como consecuencia del diferencial térmico.

Es característico de los circuitos de calefacción Mono-tubulares su lentitud para calentar, esto provoca que las estancias más alejadas de la caldera tarden más en alcanzar la temperatura de confort, si a esto le sumamos haber renovado la caldera y que tengamos una caldera modulante nos encontraremos con situaciones en las que la caldera empieza a modular, reduciendo la potencia que entrega al circuito de calefacción incluso llegando a parar el funcionamiento cuando todavía los últimos radiadores del circuito de calefacción no han calentado lo suficiente.

Esto sucede debido a que la caldera detecta una alta temperatura en la tubería de ida a radiadores, uno de los controles por el que se ajusta el sistema de gestión de temperatura de la caldera en calefacción, sin embargo, el retorno que llega a la caldera desde el último radiador de la instalación todavía no ha alcanzado la temperatura óptima dada la lentitud con la que circula el agua en el interior de este tipo de circuito de calefacción. Cuanto mayor es el circuito peor es su rendimiento si lo comparamos con otros diseños hidráulicos. Suele ser habitual que este tipo de circuito de calefacción esté diseñado en anillos con un máximo de 4 o 5 radiadores por anillo.

4.4.2.- Circuitos de calefacción Bitubular para radiadores de agua.

Mucho más equilibrado hidráulicamente el circuito de calefacción Bitubular resuelve en gran medida los problemas que planteaba el circuito de calefacción Mono-tubular.

La ventaja del circuito de calefacción Bitubular está en que cada radiador tiene un retorno dirigido al colector general de retorno y este se encarga de enviar a la caldera con mayor rapidez el agua del circuito de calefacción para que la caldera vuelva a aportarle temperatura y la bomba de la caldera vuelva a reenviarla caliente al circuito de calefacción.

Es un circuito de calefacción más rápido, sencillo a la hora de realizar ajustes hidráulicos para compensar zonas desfavorables respecto de la caldera, la bomba trabaja con una pérdida de carga inferior y la temperatura de confort se alcanza con mayor rapidez. Es el circuito de calefacción por radiadores más habitual desde mediados de los años 90.

En la figura 4.4 muestra un diagrama del circuito de calefacción Bitubular.

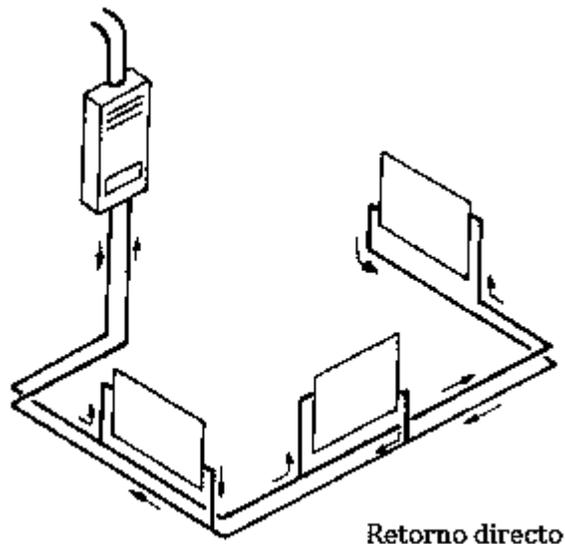


Figura 4.4 Circuito de calefacción Bitubular

La modulación de la caldera es aprovechada con mayor y mejor rendimiento al conseguir una estabilidad en la temperatura de todos los radiadores y todas las estancias de la vivienda. El hecho de poder ajustar caudales de entrada y salida por cada radiador gracias a la incorporación de llave

de reglaje y detentor permite un mejor aprovechamiento de la energía consumida aportando mayor confort a la vivienda.

4.4.3.- Circuitos de calefacción Bitubular para radiadores de agua, anillo de Tichelmann.

Este tipo de circuito de calefacción está clasificado como circuito de calefacción Bitubular, pero con la particularidad de tener el retorno invertido o inverso, también se conoce como circuito de calefacción de igual fricción.

Tiene como principio de funcionamiento que todos los radiadores del circuito de calefacción tengan la misma distancia hidráulica a la caldera, independientemente de la distancia y lugar donde se encuentren instalados los radiadores en la vivienda.

En la figura 4.5 podemos observar un diagrama del circuito de calefacción Bitubular, anillo de Tichelmann.

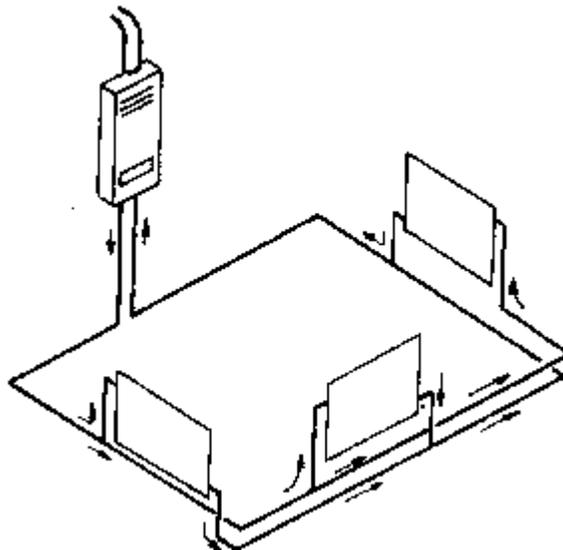


Figura 4.5 Circuito de calefacción Bitubular, anillo de Tichelmann

La conexión hidráulica del que podríamos denominar el primer radiador del circuito de calefacción, en este circuito de calefacción ya no hay orden de calentamiento, todos calientan de forma más homogénea, comienza con la entrada del agua que proviene de la caldera. Todos los radiadores van descargando a un colector de retorno que comienza en el primer radiador del circuito de calefacción. De esta forma el radiador que primero recibe agua de la caldera es el último que retorna y por contra el último radiador que recibe agua de la caldera es el primero que retorna a la caldera. Gracias a este diseño de circuito de calefacción se consiguen equilibrados hidráulicos que mejoran notablemente el confort, el consumo y un funcionamiento menos forzado de elementos como la bomba y cuerpo hidráulico de calefacción en la caldera. El circuito de calefacción y la caldera trabajaran de forma más eficiente.

4.5.- Proyecto a proponer

Como ya se ha mencionado anteriormente un ciclo combinado gas-calefacción puede ser aplicado para distribuir la energía eléctrica a una población, casas residenciales e industrias, como así mismo, se pueden aprovechar los gases de escape conectando un circuito de calefacción y brindar confort a los hogares, habitaciones, edificios, centros comerciales, oficinas, albergues, escuelas, etc.

Para este trabajo se propone una unidad de generación con matrícula SGT-A05 que contiene los siguientes datos de placa:

Unidad: SGT-A05; frecuencia $F = 60$ Hz; Proporción de presión = 14: 1; velocidad de calentamiento $V = 10,848 \frac{KJ}{KW \cdot h}$; velocidad de la turbina $\omega = 14,000$ rmp, flujo masico $\dot{m} = 21.4 \frac{Kg}{seg}$; temperatura de escape $T_4 = 522$ °C; $\beta = 14$.

Para un Ciclo Brayton Simple

La figura 4.6 ilustra un ciclo Brayton simple

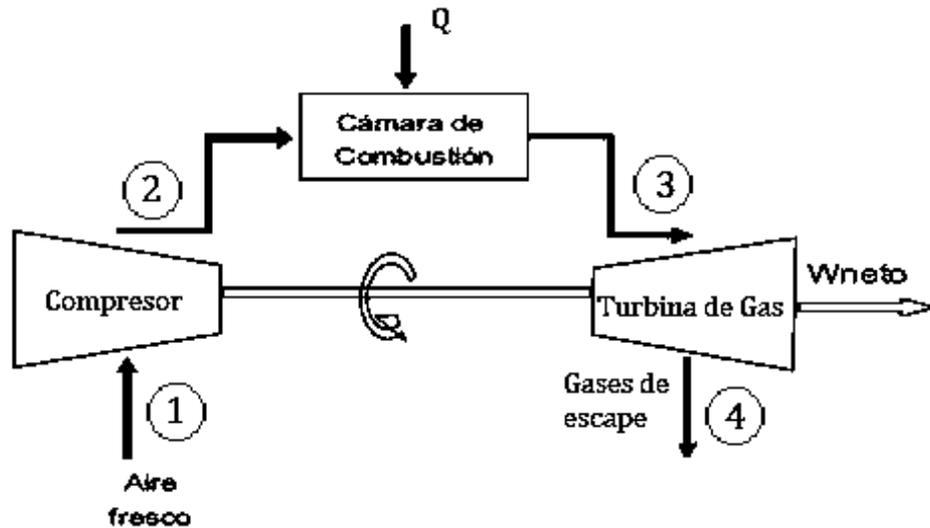


Figura 4.6 Ciclo Brayton simple

Con las ecuaciones del capítulo tres calculamos el rendimiento térmico de la unidad de generación propuesta para un ciclo Brayton simple.

$$e = 1 - \frac{1}{(\beta)^{\frac{k-1}{k}}}$$

Considerando

$$K = 1.4$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = (\beta)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$e = 1 - \frac{1}{(14)^{\frac{1.4-1}{1.4}}} = 0.5295$$

Considerando

$$T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 293 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_2 = T_1(\beta)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \text{ }^\circ\text{K} (14)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 622.77 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_4 = 522 \text{ }^\circ\text{C} = 795 \text{ }^\circ\text{K}$$

Donde

$$P_1 = P_4 \quad y \quad P_2 = P_3$$

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_3}{T_4}$$

$$T_3 = T_4(\beta)^{\frac{k-1}{k}} = 795 \text{ }^\circ\text{K} (14)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 1,689.78 \text{ }^\circ\text{K}$$

4.5.1.- Compresores

El compresor es el primer elemento que forma parte de la turbina de gas propiamente dicha. Su función es aumentar la presión del aire de admisión que proporciona el oxígeno comburente para la cámara de combustión en relaciones de compresión que oscilan entre 1:15 y 1:30. En el compresor se realiza la primera transición indicada por el ciclo Brayton: la compresión, idealmente isoentrópica, la presión y la temperatura aumentan, disminuye el volumen y la entropía se mantiene constante (en condiciones ideales).

Básicamente existen dos tipos de compresores: los centrífugos y los axiales. En los primeros, la corriente de salida es perpendicular a la de entrada. En los segundos, ambas corrientes son paralelas al eje de rotación. A pesar de

que los primeros tienen saltos de presión mayores, las ventajas de los compresores axiales y su facilidad de integración en el conjunto de la turbina hace que estos sean preferibles a los centrífugos. El problema principal de su baja relación de compresión se soluciona fácilmente colocando múltiples etapas. Cada etapa impulsa el aire hacia la etapa siguiente, aumentando su presión en una relación de compresión por etapa que oscila entre 1:1.15 y 1:1.35, hasta conseguir la relación de presión deseada. El diseño de los turbocompresores axiales entraña una gran dificultad ya que el diseño de los álabes responde a estrictos criterios aerodinámicos.

4.5.2.- Compresores centrífugos

El compresor centrífugo se fundamenta esencialmente en una o varias ruedas impulsoras, montadas sobre una flecha (eje) de acero y encerradas en una cubierta de hierro fundido. El número de impulsores (turbinas) que se puede ensamblar depende principalmente de la magnitud de la presión que queremos desarrollar durante el proceso de compresión. Las ruedas impulsoras rotativas son esencialmente las únicas partes móviles del compresor centrífugo y por tanto la fuente de toda la energía impartida al vapor durante el proceso de compresión.

La acción del impulsor es tal, que tanto la columna estática como la velocidad del vapor, aumentan por la energía que se imparte al mismo. La fuerza centrífuga aplicada al vapor confinado entre los álabes del impulsor y que gira con los mismos, origina la autocompresión del vapor en forma similar a la que se presenta con la fuerza de gravedad, que hace que las capas superiores de una columna de gas compriman a las inferiores.

En la figura 4.7 podemos observar un compresor centrífugo con sus partes principales.

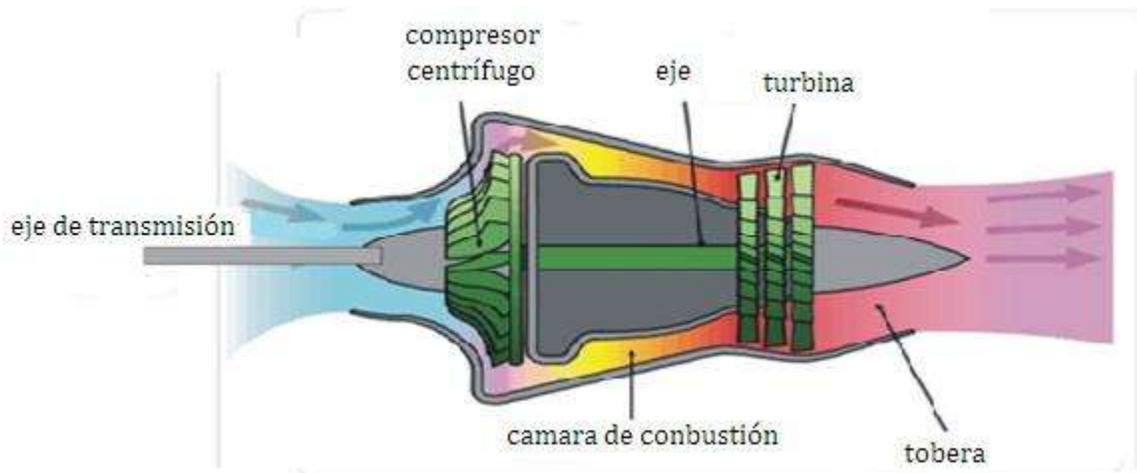


Figura 4.7 Compresor centrífugo

Los compresores centrífugos son turbo-máquinas o máquinas generadoras de flujo continuo, que transmiten la energía mecánica del motor al que van acoplados. Las velocidades rotatorias comunes varían entre 3000 y 8000 rpm, usándose en algunos casos velocidades más altas.

4.5.3.- Compresor axial

En los compresores de este tipo la corriente de aire fluye en dirección axial, a través de una serie de álabes móviles situados en el rotor y de otros fijos situados en la carcasa o estator, concéntricos todos ellos al eje de rotación. A diferencia de la turbina, que también emplea álabes fijos y móviles, el recorrido de la corriente de un compresor axial va disminuyendo de área de su sección transversal, en la dirección de la corriente en proporción a la reducción de volumen del aire según progresa la compresión de escalón a escalón. El aire al salir del compresor pasa a través de un difusor que lo prepara para entrar a la cámara de combustión [21].

El desarrollo del compresor axial se impulsó a partir de 1926, gracias a la teoría del perfil aerodinámico expuesta por A.A. Griffith, lo que permitió pasar de los modestos rendimientos que tenían estos compresores en relación a los

centrífugos (apenas alcanzaban el 55%) a rendimientos más parecidos a los actuales, superando ya entonces el 70-80%. Hoy se sobrepasa con facilidad el 85%.

En la figura 4.8 podemos observar un compresor axial con sus partes principales.

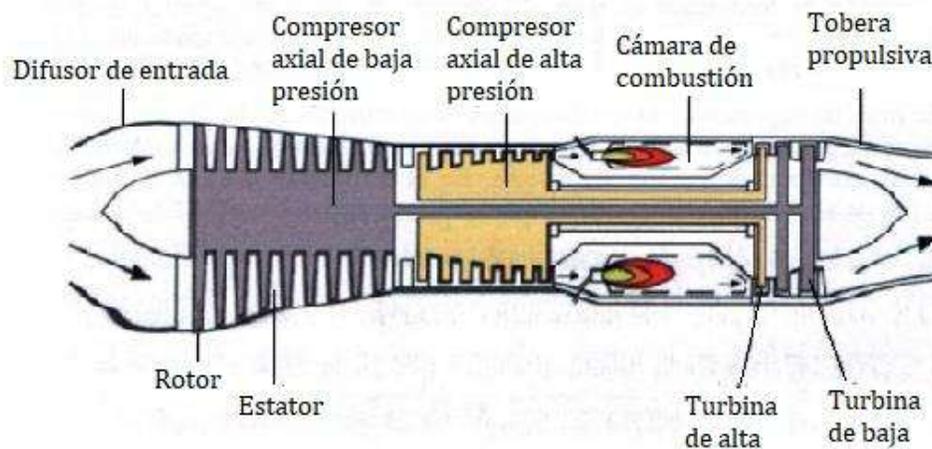


Figura 4.8 Compresor axial

4.5.4.- Rendimiento Térmico real de la Turbina de Gas

Sabemos que en toda máquina térmica el rendimiento y la potencia del ciclo real siempre son inferiores a los del ciclo teórico por varias razones, tales como:

1. La compresión no es isoentrópica.
2. La expansión no es isoentrópica.
3. En todo el sistema se producen pérdidas de presión.
4. El proceso de la combustión es incompleto, por lo cual no toda la energía química contenida en el combustible es liberada en ella como energía calórica, debido a la presencia de inquemados.
5. Existen pérdidas por radiación y convección a través de todo el cuerpo de la máquina.

6. Existen pérdidas de energía cinética a través de los gases de escape la cual no se utiliza en las máquinas industriales.

De todas estas pérdidas, solo consideramos las pérdidas en la compresión y en la expansión por ser la más significativas, pudiendo despreciar el resto frente a estas.

Por lo tanto, para obtener el rendimiento térmico real debemos tener presente que la compresión del aire en el compresor no es isoentrópica, sino que es politrópica.

Además, y de igual modo debemos tener presente que la expansión de los gases en la turbina no es isoentrópica, sino que esta es también politrópica.

Entonces:

W_{tt} es el trabajo teórico de la turbina.

W_{tc} es el trabajo teórico del compresor.

El trabajo útil teórico de la turbina está dado por la diferencia entre el trabajo teórico de la turbina menos el trabajo teórico del compresor.

$$W_{tu} = W_{tt} - W_{tc}$$

Ahora bien, el trabajo útil real de la máquina W_{ru} esta dado por la diferencia entre el trabajo real de la turbina (W_{rt}) y el trabajo real del compresor (W_{rc}).

$$W_{ru} = W_{rt} - W_{rc}$$

El rendimiento real de la turbina η_t está dado por la relación entre los trabajos real y teórico de la turbina

$$\eta_t = \frac{W_{rt}}{W_{tt}} \quad ; \quad W_{rt} = \eta_t * W_{tt}$$

El rendimiento de una turbina η_t es del orden del 95%.

Por su parte, el rendimiento real del compresor η_c , está dado por el cociente entre los trabajos teórico y real, resultado este último mayor que el teórico

$$\eta_c = \frac{W_{tc}}{W_{rc}} \quad ; \quad W_{rc} = \frac{W_{tc}}{\eta_c}$$

Como se sabe, el compresor real absorbe mayor trabajo que el teórico para llevar el aire del estado (1) al (2). En la actualidad, el rendimiento de compresor axial de turbina η_c es aproximadamente del 0.87 (87%)

$$W_{ru} = (W_{tt} * \eta_t) - \frac{W_{tc}}{\eta_c}$$

El rendimiento real o efectivo, η_e de la máquina considerada como conjunto compresor-turbina está dado por:

$$\eta_e = e * \frac{W_{ru}}{W_{tu}} = e * \left(\frac{W_{tt} * \eta_t - \frac{W_{tc}}{\eta_c}}{W_{tt} - W_{tc}} \right)$$

Dividiendo entre W_{tt} nos queda

$$\eta_e = e * \left(\frac{\eta_t - \frac{W_{tc}}{W_{tt}} * \eta_c}{1 - \frac{W_{tc}}{W_{tt}}} \right)$$

4.5.5.- Calefacción por gas

Podría definirse como uno de los tipos de calefacción más cómodo, limpio y seguro de entre los sistemas de calefacción que se pueden instalar en una vivienda.

Para su instalación necesitaremos una caldera de gas conectada a un sistema de tubos por los que circula el agua. La caldera de gas calienta el agua que circula por el circuito de tuberías y los radiadores irradian el calor. El agua que se enfría eventualmente vuelve a la caldera a través de una tubería de regreso. Así, repartidos por las habitaciones de la casa están colocados los radiadores. Al no generar calor por sí mismos, por lo que no emanan ni gases ni ninguna otra sustancia, lo que los convierte en una energía limpia y segura. En la figura 4.9 se observa un circuito de calefacción con sus radiadores.

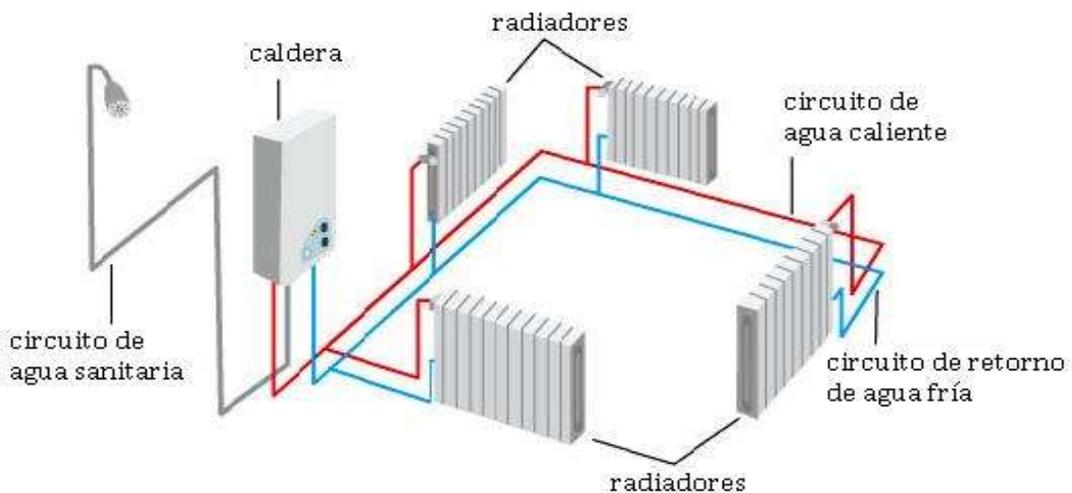


Figura 4.9 Sistema de calefacción Bitubo

4.5.6.- Intercambiador de calor

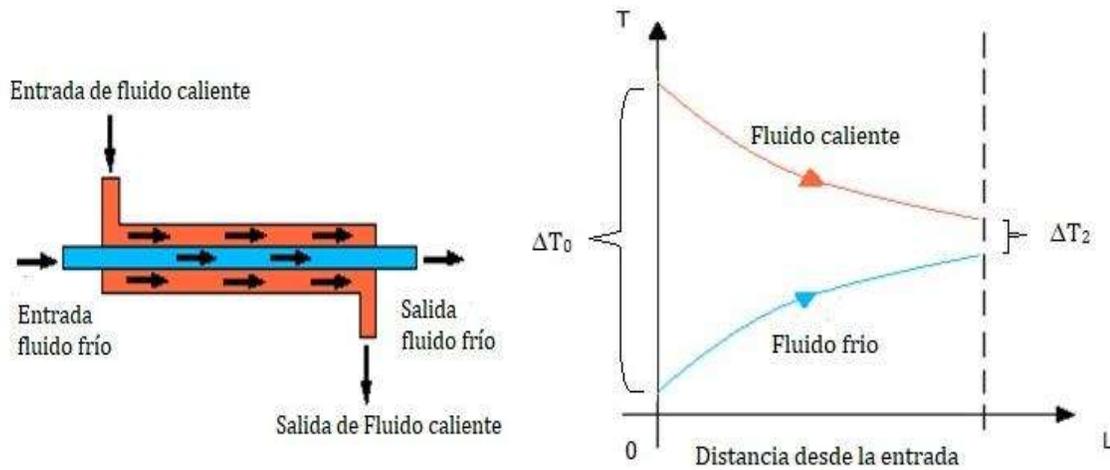


Figura 4.10 Intercambiador de calor y gráfica

Estudio Térmico del intercambiador

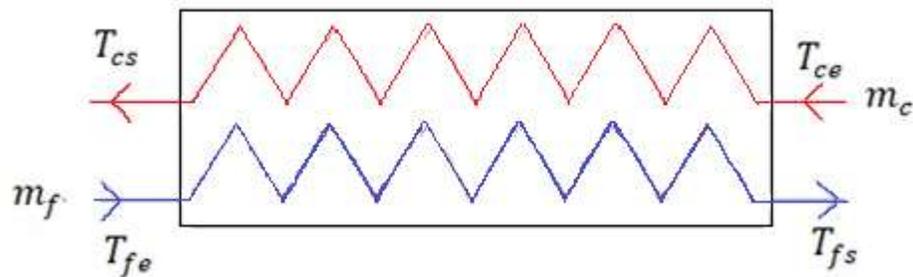


Figura 4.11 Intercambiador térmico

$$q = m_c(h_{ce} - h_{cs}) = m_f(h_{fs} - h_{fe})$$

$$\Delta h \cong C_p \Delta T$$

$$q = m_c * C_{pc}(T_{ce} - T_{cs}) = m_f * C_{Rf}(T_{fs} - T_{fe})$$

q válida para líquidos y gases a baja presión sin cambio de fase

Considerando $\eta_c = 0.85$ y $\eta_t = 0.90$

$$W_{tt} = C_p(T_3 - T_4) = 0.24(1,689.78 - 795)$$

$$W_{tt} = 214.7472 \frac{Kcal}{Kg}$$

$$W_{tc} = C_p(T_1 - T_2) = 0.24(293 - 622.77)$$

$$W_{tc} = -79.1448 \frac{Kcal}{Kg}$$

$$\eta_e = e * \left(\frac{\eta_t - \frac{W_{tc}}{W_{tt} * \eta_c}}{1 - \frac{W_{tc}}{W_{tt}}} \right)$$

$$\eta_e = 0.5295 * \left(\frac{0.90 - \frac{79.1448}{(0.85)(214.7472)}}{1 - \frac{79.1448}{214.7472}} \right)$$

$$\eta_e = (0.5295) \left(\frac{0.4664}{0.6314} \right) = 0.3911 \quad ; \quad \eta_e = 39.11\%$$

En la figura 4.12 podemos observar un esquema propuesto de un ciclo combinado gas-calefacción.

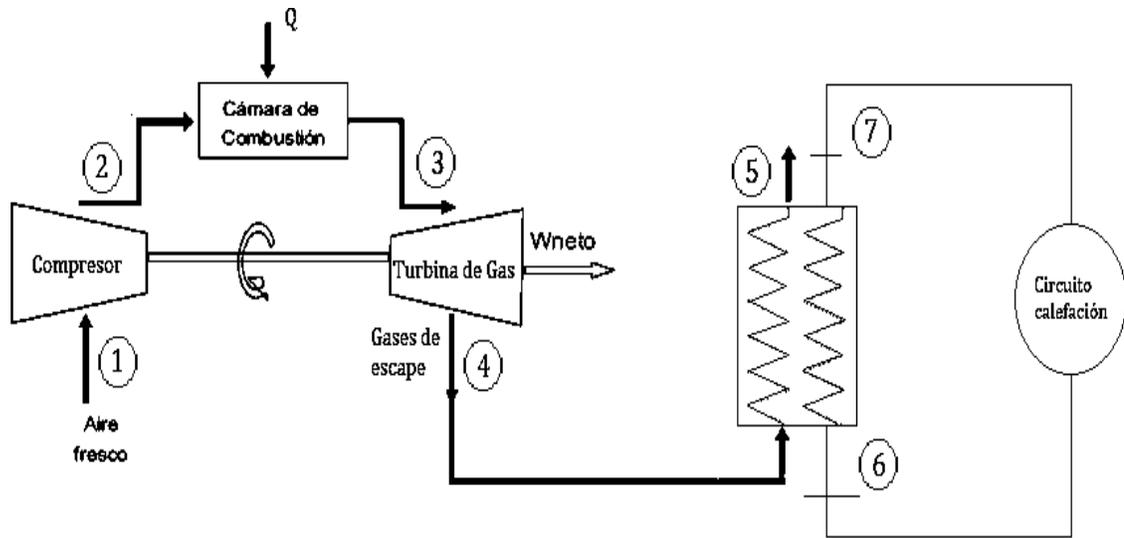


Figura 4.12 Esquema de un ciclo combinado gas-calefacción

$$\eta_t = \frac{W_{rt}}{W_{tt}} \quad ; \quad W_{rt} = \eta_t * W_{tt}$$

$$W_{rt} = 0.90(214.7472) = 193.2724 \frac{Kcal}{Kg}$$

Donde $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$

$$W_{rt} = 809.1928 \frac{KJ}{Kg} \quad \dot{m} = 21.4 \frac{Kg}{seg}$$

$$P_{rt} = W_{rt} * \dot{m} = \left(809.1928 \frac{KJ}{Kg} \right) \left(\dot{m} = 21.4 \frac{Kg}{seg} \right)$$

$$P_{rt} = 17,316.72 \text{ KW} = 17.31 \text{ MW}$$

$$Q_{4-5} = C_p(T_4 - T_5) = 0.24(795 - 293) = 120.48 \frac{Kcal}{Kg}$$

$$Q_{4-5} = 504.42 \frac{KJ}{Kg}$$

$$\dot{Q}_{4-5} = Q_{4-5} - \dot{m} = \left(504.42 \frac{KJ}{Kg}\right) \left(21.4 \frac{Kg}{seg}\right) = 10,794.58 KW$$

$$\dot{Q}_{4-5} = 10,794.58 KW = m_f(h_7 - h_6)$$

Considerando en la caldera, $P_7 = 5 \text{ bar}$

$$h_7 = h_g|_{P_7=5 \text{ bar}} = 2748.7 \frac{KJ}{Kg}$$

$$h_6 = h_f|_{P_6=5 \text{ bar}} = 640.23 \frac{KJ}{Kg}$$

$$m_f = \frac{\dot{Q}_{4-5}}{h_7 - h_6} = \frac{10,794.58 KW}{(2,748.7 - 640.23) \frac{KJ}{Kg}} = 5.11 \frac{Kg}{seg}$$

$$\dot{m}_{ft} = 5.11 \frac{Kg}{seg}$$

\dot{m}_{ft} Es la Cantidad de vapor ideal que alimentaría al circuito total

Considerando una eficiencia del intercambiador de calor de $\eta_I = 0.90$, entonces

$$\dot{Q}_{4-5r} = \dot{Q}_{4-5} * \eta_I = (10,794.58 KW)(0.90)$$

$$\dot{Q}_{4-5r} = 9,715.122 KW$$

$$m_{fr} = \frac{\dot{Q}_{4-5r}}{h_7 - h_6} = \frac{9,715.122 \text{ KW}}{(2,748.7 - 640.23) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}} = 4.60 \frac{\text{Kg}}{\text{seg}}$$

m_{fr} Es la cantidad de vapor real

Un buen cálculo de calefacción es el que determinará la comodidad que tengamos durante el invierno en nuestra casa; para llevar a cabo esta tarea primero debemos calcular el espacio que deseamos climatizar. Conociendo los metros cuadrados y haciendo un cálculo muy simple hallaremos las características necesarias del sistema que más nos interesa para la estancia; existente una fórmula, esta es la más empleada por aquellos que desean instalar un aire acondicionado como bomba de calor, la fórmula de la cual hablamos se describe a continuación.

Se calcula 100 calorías por metro cuadrado, para comprender un poco mejor el trabajo que estamos realizando, decimos que las calorías hacen referencia a la potencia del equipo; para hacer el cálculo de calefacción, cuando sepamos cuál es el tamaño de la estancia, solo tendremos que multiplicar por 100, por ejemplo, para una habitación de 20 metros cuadrados se necesitan 2,000 calorías de potencia. De todas formas, esta fórmula cuenta con excepciones, es que algunos lugares están expuestos a zonas de constantes bajas de temperaturas lo que implica un aumento en la potencia, de lo contrario, el sistema de calefacción sería ineficiente; aquí la regla se modifica y se agregan 50 calorías más al cálculo de calefacción inicial.

$$\dot{Q}_{4-5r} = Q_{4-5} * \dot{m} * \eta_I = \left(120.48 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}\right) \left(21.4 \frac{\text{Kg}}{\text{seg}}\right) (0.90)$$

$$\dot{Q}_{4-5r} = 2,320.48 \frac{\text{Kcal}}{\text{seg}}$$

$$Superficie = \frac{2,320.48}{100} = 23,204.8 m^2$$

Si el cálculo se considera para un lugar extremadamente frío, la superficie que puede dar confort nuestro sistema sería de:

$$Superficie = \frac{2,320.48}{150} = 15,466.6 m^2$$

Con esta cantidad de calorías de potencia podríamos dar confort a lugares de concentración pública como pueden ser centros comerciales, fábricas, escuelas, hospitales, etc. Si consideramos calefactores de 5000 calorías para superficie de 50 m² podríamos alimentar 464 calefactores con nuestro sistema de calefacción.

4.6.- Aplicaciones diversas

La liberalización del mercado eléctrico, unida al creciente compromiso con el medio ambiente, ha impulsado el desarrollo de nuevas técnicas de generación que impliquen menores costes de inversión y que, a la vez, sean más limpias. En este sentido, se ha desarrollado la tecnología de centrales de ciclo combinado, que es hoy por hoy, frente a los sistemas tradicionales, el sistema más eficiente y limpio para producir electricidad, por lo cual tiene diversas aplicaciones en la industria energética como se describen a continuación.

4.6.1.- Ciclo con retroalimentación para generar electricidad

La tecnología de ciclo combinado para la generación de energía eléctrica es la que mejor armoniza la eficiencia y el respeto medioambiental, debido a que combina el potencial directo de la combustión, generalmente de gas natural, y el del vapor que se obtiene por reutilización de los gases residuales de dicha

combustión, todavía calientes, para generar electricidad. Es decir, que, a partir de una misma fuente energética primaria, generalmente gas natural, se obtiene electricidad en dos etapas. La primera, basada en turbina de gas, que genera directamente electricidad a partir de la combustión. Y la segunda, que reutiliza en una caldera de recuperación de calor la energía contenida en los gases calientes sobrantes de la primera etapa para generar vapor de agua, el cual se aprovecha mediante turbina de vapor para generar más electricidad. La eficiencia combinada de todo el proceso está comprendida entre el 55% y el 60%, frente al entre el 30% y el 40% de las plantas de energía eléctrica que utilizan una sola etapa de transformación de la energía contenida en el combustible.

Básicamente, un ciclo combinado está compuesto por una turbina de gas, una caldera de recuperación de calor, una turbina de vapor, un condensador y un generador eléctrico o alternador, además de todos los servicios auxiliares requeridos (resto de planta) para obtener un sistema capaz de producir electricidad.

4.6.2.- Cogeneración

La cogeneración se define como la producción simultánea de calor útil y electricidad a partir de un mismo combustible o fuente de energía primaria. Estos combustibles pueden ser de origen fósil (por ejemplo, gas natural, combustóleo, etc.), renovable (por ejemplo, residuos agrícolas y forestales, biogás, etc.) o incluso hidrógeno.

El principio fundamental de la cogeneración es la recuperación del calor residual producto de la combustión en una planta generadora de electricidad, el cual, de otra forma, hubiera sido liberado en el medio ambiente, desperdiciando con ello una parte importante de la energía todavía disponible. Esta energía, en la mayoría de los casos, puede ser todavía utilizada en diversos usos finales como calefacción de espacios, calentamiento de agua, así como otros procesos

térmicos o de refrigeración que se encuentren cercanos a la planta de cogeneración.

Un considerable número de empresas de la industria petrolera, azucarera, cervecera, química y del papel han empleado esquemas de cogeneración para optimizar la producción de vapor y energía eléctrica en sus procesos.

En términos conceptuales, la cogeneración consiste en la producción simultánea de energía eléctrica y vapor (o calor) a partir de una misma fuente de energía primaria (combustible). En algunos esquemas de cogeneración el vapor se aprovecha para accionar equipos de bombeo, compresión o molienda; en otros, para suministrar calor a los procesos petroquímicos y de refinación de la industria petrolera. También se aplica en procesos de destilación para la industria azucarera, química y cervecera; y de secado en la industria papelera.

En la cogeneración, la energía eléctrica se obtiene a partir del aprovechamiento de la energía de los gases de combustión en alto nivel energético proveniente de las turbinas de gas. Dichos gases se introducen a recuperadores de calor para la producción de vapor, el cual a su vez se utiliza en turbinas de vapor acopladas a un generador eléctrico. Se puede decir que la aplicación de la cogeneración es viable en procesos industriales cuando el costo de la energía eléctrica producida es menor al precio que ofrece la empresa que proporciona el servicio en el lugar donde se ubica la instalación.

CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.- Conclusiones

Los sistemas de ciclo combinado permiten suministrar parcial o totalmente los requerimientos energéticos de algún edificio. Debido a que la potencia eléctrica es generada en el mismo lugar, se reducen las pérdidas por concepto de transmisión, y se logra una mayor seguridad en el abastecimiento energético. El calor sobrante de los gases de combustión, mediante un intercambiador de calor, suministra calor para calefacción de edificios. De esta forma, se mejora sustancialmente el uso de la energía del combustible, permitiendo además un grado de independencia del sistema interconectado de electricidad. En algunos casos, se podría vender la potencia eléctrica excedente al sistema interconectado.

El producto final de este trabajo es un sistema de ciclo combinado generando potencia eléctrica y calor útil para ser utilizado en circuitos de calefacción y brindar confort a edificios, industrias. Este sistema podrá funcionar con gas natural, tendrá la capacidad de operar de manera continua o a demanda, y será muy compacto, debido a la alta densidad de potencia de la turbina de gas.

Se vislumbra el uso de este sistema en edificios residenciales, centros comerciales, escuelas, población, satisfaciendo la potencia eléctrica base de iluminación y sistemas de seguridad, además de proveer calefacción central. En particular, se proyecta el uso de este sistema en zonas frías del país, donde las necesidades de potencia eléctrica y calefacción se obtienen predominantemente mediante el uso de gas natural. Este sistema presentaría una ventaja, al mejorar

el uso y confiabilidad de este combustible, además de proveer una mayor seguridad de operación.

El mercado al que apunta esta investigación son empresas inmobiliarias residenciales y comerciales, empresas del sector público e industrias privadas; tanto nacionales como extranjeras. El beneficio apuntará inicialmente a estos sectores, con énfasis residenciales, hospitales públicos, clínicas privadas, escuelas y centros comerciales. El enfoque en estos segmentos de mercado está dado por sus requerimientos energéticos constantes de electricidad y calor, además de la necesidad de seguridad de suministro. Para el caso de lugares rurales, donde existe dificultad para asegurar potencia eléctrica, un sistema de ciclo combinado propuesto es ideal.

Se ha demostrado que las plantas de ciclo combinado son una buena opción para la generación de energía eléctrica, ya que presentan importantes ventajas con respecto a las que utilizan combustibles fósiles, algunas de estas ventajas son:

Flexibilidad. - Son capaces de operar en cualquier régimen de funcionamiento, con gran rapidez de adaptación a las variaciones de carga.

Arranque rápido. - Están equipadas con dispositivos que permiten tiempos de arranque muy cortos.

Alto rendimiento. - Las modernas turbinas de gas hacen que los grupos de ciclo combinado tengan un rendimiento más elevado que el de cualquier otra central.

Costos de operación bajos. - Como resultado de las características y optimización de los nuevos grupos, la operación es más sencilla y los costos de generación, inferiores.

Los gases de escape de la unidad SGT-A05 llegan hasta 522 °C, los cuales son reutilizados conectándolo a un circuito de calefacción que dará confort a una superficie de 23, 205 m² aproximadamente. Esta superficie puede ser seccionada para distribuir la energía calorífica según sean nuestras necesidades. Examinando los resultados de los cálculos obtenidos se puede decir que nuestra propuesta es viable, porque se hace uso de la energía que sería expulsada a la atmosfera. Refiriéndonos en la parte técnica; esta cumple con las expectativas planteadas, ya que en la práctica nuestra unidad de generación propuesta puede ser aplicada para centros de consumo amplios o distribuir la energía eléctrica y calorífica una cierta cantidad de hogares o edificios, la energía calorífica se distribuiría a lugares no tan distantes de la planta de generación, aplicando lo que es calefacción central.

5.2.- Recomendaciones

En esta investigación el enfoque fue en generar energía eléctrica por medio de una turbina de gas y conectar los gases de escape aun circuito de calefacción, por lo cual es importante señalar que la parte mecánica de distribución de energía calorífica no ha sido incluida. Es recomendable investigar sobre la parte mecánica de un circuito de calefacción para tener información sobre los materiales de conducción de la energía calorífica y tener un panorama más amplio sobre costos de instalación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «wikipedia,» 19 julio 2018. [En línea].
https://es.wikipedia.org/wiki/Generaci%C3%B3n_de_energ%C3%ADa_el%C3%A9ctrica. [Último acceso: 25 julio 2018].
- [2] «la energia electrica, generacion y distribucion,» [En línea].
<http://webquery.ujmd.edu.sv/siab/bvirtual/Fulltext/ADLD0000526/Capitulo%202.pdf>. [Último acceso: 28 julio 2018].
- [3] «wikipedia,» julio 5 2018. [En línea]
https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_el%C3%A9ctrica.
[Último acceso: 26 julio 2018].
- [4] «energiza,» [En línea]
<http://www.energiza.org/116-especiales-centrales-termoel%C3%A9ctricas/287-centrales-t%C3%A9rmicas-o-termoel%C3%A9ctricas-convencionales>.
[Último acceso: 30 julio 2018].
- [5] «Guia SMA termoelectricas,» [En línea]
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjK7Z27ttHcAhUOWqwkHYDMCKQQFjAAegQIChAC&url=http%3A%2F%2Fwww.sma.gob.cl%2Findex.php%2Fdocumentos%2Fdocumentos-de-interes%2Fdocumentos%2Fguias-sma%2Fdoc_download%2F217-guias-ma-termo. [Último acceso: 3 Agosto 2018].
- [6] diciembre 2011. [En línea].
<http://www.energiza.org/anteriores/energizadiciembre2011.pdf>.
[Último acceso: 30 julio 2018].

- [7] «RENOVETEC,» [En línea]
<https://www.youtube.com/watch?v=rC1efGWBrCQ>.
[Último acceso: 30 JULIO 2018].
- [8] «naturaleza educativa,» [En línea].
<https://natureduca.com/blog/%C2%BFcomo-funciona-una-central-geotermica/>. [Último acceso: 30 julio 2018].
- [9] «Outline History of Nuclear Energy,» [En línea].
<http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-futuregeneration/outline-history-of-nuclear-energy.aspx>. [Último acceso: 4 Agosto 2018].
- [10] «Energia Nuclear,» [En línea]
https://energia-nuclear.net/como_funciona_la_energia_nuclear.html.
[Último acceso: 4 Agosto 2018].
- [11] «Tecnologia Centrales Hidroelectricas,» [En línea].
http://html.rincondelvago.com/centrales-hidroelectricas_3.html.
[Último acceso: 4 Agosto 2018].
- [12] «Centrales electricas,» 8 Diciembre 2015. [En línea].
<http://centraleshidroelectricasfundamentos.blogspot.com/>.
[Último acceso: 4 Agosto 2018].
- [13] «wikipedia planta solar,» 29 julio 2018. [En línea].
https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica.
[Último acceso: 2 agosto 2018].

- [14] «wikipedia energia eolica,» 2018. [En línea].
https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica.
[Último acceso: 2 agosto 2018].
- [15] «generadoras de chile,» 2017. [En línea]
<http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-eolica>.
[Último acceso: 2 agosto 2018].
- [16] «Energia mareomotriz,» [En línea].
<https://www.monografias.com/trabajos93/energia-mareomotriz/energia-mareomotriz.shtml>. [Último acceso: 6 Agosto 2018].
- [17] J. H. .. Horlock, Combined Power Plans, 1995.
- [18] Y. A. Cengel, Termodinamica, Morelia: Mc Graw Hill, 2018.
- [19] R. ARQHYS, «Sistemas de calefaccion,» *Revista ARQHYS*, p. 12, 2012.
- [20] C. M. HVAC&R, « Mundo HVAC&R,» Mundo HVAC&R, [En línea].
<https://www.mundohvacr.com.mx/2006/03/calefaccion/>.
[Último acceso: 13 Septiembre 2018].
- [21] «Turbinas de gas.com,» [En línea].
<http://www.turbinasdegas.com/el-compresor>. [Último acceso: 3 Octubre 2018].
- [22] 28 abril 2017. [En línea].
<https://centralestermicasdecombustion.wordpress.com/2017/04/28/que-es/>.
[Último acceso: 30 julio 2018].

[23] «fision nuclear,» [En línea].

<https://sites.google.com/site/fissaonuclear222/introduction>.

[Último acceso: 31 julio 2018].

[24] «monografias,» [En línea].

<https://www.monografias.com/trabajos93/energia-mareomotriz/energia-mareomotriz.shtml>. [Último acceso: 2 agosto 2018].