



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad De Ingeniería Eléctrica

Tesis:

Análisis de la potencia calorífica en el generador de vapor
de centrales termoeléctricas

Que para obtener el título de Ingeniero Electricista

Presenta:

Marco Antonio González Paredes

Asesor de tesis:

Dr. En ciencias Gilberto González Avalos

Morelia, Michoacán mayo/2020



AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, a Dios por permitirme llegar a estas estancias y por darme las capacidades necesarias para estar aquí

A mis padres que me apoyaron siempre y me inculcaron principios y valores que estoy seguro que ayudaron en mi desarrollo y permitieron llegar hasta aquí y estoy seguro que me ayudaran por el resto de mi vida

A mis hermanos que me aconsejaron y siempre han estado para apoyarme incondicionalmente

A la escuela por darme la oportunidad de hacer una licenciatura y formar parte de su matrícula, así como a los profesores que transmitieron parte de su conocimiento y experiencia durante mi estancia en la facultad

A todas esas personas que directa o indirectamente me han brindado su apoyo y motivación para no desistir y llegar hasta el final del proyecto de vida que me he propuesto

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico a mis familiares y amigos, que me han apoyado siempre e incondicionalmente en lo que me he propuesto y me han motivado para estudiar y no desistir hasta lograr terminar la licenciatura.

También la dedico a todas las personas que participaron aconsejándome y motivándome a ser una mejor persona que aporta a la sociedad

A todas las personas a las que le pueda servir el contenido de esta tesis esperando ser de utilidad en su formación

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	v
ÍNDICE.....	vi
RESUMEN	ix
PALABRAS CLAVE.....	ix
ABSTRACT	x
KEYWORDS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABLAS	xiii
SIMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	xiv
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Las termoeléctricas en el país	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Justificación	3
1.4 Metodología	4
1.5 Contenido de tesis.....	4
Capítulo 2 Antecedentes de las centrales Eléctricas	6
2.1 Introducción	6
2.2 Centrales eléctricas térmicas.....	8
2.2.1 Centrales termoeléctricas convencionales.....	9
2.2.2 Centrales de biomasa	10
2.2.3 Centrales de incineración de residuos sólidos urbanos (RSU)	11
2.2.4 Nucleares	12
2.2.5 Termosolares	14
2.2.6 Geotérmicas.....	14
2.3 Centrales hidroeléctricas.....	15
2.3.1 Central hidroeléctrica aprovechando ríos	16
2.3.2 Centrales mareomotrices	16

2.4 Centrales eólicas.....	17
2.5 Centrales eléctricas fotovoltaicas.....	18
Capítulo 3 Generación de vapor en termoeléctricas	20
3.1 Introducción	20
3.2 Elementos fundamentales de una termoeléctrica	21
3.3 Circuito de agua.....	24
3.4 Circuito de gases de combustión.....	24
3.5 Circuito de agua de refrigeración	24
3.6 Ciclo Rankine	25
3.7 Diagramas T-S	25
3.8 Mejoras en el ciclo Rankine.....	26
3.9 Caldera.....	29
3.9.1 Clasificación de calderas.....	30
3.9.2 Elementos de una caldera	31
3.10 Funcionamiento básico de un generador de vapor	34
3.10.1 Transferencia de calor en el hogar de una caldera	38
3.10.2 Balance energético de la caldera.....	38
3.10.3 Gases calientes como fuente de calor	39
3.10.4 Sumidero de calor: Haces de tubos	40
3.10.5 Efecto de la geometría de los haces de tubos en el suministro de calor	41
3.10.6 Modelos matemáticos para la simulación de hogares de caldera	42
3.10.7 Sistemas de control de calderas	47
Capítulo 4 Análisis energético de un generador de vapor en termoeléctricas	50
4.1 Introducción	50
4.2 Potencia calorífica a vapor seco	51
4.3 Potencia calorífica a vapor sobrecalentado	54
4.4 Potencia calorífica para un ciclo de recalentamiento	57
4.5 Potencia calorífica para un ciclo regenerativo	62
Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones.....	68
5.1 Conclusiones.....	68
5.2 Recomendaciones	69

Bibliografia	70
--------------------	----

RESUMEN

En este trabajo de tesis se hace una recopilación de diversas fuentes bibliográficas para hacer un análisis detallado de las centrales termoeléctricas, específicamente se hace énfasis en el vapor y todo lo que conlleva: combustible, generación ciclos, balances energéticos etc., así como sus diversas propiedades durante su transcurso dentro de cada parte de la central y proceso de generación de energía eléctrica

También se mencionan algunos datos relevantes acerca de este tipo de centrales en el país, así como de otros tipos de generación eléctrica con los que se cuenta en México entre otras

Con ayuda de herramientas para calcular (calculadoras, software etc.) y el conocimiento adquirido durante el proceso de investigación, se llevan a cabo algunos cálculos importantes para así obtener las características específicas de las sustancias que participan en la generación del vapor y así conocer sus propiedades y ver la opción de hacer algunos cambios para mejorar la central termoeléctrica haciéndola más eficiente o por qué no, menos contaminante

PALABRAS CLAVE

Central termoeléctrica, generadores de vapor, generación de electricidad, tipos de centrales, eficiencia de vapor

ABSTRACT

In this thesis, a compilation of diverse bibliographical sources is made to make a detailed analysis of the thermoelectric plants; specifically emphasis is placed on the steam and everything that it entails: fuel, cycle generation, energy balances, etc., as well as its diverse properties during its course within each part of the plant and electric power generation process

Some relevant data are also mentioned about this type of power plants in the country as well as other types of power generation that are available in Mexico, among others.

With the help of tools to calculate (calculators, software, etc.) and the knowledge acquired during the research process, some important calculations are carried out in order to obtain the specific characteristics of the substances that participate in the steam generation and thus know their properties and see the option to make some changes to improve the thermoelectric power station making it more efficient or why not, less polluting

KEYWORDS

Thermal power plant, steam generators, generation of electricity

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1 Capacidad y generación en centrales termoeléctricas convencionales 2017	1
Figura 2. 1 Esquema básico de una Central Termoeléctrica	10
Figura 2. 2 Esquema básico de una Central de Biomasa	11
Figura 2. 3 Esquema de una central con RSU.....	12
Figura 2. 4 Esquema de una Central Nucleoeléctrica	13
Figura 2. 5 Esquema de una Central Termosolar	14
Figura 2. 6 Esquema de una Central Geotérmica	15
Figura 2. 7 Esquema de una Central Hidroeléctrica.....	16
Figura 2. 8 Generación de energía mareomotriz	17
Figura 2. 9 Esquema de una Central Eólica	18
Figura 2. 10 Esquema de generación eléctrica mediante paneles solares	19
Figura 3. 1 Composición básica de una central termoeléctrica	23
Figura 3. 2 Ejemplo de diagrama Temperatura-Entropía (T-S).....	25
Figura 3. 3 Sección longitudinal de una caldera de circulación forzada	29
Figura 3. 4 Esquema de circulación de un hogar de polvo de carbón	32
Figura 3. 5 Quemador turbulento de Foster-Wheeler.....	33
Figura 3. 6 Sección del hogar en una central térmica de Potencia.....	35
Figura 3. 7 Economizador Foster-Wheeler	36
Figura 3. 8 Sección transversal de un calderín.....	37
Figura 3. 9 Partes de un calderín.....	38
Figura 3. 10 Representación gráfica del modelo Plug-Flow.....	44
Figura 4. 1 Esquema de una central térmica y su ciclo de Carnot	50
Figura 4. 2 Diagrama de una central termoeléctrica a vapor seco	51
Figura 4. 3 Diagrama T-S de una central termoeléctrica: a) ideal, b)real	52
Figura 4. 4 Central termoeléctrica con vapor seco	53
Figura 4. 5 Diagrama T-S de una central térmica con vapor sobrecalentado.....	55
Figura 4. 6 Central termoeléctrica con vapor sobrecalentado	56
Figura 4. 7 Diagrama de una central con ciclo de recalentamiento	57
Figura 4. 8 Diagrama T-S para una central con ciclo de recalentamiento	58
Figura 4. 9 Diagrama para una central con varios ciclos de recalentamiento	58
Figura 4. 10 Gráfica de eficiencia respecto a número de recalentamientos	59
Figura 4. 11 Central termoeléctrica con ciclo de recalentamiento	59

Figura 4. 12 comportamiento de la central con ciclo de recalentamiento en el diagrama de Mollier	61
Figura 4. 13 esquema de una central con ciclo regenerativo	62
Figura 4. 14 Diagrama T-S del ciclo regenerativo	63
Figura 4. 15 Central termoeléctrica con ciclo regenerativo.....	64
Figura 4. 16 Diagrama de molliere para un ciclo regenerativo en una central termoeléctrica	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. 1 Termoeléctricas en el país	2
Tabla 2. 1Capacidad Eléctrica Instalada En México en 1889 (Kw) 1. 2	6
Tabla 4. 1 Interpolación para el ciclo regenerativo	64
Tabla 4. 2 Poder calorífico de materiales empleados en centrales termoeléctricas.....	67
Tabla 4. 3 Cantidad de combustible por tipo de ciclo.....	67

SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

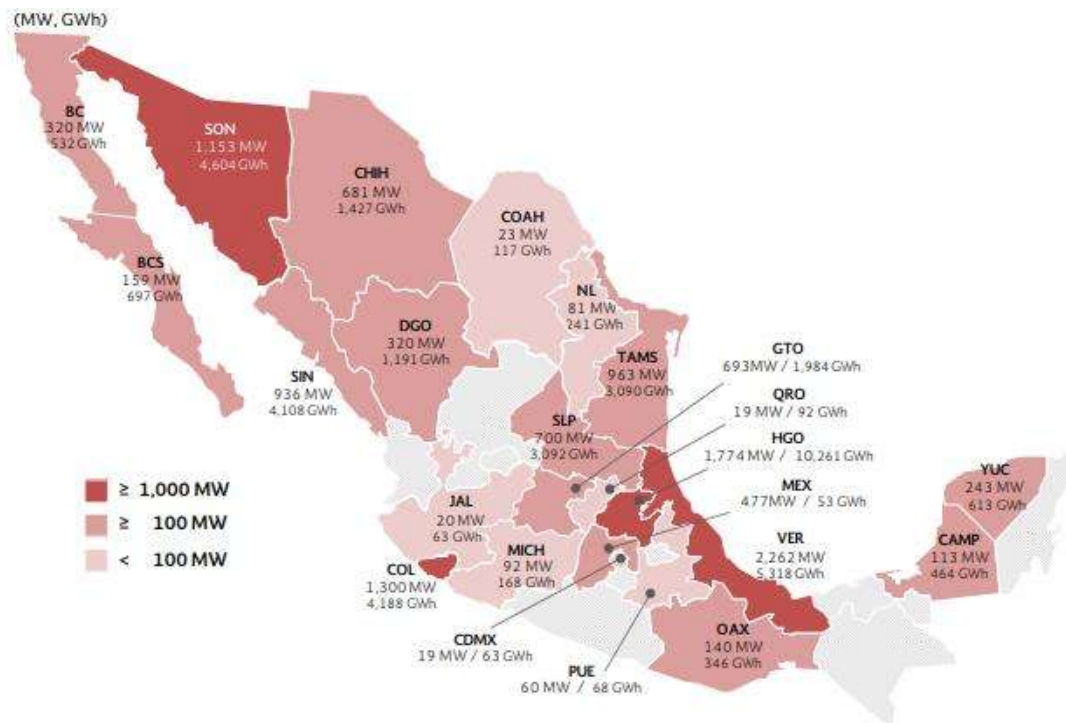
Símbolo	significado
$\dot{Q}$	Potencia calorífica requerida
$\dot{m}_a$	Flujo de líquido saturado
$\dot{m}_v$	Flujo de vapor
bl	barriles
G.V	Generador de vapor
Gwh	Giga watts hora
h	Entalpia
hf	Entalpia de líquido saturado
hfg	Entalpia de vapor saturado seco
hg	Entalpia vapor seco
Kw	Kilo watts
MW	Mega watts
Mwh	Mega watts hora
P	Presión
q	calor
Q	Potencia calorífica
s	Entropía
sf	Entropía liquido saturado
sfg	Entropía vapor saturado
T	Tonelada métrica
w	trabajo
x	calidad

Capítulo 1

Introducción

1.1 Las termoeléctricas en el país

En México existen 59 centrales termoeléctricas convencionales cuya capacidad instalada total es de 12,546 MW, equivalente al 17% del total nacional y generan 42,780 GWh que representa el 13% del total de la electricidad generada en 2017. El 66.8% de la capacidad instalada y el 73.8% de la energía eléctrica generada en centrales termoeléctricas convencionales, se concentra en los estados de Veracruz, Hidalgo, Colima, Sonora, Tamaulipas y Sinaloa. En la figura 1.1 se puede ver la distribución de centrales termoeléctricas en México.



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

Figura 1. 1 Capacidad y generación en centrales termoeléctricas convencionales 2017

Tabla 1. 1 Termoeléctricas en el país

Nº	Nombre	Entidad Federativa	Región de control	Capacidad total (MW)
1	Agroindustrias del balsas	Michoacán	01-central	15
2	Akra Polyester	Tamaulipas	06-Noreste	14
3	Arcelormittal Lázaro Cárdenas	Michoacán	01-Central	40
4	BioPappelPackaging Planta de Papel Tizacayuca	Hidalgo	01-Central	35
5	Destiladora del Valle	Veracruz	02-oriental	2
6	Generadora Pondercel	Chihuahua	05-Norte	65
7	Mexicana de cobre	Sonora	04-Noroeste	37
8	MexicoCarbonManufacturing	Tamaulipas	06-Noreste	4
9	Papeles Ultra	México	01-Central	10
10	TerniumMexico Planta Puebla	Puebla	02-Oriental	6
11	Agroenergía	Querétaro	03-Occidental	19
12	Compañía Cervecería De Coahuila _COG	Coahuila	06-Noreste	16
13	Generadora Petrocel	Tamaulipas	06-Noreste	16
14	Grupo Celanese, Complejo Ocotlan	Jalisco	03-Occidental	13
15	Industrias Derivadas del Etileno	Veracruz	02-Oriental	2
16	Innophos Fosfatados De Mexico COG	Veracruz	02-Oriental	6
17	MetalurgicaMet-Mex Peñoles	Coahuila	05-Norte	7
18	Minera y Metalurgica de Boleo COG	Baja California Sur	10-Mulege	46
19	Pemex Gas y PetroquímicaBasica, Complejo Procesador de Gas Poza Rica	Veracruz	02-Oriental	16
20	Pemex-Petroquímica, Complejo Petroquímico Independencia	Puebla	02-Oriental	54
21	Pemex-Refinación, Ing. Antonio M. Amor	Guanajuato	03-Occidental	143
22	Pemex-Refinación, Refinería Francisco I. Madero	Tamaulipas	06-Noreste	129
23	Pemex-Refinación, Refinería General Lázaro Cárdenas	Veracruz	02-Oriental	64
24	Pemex-Refinación, Refinería General Lázaro Cárdenas, Proyecto Reconfiguración	Veracruz	02-Oriental	40
25	Pemex-Refinación, Refinería Ing. Antonio Dovalí Jaime	Oaxaca	02-Oriental	115
26	Pemex-Refinación, Refinería Ing. Héctor Lara Sosa	Nuevo León	06-Noreste	79
27	Pemex-Refinación, Refinería Miguel Hidalgo	Hidalgo	01-Central	134
28	Políoles	México	01-Central	3
29	Zacapu Power	Michoacán	03-Occidental	8
30	BioPappelPrinting, Central II	Veracruz	02-Oriental	12
31	Altamira	Tamaulipas	06-Noreste	500
32	Francisco Villa	Chihuahua	05-Norte	300
33	Guaymas II (Carlos Rodríguez Rivero)	Sonora	04-Noroeste	484
34	Lerdo (Guadalupe Victoria)	Durango	05-Norte	320
35	Lerma (Campeche)	Campeche	07-Peninsular	113
36	Manzanillo (Gral. Manuel Álvarez Moreno)_TC	Colima	03-Occidental	1,300
37	Mazatlán II (José Aceves Pozos)	Sinaloa	04-Noroeste	616
38	Mérida II	Yucatán	07-Peninsular	168
39	Presidente Juárez_TC	Baja California	08-Baja California	320
40	Puerto Libertad	Sonora	04-Noroeste	632
41	Punta Prieta II_TC	Baja California Sur	09-Baja California Sur	113
42	Río Bravo (Emilio Portes Gil) U3	Tamaulipas	06-Noreste	300
43	Salamanca	Guanajuato	03-Occidental	550
44	Samalayuca	Chihuahua	05-Norte	316
45	Topolobampo II (Juan de Dios Bátiz)	Sinaloa	04-Noroeste	320

Nº	Nombre	Entidad Federativa	Región de control	Capacidad total (MW)
46	Tula (Francisco Pérez Ríos)_TC	Hidalgo	01-Central	1,606
47	Tuxpan (Adolfo López Mateos)	Veracruz	02-oriental	2,100
48	Valladolid (Felipe Carrillo Puerto)_TC	Yucatán	07-Peninsular	75
49	Valle de México_TC	México	01-Central	450
50	Villa de Reyes	San Luis Potosí	03-Occidental	700
51	Arcelormittal Las Truchas	Michoacán	01-Central	22
52	BioPappel Scribe_1	Michoacán	03-Occidental	4
53	BioPappel Scribe_2	Michoacán	03-Occidental	4
54	Cervecería Modelo	Cd. de México	01-Central	19
55	Cervecería Modelo de Guadalajara	Jalisco	03-Occidental	7
56	Compañía Cervecera El Trópico	Oaxaca	02-oriental	25
57	Empaques Modernos San Pablo_TC	México	01-Central	14
58	Industria del Alkali	Nuevo León	06-Noreste	2
59	Tereftalatos Mexicanos	Veracruz	02-Oriental	21
			TOTAL	12,546

México se mantiene entre los diez primeros países que generan electricidad mediante petróleo y sus derivados en su caso con crudo y sus derivados

En México como en otros países se ha optado por sustituir esta tecnología por otras de mayor eficiencia y con menor impacto ambiental, ya que una termoeléctrica convencional es 73% menos eficiente que un ciclo combinado, y emite en promedio 680 kilogramos de CO_2 por cada Mwh de energía eléctrica producido. [1]

1.2 Objetivo

Realizar un estudio sobre el generador de vapor con el que se opera en centrales termoeléctricas para conocer sus propiedades, costos, combustibles con los que se genera y así tener conocimiento del comportamiento de la central termoeléctrica

1.3 Justificación

Los componentes de una planta de generación térmica son los siguientes: caldera, tanque, turbina de alta presión, turbina de mediana presión, turbina de baja presión, condensador, recalentador, quemadores, ventilador de tiro forzado, ventilador de tiro aducido, sobre calentador, economizador y generador.

Algunas de estas partes mencionadas intervienen en el generador de vapor para que este cumpla la función para la que está diseñado, que es proporcionar vapor con ciertas características a las turbinas en una central termoeléctrica

Esta tesis va encaminada al estudio de estas partes y el efecto que tienen dentro de la central termoeléctrica, así como analizar posibles modificaciones en las propiedades del vapor que se extrae de estos generadores, así como el efecto y costo de estas modificaciones para ver su viabilidad considerando todas las especificaciones para su funcionalidad

1.4 Metodología

En esta tesis se hace la consulta y recopilación de datos de diversas fuentes como son; libros, artículos de investigación, sitios web, entre otros, sobre plantas termoeléctricas convencionales y más específicamente sobre el vapor que se genera en dichas plantas pretendiendo profundizar y comprender mejor lo que se está planteando y así poder cumplir con el objetivo

También de ser necesario se harán los cálculos para precisar algunos datos utilizando las herramientas y conocimientos adquiridos.

1.5 Contenido de tesis

En el capítulo 1 se hace una introducción sobre las plantas de generación termoeléctrica, se plantea el objeto de estudio de este documento y la forma en que se llevó a cabo la recopilación de información en el mismo.

En el capítulo 2 trataremos sobre la historia de la generación eléctrica en México y como ha ido cambiando con el paso del tiempo con las diferentes necesidades de los usuarios. También en el segundo capítulo se mencionan algunos de los tipos de generación conocidos

En el capítulo 3 Nos enfocamos en las partes que participan en la generación de vapor en las centrales termoeléctricas y se describe paso a paso este proceso.

En el capítulo 4 Se realizan algunos cálculos necesarios para poder conocer mejor el funcionamiento de la generación de vapor y así conocer las propiedades de dicho vapor

En el capítulo 5 Esta sección de esta tesis fue reservada para hacer observaciones, así como para mencionar las conclusiones a las que se llegó después de haber realizado toda la labor de investigación y cálculos.

Capítulo 2

Antecedentes de las centrales Eléctricas

2.1 Introducción

A finales del siglo XIX los sectores textil y minero eran los principales usuarios de energía eléctrica. En 1879 en la fábrica de hilados y tejidos La Americana” en la ciudad de León, Guanajuato, se instaló la primera planta generadora de electricidad con una capacidad de 1.8 Kw. Hacia 1890, la Ciudad de México contaba con 2,054 focos para alumbrado público. Posteriormente, el alumbrado público se instaló en las principales ciudades del país, en Guadalajara en 1884, en Monterrey en 1888, y Veracruz y Mérida en 1889.

En 1889, de acuerdo con las estadísticas elaboradas por el Ministerio de Fomento, el país contaba con una capacidad total instalada de 837.89 Kw distribuida en 60 plantas, sólo 9.51% era de origen hidráulico y el resto de origen térmico. El principal uso del suministro eléctrico eran los servicios públicos (cerca del 72%) y el resto para los servicios privados. Los servicios públicos principales eran iluminación, bombeo de agua y transporte (tranvías eléctricos). El primer tranvía eléctrico en la Ciudad de México se puso en marcha en 1900.

Tabla 2. 1 Capacidad Eléctrica Instalada En México en 1889 (Kw) 1. 2

Zonas	kW instalados	Porcentaje del total
Norte	65.52	7.85
Golfo	53.70	6.42
Pacífico Norte	17.47	2.08
Pacífico Sur	19.50	2.34
Centro	681.70	81.31
Total Nacional	837.89	100.00

En diciembre de 1905, entró en operación la central hidroeléctrica Necaxa. La línea de transmisión en corriente alterna que unía a la Ciudad de México consta planta hidroeléctrica fue considerada en su momento como la más larga en operación en el mundo, con una extensión de cerca de 272 Km, y un nivel de tensión de 60 Kv. En su momento fue considerada la planta hidroeléctrica más grande de Latinoamérica. La primera planta hidroeléctrica en México se instaló en Batopilas, Chihuahua con 22 Kw de capacidad eléctrica en 1889.

En 1900, la capacidad instalada de generación de energía eléctrica en el país era únicamente de 18 Mw. Para 1940, este valor era de 680 MW y dos décadas después, en 1960, era 3,058 MW.

A fines de 1959, se inauguró en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, la primera planta Geotermoeléctrica del país con una capacidad de 3.5 Mw. En 1973 esta central dejó de operar.

En la segunda mitad del siglo XX, el primer gran proyecto hidroeléctrico fue la central Infiernillo, en el río Balsas, que entró en operación en 1965. Para transmitir la energía eléctrica generada en las hidroeléctricas hacia los centros de consumo fue necesario incrementar los niveles de tensión eléctrica previamente utilizados a principios de los años cincuenta (230 Kv) por 400 Kv.

A partir de 1960, se propició la expansión de una reconstituida por regiones de generación hidroeléctrica y termoeléctrica, así como regiones de transmisión, desarrollando en diversas etapas la interconexión de sistemas aislados para constituirse un Sistema Interconectado Nacional (SIN) en alta tensión (230 y 400 Kv) y unificando la frecuencia utilizada a 60 Hz. Un aspecto destacable de este crecimiento es que no se estandarizaron inicialmente las especificaciones de los componentes y equipos. Consecuentemente, hacia 1979 la Comisión Federal de Electricidad inició estudios y programas para aplicar criterios normalizados en el diseño de centrales termoeléctricas convencionales. Como resultado, en 1986 entró en operación comercial la central termoeléctrica San Luis Potosí, la primera central normalizada con unidades de 350 MW.

En 1958, se realizaron los primeros reconocimientos geológicos en el campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, donde en abril y octubre de 1973 empezaron a operar las dos primeras unidades de 37.5 MW cada una. Estas unidades, junto con las siguientes dos de la misma capacidad, se encuentran actualmente fuera de operación, después de haber concluido su periodo de vida útil. No obstante, todavía existen otras unidades generadoras en operación en Cerro Prieto.

En 1982, inició operaciones la central carboeléctrica de Río Escondido, Coahuila, la primera de su tipo. Hacia 1987 la capacidad instalada en el país alcanzaba los 23.15 GW, con una participación de la generación termoeléctrica del 81%.

La primera y única central nucleoelectrica que se ha instalado en México, es la central Laguna Verde, ubicada en Veracruz, que inició operaciones en 1990.

El primer parque eólico en México se construyó en 1994 en La Venta, Oaxaca. El parque eólico La Venta, originalmente un proyecto prototipo, cuenta con siete aerogeneradores de 225 Kw y fue el primero en su tipo en nuestro país y en América Latina.

La primera central en operación bajo el esquema de Productor Independiente de Energía fue Mérida III, en Yucatán, de tecnología ciclo combinado y con 484MW de capacidad operando a partir del año 2000.

El primer parque fotovoltaico instalado por la Comisión Federal de Electricidad fue Santa Rosalía (Tres Vírgenes), ubicado en Baja California Sur con una capacidad de 1 MW que inició operación en 2012.

La capacidad instalada de generación de energía eléctrica en el país entre 1960 y 2013, año en que se promulgó la Reforma Energética, creció 17.5 veces.

Durante 2017 entraron en operación 10 MW que son parte del proyecto solar Villanueva en Coahuila. Dicho proyecto forma parte de los ganadores de la Primera Subasta de Largo Plazo de 2015 y es el primer proyecto en operación bajo este esquema creado a partir de la Reforma Energética. [1]

2.2 Centrales eléctricas térmicas

En este tipo de centrales las turbinas son movidas por chorros de vapor a presión obtenido calentando agua [2]

El nombre o tipo de central se clasifica por el combustible primario utilizado para elevar las temperaturas del agua y así obtener el vapor con las características adecuadas, a excepción de las geotérmicas que el vapor sale directamente del subsuelo sin necesitar algún combustible.

A continuación, se hace una breve explicación de las principales centrales con este principio y solo en la termoeléctrica convencional se describen sus partes principales por dos razones

Primera razón: prácticamente lo que diferencia a estas centrales es como se genera el vapor, el tipo de turbinas y las partes siguientes tienen los mismos principios.

Segunda razón: En este documento nos enfocamos a las características del vapor con el que se produce energía eléctrica en las centrales termoeléctricas convencionales.

Existen otros tipos de centrales térmicas diferentes a las que se tratan a continuación (ciclo combinado, carboeléctrica, turbogas, entre otras) las cuales también funcionan con combustibles fósiles por lo que no se especifican en este texto.

2.2.1 Centrales termoeléctricas convencionales

Las plantas de generación térmica producen electricidad a partir del calor liberado por la combustión de carbón, petróleo, o gas natural. La mayoría de las plantas tienen capacidades entre 20 y 1500 Mw a fin de alcanzar la alta eficiencia y economía de una instalación grande. Una planta de este tipo tiene que ser vista para apreciar su enorme complejidad y tamaño.

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

La eficiencia de las plantas de generación térmicas siempre es debido a la baja eficiencia propia de las turbinas. La eficiencia máxima de cualquier máquina que convierte energía térmica en energía mecánica está dada por la ecuación

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) 100$$

Dónde:

η = eficiencia de la maquina

T_1 = Temperatura del gas que entra a la turbina

T_2 = Temperatura del gas que sale de la turbina

En la mayoría de las plantas de generación térmicas el gas es vapor. Para obtener una alta eficiencia, el cociente T_2/T_1 debe ser tan pequeño como sea posible. Sin embargo, la temperatura T_2 no puede ser más baja que la temperatura ambiente, la cual siempre es de unos 20 °C. Por consiguiente, T_2 no puede ser menor que

$$T_2 = 20^\circ + 273K$$

Esto significa que para obtener una alta eficiencia, T_1 debe ser tan alta como sea posible. El problema es que no se pueden utilizar temperaturas por encima de las que el acero y otros metales pueden soportar con seguridad, teniendo en cuenta las altas presiones de vapor correspondientes. Resulta que la temperatura T_1 más alta factible es de aproximadamente 550 °C. Por consiguiente,

$$T_3 = 550^\circ + 273^\circ = 823K$$

Entonces la eficiencia máxima posible de una turbina impulsada por vapor que entra a 823 K y sale a 293 K es

$$\eta = \left(1 - \frac{293}{823}\right) 100 = 64$$

Debido a otras pérdidas, algunas de las turbinas de vapor más eficientes tienen eficiencias de 45%. Esto significa que se pierde el 65% de la energía térmica durante el proceso de conversión térmica a mecánica.

La enorme pérdida de calor y como disponer de este representa uno de los aspectos fundamentales de una planta de generación térmica [3]

En la figura 2.1 se ilustra el esquema básico de una central termoeléctrica convencional.

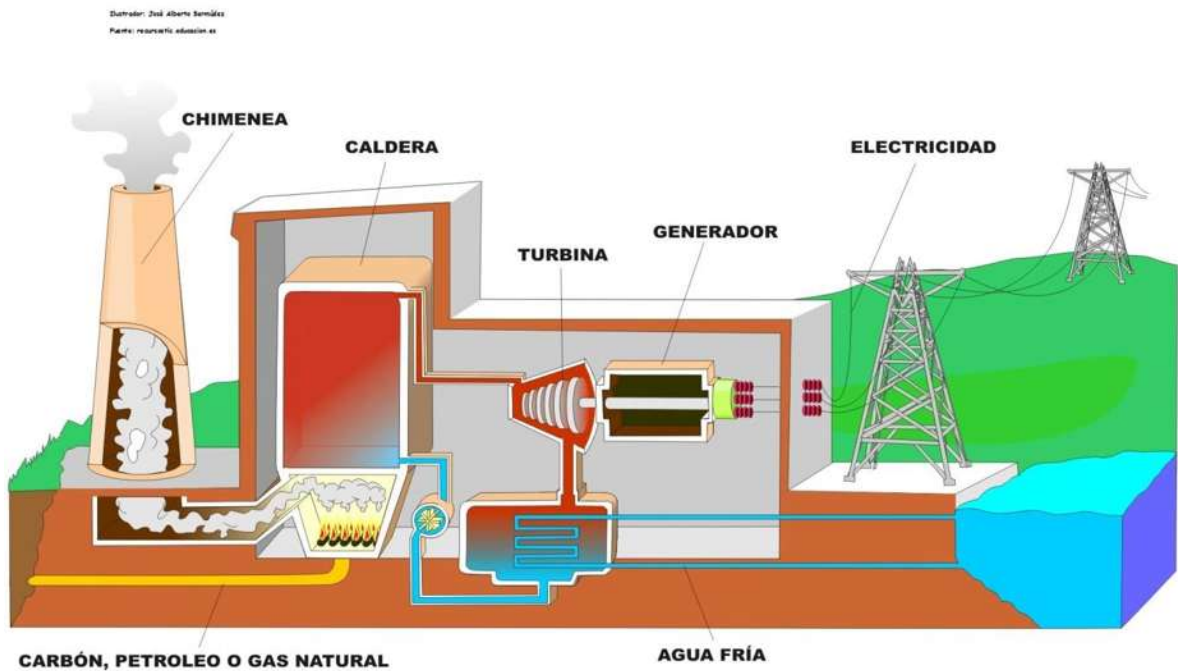


Figura 2. 1 Esquema básico de una Central Termoeléctrica

2.2.2 Centrales de biomasa

Se obtienen la energía mediante la combustión de residuos forestales agrícolas o de los llamados cultivos energéticos.

La biomasa es el nombre dado a cualquier materia de origen reciente que haya derivado de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintético.

La energía de la biomasa deriva del material vegetal y animal, tal como madera de bosques, residuos de procesos agrícolas y forestales, y de la basura industrial, humana o animales.

El vapor energético de la biomasa vegetal proviene originalmente de la energía solar a través del proceso conocido como fotosíntesis.

La energía química que se almacena en plantas y animales o en los desechos que producen, se llama bioenergía.

Durante procesos de conversión de energía tales como la combustión, la biomasa libera su energía a menudo en forma de calor y el carbón se oxida nuevamente a dióxido de carbono para restituir el que fue absorbido durante el crecimiento de la planta. Esencialmente, el uso de la biomasa para energía es la inversa de la fotosíntesis. [4]



A continuación, en la figura 2.2 está representada una central de biomasa y algunas de sus principales partes.



Figura 2. 2 Esquema básico de una Central de Biomasa

2.2.3 Centrales de incineración de residuos sólidos urbanos (RSU)

Obtención de energía mediante la combustión de la basura (una vez tratada convenientemente).

La incineración de residuos con aprovechamiento energético es un proceso muy utilizado en Europa. Esta tecnología consiste, fundamentalmente, en una combustión con generación de vapor y la posterior expansión de este en una turbina convencional acoplada a un generador eléctrico.

Se trata, por lo tanto, de una combustión clásica, en la que la cámara de combustión está adaptada al tipo de combustible utilizado. Cada línea de incineración dispone de una alimentación individualizada, un horno-caldera productor de vapor y un sistema de tratamiento de gases. [5]

En la figura 2.3 se muestra el esquema de una central termoeléctrica a base de RSU (Residuos Sólidos Urbanos).

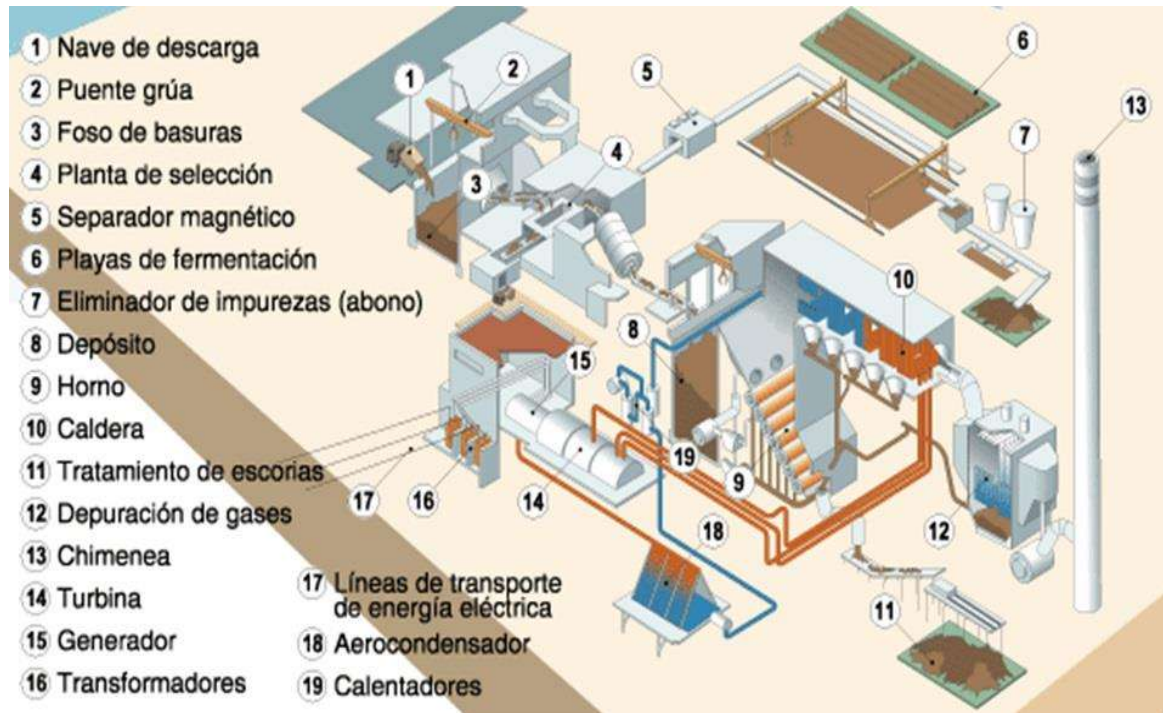


Figura 2. 3 Esquema de una central con RSU

2.2.4 Nucleares

Una planta nucleoelectrica es aquella que aprovecha la energía producida en una reacción nuclear (generalmente fisión), para generar calor y usarlo en la producción de vapor y con este siguiendo un proceso similar al de las termoeléctricas convencionales, producir energía eléctrica. [4]

Las centrales nucleoelectricas tienen un reactor nuclear, que equivale a la caldera de las centrales convencionales. El reactor no tiene sistemas de inyección continua de combustibles y aire, ni en él se necesita un dispositivo de eliminación continua de residuos sólidos. Tampoco se producen gases de combustión.

Las centrales nucleoelectricas tienen una serie de dispositivos de seguridad destinados a mantener bajo control la reaccion de fisión en cadena y evitar la salida de radiaciones al exterior en caso de accidentes. [6]

En la figura 2.4 se muestra la representaci3n de una central nucleoelectrica y su ciclo de funcionamiento.

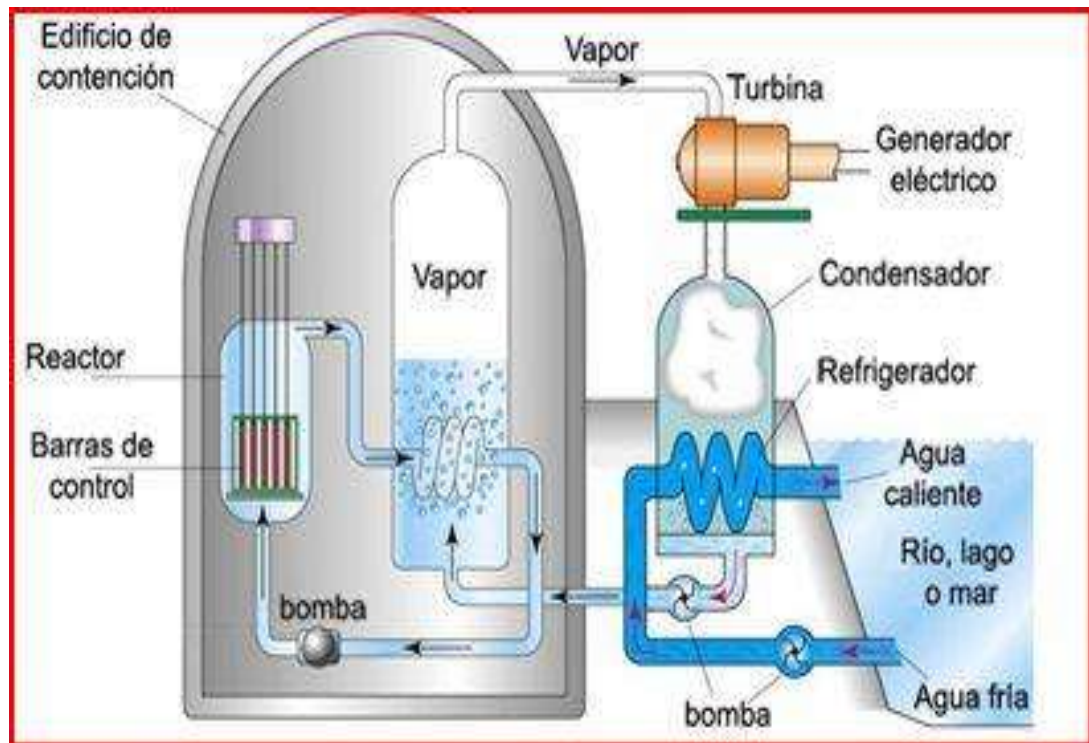


Figura 2. 4 Esquema de una Central Nucleoelectrica

La fisión se produce al chocar un neutr3n contra un n3cleo de uranio o plutonio dentro de un reactor. La divisi3n de estos n3cleos genera energía, partículas subatómicas y más neutrones que al chocar con otros n3cleos de uranio o plutonio provocan una reacci3n en cadena. La energía generada se aprovecha mediante un refrigerante, el cual puede ser agua o sodio líquido.

Este fluido absorbe el calor dentro del reactor y permite generar vapor de agua mediante un sistema secundario.

La fisión nuclear es una tecnología que ha estado en uso desde hace más de 50 años. Los últimos diseños ofrecen mejor seguridad y rendimiento. [1]

2.2.5 Termosolares

La tecnología termosolar está basada en el concepto de la concentración de la radiación solar para producir vapor o aire caliente, que puede posteriormente ser usado en plantas eléctricas convencionales. Para la concentración la mayoría de los sistemas utilizan espejos debido a su gran reflectividad. [7]

En la figura 2.5 se muestra el esquema de una central termosolar.

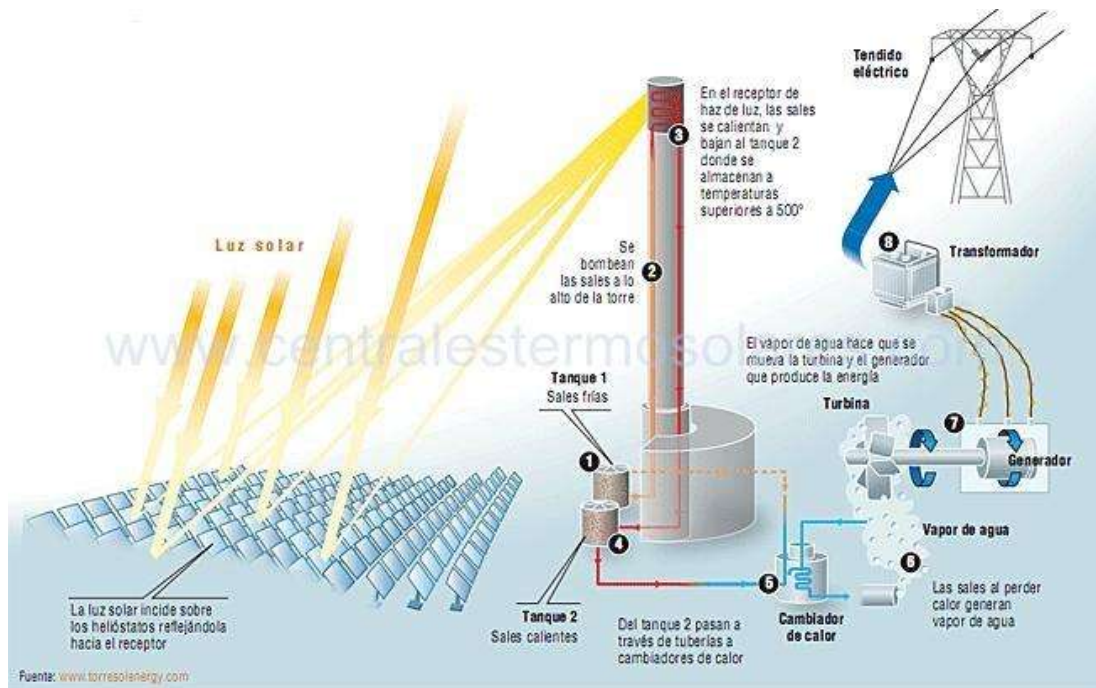


Figura 2. 5 Esquema de una Central Termosolar

2.2.6 Geotérmicas

El funcionamiento de una central geotérmica o geotermoelectrica se basa en la compleja operación de un sistema campo-planta.

El campo geotérmico es una extensión de tierra con mayor gradiente (temperatura) que lo normal.

También se conoce como área con calentamiento anómalo, cuya fuente de calor es un acuífero confinado (depósito de agua) almacenado y limitado por una capa sello, impermeable, que conserva el calor y presión, formando lo que se conoce como reservorio térmico. Este yacimiento de agua almacenado y calentado de forma natural en el subsuelo por una fuente de calor no tan profunda denominada cámara magmática, usualmente está relacionado con actividad volcánica. La alta presión que alcanzan estos reservorios muchas

veces rompe los estratos rocosos o utilizan las fallas geológicas existentes y salen a la superficie en forma de fumarolas, manantiales de agua caliente, ausoles o geiser.

El proceso de generación inicia con la extracción de una mezcla de vapor y agua geotérmica desde el reservorio geotérmico a través de los pozos productores, ya en la superficie, se separan el vapor de agua geotérmica utilizando un equipo llamado separador ciclónico. Una vez separados, el agua se inyecta nuevamente al subsuelo, mientras que el vapor ya seco es conducido hasta la central generadora. [8]

En la figura 2.6 se muestra el esquema de una central geo termoeléctrica.

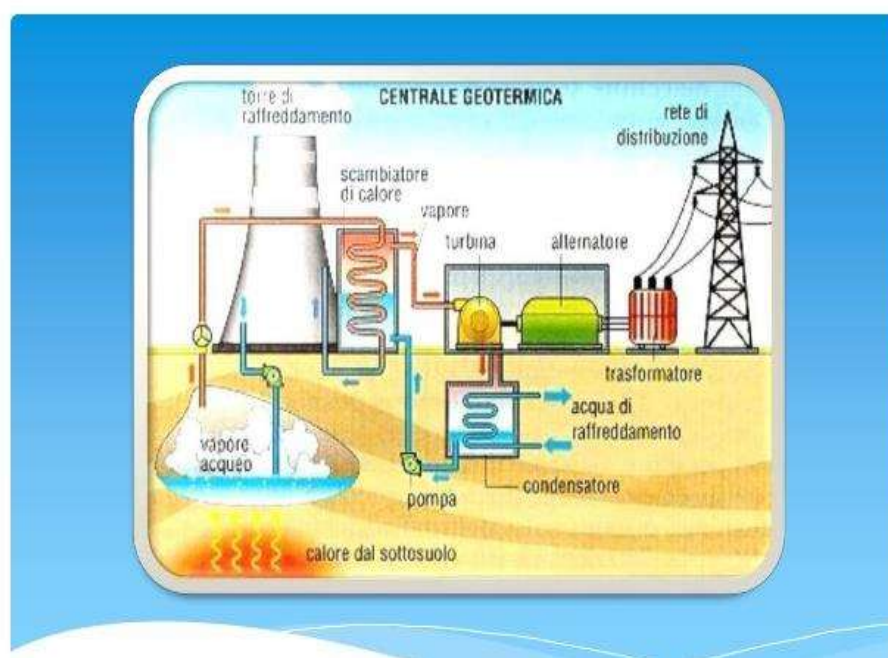


Figura 2. 6 Esquema de una Central Geotérmica

2.3 Centrales hidroeléctricas

En una central hidroeléctrica, se aprovecha la energía potencial del agua para convertirla en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. Este proceso consiste en hacer pasar un flujo de agua por una turbina hidráulica acoplada a un generador eléctrico

Las centrales Hidroeléctricas varían en diseño, capacidad y tamaño, según las condiciones topográficas y geológicas de los lugares donde está disponible el recurso hídrico; tienen bajos costos de operación, pero sus costos de inversión son mayores debido a la magnitud de la construcción de las plantas, generalmente se encuentran lejos de los centros de carga por lo que requieren extensas líneas de transmisión. [1]

2.3.1 Central hidroeléctrica aprovechando ríos

Las centrales hidroeléctricas se construyen en los cauces de los ríos, creando un embalse para retener agua. Para ello se construye un muro grueso de piedra, hormigón u otros materiales, apoyado generalmente en alguna montaña. La masa de agua embalsada se conduce a través de una tubería hacia los alabes de una turbina que suele estar a pie de la presa, la cual está conectada al generador. Así, el agua transforma su energía potencial en energía cinética, que hace mover los alabes de la turbina. [9]

En la figura 2.7 se muestra el esquema de una central hidroeléctrica que aprovecha el caudal de los ríos y este es el esquema más común en las hidroeléctricas.

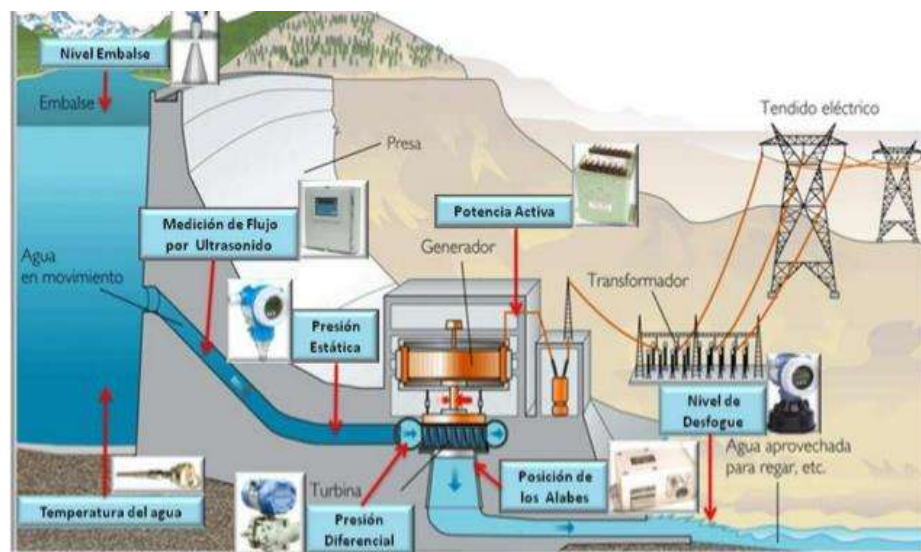


Figura 2. 7 Esquema de una Central Hidroeléctrica

2.3.2 Centrales mareomotrices

Las centrales mareomotrices son aquellos lugares en donde se transforma la energía producida por las mareas del mar a energía eléctrica.

Esto es basado en los principios de energía potencial y cinética, ya que la energía mareomotriz se obtiene a través del aumento o disminución de la marea, generando una diferencia de altura entre el nivel del mar y el nivel de un embalse, donde se transforma la energía potencial y cinética; mediante una serie de turbinas o alternadores ubicados al fondo de la represa, estos poseen aspas que, mediante la circulación de agua, comienzan a girar y producir electricidad. [10]

En la figura 2.8 se muestra un esquema de generación eléctrica en la que se aprovecha el nivel de las mareas

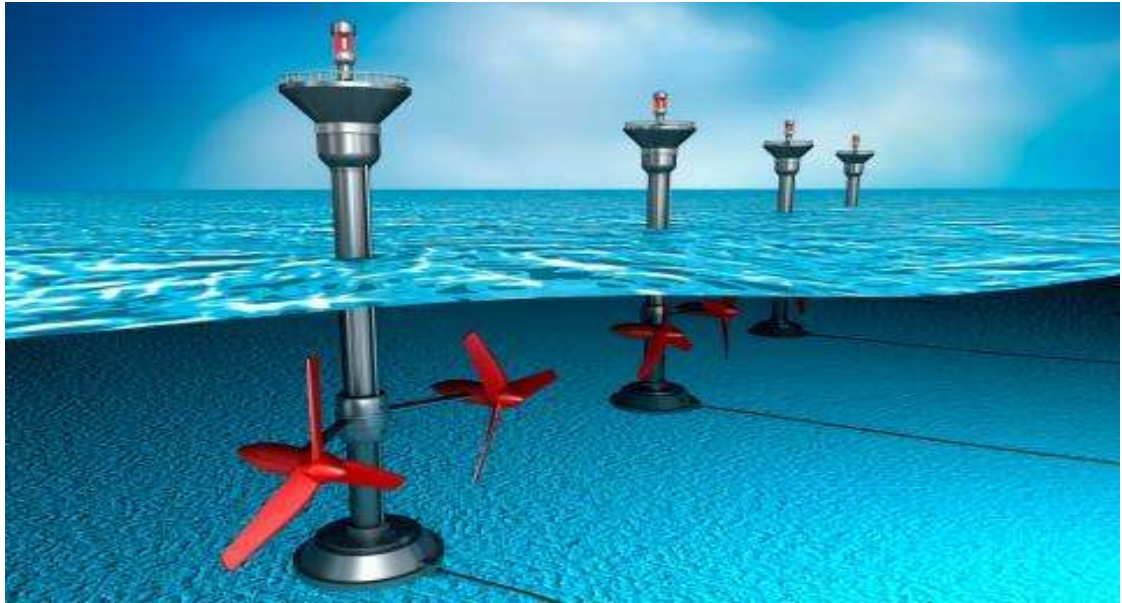


Figura 2. 8 Generación de energía mareomotriz

2.4 Centrales eólicas

Una central eólica es una instalación en donde la energía cinética del aire al moverse se puede transformar en energía mecánica de rotación. Para ello se instala una torre en cuya parte superior existe un rotor con múltiples palas, orientadas en la dirección del viento. Las palas o hélices giran alrededor de un eje horizontal que actúa sobre un generador de electricidad.

Las centrales eólicas aprovechan la energía cinética del viento para producir electricidad mediante turbinas eólicas (aerogeneradores). Un aerogenerador o turbina eólica es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica que impulsa un generador para producir electricidad.

Los aerogeneradores empiezan a funcionar cuando el viento alcanza una velocidad de tres a cuatro metros por segundo (m/s), y alcanzan su producción máxima con velocidades de 13 a 14 m/s.

El factor de planta para este tipo de centrales oscila entre 20% y 43%. Debido a que su capacidad es función de la de la velocidad del viento. [11]

En la figura 2.9 se muestra el esquema de un parque eólico en el que se genera energía eléctrica aprovechando las corrientes de aire.

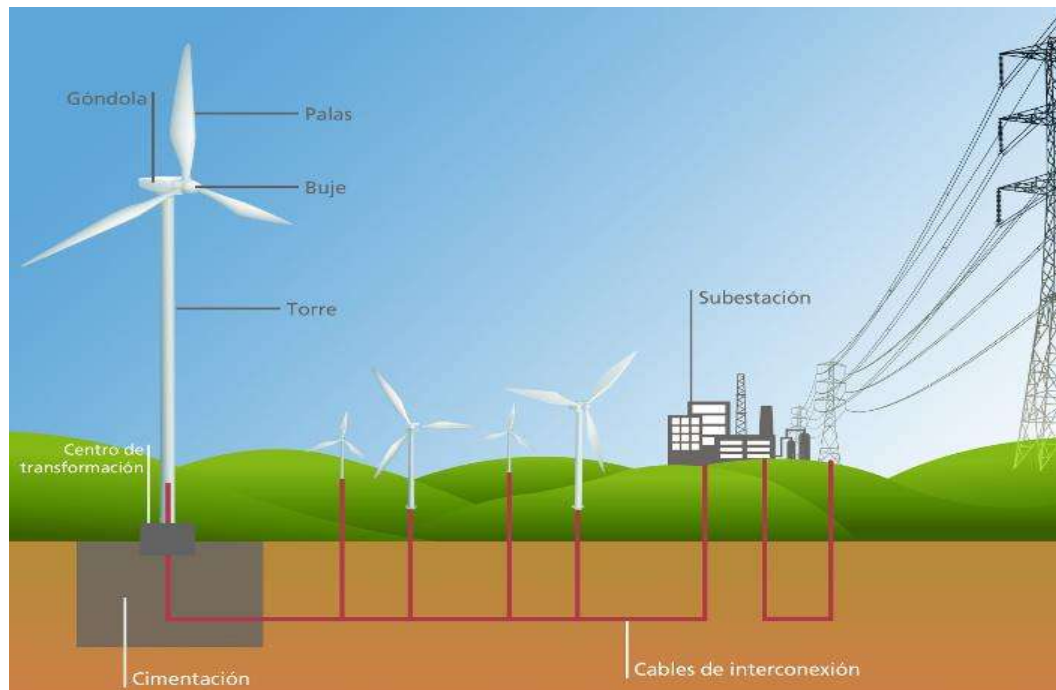


Figura 2. 9 Esquema de una Central Eólica

2.5 Centrales eléctricas fotovoltaicas

Esta tecnología consiste en la conversión de la luz solar en electricidad por medio de un dispositivo semiconductor (celdas fotovoltaicas).

La energía solar fotovoltaica es una tecnología que no requiere el uso de combustibles, por lo que puede ser utilizada cerca de los centros de consumo reduciendo la congestión del sistema eléctrico. [1]

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos formados por metales sensibles a la luz que desprenden electrones cuando los rayos de luz inciden sobre ellos, generando energía eléctrica. Están formados por celdas a base de silicio puro con adición de impurezas de ciertos elementos químicos, siendo capaces de generar cada una de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0.46 a 0.48 voltios. Estas celdas se colocan en serie sobre paneles o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado a las aplicaciones eléctricas.

Los elementos principales de un panel solar son: Generador solar, un conjunto de paneles fotovoltaicos que captan energía luminosa y la transforman en corriente continua de baja tensión; Acumulador: Almacena la energía producida por el generador y transforma a través

de un inversor la corriente continua en corriente alterna; regulador de carga, su función es evitar sobrecargas o descargas excesivas al acumulador, puesto que los daños podrían ser irreversibles; Inversor, se encarga de transformar la corriente continua producida por el campo fotovoltaico en corriente alterna, la cual alimentara directamente a los usuarios. [12]

En la figura 2.10 se representa una casa con instalación de paneles solares para su propio suministro eléctrico.



Figura 2. 10 Esquema de generación eléctrica mediante paneles solares

Capítulo 3

Generación de vapor en termoeléctricas

3.1 Introducción

En capítulos anteriores ya nos referimos a las centrales termoeléctricas y se explicó el funcionamiento de las mismas.

A continuación, nos enfocaremos al proceso de la generación del vapor con el que operan estas centrales, así como los distintos combustibles utilizados para la generación del mismo.

En las calderas es donde se genera el vapor. Están formadas por el horno (u hogar), que es la zona donde se produce la combustión y donde se encuentran los tubos de intercambio de calor por los que circula el agua que se calienta convirtiéndose en vapor, así como por varias superficies recuperadoras del calor de los gases de la combustión como los economizadores de agua, los sobrecalentadores y recalentadores de vapor y los calentadores de agua. [5]

El agua es el fluido de trabajo utilizado con mayor frecuencia en los sistemas de potencia con ciclo de vapor debido a las siguientes características:

- Es abundante, barata, no tóxica, químicamente estable y relativamente no corrosiva
- Cambio de entalpía específica grande a presiones ordinarias en el generador de vapor, lo que reduce el flujo másico para una potencia neta dada del ciclo

Por el contrario, el agua presenta las siguientes características no deseables para el buen funcionamiento de una central:

- Temperatura crítica baja ($374.14\text{ }^{\circ}\text{C}$) en relación a la temperatura máxima admisible en la entrada de la turbina, alrededor de $225\text{ }^{\circ}\text{C}$ inferior. Por tanto, para lograr una temperatura media de absorción del calor que consecuentemente permita obtener un rendimiento térmico elevado, el generador de vapor ha de operar en condiciones

supercríticas. Esto implica materiales de tuberías y tubos de intercambio costosos para lograr soportar las altas presiones de operación.

-La presión de saturación del agua a la presión normal de operación del condensador es muy inferior a la presión atmosférica. La consecuencia directa es la posible entrada de aire al sistema y la instalación de calentadores de agua de alimentación con desgasificación para eliminar el aire. [13]

3.2 Elementos fundamentales de una termoeléctrica

El agua para generar el vapor entra a la caldera a través de un economizador, por lo general situado en la zona más alejada del hogar, donde se precalienta con los gases de la combustión. Después baja a la parte inferior del hogar e inicia un recorrido ascendente a través de los tubos arrollados de los intercambiadores que constituyen las paredes del hogar. Aquí continua el calentamiento y se produce evaporación. Posteriormente, el vapor va a los separadores de humedad en los que se separa el agua del vapor agua-vapor. De aquí pasada a los sobrecalentadores situados bien en la zona de convección(primarios) o en la zona de radiación(secundarios) en los que adquiere la temperatura de servicio. Para controlar esta temperatura se utilizan atemperadores situados en las tuberías de entrada de los sobrecalentadores. La temperatura final del vapor recalentado se controla por la recirculación de gases. El vapor, con la temperatura y presión de servicio, sale hacia las turbinas, en donde se expande y regresa otra vez a la caldera para completar el ciclo. [5]

Normalmente en las centrales termoeléctricas se lleva a cabo la combustión de combustibles fósiles como son: Petróleo, gas natural, carbón mineral o crudo.

a) Caldera (1):

La caldera es el equipo principal de un generador de vapor en las centrales termoeléctricas, esta actúa como horno, transfiriendo calor del combustible que se quema a los tubos de agua *S1*, los cuales rodean por completo las llamas. Una bomba *P1* mantiene el agua circulando en los tubos.

b) Tanque (2):

Contiene agua y vapor a alta presión, produce el vapor requerido por las turbinas. También recibe agua suministrada por la bomba *P3* de alimentación de la caldera el vapor pasa rápidamente hacia la turbina de alta presión *AP* después de haber pasado por el supe calentador *S2*. El supercalentador, compuesto de una serie de tubos que rodean las llamas, eleva la temperatura del vapor a unos 200 ° C. Este incremento de

temperatura garantiza que el vapor está absolutamente seco y eleva la eficiencia global de la estación.

c) Turbina de alta presión (AP) (3):

Convierte la energía térmica en energía mecánica dejando que el vapor se expanda conforme pasa a través de sus aspas. Por consiguiente, la temperatura y presión a la salida de la turbina son menores que a la entrada. Para elevar la eficiencia térmica y evitar la condensación prematura, el vapor pasa a través de un recalentador S3, compuesto de un tercer juego de tubos calentados.

d) Turbina de mediana presión (MP) (4):

Es similar a la de alta presión, excepto que es más grande para que el vapor pueda expandirse más.

e) Turbina de baja presión (BP) (5):

Consta de dos secciones izquierda y derecha idéntica.

Las secciones de la turbina extraen la energía restante disponible del vapor.

El vapor que fluye hacia afuera de la turbina de baja presión se expande en un vacío casi perfecto creado por el condensador (6).

f) Condensador (6):

Hace que el vapor se condense dejando que fluya a través de tubos de enfriamiento S4. En los tubos fluye agua fría de una fuente externa, como un río o lago la cual arrastra el calor. Este es el vapor condensado que crea el vacío.

Una bomba de condensado P2 extrae el vapor condensado tibio y lo dirige a través de un recalentador (7) hacia una bomba de agua de alimentación (8).

g) Recalentador (7):

Es un intercambiador de calor.

Recibe vapor caliente, purgado de la turbina de alta presión (AP), para elevar la temperatura del agua de alimentación. Estudios termodinámicos indican que la eficiencia térmica global mejora cuando algo de vapor es purgado de esta manera en lugar de dejarlo que siga su curso normal a través de las tres turbinas.

h) Quemadores (9):

Suministran y controlan la cantidad de gas, aceite, carbón u otro combustible utilizado.

i) Ventilador de tiro forzado (10):

Suministra las grandes cantidades de aire necesarias para la combustión.

j) Ventilador de tiro inducido (11):

Conduce los gases y otros productos de combustión hacia un aparato de limpieza, y de allí a la chimenea y al aire externo.

k) Generador (G):

Directamente acoplado a las tres turbinas, convierte la energía mecánica en energía eléctrica

Para darse una idea mejor de las partes de una central termoeléctrica en la figura 3.1 se muestran enumeradas cada una de las partes de las que se hace mención anteriormente.

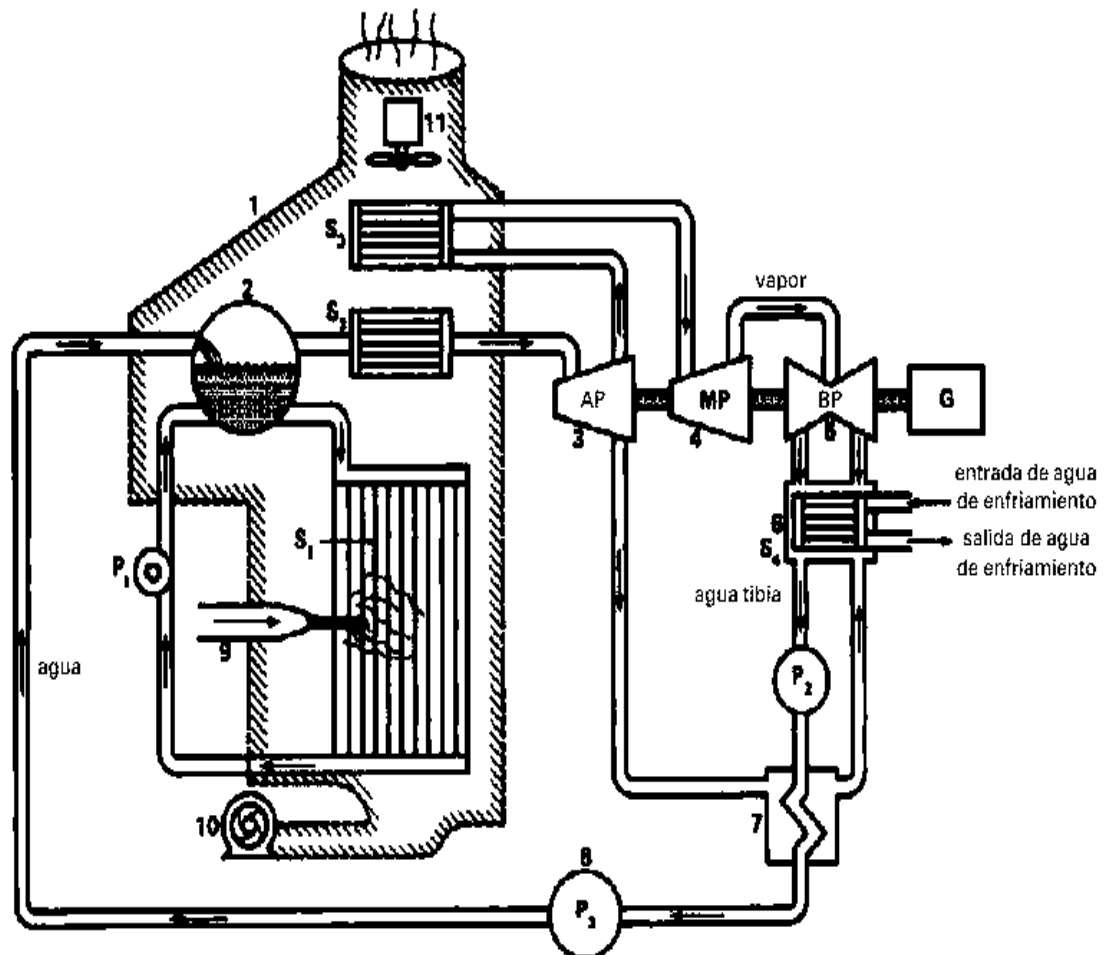


Figura 3. 1 Composición básica de una central termoeléctrica

3.3 Circuito de agua

Procedente del condensador llega el agua de alimentación de la caldera en fase líquida, sobre presionada con bombas y calentada en el economizador por los gases de escape de la caldera, en dirección a la chimenea. En la caldera se vaporiza y el vapor saturado (ligeramente húmedo, ya que al desprenderse del líquido arrastra consigo pequeñas cantidades del mismo ligeramente pulverizadas), se recoge en el calderín. A continuación, pasa al sobrecalentador donde prácticamente a presión constante se calienta hasta la temperatura máxima prevista y de ahí se desplaza a la turbina. Tanto en el sobrecalentado como en la tubería que lo une a la turbina, el flujo sufre una pérdida de presión por rozamiento que generalmente no se toma en cuenta.

Una vez que el vapor llega a la turbina a las condiciones de temperatura y presión adecuadas, provoca el giro del rodete (energía mecánica) y con él, el del rotor del generador eléctrico o alternador (energía eléctrica).

El vapor, ya sin energía a temperatura útil para poder seguir obteniendo trabajo, abandona la turbina y pasa al condensador donde se licua, cediendo calor al medio ambiente, a través del agua de refrigeración que circula en gran cantidad por el interior del haz de tubos que atraviesan el condensador. Del condensador se envía nuevamente a la caldera para repetir el ciclo. [13]

3.4 Circuito de gases de combustión

El aire necesario para la combustión es introducido en el hogar mediante ventiladores de tiro forzado. Los gases procedentes de la combustión en el hogar de tiro equilibrado salen al exterior con la ayuda adicional de ventiladores de tiro inducido. En su recorrido, pasan primero por el haz de tubos vaporizadores que comunica el colector inferior con el calderín (propriadamente el vapor). A continuación siguen su paso por el sobrecalentador y por el recalentador de vapor, que son los dispositivos intercambiadores de calor de más alta temperatura, seguidamente por el economizador (precalentador de agua) y finalmente por los precalentadores de aire hasta llegar a los precipitadores electrostáticos y la chimenea. [13]

3.5 Circuito de agua de refrigeración

Se hace de disponer de un gran almacenamiento de agua. Para garantizar los caudales necesarios para la refrigeración de los dos grupos en el periodo de estiaje, y este tiene su torre de refrigeración donde el agua cede el calor al aire ambiente a través de su propia evaporación. [13]

3.6 Ciclo Rankine

El ciclo rankine es un ciclo para la obtención de potencia, que opera con vapor. Este es producido en una caldera a alta presión donde se produce la reacción exotérmica de la combustión para generar calor, para luego ser llevado a una turbina donde se expande, transformando la energía térmica en mecánica de rotación del turbogenerador, donde perdería su presión. Su camino continuo al seguir hacia un condensador donde lo que queda de vapor pasa al estado líquido. Mediante bombas y calentadores se consigue que el agua líquida aumente la presión y temperatura para que pueda alimentar de nuevo a la caldera y cerrar el ciclo.

Como otros ciclos termodinámicos, el máximo rendimiento termodinámico es dado por el cálculo del máximo rendimiento del ciclo de Carnot. [13]

3.7 Diagramas T-S

Existen cuatro procesos distintos en el desarrollo del ciclo (suponiendo ciclo ideal con procesos adiabáticos e internamente reversibles), los cuales van cambiando el estado del fluido y que se pueden reflejar en un diagrama T-s Temperatura – entropía:

- . Expansión isotrópica del fluido de trabajo en la turbina desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador.
- . Transmisión de calor desde fluido de trabajo al refrigerante a presión constante en el condensador hasta el estado líquido saturado.
- . Compresión Isotrópica en la bomba. En él se aumenta la presión del fluido mediante un compresor o bomba, al que se le aporta un determinado trabajo.
- . Transmisión de calor hacia el fluido de trabajo a presión constante en la caldera.

En la figura 3.2 se observa un diagrama de temperatura entropía, en donde se muestran las propiedades del fluido considerando el ciclo rankine [13]

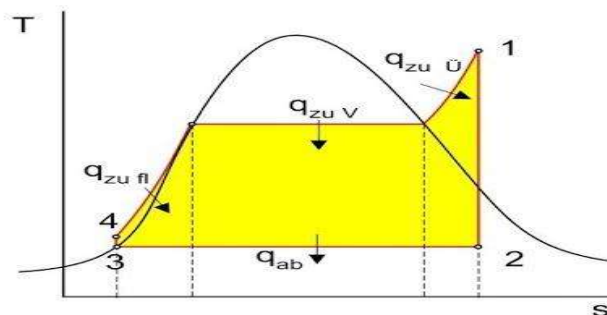


Figura 3. 2 Ejemplo de diagrama Temperatura-Entropía (T-S)

En realidad, los procesos no son adiabáticos ni internamente reversibles, pues tenemos distintas irreversibilidades y pérdidas

3.8 Mejoras en el ciclo Rankine

El rendimiento del ciclo Rankine se puede expresar en función de los calores transferidos en la caldera y el condensador y consecuentemente de las temperaturas de ambos focos:

$$\eta_{Rankin_ideal} = 1 - \frac{T_C}{T_B}$$

Dónde:

T_C = Temperatura del vapor en el condensador

T_B = Temperatura media de absorción de calor en la caldera

El análisis de la ecuación muestra que el rendimiento térmico del ciclo tiende a aumentar cuando la temperatura media a la que se absorbe el calor en la caldera aumenta y/o la temperatura a la que el calor se cede en el condensador disminuye.

Estas conclusiones, obtenidas para el ciclo Rankine ideal, también son válidas cualitativamente para ciclos termodinámicos reales

Experimentalmente, se ha comprobado que influyen de forma positiva en el rendimiento del ciclo de Rankin las siguientes características:

- 1.- Aumento de la temperatura máxima del ciclo (sobrecalentamiento)
- 2.- Disminución de la temperatura mínima y como consecuencia la presión mínima del ciclo (reducción de la presión del condensador que puede conllevar la utilización de degasificadores).
- 3.- Aumento de la presión máxima del ciclo (aumento de la presión de caldera – recalentamiento).
- 4.- Aumento de la temperatura del agua de alimentación de la caldera (regeneración).

Un incremento en la presión de caldera o descenso en la presión del condensador pueden provocar una reducción en la calidad de vapor en la salida de la turbina. Si la calidad de la mezcla es muy baja, el impacto de las gotas de líquido en los alabes de la turbina puede erosionarlos. En consecuencia, es práctica común mantener en la salida de la turbina con una calidad de vapor del 90%.

a) Sobrecalentamiento

El sobrecalentamiento consiste en la transferencia de energía adicional al vapor saturado para obtener vapor en condiciones de sobrecalentamiento a la entrada de la turbina. Esto se consigue en un equipo específico llamado sobrecalentador

El sobrecalentamiento al igual que el recalentamiento permite operar con presiones ventajosas en la caldera y condensador resolviendo el problema de bajo título de vapor. El sobrecalentamiento del agua en la caldera está limitado por las temperaturas máximas que soportan los materiales sometidos a grandes esfuerzos mecánicos como las tuberías, los alabes y los rodets de las turbinas $T_{B_{max}} \cong 550\text{ }^{\circ}\text{C}$

b) Disminución de la presión del condensador

La presión del condensador solo se puede bajar hasta que la temperatura de saturación del agua permita el intercambio del calor de condensador con el fluido de refrigeración. Habitualmente la diferencia de temperaturas entre ambos fluidos se establece en unos 10 grados para permitir el correcto intercambio de calor de forma económicamente adecuada. Para grandes y medianas instalaciones los condensadores trabajan en depresión (presión absoluta inferior a la atmosférica). Cuanto menor es la presión de condensación más elevado es el rendimiento térmico, ya que también disminuye la temperatura de foco frío. El trabajo en depresión exige métodos adicionales para evitar que el aire y otros gases que puedan alojarse en el interior provoquen la corrosión de la instalación, tales como los degasificadores.

c) Recalentamiento

Con el recalentamiento del agua se consigue una presión de caldera más alta sin que suponga una reducción del título de vapor a la salida de la turbina. En ella el vapor no se expande directamente hasta la presión del condensador, sino que lo hace en dos etapas. En la primera el vapor se expone hasta una presión que se estima en torno a un cuarto de la presión de sobrecalentamiento. Posteriormente, se vuelve a introducir en la caldera y se recalienta. Después del recalentamiento se vuelve a expandir en la segunda etapa de la turbina hasta la presión del condensador. A la primera etapa de la turbina se le denomina turbina de alta presión y a la segunda etapa de la turbina de media y baja presión. La principal ventaja del recalentamiento, con respecto al ciclo simple, es el incremento del título de vapor expulsado de la turbina.

Con sobrecalentamiento y recalentamiento, el rendimiento es mayor que en el ciclo simple, por lo que para una potencia específica neta de salida, el flujo másico de vapor será menor y también la demanda de agua de refrigeración, al disminuir el flujo de calor cedido a esta.

Las presiones óptimas de extracción se realizan entre $1/4$ y $1/10$ de la presión de la caldera cuando el ciclo no incluye regeneración. Para ciclos con regeneración la presión óptima de recalentamiento varía de $1/5$ a $1/4$ de la presión de caldera.

A la combinación de caldera, sobrecalentador y recalentador se la conoce como generador de vapor

d) Regeneración

La regeneración consiste en el precalentamiento del agua de alimentación de la caldera con extracciones de vapor de las turbinas, logrando de esta manera elevar la temperatura media de absorción de calor en la caldera. La regeneración introduce nuevos elementos al ciclo, como son los calentadores abiertos y cerrados. Los calentadores abiertos consisten en un intercambiador de calor por contacto directo en el cual se mezclan dos corrientes de agua para dar una corriente de temperatura intermedia. De las dos corrientes que entran al calentador una proviene de una extracción de vapor de la turbina y la otra del condensador. Como las presiones en el calentador han de ser iguales, se añade una bomba después del condensador para igualar la presión de la parte del vapor que ha sufrido la expansión completa, a la de extracción. En el caso de los calentadores cerrados, no se produce contacto directo entre ambos fluidos durante el intercambio de calor. Se obtiene una corriente de agua a temperatura intermedia entre la extracción y la proveniente del condensador. La extracción se reinyecta, mediante bombas, aguas abajo en el circuito primario de agua de alimentación proveniente del condensador, donde la temperatura es 2 C o 3 C inferior y por tanto la energía destruida es pequeña. Esta variación del ciclo Rankin implica las siguientes ventajas respecto al ciclo simple, como un aumento del rendimiento y una reducción del aporte de calor en la caldera. Presenta además la gran ventaja de evitar que todo el vapor que entra en la turbina llegue al condensador (aproximadamente $1/3$ parte del vapor de entrada), ya que la potencia de la turbina viene limitada por la cantidad de vapor que pueda fluir por las últimas ruedas de la misma, donde el volumen específico del vapor es elevado (aproximadamente $18\text{ m}^3/\text{kg}$). El diámetro de la última rueda y la altura radial de los alabes están limitados por consideraciones de orden mecánico, esto determina el área de la corona circular por donde pasa el vapor. Por tanto, cuanto menor sea la masa de vapor que sale en relación a la que entra, mayor podrá ser esta última y mayor potencia tendrá la turbina. Pero por otro lado también se encuentra el inconveniente del aumento de la complejidad de la instalación.

Para lograr el máximo rendimiento en una instalación con regeneración sin recalentamiento, los incrementos de entalpía deben ser iguales en todos los calentadores y en el economizador [13]

3.9 Caldera

Las plantas generadoras de potencia, dependen en gran medida de procesos de calentamiento. Los generadores térmicos transforman en calor un tipo de energía determinado y, por tanto, atendiendo al tipo de energía origen de la transformación térmica, pueden ser eléctricos, nucleares o químicos. En el caso del se hace mención en este texto es de tipo químico que aprovecha el poder calorífico almacenado en combustibles derivados del petróleo

En las plantas de potencia se emplea un determinado tipo de generador térmico químico denominado caldera, donde la energía se cede a un flujo de trabajo (agua) que se somete a un proceso industrial (generación de energía eléctrica).

Las calderas son máquinas térmicas diseñadas para generar vapor saturado, El vapor generado se obtiene mediante un proceso de cambio de estado líquido a vapor a presión y temperatura constante

Las calderas están compuestas básicamente de una cámara aislada y recubierta con material refractario contenedora de los tubos portadores del fluido de proceso a calentar, así como quemadores de combustible en aire para la generación de gases calientes. [13]

A continuación, en la figura 3.3 se muestra la sección transversal de una caldera de circulación forzada

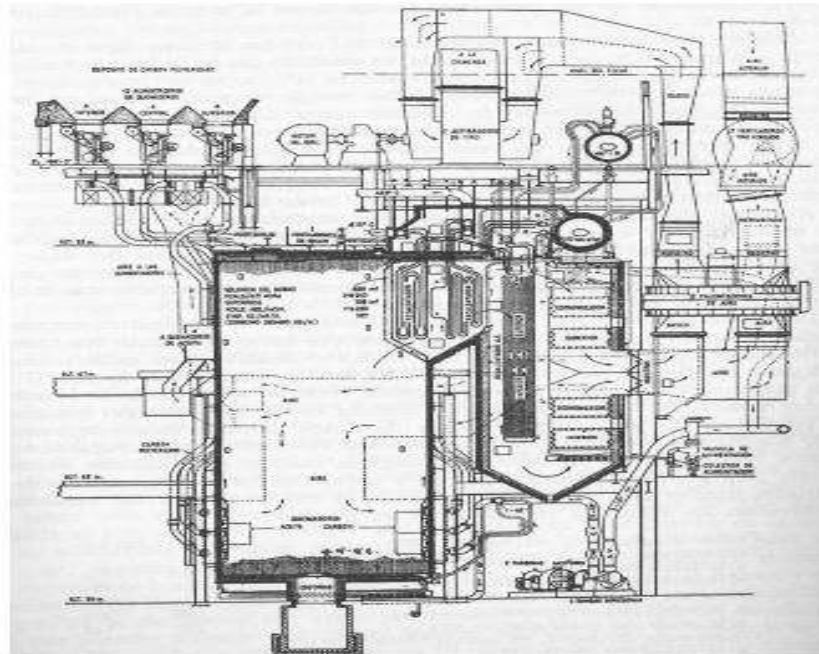


Figura 3. 3 Sección longitudinal de una caldera de circulación forzada

3.9.1 Clasificación de calderas

La clasificación de calderas se puede realizar atendiendo a diversos elementos diferenciadores, tales como puedan ser: su aplicación, la temperatura de salida de los humos, el tipo de toma de aire, tipo de combustible, etc., en cualquier caso, a continuación, se presentan dos tipos de clasificación que ayudaran a la comprensión del tipo de caldera empleada en la generación de potencial eléctrico

Atendiendo, al fluido caloportador, las calderas se pueden clasificar en:

- *Caldera de vapor*: es toda caldera en la que el medio de transporte es vapor de agua
- *Caldera de agua caliente*: es toda caldera en la que el medio de transporte es agua a temperatura inferior a 110°C. Esto implica sobrepresiones de entre 1 y 2 bares
- *Caldera de agua sobrecalentada*: Es toda caldera en la que el medio de transporte es agua a temperatura superior a 110°C. Esto implica sobrepresiones del entorno de los 20 bares.

Es habitual inducir una sobrepresión en el líquido de alimentación de la caldera para que hierva a mayor temperatura, con lo que se puede obtener más calor sin la aparición de vapor, el cual disminuye considerablemente el coeficiente de película y por tanto puede generar aumentos bruscos de temperatura en los tubos de intercambio.

Atendiendo, a la morfología de las calderas, estas se pueden clasificar en:

- *Calderas de fundición*: como indica su nombre el material del que están hechas estas calderas es una aleación de hierro y más de un 2% de masa de carbono, La fundición, es un material quebradizo y no soldable, por lo que las presiones de operación de este tipo de calderas serán menores que las de acero, alrededor de 10 bares. Lo habitual son gases de la combustión a presión atmosférica, área de intercambio pequeña. Poca pérdida de carga en los humos y por tanto de tiro natural. No generan vapor, únicamente agua caliente. Su rendimiento está en torno a un 60%-70%.
- *Calderas de acero*: El material del que se hacen estas calderas es una aleación de hierro y carbono, donde este último no supera el 2% en masa, siendo habitual un 0,2% o 0,3% de carbono en dicha aleación. A su vez, las calderas de acero se dividen en dos grandes grupos:
 - *Pirotubulares*: en este tipo de calderas, el fluido caloportante en estado líquido se encuentra en un recipiente, y es atravesado por tubos por los cuales circulan los gases producto de la combustión que ha generado la llama en el hogar. Presentan una elevada pérdida de carga de humos.

El hogar y los tubos están completamente rodeados de agua. Las presiones máximas de operación oscilan en torno a 20 bares. Su rendimiento esta entre 70% y 80%.

- *Acuotubulares*: son aquellas calderas en las que el fluido de trabajo se desplaza a través de tubos durante su calentamiento. La llama se forma en un recinto de paredes tubulares que configuran la cámara de combustión. Son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida, en torno a 200 bares y tienen menor inercia térmica. La estructura de los tubos no ha de ser tan robusta como en las calderas piro-tubulares. En su contra están una mayor inversión inicial en la instalación y mayores problemas de suciedad en el lado del agua. Su rendimiento esta entre un 80% y un 90%.

- *Calderas de condensación*: son aquellas calderas que aprovechan el calor latente de condensación del vapor de agua contenido en los gases producto de la combustión. Para conseguirlo, se deben evacuar los gases a temperaturas inferiores a las de condensación, por debajo de los 100°C, lo que por otro lado reduce el tiro térmico del conducto de gases y hace necesario utilizar un ventilador. El uso de combustibles sin contenido de azufre, como el gas natural y los GLP, permitiendo la construcción de este tipo de calderas. El resto expulsan los gases procedentes de la combustión a temperaturas superiores a 130°C, para conseguir tiro térmico y para evitar que el agua condense y forme ácido sulfúrico o sulfuroso al combinarse con los óxidos de azufre, que corroería sus partes metálicas. El rendimiento de estas calderas resulta ser del orden de un 105%-110% medido sobre el poder calorífico inferior. [13]

3.9.2 Elementos de una caldera

Los principales elementos en los que se puede dividir una caldera son los siguientes:

Hogar: es una cámara donde se efectúa la combustión. La cámara confina el producto de la combustión y puede resistir las altas temperaturas que se generan a las presiones de operación. Sus dimensiones y geometría se adaptan a la velocidad de liberación del calor, el tipo de combustible y al método de combustión, de tal manera que e haga lo posible por tener una combustión completa y proporcione un medio apropiado para eliminar la ceniza. Los hogares enfriados por agua se utilizan con la mayor parte de unidades de calderas, es decir en su gran mayoría, y para todos los tipos de combustible y métodos de combustión. El enfriamiento por agua de las paredes del hogar reduce la transferencia de calor hacia los elementos estructurales y, en consecuencia, puede limitarse a su temperatura a la que satisfaga

los requisitos de resistencia mecánica y resistencia a la oxidación. Las construcciones de tubos enfriados por agua facilitan el logro de grandes dimensiones del hogar y optimas de techos, tolvas y montajes de los quemadores, así como el uso de pantallas tubulares, planchas o paredes divisoras, para aumentar la superficie absorbente del calor en la zona de combustión. El uso de hogares con enfriamiento por agua reduce las pérdidas de calor al exterior. En el hogar la transferencia de calor es fundamentalmente por radiación, aunque también tengan lugar la convección y la conducción

En la figura 3.4 se muestra un esquema de circulación de un hogar de polvo de carbón, del tipo F, de la Babcocks and Wilcox

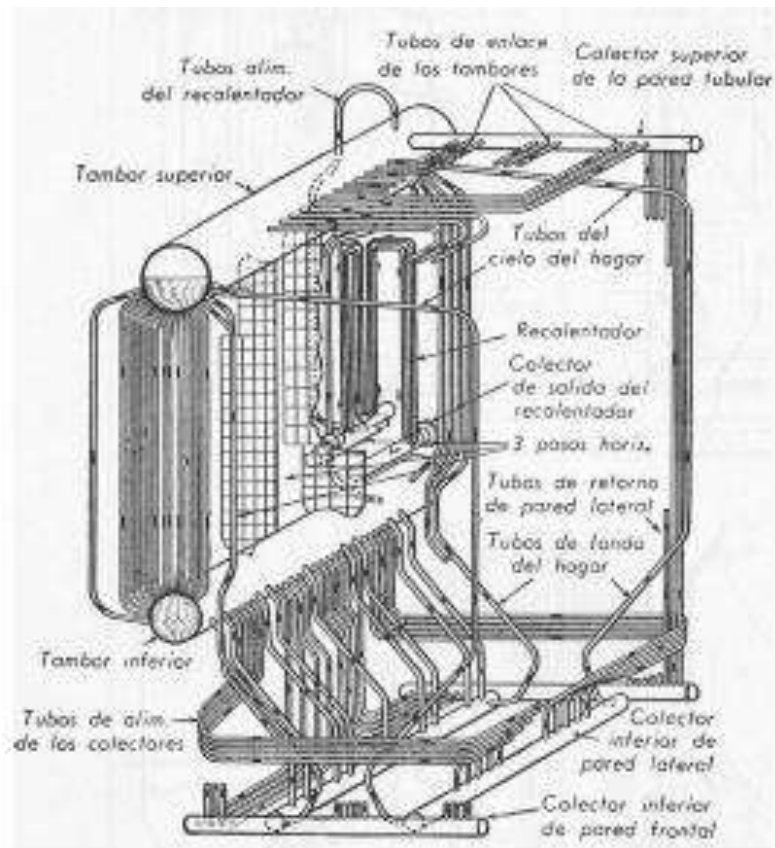


Figura 3. 4 Esquema de circulación de un hogar de polvo de carbón

Quemador: Elemento acondicionador de la mezcla comburente-combustible. El propósito principal de un quemador es mezclar y dirigir el flujo de combustible y aire de tal manera que se asegure el encendido rápido y la combustión completa. En los quemadores de carbón pulverizado, una parte del 15% al 25% del aire, llamada aire primario, se mezcla inicialmente con el combustible para obtener un encendido rápido y actuar como un medio de transporte del combustible

En la figura 3.5 se muestra el esquema de un quemador turbulento de Foster-Wheeler para carbón pulverizado, gas y aceite pesado

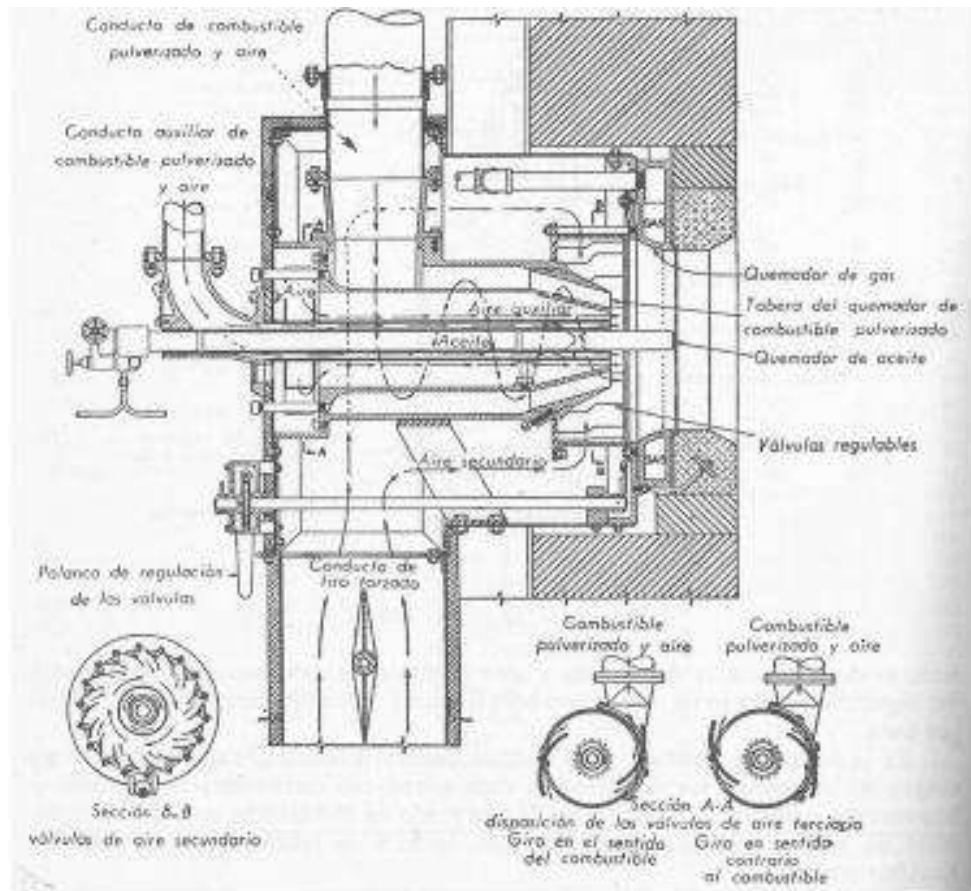


Figura 3. 5 Quemador turbulento de Foster-Wheeler

Intercambiador de calor: es el elemento que actúa como interface para el intercambio del calor entre los gases calientes generados en la combustión y el fluido caloportante (agua).

Envolvente: elemento aislante de la caldera con el exterior

Sistema de tiro: elemento de la caldera que permite la circulación del fluido caloportante. Puede ser natural o forzada. Por encima de determinadas presiones la diferencia de densidades entre líquido y vapor se hace tan despreciable que se hace necesario el tiro forzado.

Sistemas auxiliares: se trata de los elementos de control y seguridad de la caldera, que evitan en todo momento las situaciones de funcionamiento peligroso o anormal de la instalación. [13]

3.10 Funcionamiento básico de un generador de vapor

Los generadores de vapor son máquinas térmicas diseñadas para generar vapor sobrecalentado. Mediante un proceso de cambio de estado líquido a vapor a presión y temperaturas constantes (considerando despreciables las pérdidas de energía al exterior) se obtiene en primer lugar vapor saturado. Posteriormente, mediante un proceso de transferencia de calor sensible con el que se logra aumentar a presión constante la temperatura de dicho vapor saturado, se genera vapor sobrecalentado.

Es importante destacar la diferencia entre caldera y generador de vapor. La caldera genera vapor saturado, mientras que el generador de vapor son los siguientes:

- Cuerpo del intercambiador
 - Haces vaporizadores: son los tubos que forman el hogar de la caldera y por los que circula el fluido caloportante (agua) en el caso de las calderas acuotubulares. Estos tubos reciben el calor generado por la llama en el hogar de forma directa por lo que la transferencia de calor es mayoritariamente por radiación. Están expuestos a temperaturas muy elevadas y en presencia de gases secos que pueden resultar corrosivos, por lo que se hace fundamental el control de su temperatura a la hora de evitar posibles roturas por sobrepasar la resistencia térmica del material. Se debe evitar en todo caso el “dryout” de la superficie interior de los haces, manteniendo siempre una ebullición nucleada
 - Sobrecalentador primario: Elemento que recibe el vapor de agua seco del calderín y transfiere calor sensible a presión constante para aumentar su temperatura. En su mayor parte es un proceso de transferencia de calor dominado por convección.
 - Atemperador o Desrecalentador: Elemento del generador de vapor que regula la carga de la turbina y evita la posible rotura de los tubos. Dispone de atomizadores de agua que descargan sobre el vapor entrante del sobrecalentador y disminuyen su temperatura.
 - Sobrecalentador secundario: Al igual que el sobrecalentador primario transfiere calor sensible al vapor que sale del atemperador. Es un proceso de transferencia de calor dominado fundamentalmente por radiación.

- Recalentador: Este elemento del generador de vapor recibe el vapor sobrecalentado parcialmente expandido en el primer cuerpo de turbina y logra mediante transferencia de calor sensible aumentar el nivel térmico del vapor sobrecalentado y por tanto también el rendimiento de la caldera. A su vez aumenta el título de vapor a la salida de la turbina de baja presión. Lo que evita que la turbina trabaje en condiciones de vapor húmedo que puedan dañar sus alabes. El proceso de transferencia térmica es dominado por convección.

En la figura 3.6 se ve representado el tamaño real comparado con una persona de un hogar en centrales térmicas

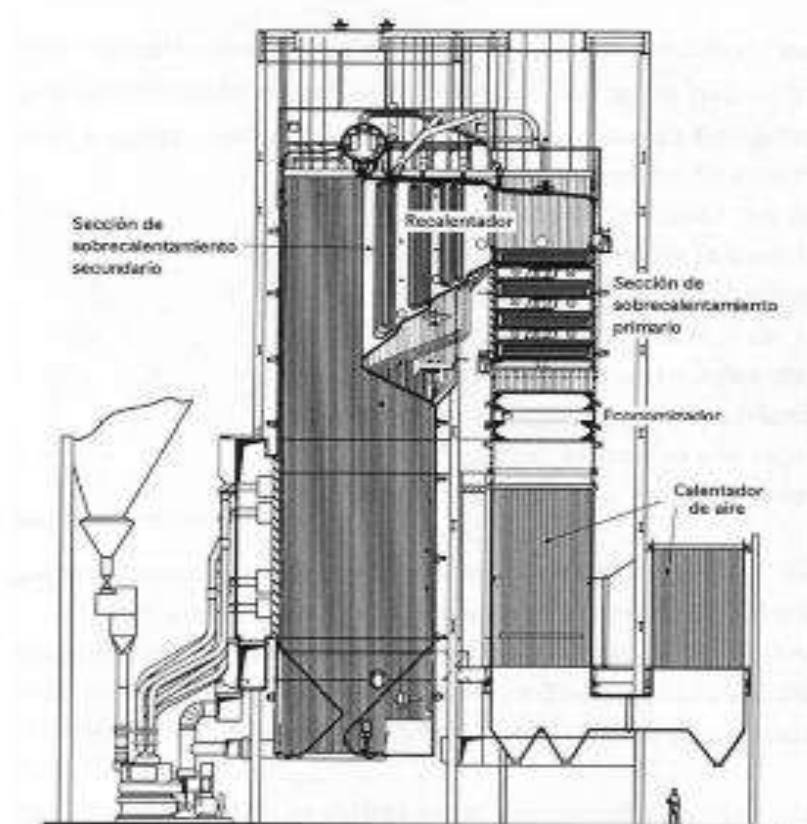


Figura 3. 6 Sección del hogar en una central térmica de Potencia

- Economizador: Es un dispositivo mecánico intercambiador de calor que pretende reducir el consumo de energía, o desarrollar otra función práctica como el precalentamiento de un fluido. Hacen uso de la entalpía en fluidos que no están lo suficientemente calientes como para ser usados en una caldera, recuperando la potencia

que de otra forma se perdería, y mejorando el rendimiento del ciclo térmico

Este elemento transmite calor sensible al líquido subenfriado que entra a la caldera, hasta que este alcanza un nivel térmico 5 grados por debajo de la temperatura de saturación a la presión de la caldera. Para conseguirlo utiliza el calor de los gases de escape de la combustión en el hogar de la caldera, que de otra manera se perdería. De esta manera mejora el rendimiento del ciclo termodinámico. El proceso de transferencia térmica está dominado por convección

En la figura 3.7 se muestra como es un economizador de la Foster-Wheeler y como está formado por un grupo de tubos

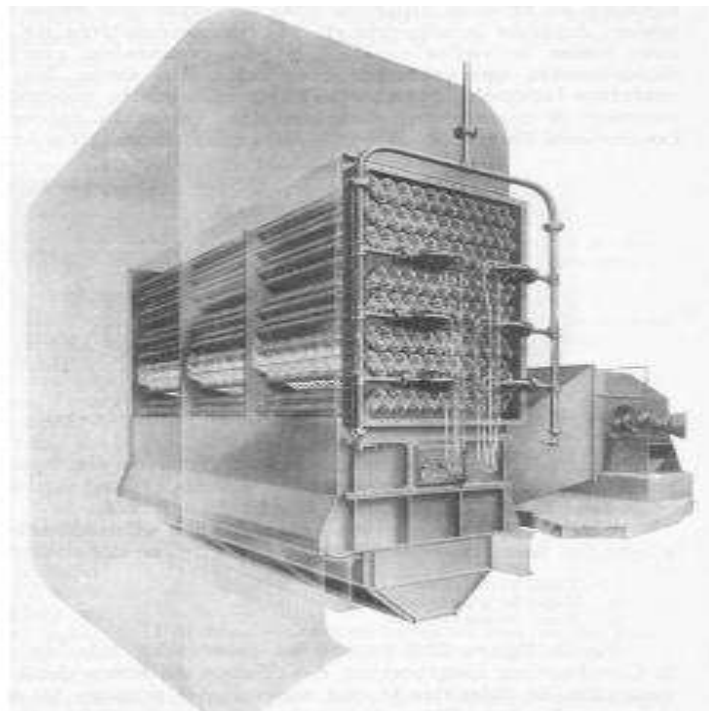


Figura 3. 7 Economizador Foster-Wheeler

- Precalentador de aire: al igual que el economizador utiliza gases de escape de la combustión para aumentar el nivel térmico del agua de entrada a la caldera el precalentador los utiliza para aumentar el nivel térmico de los gases de entrada a los quemadores. Inicialmente el aire se encuentra a temperatura ambiente (unos 298K) y en el precalentador alcanza temperaturas próximas a los 480K. El proceso de transferencia térmica está dominado por convección.

- Calderin: Es el elemento del generador de vapor que tiene las siguientes funciones principales:
 - Separar el líquido del vapor saturado procedente de los haces vaporizadores mediante un sistema de separadores ciclónicos que recogen el agua líquida que puede ser arrastrada por el vapor. A la salida obtiene vapor seco que se envía al sobrecalentador primario. A consecuencia de esto, regula la carga de la turbina.
 - Mantiene un nivel de agua líquida suficiente como para garantizar que los haces vaporizadores no se queden secos en ningún caso, alcanzando el “dryout” de la superficie de intercambio. [13]

En las figuras 3.8 y 3.9 se muestran los esquemas de un calderin y las partes que lo conforman.

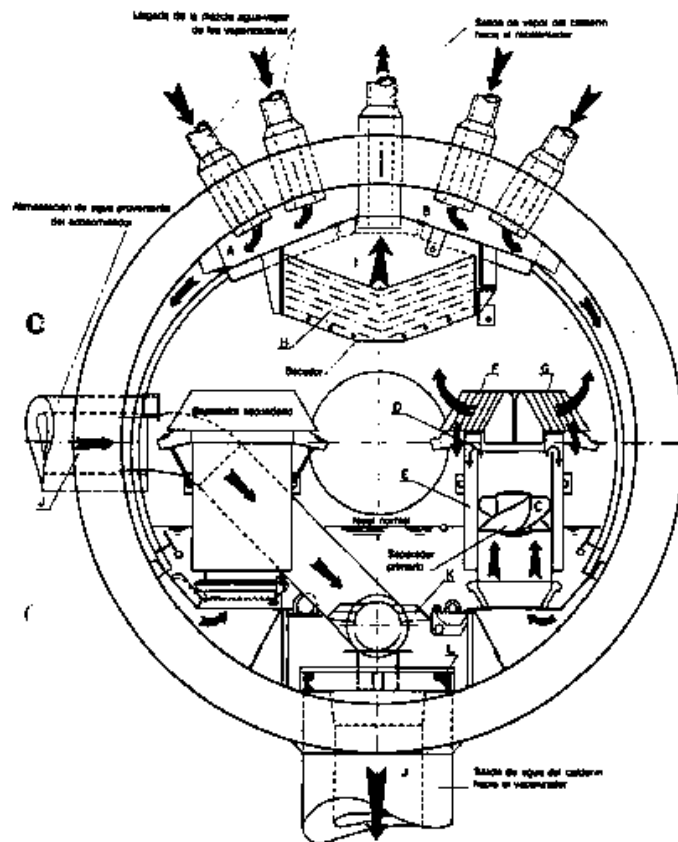


Figura 3. 8 Sección transversal de un calderin

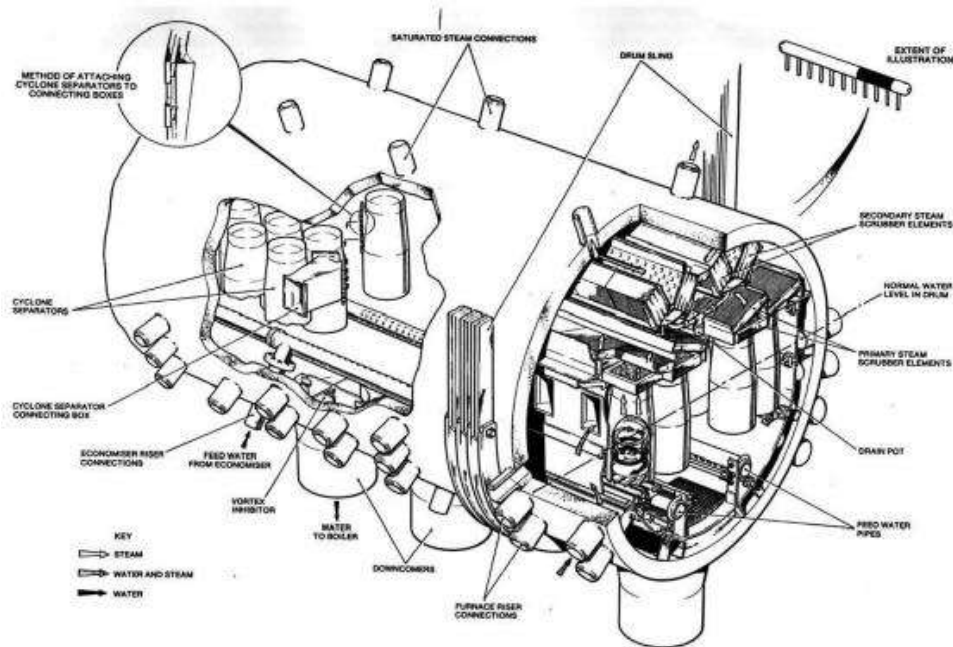


Figura 3. 9 Partes de un calderin

3.10.1 Transferencia de calor en el hogar de una caldera

El hogar de una caldera se divide para su estudio en: una fuente de calor gaseosa, un sumidero de calor y una envolvente de material refractario. El calor es transferido al sumidero de calor por radiación y convección de los gases calientes y por rerradiacion de las paredes de material refractario. Para el desarrollo de modelos matemáticos que puedan representar el comportamiento de la caldera, es necesario considerar los dos siguientes fenómenos de transferencia de calor:

- La emisión de calor por parte de los gases calientes producto de la combustión (fuete de calor)
- El calor absorbido por los tubos (sumidero de calor), teniendo en cuenta su configuración geométrica y las propiedades de los materiales que los forman. Este calor estará constituido fundamentalmente por el calor transferido por los gases calientes y de forma secundaria por el calor intercambiado con las paredes de material refractario. [13]

3.10.2 Balance energético de la caldera

El calor liberado en el interior de la caldera es el resultado de la combustión.

Dicho calor será el producto del gasto másico de combustible quemado por el poder calorífico inferior del mismo:

$$Q_1 = M_f \Delta h_f$$

Donde:

Q_1 = Calor liberado por la combustión

M_f = Gasto másico de combustible

Δh_f = Poder calorífico inferior del combustible

El calor generado en la combustión aparece inicialmente como calor sensible en la corriente de gases de escape calientes (M_g), compuesta por los productos de combustión y el aire en exceso. Parte de este calor es transferido al sumidero a una tasa de transferencia Q_g , mientras que parte se pierde a través de las paredes del hogar a una tasa de transferencia Q_l y el resto es transportado por los gases de escape parcialmente enfriados. Al exterior e la caldera a través de la chimenea con una tasa de transferencia Q_p . [13]

$$Q_f = Q_g + Q_l + Q_p$$

3.10.3 Gases calientes como fuente de calor

La composición química de los gases producto de la combustión de hidrocarburos depende de la elección del tipo de combustible y la cantidad de aire consumido por encima de las condiciones estequiométricas. En la práctica, se utiliza alrededor de un 20% de aire en exceso para lograr la combustión completa de combustibles sólidos pulverizados.

Los combustibles líquidos y sólidos producen llamas luminosas debido a la presencia de partículas de base carbono como pueda ser el hollín, resultado de la combustión incompleta de hidrocarburos y materia mineral presente en el combustible.

Los gases producto de la combustión se consideran cuerpos grises por lo que habrá que calcular su emisividad, que relaciona la potencia emisiva de dicho cuerpo gris con la potencia emisiva de un cuerpo negro, siendo esta última la máxima potencia emisiva que puede emitir un cuerpo por radiación. La potencia emisiva de un cuerpo negro está definida por la ley de Stefan-Boltzmann, la cual relaciona dicha potencia con la cuarta potencia de la temperatura del cuerpo a través de la constante de Stefan-Boltzmann.

Cuerpo negro $Q_b = S \cdot \sigma \cdot T_b^4$

Cuerpo gris $Q = S \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T_b^4$

Donde:

Q_b = Potencia calorífica que un cuerpo negro emite por radiación

Q_b = Potencia calorífica que un cuerpo gris emite por radiación

σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($5,6 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

ε = Emisividad del cuerpo gris

T_b = Temperatura superficial del cuerpo

S = Superficie del cuerpo

El dióxido de carbono y el agua son las mayores fuentes de radiación en llamas no luminosas. La emisividad ε_g , de un volumen de gases producto de la combustión, depende de la temperatura de dichos gases T_g , y del producto de las presiones parciales de dióxido de carbono y agua por la longitud media radiante. Para el cálculo de la emisividad del gas producto de la combustión será empleado el “Método de Leckner”, el cual no entra dentro del alcance de este proyecto, por lo que únicamente se hará uso de los valores de emisividad que proporciona.

La longitud media radiante L , se define como el radio de un volumen semiesférico de gas con una emisividad equivalente al volumen de gases a estudio. [13]

3.10.4 Sumidero de calor: Haces de tubos

La transferencia de calor por radiación a los haces de tubos (sumidero), no solo depende de la emisividad de los gases producto de la combustión y de la emisividad de la superficie de los tubos, también depende del tamaño relativo de la superficie ocupada por el sumidero. Esto se debe a que el recubrimiento del material refractario de la envolvente irrradia hacia el interior de la caldera calor que ha recibido de la llama y parte de esta radiación es absorbida por el sumidero.

Una buena aproximación para el intercambio de calor con los haces de tubos en las calderas de centrales térmicas es la ecuación desarrollada por Hotel y Sarofim en 1967 para haces de tubos íntimamente mezclados con la superficie refractaria, llamada ecuación de la “superficie especular”.

$$Q_g = A_1 \cdot \varepsilon_{media} \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T_1^4)$$

$$\varepsilon_{media} = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + C \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right) \right)^{-1}$$

Donde:

Q_g = potencia calorífica intercambiada por los gases de escape con el sumidero

A_1 = área total del sumidero

C = relación entre área cubierta por el sumidero frente al área total del hogar

ε_1 = emisividad de la superficie de los haces de tubos (usualmente alrededor de 0.85)

ε_g = emisividad de los gases producto de la combustión

ε_{media} = emisividad media del sumidero de calor

T_1 = temperatura de la superficie de los haces de tubos (alrededor de la mitad de la temperatura de los gases de escape)

T_g = Temperatura de los gases producto de la combustión. [13]

3.10.5 Efecto de la geometría de los haces de tubos en el suministro de calor

Hasta el momento se ha considerado el sumidero de calor como si de una superficie plana se tratara. En la práctica se disponen haces de tubos montados de manera muy cercana a la envolvente refractaria. Normalmente la superficie entre tubos permite el paso de radiación que no es interceptada por los mismos y que es parcialmente rerradiada por la superficie refractaria posterior, contribuyendo al flujo de calor hacia el sumidero. Debido a los efectos de apantallamiento mutuo entre tubos adyacentes, el flujo de calor por radiación alrededor de los tubos varia. La magnitud del flujo de calor por radiación en la parte posterior de los tubos es mucho menor debido a que proviene de la rerradiacion de la superficie refractaria.

Hottel propuso una simplificación de este problema, en la cual el sumidero de calor es definido como una superficie plana equivalente con una superficie igual a la cubierta por los tubos y una emisividad efectiva ε_{eff} , la cual proporciona la misma transferencia de calor por radiación que el banco de tubos.

El primer paso para el cálculo de dicha emisividad efectiva es la determinación de la fracción, F , de radiación interceptada por los tubos. La ecuación para F está basada en la geometría óptica:

$$F = 1 - \frac{1}{B} \cdot \{(B^2 - 1)^{\frac{1}{2}} - \cos^{-1}(1/B)\}$$

El valor calculado para la fracción de radiación interceptada se puede utilizar para el cálculo de la emisividad efectiva del haz de tubos. Incluyendo la radiación de una superficie trasera refractaria adiabática, de la siguiente manera

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{F(2-f)} + \left(\frac{B}{\pi}\right) \cdot \left(\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right) - 1\right)}$$

$$B = \frac{p}{d}$$

Donde:

B = relación entre el paso de tubo y el diámetro de tubo

p = paso de tubo (distancia de centros)

d = diámetro del tubo

De la ecuación anterior se deduce que el espaciado de los tubos es de especial relevancia. En parte esto es debido al hecho de que la superficie real de los tubos por unidad de área total proyectada es proporcional a $1/B$, hecho que se ve reflejado en la reducción de la fracción de radiación F interceptada, la cual ocupa un lugar predominante en la determinación de la emisividad efectiva. [13]

3.10.6 Modelos matemáticos para la simulación de hogares de caldera

La simulación puede definirse como una representación del comportamiento de un proceso real mediante la resolución de un modelo matemático. Las ventajas que ofrece la utilización de modelos matemáticos se resume en:

- Determinación de las variables o parámetros críticos que influyen de manera decisiva en el funcionamiento del sistema
- Determinación de las condiciones óptimas de funcionamiento
- Estudio de forma segura, de las condiciones extremas de funcionamiento, alejadas de las normales de operación

La completa descripción matemática del hogar de la caldera es excesivamente compleja, ya que se tienen que combinar la descripción aerodinámica del problema, las reacciones químicas que tienen lugar en la combustión y el proceso de transferencia de calor que genera.

Los modelos completos del hogar de la caldera se dividen, por tanto, según su método de cálculo, en dos grupos:

- *Métodos por zona*: son empleados en el caso en que el patrón de calor liberado por la llama sea conocido. Consiste en dividir y analizar el hogar y sus paredes en

zonas discretizadas. Serán calculadas las áreas de intercambio efectivas entre zonas y el calor transferido por efecto de la radiación.

- *Métodos por flujo:* en este caso en lugar de dividir el hogar en zonas, se divide la radiación incidente en un punto del sistema entre un número de direcciones características, representando promedios sobre un ángulo sólido específico. Estos métodos se usan en combinación con métodos de predicción de caudal y patrones de mezcla.

Los modelos simples del hogar de caldera permiten realizar un rediseño del sistema y valoración económica preliminar del mismo.

a) Modelo “Well stirred”

El modelo “well stirred” es la aproximación más sencilla al funcionamiento de la caldera. Se trata de un modelo cerodimensional donde el hogar se divide en tres zonas: La zona central de gases calientes, la zona del sumidero de calor (banco de tubos con el fluido caloportador) y las paredes de material refractario. La zona de combustión y la zona ocupada por los productos calientes de la combustión son consideradas una única zona central de gases calientes que transfiere calor por radiación al sumidero de calor y a las paredes de material refractario que contienen el hogar de la caldera. Este modelo tiene en cuenta las siguientes simplificaciones:

- Los gases calientes están perfectamente mezclados a una temperatura uniforme T_g .
- El sumidero de calor es considerado un cuerpo gris con una temperatura uniforme T_1 .
- La superficie de material refractario devuelve todo el calor que recibe por radiación.

Posteriormente se han hecho versiones mejoradas de este modelo, en las que se tienen en cuenta términos adicionales para la mezcla imperfecta y las pérdidas de calor por las paredes.

Este modelo es adecuado para el cálculo del calor promedio transferido, pero no proporciona información sobre las variaciones espaciales, en particular aquellas debidas a cambios en la tasa de liberación de calor que ocurren durante el trayecto de salida de los gases producto de la combustión.

La solución obtenida con este modelo matemático conlleva alrededor de un 20% de error. Por lo que para el cálculo más preciso del hogar se opta por un modelo matemático unidimensional.

b) Modelo “Plug-Flow”

El modelo “Plug-Flow” es un modelo unidimensional que proporciona una mayor descripción del funcionamiento de las calderas, ya que puede calcular la variación axial del calor liberado.

La aproximación realizada por el modelo se ilustra en la figura . En lugar de calcular los flujos de calor totales, tal como propone el método “well stirred”, el modelo “Plug-Flow” considera la caldera como un tubo de longitud L dividido en pequeños segmentos de tamaño dx , sobre los que actúan los siguientes flujos de calor:

En la figura 3.10 se muestran el corte longitudinal y transversal del hogar de una caldera de la marca Plug-Flow

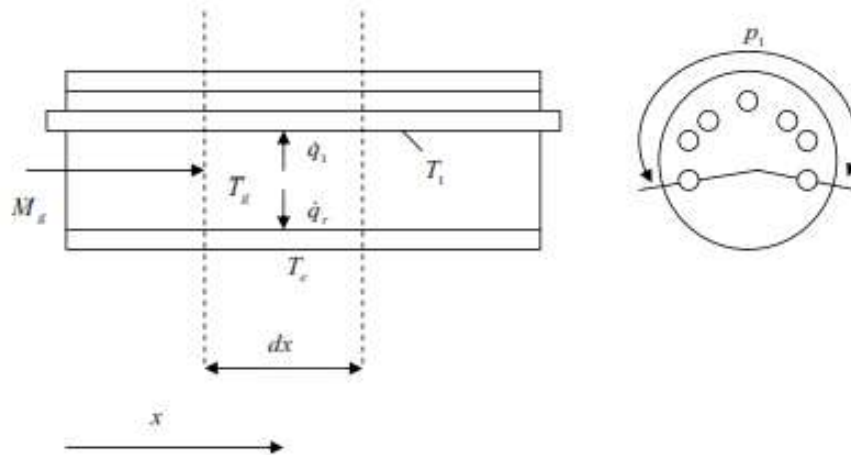


Figura 3. 10 Representación gráfica del modelo Plug-Flow

q_1 = flujo de calor local desde los gases calientes al sumidero

q_r = flujo de calor a través de la pared refractaria hacia el exterior de la caldera

Estos flujos de calor actúan sobre las superficies definidas por los siguientes parámetros.

En el caso de q_1 , este actúa sobre el sumidero que recubre el perímetro p_1 , mientras que q_r actúa sobre todo el perímetro de la pared refractaria p_r .

El tercer factor que se necesita para el cálculo es la tasa local de calor liberado por unidad de longitud del tubo debido a la combustión. En este modelo se asume que la tasa de liberación volumétrica de calor es conocida y es función de la distancia.

$$h_f = f(x)$$

El calor liberado por unidad de longitud viene dado por $h_f \cdot S$, donde S es el área de la sección transversal de la caldera. Por tanto, la tasa total de calor liberado vendrá dada por la siguiente expresión:

$$Q_f = S \cdot \int_0^L h_f dx$$

Las hipótesis realizadas con el modelo “Plug-Flow” son:

- Las superficies se comportan como cuerpos grises
- Las superficies de material refractario están en equilibrio térmico
- Los caudales son uniformes, la temperatura del gas en cualquier posición a lo largo del eje de la caldera está caracterizado por una temperatura, T_g , la cual varía con la posición x. El sumidero de calor está caracterizado por una temperatura T_1 .
- La transferencia de calor por radiación en la dirección axial de la caldera puede ser despreciada y la longitud media radiante correspondiente a un cuerpo de longitud infinita puede ser utilizada para el cálculo de la emisividad del gas.

El balance de energía para el modelo “Plug-Flow” está basado en un elemento de caldera de longitud dx, por lo tanto, dicha ecuación quedará de la siguiente forma:

$$S \cdot h_f \cdot dx = q_1 \cdot p_1 \cdot dx + M_g \cdot C_{pg} \cdot dT_g + q_r \cdot p_r \cdot dx$$

Donde:

M_g = flujo masico de gases calientes

C_{pg} = calor especifico a presión constante de los gases en x.

dT_g = incremento de temperatura de los gases en el intervalo dx

El cual puede ser expresado como:

$$\frac{dT_g}{dx} = \frac{S \cdot h_f - q_1 \cdot p_1 - q_r \cdot p_r}{M_g \cdot C_{pg}}$$

Las ecuaciones de transferencia de calor por radiación, para la determinación de los flujos de calor hacia los haces de tubos (q_1) son los siguientes:

$$q_1 = \varepsilon_{media1} \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T_1^4)$$

$$q_1 = \varepsilon_{mediar} \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T_r^4)$$

Donde:

ε_{media1} = emisividad media del haz de tubos.

ε_{mediar} = emisividad media de la superficie de material refractario.

σ = constante de Stefan-Boltzmann.

T_g = temperatura media de los gases en cada celda.

T_1 = temperatura de la superficie de los tubos.

T_r = temperatura de la superficie de material refractario.

Como hipótesis para el cálculo del flujo de calor perdido a través del material refractario, se toma la temperatura de la superficie de la envolvente de material refractario T_r igual a la temperatura de la superficie de los tubos T_1 . Como la emisividad media depende de la temperatura de la superficie en contacto con el gas a través de la emisividad efectiva de dicha superficie y de la temperatura del gas a través de la emisividad del gas, se tiene que las dos expresiones anteriores para ambos flujos de calor son idénticas:

$$q_r = f(\varepsilon_{mediar}, \sigma, T_r, T_g)$$

$$q_1 = f(\varepsilon_{media1}, \sigma, T_1, T_g)$$

$$\varepsilon_{mediar} = f(\varepsilon_{ff}(T_r), \varepsilon_g(T_g))$$

$$\varepsilon_{media1} = f(\varepsilon_{ff}(T_1), \varepsilon_g(T_g))$$

$$T_r = T_1 \rightarrow q_r = q_1$$

Por tanto, teniendo en cuenta el balance de energía en el elemento “dx” y las simplificaciones anteriores, se puede calcular, tras varias iteraciones hasta alcanzar la precisión requerida, el valor de “dTg” en ese elemento “dx”. Con el valor de “dTg_{n-1}” calculado para un elemento “n-1” se puede calcular la temperatura de salida “Tgout_{n-1}” de ese mismo elemento, que por otra parte coincidirá con la temperatura de entrada al elemento “n”. Como temperatura de entrada al primer elemento se tomará la temperatura de precalentamiento del aire de combustión. [13]

$$Tgmedia_{n-1} = Tgin_{n-1} + \frac{gdT_{n-1}}{2}$$

$$Tgout_{n-1} = Tgin_{n-1} + dTg_{n-1}$$

$$Tgin_n = Tgout_{n-1}$$

$$Tgin_1 = T_0$$

Donde:

T_0 = Temperatura de precalentamiento del aire.

3.10.7 Sistemas de control de calderas

Controlar de forma eficaz las condiciones de operación de una caldera es necesario, teniendo en cuenta que las condiciones de trabajo exigentes (temperaturas y presiones elevadas) constituyen la causa principal de peligro por riesgo de explosiones. También se ha de tener en cuenta que un control eficaz de la instalación de manera directa en el aspecto económico, considerando los elevados costes de operación (gran cantidad de combustible quemado) y de mantenimiento de estas instalaciones.

Un control eficaz de la caldera deberá proporcionar una rapidez de respuesta al sistema frente a las variaciones en la demanda.

a) Fenómeno de “falso nivel”. Esponjamiento y contracción en el calderin de vapor

El calderin es un elemento fundamental en el modelado del control de la caldera. Un buen sistema de control deberá interpretar correctamente los fenómenos de esponjamiento y contracción del nivel de líquido en el calderin como consecuencia de aumentos o disminuciones en la demanda de vapor de la caldera, y que provocan una variación del nivel en el sentido opuesto al que intuitivamente podría esperarse. A este fenómeno se le conoce con el nombre de “falso nivel”.

Si aumenta repentinamente la demanda de vapor, el nivel, en lugar de disminuir al ser extraído más vapor, aumenta temporalmente debido a una caída momentánea de la presión de vapor causada por el aumento de consumo. Esta disminución de presión inicial provoca una mayor evaporación y un aumento en el tamaño de las burbujas de vapor (esponjamiento) que hace aumentar el nivel en el calderin, hasta que el flujo de calor pueda incrementarse lo suficiente como para restaurar el valor de presión.

Por el contrario, si disminuye repentinamente la demanda de vapor, se producirá una disminución temporal del nivel en el calderin (contracción). Un fenómeno parecido ocurre con la variación de agua de alimentación.

b) sistema de control mínimo

El sistema de control mínimo debe garantizar el funcionamiento correcto de la caldera al mantener las variables críticas de proceso dentro de unos límites razonables. Hay que tener en cuenta que entre las variables de proceso existe una gran interacción.

El sistema de control mínimo incluirá:

- Control de la presión en el colector de vapor, mediante la manipulación del flujo de entrada de combustible al hogar.
- Control del nivel de líquido en el calderin de vapor, mediante la manipulación del flujo de agua de alimentación a la caldera.
- Control de temperatura del vapor sobrecalentado, mediante la manipulación del flujo de agua de entrada al atemperador.

c) principales parámetros de control

Los principales parámetros a controlar para lograr unas óptimas condiciones de funcionamiento y seguridad en la instalación de la caldera son los siguientes:

- *Control del nivel del agua del calderín:* la falta de agua puede generar el aumento incontrolado de temperatura de la caldera, pudiendo llegar a provocar la rotura de los tubos. El control de nivel sería relativamente fácil simplemente actuando sobre la entrada de agua, pero la solución que se propone debe resolver los dos problemas siguientes: rapidez de respuesta ante la variación de la demanda y el fenómeno de falso nivel. Esto se soluciona mediante un control “feedforward + feedback” donde la señal proveniente del nivel del calderín es corregida con la señal que detecta las variaciones en la demanda de vapor. Este control adelanta su respuesta al problema expuesto y regula la apertura de la válvula de alimentación de agua al calderín.
- *Control de la combustión (presión de vapor):* el paso del combustible y comburente debe quedar cerrado cuando la caldera esta parada. La combustión con defecto de aire debe ser evitada, al igual que se debe evitar el paso de aire en exceso, el cual contribuye a la disminución de la temperatura de llama y por tanto a bajar el rendimiento del sistema,
- *Control de exceso de oxígeno:* el punto óptimo de aire en exceso varia no solo con la caldera, sino con el porcentaje de carga. Es importante disponer de la curva experimental que relaciona el exceso de oxígeno con la carga de la caldera. Para el control se puede emplear un analizador de oxígeno, de óxido de zirconio.
- *Control de la temperatura del vapor:* esto evita que se generen puntos calientes con temperaturas excesivas que puedan acortar la vida de la caldera.
- *Control de la purga continua:* un exceso de purga consume energía y encarece el tratamiento de agua aportada y un defecto de purga aumenta los sólidos disueltos y disminuye el rendimiento de la caldera, así como el tiempo entre revisiones. Se debe instalar un analizador cerca del calderín.
- *Control de la temperatura de los humos:* la temperatura excesiva implica pérdidas excesivas de energía. La baja temperatura tiene riesgo de producir condensaciones indeseadas que provoquen la corrosión y oxidación de la instalación.
- *Control de la bomba y el ventilador:* el paro de la bomba de circulación de agua (en el caso en que la haya) implica un calentamiento excesivo de la misma y de la caldera. La parada del ventilador puede provocar un excesivo aumento de temperatura de la caldera al no evacuar los gases de escape.
- *Control de encendido y mantenimiento de la combustión:* la extinción de la llama, es debida a en gran medida al aumento fortuito de la proporción aire/combustible, sobrepasando los límites de la inflamabilidad

- *Control del quemador:* se debe controlar el encendido y modular la potencia en función de las necesidades térmicas de la instalación.
- *Control de la aparición de inquemados:* esta se controla mediante un analizador de gases.
- *Control de condensador:* se estos se producen, para proceder a su evacuación y si es preciso a su neutralización.
- *Control del suministro eléctrico:* de vital importancia se los sensores son eléctricos. Si falla el suministro eléctrico la caldera debe ser parada.

d) Sistemas de regulación de la carga

A continuación, se exponen diversos tipos de regulación de la carga de una caldera:

sistema de regulación modulante o continua: es el sistema empleado en calderas industriales, ya que el mejor rendimiento ofrece.

- *Generador de vapor.* La señal primaria de gobierno del regulador principal del sistema es el valor de la presión de vapor generado, que se toma a la salida de la caldera. Las válvulas de combustible y las carpetas de aire de combustión varían su posición en función de la variación del valor de la presión de vapor, la cual a su vez cambia con la demanda de vapor
- *Inyectando agua de alimentación a la caldera:* la señal primaria de gobierno en este caso es el valor de nivel de agua en el calderín, la cual controla la posición de las válvulas que controlan la inyección de agua de alimentación a la caldera.
- *Regulando la temperatura del vapor sobrecalentado:* la señal primaria de gobierno en este caso es el valor de la temperatura de impulsión del vapor sobrecalentado tomado a la salida de la caldera, la cual regula la posición de las válvulas de entrada de agua al atemperador.

Sistema todo/nada: los quemadores se encienden o apagan al sobrepasar los valores de consigna

Sistema de regulación en escalones: los quemadores se encienden en distintos escalones de potencia predeterminados (varga, carga mínima, carga máxima) en función de la demanda. [13]

Capítulo 4

Análisis energético de un generador de vapor en termoeléctricas

4.1 Introducción

Existen diversos ciclos teóricos, compuestos por procesos internamente reversibles. Uno de ellos es el denominado ciclo de Carnot, que puede funcionar como sistema cerrado o como sistema de flujo en régimen estacionario.

Este puede resumirse en la siguiente secuencia de procesos:

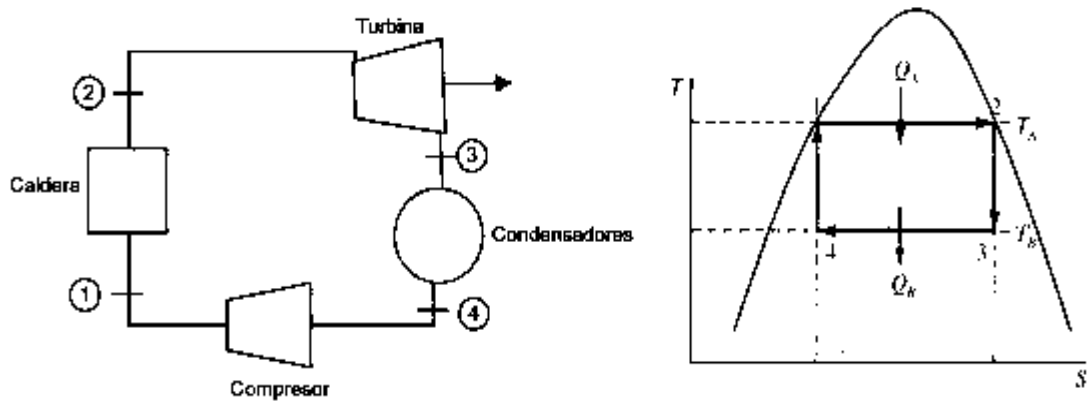


Figura 4. 1 Esquema de una central térmica y su ciclo de Carnot

1-2 A la presión alta del estado 1 se comunica calor a presión constante (y a temperatura constante), hasta que el agua se encuentra como vapor saturado en el estado 2

2-3 Una expansión adiabática e internamente reversible del fluido de trabajo en la turbina hasta alcanzar la temperatura T_B en el estado 3

3-4 El vapor húmedo que sale de la turbina se condensa parcialmente a presión constante (y temperatura constante) hasta el estado 4 cediendo calor

4-1 Se comprime isotrópicamente vapor de agua húmedo, que se encuentra en el estado 4, hasta el estado 1 de líquido saturado

El rendimiento térmico del ciclo de Carnot, es el máximo posible bajo condiciones a la cual esté operando. Para no tener que lidiar con las complicaciones que esto pueda causar, en el análisis de las centrales termoeléctricas se utiliza **el ciclo rankine**, que es una modificación al ciclo de Carnot

A continuación, se llevará a cabo el análisis de una central termoeléctrica enfocada al rendimiento térmico, considerando esta central con diferentes ciclos de vapor apoyándonos en el ciclo rankine para tener conocimiento sobre la eficiencia del combustible empleado en este tipo de centrales eléctricas [14]

4.2 Potencia calorífica a vapor seco

La planta de generación de vapor ideal que aparece en la figura se puede analizar mediante el ciclo Rankine, cuyos diagramas presión-volumen y temperatura-entropía aparecen en la figura 4.2.

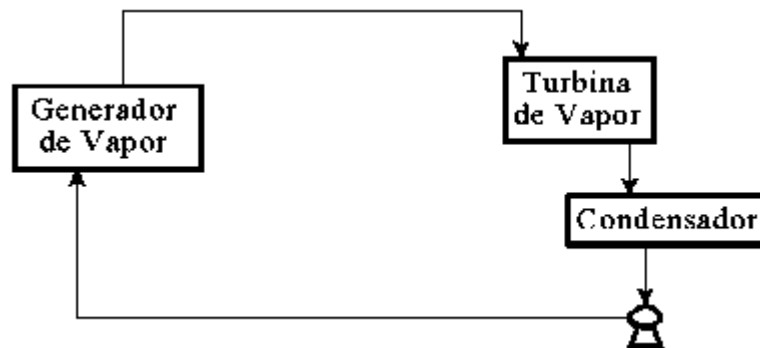


Figura 4. 2 Diagrama de una central termoeléctrica a vapor seco

El vapor saturado descargado por la caldera a una presión P_1 es suministrado a la turbina, en donde se expande isoentropicamente hasta la presión P_2 . En el condensador se transforma el vapor húmedo isobárica a isotérmicamente, en líquido saturado mediante la remoción de calor. Puesto que la presión $P_2 = P_3$ es mucho menor que la presión del vapor

en la caldera $P_4 = P_1$, un líquido saturado mediante la remoción de calor. Se bombea isoentropicamente hasta alcanzar la presión P_4 .

El líquido comprimido es suministrado a la caldera, en donde se calienta primero hasta su temperatura de saturación correspondiente a la P_1 , y luego se evapora hasta transformarse finalmente en vapor seco para terminar el ciclo. [4] [14]

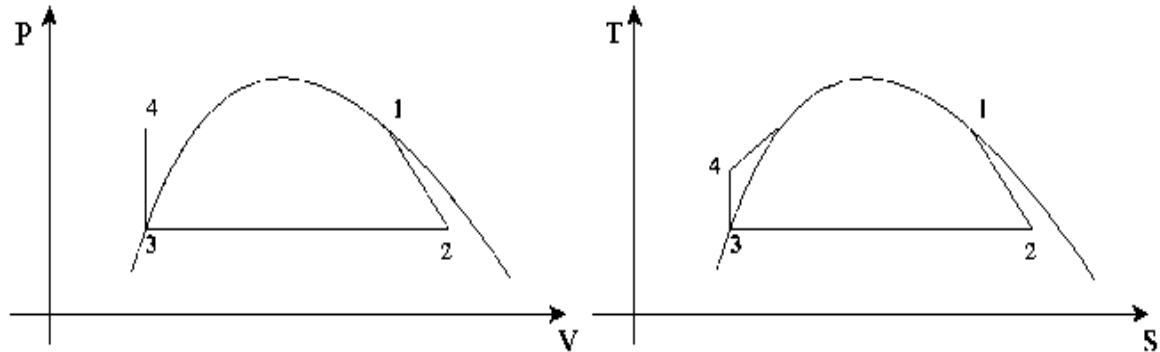


Figura 4. 3 Diagrama T-S de una central termoeléctrica:
a) ideal, b) real

La eficiencia del ciclo Rankine ideal, puede obtenerse de la definición original de eficiencia.

$$e = \frac{\text{Trabajo neto o util}}{\text{Trabajo entregado al sistema}}$$

El trabajo desarrollado por la turbina, despreciando diferencias de energía cinética y potencial es:

$$W_c = h_1 - h_2$$

Por otro lado, la energía por unidad de masa que toma el agua en el generador de vapor es:

$$Q = h_1 - h_4$$

A continuación, se analizará una central termoeléctrica tomando en cuenta las consideraciones antes mencionadas:

Se tiene una planta termoeléctrica convencional la cual se muestra en la figura en la que el vapor entra a la turbina, seco y a una presión de 15MPa, la presión en el condensador es de 10KPa y la potencia a la salida del generador es de 300MVA. Calcular cantidad calorífica (Q) del ciclo y cantidad calorífica ($\dot{Q}$) requerida para producir la potencia de dicho generador en los diferentes ciclos

15 MPA = 150 bar

10 KPa = 0.1 bar

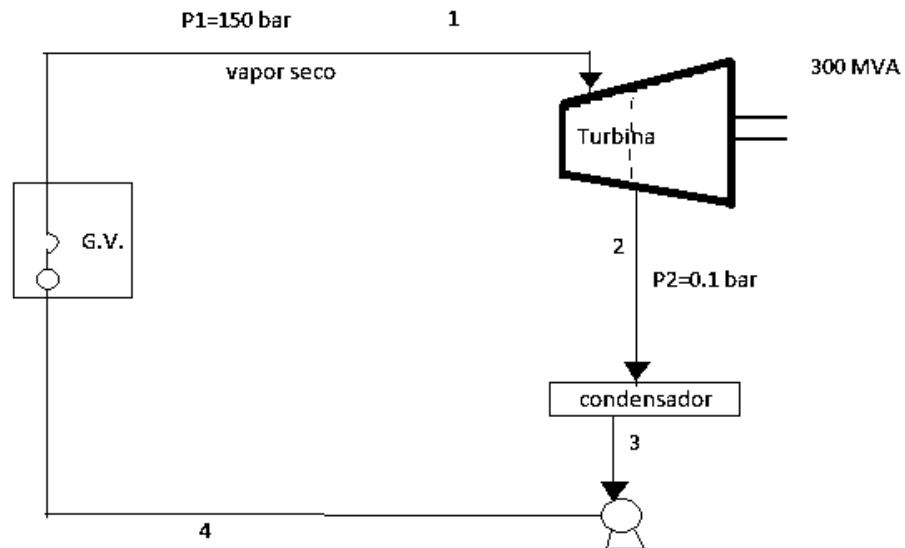


Figura 4. 4 Central termoelectrica con vapor seco

De las tablas de vapor se tiene:

$$h_1 = h_g = 2610.5 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{f2} = 191.83 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 = s_g = 5.3098 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{°K)}$$

$$h_{fg2} = 2392.8 \text{ kJ/kg}$$

$$s_{f2} = 0.6493 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{°K)}$$

$$s_{g2} = 8.1502 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{°K)}$$

$$s_{fg2} = s_{g2} - s_{f2} = 8.1502 - 0.6493 = 7.5009 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{°K)}$$

Como en la turbina el proceso es isoentropico:

$$s_1 = s_2 = s_g = s_{f2} + x_2 s_{fg2}$$

Despejando la calidad nos queda:

$$x_2 = \frac{s_1 - s_{f2}}{s_{fg2}}$$

$$x_2 = \frac{5.3098 - 0.6493}{7.5009} = 0.62132$$

Con esas operaciones se calcula la entalpia h_2

$$h_2 = h_{f2} + x_2 h_{fg2}$$

$$h_2 = 191.83 + (0.62132) (2392.8) = 1678.4766 \text{ kJ/kg}$$

Para posteriormente calcular el trabajo de la turbina w_t

$$w_t = h_1 - h_2$$

$$W_t = 2610.5 - 1678.4766 = 932.0234$$

Y así calcular el flujo másico, $\dot{m}_v$:

$$\dot{m}_v = \frac{pot}{w_t}$$

$$\dot{m}_v = \frac{300000}{932.0234} = 321.8803$$

para poder calcular Q :

$$Q = h_1 - h_{f2}$$

$$Q = 2610.5 - 191.83 = 2418.67 \text{ kJ/kg}$$

Y tener $\dot{Q}$

$$\dot{Q} = Q \dot{m}_v$$

$$\dot{Q} = (2418.67) (321.8803) = 778522.2252 \text{ kJ/seg} \rightarrow 778.522 \text{ Mj/seg}$$

Este resultado es la cantidad de calor requerida para un ciclo de vapor seco si se requiere generar 300MVA.

4.3 Potencia calorífica a vapor sobrecalentado

Es posible elevar la temperatura promedio a la que se añade calor al vapor sin aumentar la presión de la caldera, y es con el sobrecalentamiento del vapor a altas temperaturas, logrando un incremento en el trabajo de la turbina.

Como lo muestra la figura 4.5 si luego de saturar el vapor se continúa calentado a fin de llevarlo hasta la zona de vapor sobrecalentado, la ganancia de superficie encerrada por el ciclo viene

representada por la zona sombreada en el diagrama T-S. desde el punto de vista teórico, encontramos justificación en el hecho de que cuanto más alta sea la temperatura del vapor, mayor cantidad de calor se transformara en trabajo en la turbina, y por lo tanto menos irreversible será el proceso, incrementando el rendimiento térmico del ciclo; Además de reducir los efectos perjudiciales de la humedad del vapor en la turbina (erosión de los alabes). [14] [4]

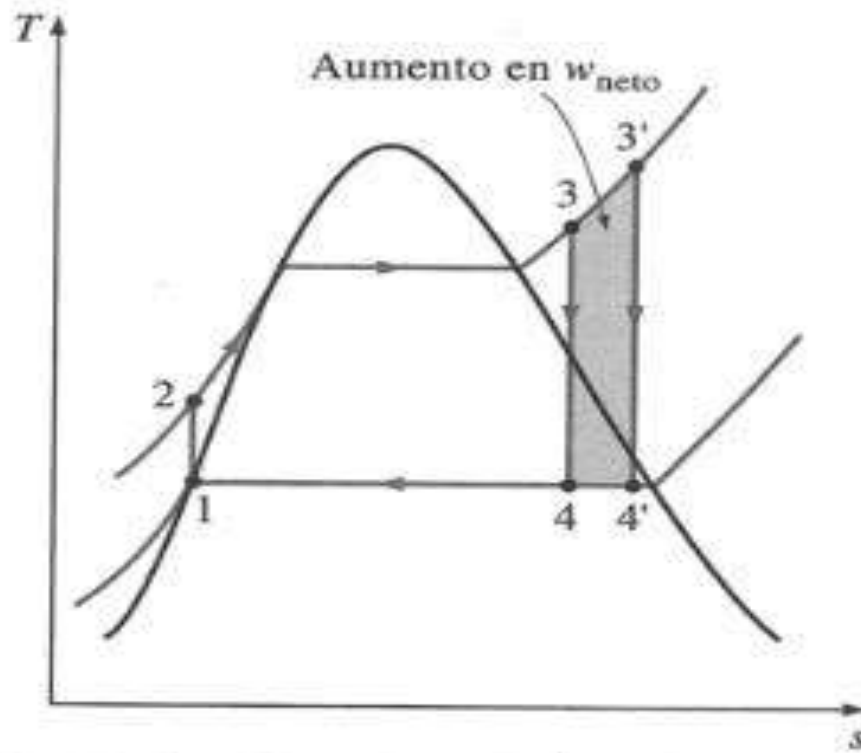


Figura 4. 5 Diagrama T-S de una central térmica con vapor sobrecalentado

Ahora se analizará la misma central pero ahora con sobrecalentamiento y el circuito queda de la siguiente manera y con las siguientes características.

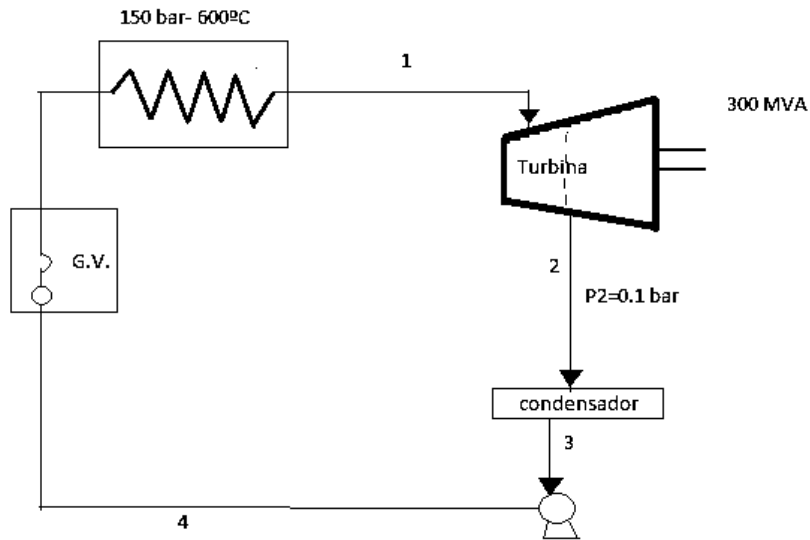


Figura 4. 6 Central termoeléctrica con vapor sobrecalentado

De las tablas de vapor se tiene:

$$h_1 = h_g = 3582.3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{f2} = 191.83 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 = s_g = 6.6785 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{K)}$$

$$h_{fg2} = 2392.8 \text{ kJ/kg}$$

$$s_{f2} = 0.6493 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{K)}$$

$$s_{g2} = 8.1502 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{K)}$$

Con esos nuevos valores se realizan otra vez los cálculos, de donde se obtienen los siguientes valores:

$$s_{fg2} = 8.1502 - 0.6493 = 7.5009 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{K)}$$

$$x_2 = 0.8037$$

$$h_2 = 2114.9233 \text{ kJ/kg}$$

$$W_t = 1467.3767$$

$$\dot{m}v = 321.8803$$

$$Q = 3390.47 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}=1091325.5007\text{kJ/seg}\rightarrow 1091.325\text{Mj/seg}$$

Para un ciclo con vapor sobrecalentado obtuvimos esta $\dot{Q}$ que es la cantidad de calor requerido para generar 300MVA.

4.4 Potencia calorífica para un ciclo de recalentamiento

Se llama así al ciclo en el cual, el vapor después de haber pasado por parte de la turbina, se extrae de la misma para llevarse al generador de vapor y eliminar la humedad recalentándose a presión constante, el arreglo queda de la forma que se muestra en la figura 4.7

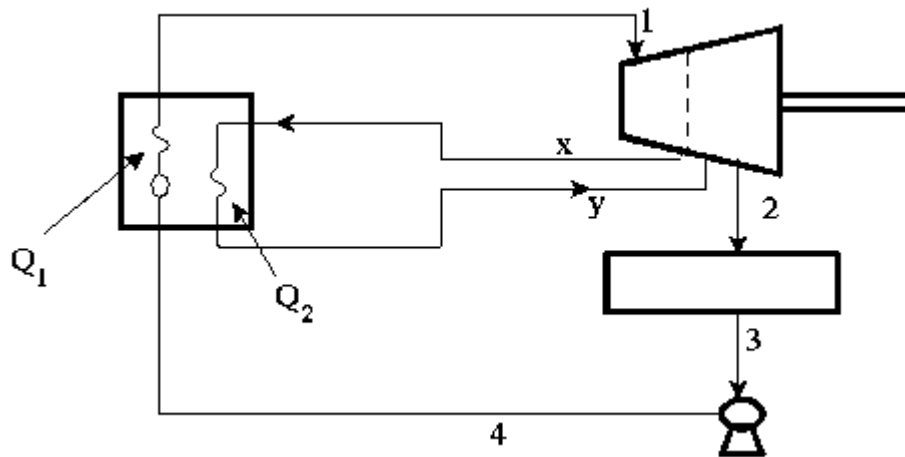


Figura 4. 7 Diagrama de una central con ciclo de recalentamiento

La eficiencia, que es la energía que se entrega a la turbina respecto a la que recibe el ciclo es:

$$e = \frac{(h_1 - h_x) + (h_y - h_2)}{Q_1 + Q_2}$$

donde Q_1 es el calor que absorbe el agua en el generador de vapor y Q_2 es el calor que absorbe el vapor en el recalentador.

El cálculo de Q_1 y Q_2 se determina por:

$$Q_1 = h_1 - h_4$$

$$Q_2 = h_y - h_x$$

Por lo tanto:

$$e = \frac{(h_1 - h_x) + (h_y - h_2)}{(h_1 - h_4) + (h_y - h_x)}$$

Esta expresión determina la eficiencia termodinámica del ciclo para un paso o etapa de recalentamiento.

El diagrama T-S para este ciclo queda como en la figura 4.8

Para una central que tenga dos o más extracciones de recalentamiento la eficiencia se define con base en el concepto ya antes dado, sea por ejemplo el arreglo mostrado en la figura 4.9.

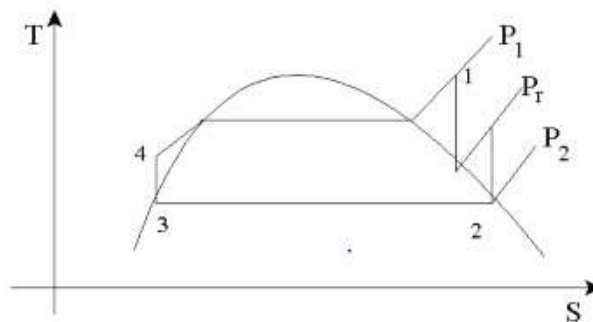


Figura 4. 8 Diagrama T-S para una central con ciclo de recalentamiento

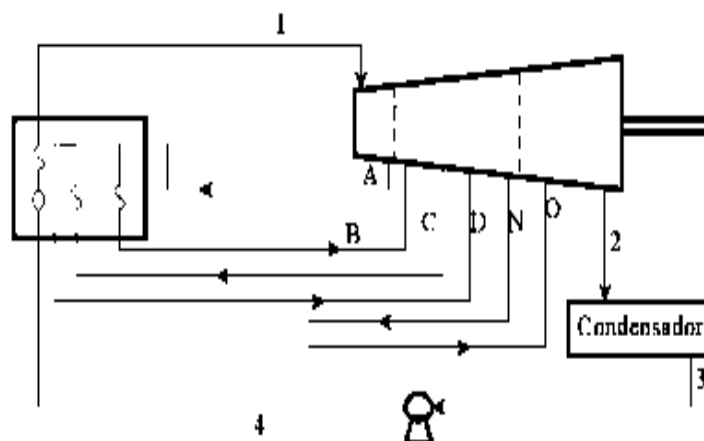


Figura 4. 9 Diagrama para una central con varios ciclos de recalentamiento

La eficiencia será entonces

$$e = \frac{(h_1 - h_A) + (h_B - h_C) + (h_D - h_N) + (h_o - h_2) + \dots}{(h_1 - h_4) + (h_B - h_A) + (h_D - h_C) + (h_o - h_N) + \dots}$$

Desde luego no es posible instalar un número muy grande de pasos de recalentamiento ya que el costo resulta prohibitivo y los incrementos en la eficiencia, a medida que se incrementa el número de pasos es cada vez más pequeño, la gráfica de la figura 4.10 nos muestra como varia la eficiencia con las etapas de recalentamiento. [4]

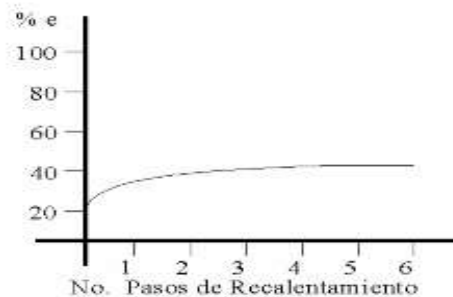


Figura 4. 10 Grafica de eficiencia respecto a número de recalentamientos

Es necesario hacer un análisis técnico-económico para decidir el número de recalentamientos.

Siguiendo con en análisis de la central con la que venimos trabajando tenemos el siguiente sistema con las siguientes propiedades

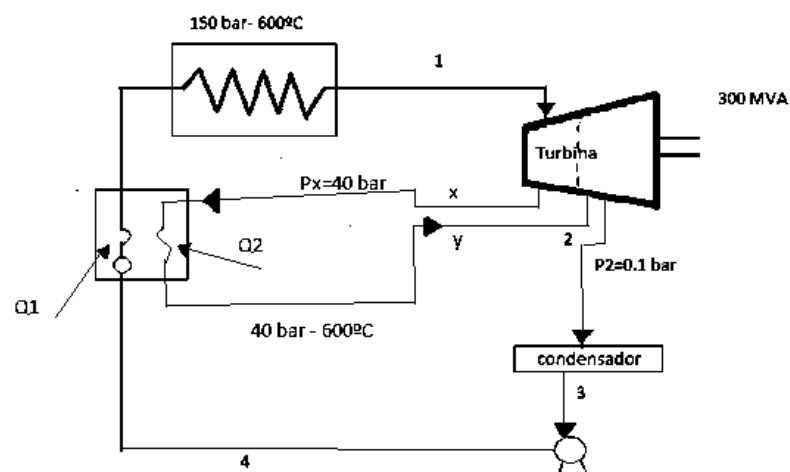


Figura 4. 11 Central termoeléctrica con ciclo de recalentamiento

De las tablas de vapor tenemos los siguientes valores:

$$h_y = 3674.4 \text{ kJ/kg}$$

$$s_y = 7.3688 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{K)}$$

$$h_{fgx} = 1714.1 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{fx} = 1087.3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{gx} = 2602.3 \text{ kJ/kg}$$

$$s_{fx} = 2.7964 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{K)}$$

$$s_{gx} = 6.0701 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{K)}$$

Se procede a realizar los cálculos para obtener la calidad

$$s_{fgx} = 3.2737 \text{ kJ/(kg} \cdot ^\circ\text{K)}$$

$$x_x = 1.1858$$

Al calcular la calidad obtuvimos que esta es mayor a la unidad (1) por lo que esta modificación se tuvo que analizar apoyándonos en el diagrama de mollier teniendo las siguientes entalpías:

$$h_1 = 3580 \text{ kJ/kg}$$

$$h_x = 3165 \text{ kJ/kg}$$

$$h_y = 3675 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = 2685 \text{ kJ/kg}$$

Con esas entalpías se calcula entonces el trabajo de la turbina y se procede con los cálculos como le hemos venido haciendo.

$$w_t = (h_1 - h_x) + (h_y - h_2)$$

$$w_t = 1405$$

$$Q_{rec} = h_y - h_x ; \quad Q_{sobre} = h_1 - h_4$$

$$Q_{rec} = 510 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_T = Q_{sobre} + Q_{rec}$$

De los cálculos anteriores tenemos que $Q_{sobre} = 3390.47$, por lo tanto:

$$Q_T = 3900.47 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q} = 1255484.454 \text{ kJ/seg} \rightarrow 1255.4844 \text{ MJ/seg}$$

Para generar 300MVA con ciclo de recalentamiento es necesaria la cantidad de calor obtenida en los cálculos y representada por $\dot{Q}$.

A continuación, en la figura 4.12 se muestra como es el comportamiento de una central con recalentamiento en un diagrama de Mollier

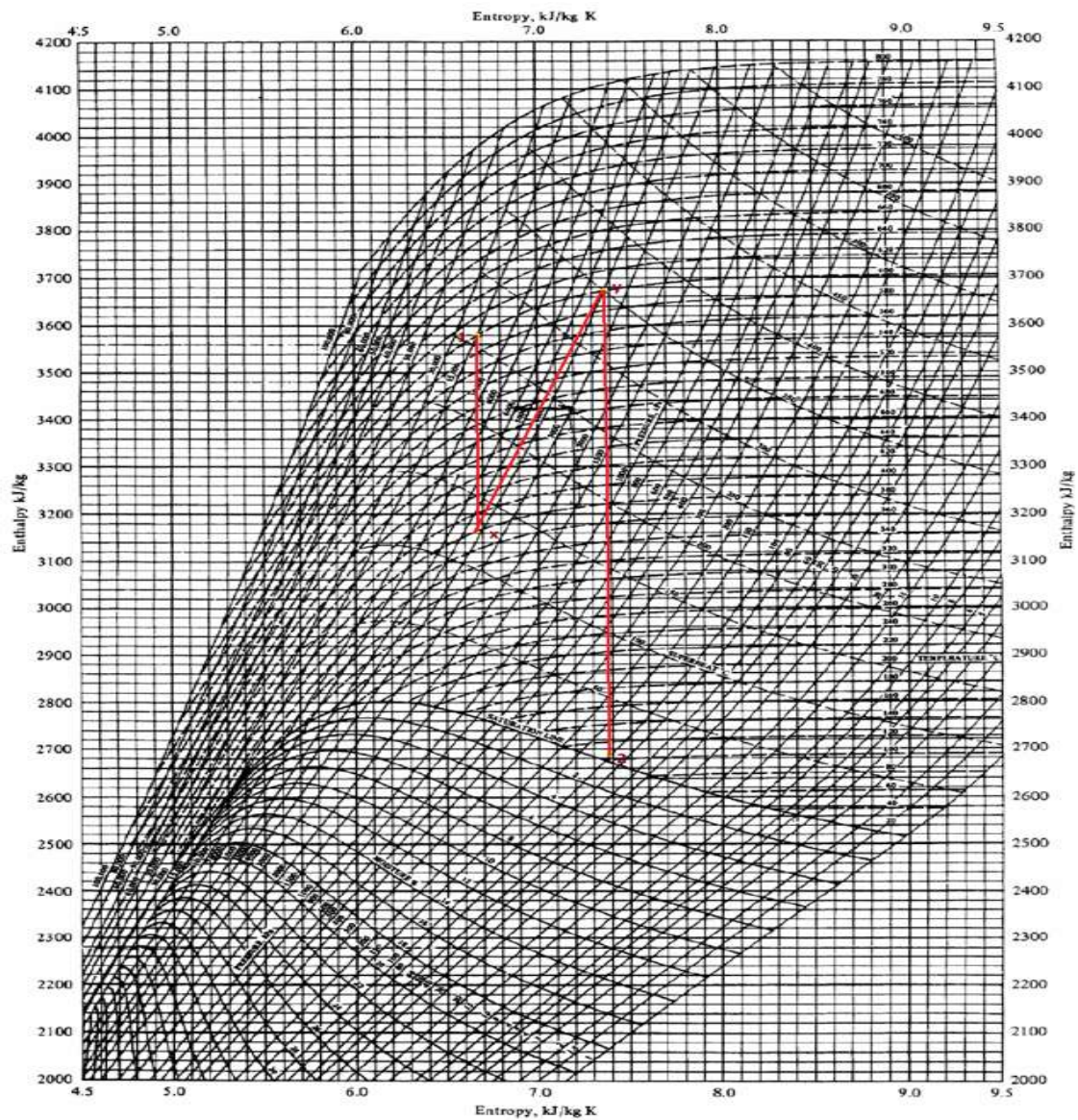


Figura 4. 12 comportamiento de la central con ciclo de recalentamiento en el diagrama de Mollier

4.5 Potencia calorífica para un ciclo regenerativo

La idea básica de este ciclo es extraer parte del vapor que ya ha sido usado en la turbina, pero a una presión superior a la que opera el condensador, y usarlo para calentar el agua de alimentación a la caldera, de esta forma se recupera la energía que libera el vapor extraído al condensarse, es decir, disminuye el calor rechazado en el condensador. La figura 4.13 muestra un arreglo donde se tiene un calentador de contacto directo.

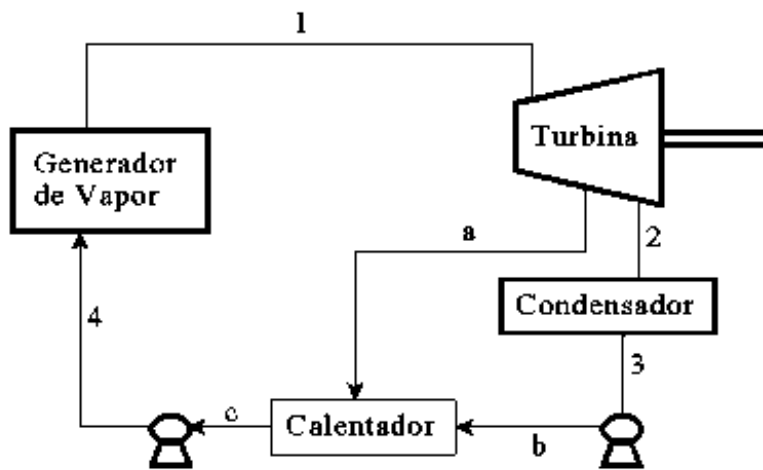


Figura 4. 13 esquema de una central con ciclo regenerativo

En este caso el vapor de extracción y el condensado se mezclan en un calentador abierto para lograr un líquido saturado. Las presiones del vapor del líquido saturado y el condensador deben ser las mismas, por lo que es necesario otra bomba para introducir el agua a la caldera. Para este caso el flujo de masa de vapor en la extracción se determina mediante un balance de masa de vapor en extracción de determina mediante un balance de masa y energía considerando las diferencias de energía cinética y potencial se tiene: [4]

$$\dot{m}_b h_b + \dot{m}_a h_a = \dot{m}_c h_c$$

Pero

$$\dot{m}_c = \dot{m}_1; h_b = \dot{m}_c - h_a$$

Sustituyendo la expresión anterior

$$(\dot{m}_c - \dot{m}_a) h_b + \dot{m}_a h_a = \dot{m}_1 h_c$$

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1} = \frac{h_c - h_b}{h_a - h_b}$$

Pero también se tiene que

$$h_b = h_3 = h_{f2} \text{ y } h_c = h_{fa}$$

Entonces

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1} = \frac{h_{fa} - h_{f2}}{h_a - h_{f2}}$$

De esta manera la eficiencia del ciclo termodinámico es.

$$e = \frac{\dot{m}(h_1 - h_a) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_a)(h_a - h_2)}{\dot{m}_1(h_1 - h_4)}$$

$$e = \frac{(h_1 - h_a) + (1 - \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1})(h_a - h_2)}{\dot{m}_1(h_1 - h_4)}$$

El diagrama Temperatura-Entropía se muestra en la figura 4.14.

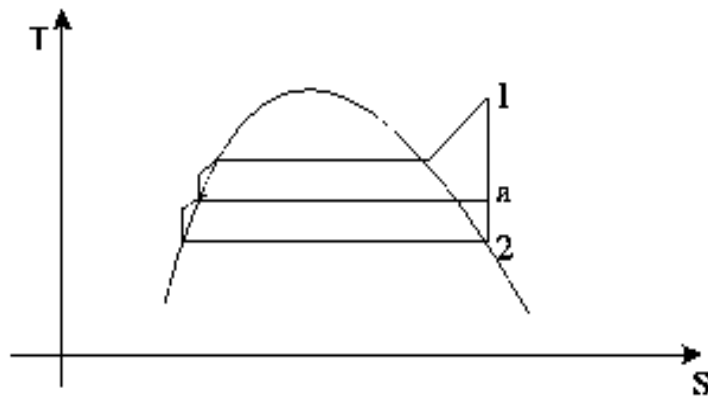


Figura 4. 14 Diagrama T-S del ciclo regenerativo

Se presenta la siguiente modificación en la central con la que venimos trabajando para su análisis y queda como se muestra en la figura 4.15.

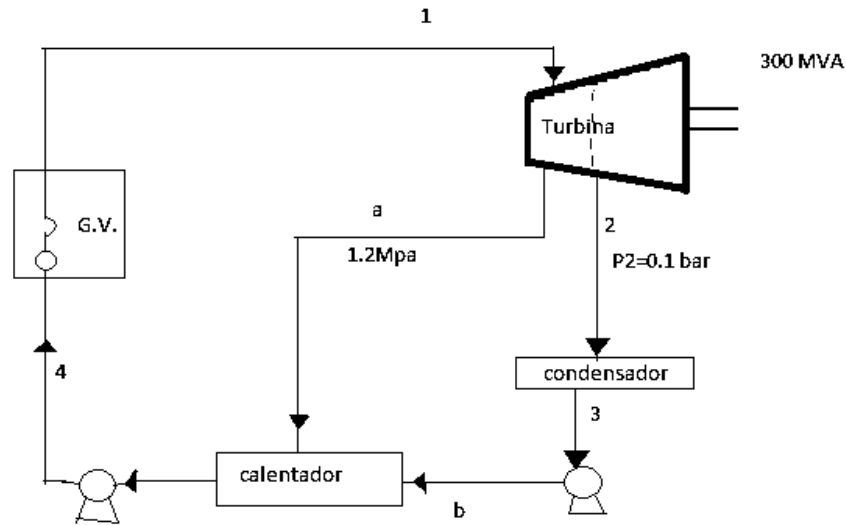


Figura 4. 15 Central termoeléctrica con ciclo regenerativo

Primero se busca en las tablas de vapor las entalpías y entropías correspondientes a $P_a = 12$ bar, como precisamente esos datos no se encuentran en dichas tablas se procede a interpolar con los valores superior e inferior siguientes que tenemos en las tablas de vapor los cuales corresponden a 15 bar y 10 bar respectivamente.

Tabla 4. 1 Interpolación para el ciclo regenerativo

Especificación	Presión en bar's	h_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
Datos superiores	15	2594.5	844.84	1947.3	2792.2	2.3150	6.4448
Datos inferiores	10	2883.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	6.5863
Diferencia	5	10.9	82.03	-68	14.1	0.072	-0.1415
Complemento al dato inferior para completar 12	2	4.36	32.812	-27.2	5.64	0.0288	-0.0566
Resultados	12	2587.96	795.622	1988.1	2783.74	2.1675	6.5297

Y calculamos:

$$s_{fg2}=6.5297-2.1675=4.3622 \text{ }^{kj}/(kg \cdot ^\circ K)$$

$$x_a = \frac{6.6785-2.1675}{4.3622} = 1.0341$$

Nuevamente tenemos una calidad mayor a 1, por lo que volvemos a recurrir a el diagrama de Mollier de ahí obtenemos las siguientes entalpías.

$$h_1 = 3580 \text{ }^{kj}/kg$$

$$h_a = 2840 \text{ }^{kj}/kg$$

Y nos apoyamos con los resultados de la interpolación para seguir con el análisis de esta central

$$k = \frac{h_{fa} - h_{f2}}{h_a - h_{f2}}$$

$$k = \frac{795.527-191.83}{2840-191.83} = 0.2280$$

$$\dot{m}_a = k \dot{m}_1$$

$$\dot{m}_a = (0.2280) (321.8803) = 73.3887$$

$$Q = h_1 - h_{fa}$$

$$Q_{regen} = 3580 - 795.527 = 2784.378 \text{ }^{kj}/kg$$

$$Q_{ciclo} = Q_{regen} + Q_{sobrec}$$

$$Q_{ciclo} = 6174.848 \text{ }^{kj}/kg$$

$$\dot{Q} = 1987561.927 \text{ kj/seg}$$

Por último, para que se puedan generar 300MVA con ciclo regenerativo se requiere la cantidad de calor $\dot{Q}$ obtenida con los cálculos anteriores.

En este caso solo se utilizó el diagrama de mollier para localizar el punto a y h_a , con ayuda del punto 1 a entropía constante (proceso isoentrópico).

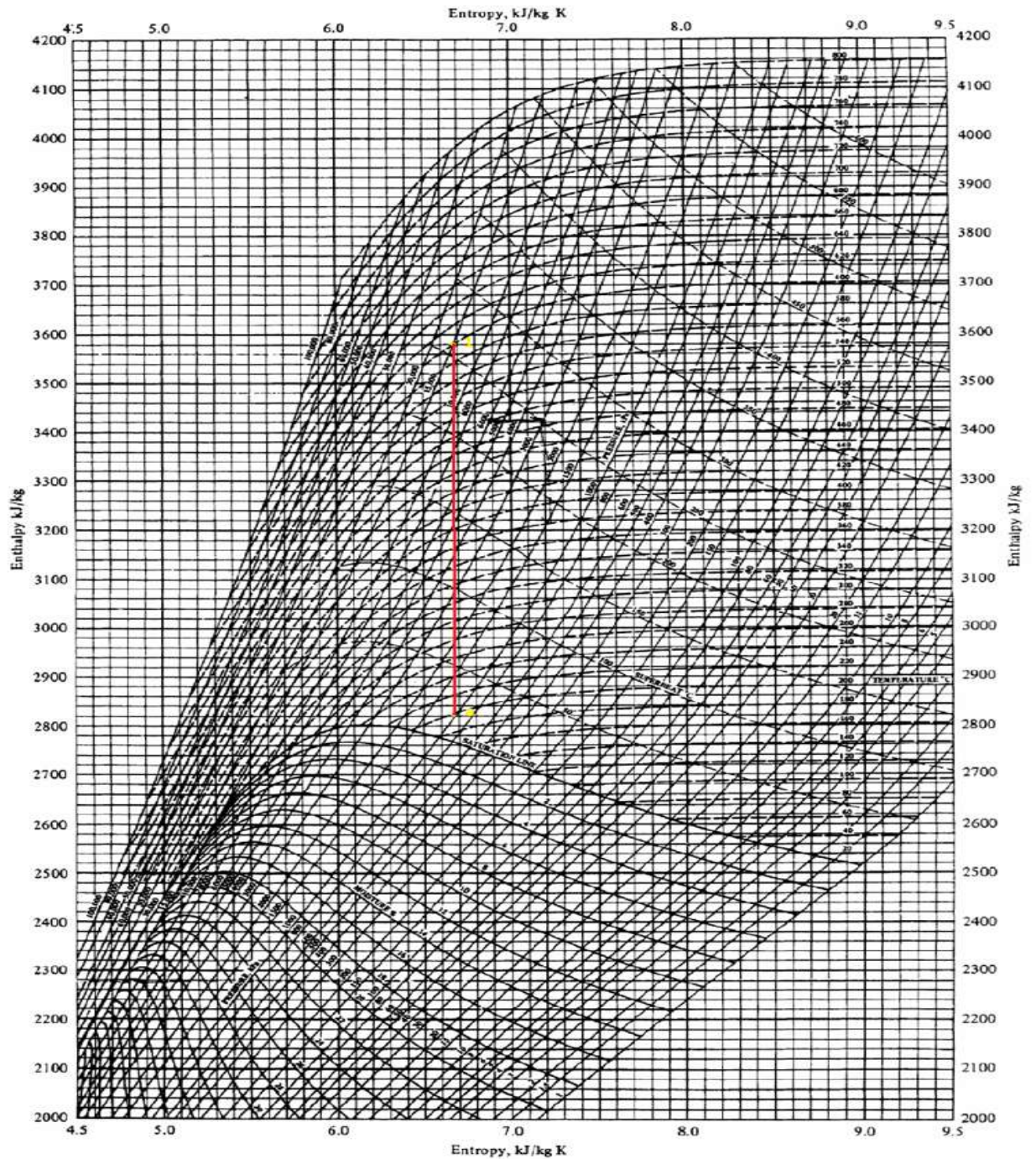


Figura 4. 16 Diagrama de molliere para un ciclo regenerativo en una central termoelectrica

En la tabla 4.2 se muestra la cantidad calorífica producida por cada combustible mencionado, que son los que normalmente se utilizan en centrales termoelectricas

Tabla 4. 2 Poder calorífico de materiales empleados en centrales termoeléctricas

Material	Poder calorífico	unidades
crudo de petróleo	6122	Mj/bl
Carbón siderúrgico importado	28954	Mj/T
Carbón siderúrgico nacional	29335	Mj/T
Carbón térmico importado	22543	Mj/T
Carbón térmico nacional	19434	Mj/T
Biodisel	18837	Kj/m ³
Carbón vegetal	29000-30000	Mj/T

Por lo consiguiente en la tabla 4.3 se muestra la cantidad de cada tipo de combustible requerido para producir 300MVA de potencia en los diferentes ciclos de análisis.

Tabla 4. 3 Cantidad de combustible por tipo de ciclo

Tipo de ciclo en central	Cantidad de calor necesario para 300MVA	Crudo de petróleo	Carbón siderúrgico o importado	Carbón siderúrgico o nacional	Carbón térmico importado	Carbón térmico nacional	biodiesel
Ciclo con vapor sobrecalentado	1091325.5007 kj/seg	0.1782 barriles por segundo	0.0376 Toneladas métricas por segundo	0.0372 Toneladas métricas por segundo	0.0484 Toneladas métricas por segundo	0.0561 Toneladas métricas por segundo	57.9352 metros cúbicos por segundo
Ciclo con vapor seco	778522.2252 kj/seg	0.1271 barriles por segundo	0.0268 Toneladas métricas por segundo	0.0265 Toneladas métricas por segundo	0.0345 Toneladas métricas por segundo	0.0400 Toneladas métricas por segundo	41.3294 metros cúbicos por segundo
Ciclo con recalentamiento	1255484.454 kj/seg	0.2050 barriles por segundo	0.0433 Toneladas métricas por segundo	0.0427 Toneladas métricas por segundo	0.0556 Toneladas métricas por segundo	0.0646 Toneladas métricas por segundo	66.6499 metros cúbicos por segundo
Ciclo regenerativo	1987561.927 kj/seg	0.3246 barriles por segundo	0.0686 Toneladas métricas por segundo	0.0677 Toneladas métricas por segundo	0.0881 Toneladas métricas por segundo	0.1022 Toneladas métricas por segundo	105.5137 metros cúbicos por segundo

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Como conclusión a este trabajo de tesis, podemos darnos cuenta de las modificaciones que se le pueden hacer a las centrales termoeléctricas convencionales, y como estas modificaciones traen ventajas en la eficiencia, así mismo se pueden comparar cada una de ellas para ver cuál es más viable para la producción de energía eléctrica siempre y cuando se realice un análisis para ver qué tan conveniente resultaría hacer cierto número de modificaciones ya que cada modificación en la central aumenta solo un pequeño porcentaje de eficiencia, pero en costo resultan ser inversiones de miles de dólares y muchas veces no resulta tan conveniente.

Respecto a la eficiencia en los combustibles, existen muchos tipos de estos (gaseosos, líquidos y sólidos) siendo los más utilizados en este tipo de centrales los derivados del petróleo (carbón mineral y combustóleo), para seleccionar alguno con el que se va a trabajar en cada central también se realiza un estudio y no basta con que un combustible sea mejor que otro. También se debe de considerar el costo de este y la facilidad con que este se consiga, ya que la producción de energía eléctrica es constante y debe haber siempre disponible suficiente combustible para no parar la producción.

En la tabla 4.3 se muestra una tabla en donde se especifican los tipos y cantidades de combustibles necesarios para generar 300MVA en los diferentes tipos de ciclo en centrales termoeléctricas, por lo que nos podemos dar una idea de las grandes cantidades necesarias de combustible para hacer operar este tipo de centrales, así mismo conocer el tipo de combustible más óptimo para las mismas.

Finalmente se puede mencionar que se cumplió el objetivo de este trabajo de tesis, ya que logramos conocer la eficiencia de las centrales termoeléctricas en sus diferentes ciclos básicos y la capacidad de energía calorífica que pueden aportar a este tipo de centrales los combustibles que se emplean en ellas.

5.2 Recomendaciones

Actualmente en el país existen muchas centrales con ciclos térmicos a pesar que estas son las que emiten más dióxido de carbono al ambiente, esto es debido a que la instalación de una central de este tipo resulta ser mucho más económica respecto a los otros tipos de centrales. Desde un punto de vista ecológico y desde mi punto de vista sería más amigable con la naturaleza optar por energías limpias y renovables, pero debido a la demanda de energía eléctrica que existe en la actualidad, y a los altos costos que implican su instalación las energías limpias no serían lo más óptimo.

Considerando lo anterior, lo más conveniente sería la instalación de centrales procurado que esta sean lo más eficientes respecto al combustible y de ciclos combinados ya que estas resultan contaminar menos que las termoeléctricas convencionales.

Bibliografía

- [1] SENER, «www.gob.mx,» [En línea]. Available: www.gob.mx.
- [2] X. D. GALICIA. [En línea]. Available: www.edu.xunta.es.
- [3] T. WILDI, Maquinas Electricas y sistemas de potencia sexta edicion, pearson, 2007.
- [4] G. G. Avalos, Modelado de sisstemas en ele dominio fisico, 2008.
- [5] E. 2012, «las centrales termicas, uso de combustibles fosiles,» [En línea]. Available: www.energia2012.es.
- [6] UGTO, «dcnt.ugto,» [En línea]. Available: www.dcnt.ugto.mx.
- [7] O. ENERGY, «termosolares,» [En línea]. Available: energy.com.
- [8] lageo.com, «la geotermoelectrica,» [En línea]. Available: www.lageo.com.sv.
- [9] F. Nuclear, «central hidroelectrica,» [En línea]. Available: www.foronuclear.org.
- [10] wordpress, «maremotrizate,» [En línea]. Available: maremotrizate.wordpress.com.
- [11] F. Nuclear, «central eolica,» [En línea]. Available: www.foronuclear.org.
- [12] s. UMICH, «Paneles solares,» [En línea]. Available: saberma.umich.mx.
- [13] c. a. uk, «La Robla,» [En línea]. Available: core.ac.uk.
- [14] «ciclo de vapor,» [En línea]. Available: tema-1-ciclo-de-vapor-160706190324.