



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Cuna de héroes, crisol de pensadores

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**CENTRAL TERMOELÉCTRICA
CONECTADA A COLECTORES SOLARES**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTA
OSCAR ESCAMILLA RINCÓN

ASESOR DE TESIS
DR. GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS



MORELIA, MICHOACÁN, MARZO DE 2018

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres por su ejemplo de dedicación y responsabilidad, además de su total apoyo durante mi tiempo en la universidad; a mis familiares y amigos que siempre han estado ahí para ayudarme en los momentos que necesité ayuda, y para guiarme en los momentos en que me encontraba perdido y a mis profesores que me impartieron los conocimientos necesarios para poder desarrollar este trabajo.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible el desarrollo de este trabajo y con ello la conclusión de mi carrera como ingeniero electricista. A todas las personas que dedicaron su tiempo y esfuerzo para impartirme el conocimiento y las habilidades necesarias para el desarrollo de la misma y a las personas que me apoyaron durante este periodo de mi vida. Agradezco especialmente al Dr. Gilberto Gonzales Ávalos por asesorarme en ésta tesis. También agradezco a la universidad por impartirme una educación de calidad en todo momento y hacer posible que yo y otros miles de jóvenes cumplan su sueño de terminar una carrera. Y finalmente agradezco al lector por tomarse el tiempo de leer esta tesis.

Índice

Dedicatoria	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen	vi
Abstract	vii
Glosario	viii
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Antecedentes históricos.....	1
1.2 La energía del sol	2
1.3 Objetivo.....	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivo Particular	3
1.4 Justificación.....	3
1.5 Metodología	4
1.6 Contenido de la tesis	4
Capítulo 2 Antecedentes de las centrales eléctricas	5
2.1 Centrales Hidroeléctricas	5
2.2 Centrales Nucleares.....	7
2.3 Centrales de Turbogas.....	8
2.5 Centrales Termoeléctricas	10
2.5.1 Generador de Vapor	12
2.5.2 Turbina	13
2.6 Central Termosolar.....	14
Capítulo 3 Diseño del suministrador de vapor por medio de colectores solares.....	16
3.1 Central con ciclo Rankine Simple.....	16
3.2 Central con ciclo Rankine con recalentamiento	19
3.3 Central con ciclo Rankine regenerativo	21
3.4 Análisis con colectores solares.....	24
Capítulo 4 Potencia y eficiencia de centrales termoeléctricas	30
4.1 Reducción de consumo de combustible	30
4.1.1 Caso de la central con ciclo Rankine simple.....	31
4.1.2 Caso de la central con ciclo Rankine con recalentamiento.	32
4.1.3 Caso de la central con ciclo Rankine regenerativo.....	33

4.1.4 Análisis de cambio de consumo de combustible.....	34
4.2 Aumento de potencia de la central	35
4.2.1 Caso de la central con ciclo Rankine simple.....	35
4.2.2 Caso de la central con ciclo Rankine con recalentamiento	36
4.2.3 Caso de la central con ciclo Rankine regenerativo.....	37
Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones.....	38
5.1 Conclusiones	38
5.2 Recomendaciones.....	39
Referencias	40

Lista de Figuras

Figura 2-1. Diagrama de una central hidroeléctrica [6]	6
Figura 2-2. Diagrama Básico de central nuclear	7
Figura 2-3. Diagrama de una Central de Turbogas	8
Figura 2-4. Central Geotérmica de vapor de destello [6]	10
Figura 2-5. Diagrama de Central Termoeléctrica.....	11
Figura 3-1. Ciclo Rankine Simple [10]	16
Figura 3-2. Ciclo RAnkine con recalentamiento [10]	19
Figura 3-3. Ciclo Rankine regenerativo [10].....	22
Figura 3-4. Modelo de central termoeléctrica con colectores solares	26

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de una central termodinámica conectada a colectores solares, así, el diseño del suministro de vapor es por medio de los colectores, es decir, una central que solamente cuenta con una caldera, turbina, condensador y bomba. Esto con la finalidad de aprovechar la energía emitida por el Sol e incrementar la eficiencia y/o la potencia generada de la central generadora, lo cual implica quemar una menor cantidad de combustibles fósiles.

También, se realiza un análisis comparativo entre una central termoeléctrica convencional y una central con colectores solares, en términos de potencia generada y eficiencia energética, con la finalidad de observar las ventajas y desventajas que se tienen al utilizar los colectores.

Palabras Clave: Entropía, Entalpía, Potencia, Eficiencia, Vapor, Ciclo Térmico, Central Eléctrica, Generador, Combustible.

Abstract

In this thesis is presented the design of a thermodynamic plant with solar collectors, as well as the design of the steam supply using the collectors. In other words, a design of a plant with a boiler, turbine, condenser and pump is presented. This is done with the objective of taking advantage of the energy emitted by the Sun and increase the efficiency and/or the power generated by the power plant, which brings a lower consumption of fossil fuels.

Also, a comparative analysis is made between a conventional power plant and a power plant with solar collectors, being analyzed the generated power and the efficiency, with the purpose of observing the advantages and disadvantages of the plant when using the solar collectors.

Keywords: Entropy, Enthalpy, Power, Efficiency, Steam, Thermal Cycle, Electric Plant, Generator, Fuel.

Glosario

Álabe	Aspa de la turbina
Calidad de Vapor	Cantidad de la mezcla que es vapor de agua, toma valores entre 0 y 1
Condensado	Agua líquida
Entalpía	Expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico
Entropía	Magnitud termodinámica que indica el grado de desorden molecular de un sistema.
Moderador	Medio para disminuir la velocidad de los neutrones
Salto	Diferencia de altura entre dos puntos de agua fluyente

Capítulo 1 Introducción

1.1 Antecedentes históricos

Desde el inicio de la humanidad, el ser humano ha necesitado apoyarse de diversas fuentes de energía para progresar como civilización. Fuentes como el fuego, que le permitió incrementar la nutrición de los alimentos que se cocinaban en él y también le permitió moldear diversos metales al concentrar una gran cantidad de calor; o bien la domesticación de las bestias, lo cual le permitió asegurar su territorio, transportarse con facilidad y poder eliminar plagas que afectaban a la población o a los cultivos.

Sin embargo, con el paso del tiempo, estas energías primarias cambiaron a energías de mayor facilidad de uso o de un mantenimiento menor. Tal es el caso del molino de viento o de agua, que entregaba las ventajas de realizar el mismo trabajo que un animal de carga sin necesidad de alimentarlo o cuidarlo, pero tenía la desventaja de que el par producido no fuera el suficiente para moler la cosecha.

Más adelante se descubrió el potencial del vapor de agua, producido a partir de carbón o petróleo crudo, y se inició la revolución industrial. En esta revolución, se crearon las cadenas de producción, donde una banda de producción movida por una turbina a vapor transformaba una materia prima en un producto terminado.

Este avance tecnológico continuó de manera exponencial, llegando al descubrimiento de la energía eléctrica y de sus grandes beneficios para la industria y la vida en general. La producción de energía eléctrica se basó en los mismos principios de la industria, utilizando el poder del vapor para mover un generador, ya no una banda de producción; y así utilizar un motor eléctrico para producir los movimientos necesarios.

No obstante, la producción de energía eléctrica en sus inicios era en los lugares donde era necesitada, teniendo pequeñas plantas generadoras en cada centro de consumo. Pero con el desarrollo de la corriente alterna, así como con la invención del transformador de CA, se logró disminuir la cantidad de plantas generadoras a unas cuantas de gran potencia, que suministran energía a regiones completas. Estas plantas son en su mayoría termoeléctricas [1], las cuales requieren de algún tipo de combustible que libere calor para producir vapor de agua y mover una turbina para producir un par necesario en la producción de energía eléctrica.

Debido a la cantidad de energía eléctrica necesaria para la vida diaria en el mundo, son necesarias cantidades inmensas de estos combustibles para poder satisfacer la demanda de energía, por lo que se propone aprovechar la energía emitida por el sol para reducir en cierta medida el consumo de estas fuentes de calor no renovables.

1.2 La energía del sol

El sol es el corazón del sistema solar, ya que la energía emitida de éste permite que exista la vida en este planeta. Éste es una estrella enana amarilla compuesta de gases fusionándose, y su gravedad permite que los planetas mantengan una órbita alrededor de él.

Aunque el sol se encuentre muy lejos del planeta, a unos 150,000,000 kilómetros [2], la superficie de la Tierra recibe aproximadamente 1400W/m^2 por segundo del sol, y esta energía es aprovechada por los habitantes del planeta.

Se aprovecha en cosas tan simples como secar la ropa o inclusive cocinar algunos alimentos, o también se aprovecha en cosas más sofisticadas como la generación de energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos o de manera mas indirecta en los generadores eólicos.

Sin embargo, esta transformación de la energía solar a energía eléctrica no fue realizado hasta hace unos pocos años, cuando se empezaron a ver las primeras granjas solares. No obstante, estas granjas provocan perturbaciones en las redes eléctricas donde son instaladas, alterando la forma de onda de la señal eléctrica y disminuyendo la amortiguación del sistema ante cambios de la potencia.

Pero se puede aprovechar la energía del sol de otras formas que no produzcan estos efectos secundarios. Tal es el caso del uso de los colectores solares, que inyectan directamente la energía del sol al agua utilizada en una central termoeléctrica para reducir su consumo de combustible.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo General

En este trabajo se propone un modelo de central termoeléctrica que utiliza colectores solares, para que esta sirva de base en el diseño de una nueva central generadora de energía con la mentalidad de reducir las emisiones de dióxido de carbono y otros gases contaminantes, o bien, que sirva de apoyo para realizar una mejora a una central ya existente.

1.3.2 Objetivo Particular

En esta tesis se realiza lo siguiente:

- Se utilizan los conocimientos adquiridos en la carrera para plantear la planificación de una central generadora con colectores solares
- Se diseñan las modificaciones necesarias para que la central generadora pueda generar potencia eléctrica a partir de un conjunto de colectores solares y caldera.
- Se realiza un análisis comparativo entre una central termoeléctrica convencional y la planta con colectores solares, con la finalidad de observar los cambios de potencia y eficiencia.

1.4 Justificación

Debido al uso desmedido de combustibles fósiles y a la creciente demanda de potencia eléctrica, las reservas de petróleo, gas natural, gasolina y otros derivados del petróleo se están agotando en el planeta [3] [4]. Aunado a esto, no se tiene la infraestructura necesaria en energías renovables para poder sustentar toda la potencia demandada por el ser humano.

Además, como ya se vio en la sección 1.1, las energías “verdes” conllevan problemas en el esquema actual de transmisión de energía, por lo que resulta conveniente idear una forma de reducir, o inclusive eliminar, el uso de derivados del petróleo en la generación de energía eléctrica manteniendo el esquema de generación en corriente alterna.

En este punto entran los colectores solares, los cuales aprovechan la energía emitida por el sol para amortiguar el consumo de petróleo y permitir una transición suave a las energías limpias, ya que mantienen el paradigma de generación y retrasan un poco el inevitable agotamiento de los combustibles fósiles.

1.5 Metodología

Esta tesis se realizó consultando diversas fuentes bibliográficas, tales como libros, notas de clase, artículos de revista, artículos de investigación científica, así como documentos oficiales de la República Mexicana para obtener la información necesaria sobre los temas de la tesis. Además se emplearon los conocimientos obtenidos en clase y diversos estudios realizados sobre el tema.

1.6 Contenido de la tesis

En el capítulo 1 se realiza una introducción al tema de la tesis así como una breve explicación a algunos conceptos clave utilizados en el trabajo.

En el capítulo 2 se realiza una pequeña explicación de las diferentes centrales de energía convencionales, en donde se realiza una breve explicación del principio de operación de cada uno y se hace un énfasis en las centrales termoeléctricas.

En el capítulo 3 se realiza el diseño de una central termoeléctrica con colectores solares, se analizan los cambios necesarios realizar para poder instalarlos, así como el diseño del suministrador de vapor por medio de los colectores

En el capítulo 4 se realiza un análisis de la potencia y la eficiencia de la central con colectores solares, en el cual se hace una comparativa entre una central termoeléctrica sin colectores solares y la misma central con los colectores.

En el capítulo 5 se escriben las conclusiones obtenidas al finalizar este trabajo, en donde también se escriben algunas recomendaciones y trabajos futuros sobre esta rama de investigación.

Capítulo 2 Antecedentes de las centrales eléctricas

Una central eléctrica es aquel lugar donde se realiza una transformación de energía, tal que una energía primaria pasa a ser energía eléctrica. Estas centrales varían en tipo, dispositivos instalados, así como energía primaria. Esta energía puede ser energía potencial, energía calorífica, energía eólica, o energía radioactiva entre otros.

2.1 Centrales Hidroeléctricas

En las centrales hidroeléctricas, se aprovecha la energía potencial que el agua tiene al escurrir hacia los océanos o lagos. A esta diferencia de altura entre el escurrimiento de agua y su destino final se denomina salto, y es uno de los factores principales para determinar la potencia de la central de energía. Otros factores que definen la potencia de la central son la disponibilidad de agua, la capacidad de almacenamiento de agua, la accesibilidad al sitio, la distancia de los centros de carga y el tipo de terreno en el sitio [5].

Este tipo de centrales funcionan a partir de la energía potencial del agua en el salto, dada por la siguiente ecuación:

$$P = W * Q * H * \eta \quad (2.1)$$

Donde:

P = Potencia mecánica de la turbina (W).

W = Peso específico del agua (N/m³).

Q = Caudal de agua (m³/sec).

H = Salto de agua (m).

η = eficiencia de conversión de energía potencial a energía mecánica.

Esta energía mecánica producida por la turbina es transmitida por una flecha hacia el generador y la potencia eléctrica generada depende directamente de la potencia mecánica y de la eficiencia del

generador al convertir la energía mecánica en energía eléctrica. El diagrama completo de una central hidroeléctrica se muestra en la figura 2-1.

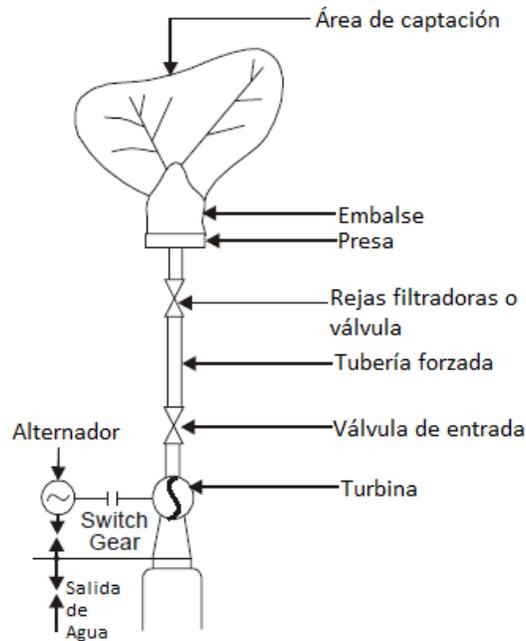


Figura 2-1. Diagrama de una central hidroeléctrica [6]

Este tipo de centrales presentan las siguientes ventajas [6]:

- No requieren combustibles para operar.
- Tiene un bajo costo de operación comparada con una central termoeléctrica.
- Entran y salen de operación con una velocidad considerable.
- El equipo tiene una larga esperanza de vida, de 50 años o más.
- Debido a su simple operación, no se requieren trabajadores altamente entrenados.

Sin embargo, este tipo de plantas presentan estas desventajas [6]:

- Estas plantas tienen una alta inversión inicial y un retorno de inversión lento.
- Su tiempo de construcción es largo
- La generación depende de la cantidad de agua disponible en el momento.
- Estas plantas se encuentran muy alejadas de los centros de consumo, lo cual incrementa las pérdidas en las líneas y el costo de mantenimiento de éstas.

- Las centrales hidroeléctricas de gran tamaño perturban el ecosistema de la zona, ya sea por deforestación, destrucción de la vegetación y el traslado de las personas.

2.2 Centrales Nucleares

Las centrales nucleares se están volviendo cada vez más populares en el mundo, debido a que su costo se ha vuelto comparable con otros combustibles, principalmente el carbón y el petróleo, además de que este tipo de energía presenta una menor cantidad de problemas en relación a la seguridad de las minas, el costo y logística del transporte del combustible y la contaminación ambiental [5].

Estas centrales varían dependiendo del reactor instalado para liberar la energía del combustible radioactivo y se dividen en reactores homogéneos y heterogéneos. Los reactores homogéneos tienen el combustible nuclear disuelto en el moderador, mientras que los reactores heterogéneos tienen varillas de combustible las cuales son ahogadas en una sustancia enfriadora que transporta el calor generado por las varillas.

En ambos casos, se produce el calor por medio de fisión nuclear, el cual es un proceso en donde un neutrón libre choca con un átomo y se queda unido a este átomo, provocando que otros neutrones sean liberados del átomo lo cual trae como consecuencia una reacción en cadena de choques y uniones de neutrones que liberan grandes cantidades de energía [6]. Esta energía, en forma de calor, es transmitida a un fluido de trabajo para llevarlo a vapor, y hacerlo pasar por una turbina para producir un trabajo, en donde pierde parte del calor. Este proceso se muestra en la figura 2-2.

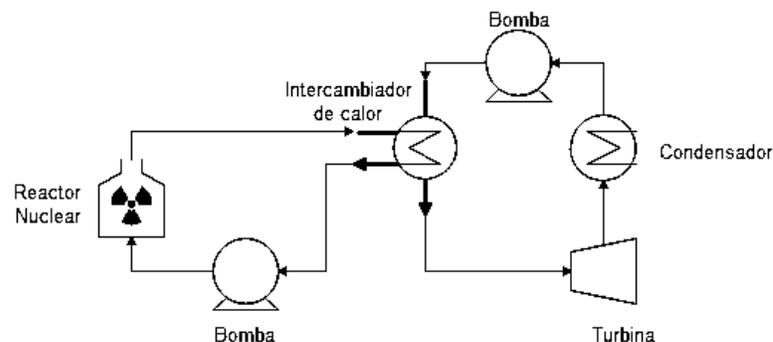


Figura 2-2. Diagrama Básico de central nuclear

Mas sin embargo, este tipo de centrales están rodeadas de problemas, debido principalmente al manejo de los desechos de las reacciones nucleares, la proliferación de armas nucleares, los efectos a la salud que provoca la radiación y principalmente los accidentes en este tipo de centrales que dejan inhabitables ciudades completas lo que dificulta la proliferación de esta forma de generación de energía.

2.3 Centrales de Turbogas

Este tipo de centrales son muy similares a las centrales termoeléctricas convencionales, debido a que producen energía eléctrica al expandir un fluido en una turbina. La diferencia radica en que el fluido a utilizar es aire, en lugar de agua, al cual se le aumenta la presión en un compresor que obtiene su energía de la turbina. Entonces se lleva por un calentador el cual eleva la temperatura, con la finalidad de poder obtener un trabajo neto desarrollado por la turbina debido a la energía necesaria por el compresor. Posteriormente entra a la turbina que expande el gas y genera un movimiento mecánico, como se puede ver en la figura 2-3.

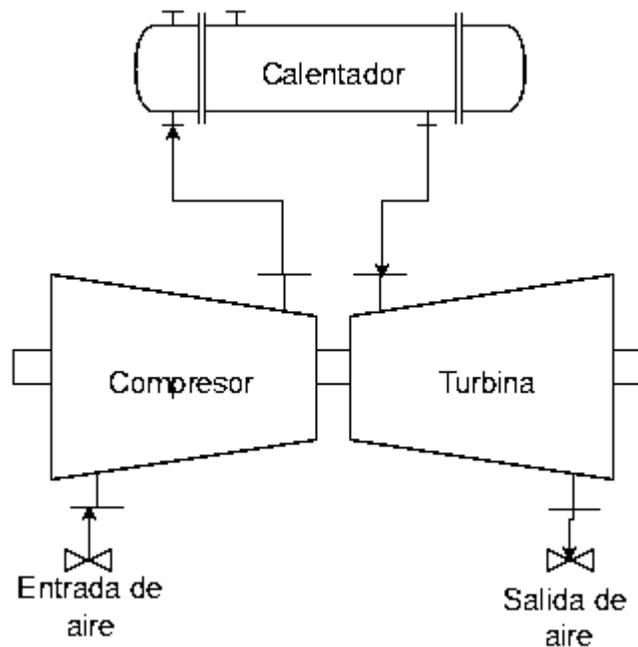


Figura 2-3. Diagrama de una Central de Turbogas

Este tipo de centrales requieren que la velocidad y cantidad del fluido sean mayores y la necesidad del compresor provoca una reducción en la eficiencia total de la planta, pero estas pueden entrar en operación muy rápidamente, cuentan con una alta flexibilidad y pueden operar con una gran variedad de combustibles, como gas natural, petróleo o carbón pulverizado.

Y debido a las nuevas tecnologías en materiales y al mejoramiento de los enfriadores de las aspas, este tipo de centrales ha ido incrementando su eficiencia energética, así como han ido incrementando los puntos de operación posibles de las turbinas, llegando a una temperatura de 1200°C, lo cual lleva la eficiencia hasta un 35% [5].

2.4 Centrales Geotérmicas

La mayoría de las centrales eléctricas requieren de vapor para operar, y producir energía eléctrica a partir de éste. De igual manera, las plantas geotérmicas requieren de vapor para producir un movimiento mecánico en una turbina. La diferencia radica en la forma como se obtiene el vapor, ya que este es producido por reservas de agua caliente que se encuentran dentro de la superficie terrestre, en puntos donde se tiene contacto con el magma en el interior del planeta [6]. Estas plantas pueden ser de vapor seco, vapor de destello y de ciclo binario.

En las plantas de vapor seco, el fluido de trabajo es obtenido de reservas de vapor en el interior de la corteza, y directamente entran en el conjunto turbina-generador y finalmente vuelve a ser inyectado en el depósito de vapor en el interior de la Tierra. Las centrales de vapor de destello son las más comunes, en las cuales se extrae agua a alta presión de la corteza terrestre, la cual pierde presión al subir a la superficie y parte de ésta se transforma en vapor; este vapor es separado del agua y se utiliza para mover el conjunto turbina-generador, para después ser inyectado al depósito junto con el agua que se separó anteriormente, como se muestra en la figura 2.4. Finalmente se encuentran las centrales de ciclo binario, las cuales extraen agua a alta temperatura y la utilizan para calentar otro fluido de trabajo, el cual cuenta con un punto de ebullición bajo. Este fluido es utilizado para mover el conjunto turbina generador, mientras que el agua es regresada al depósito geotérmico [6].

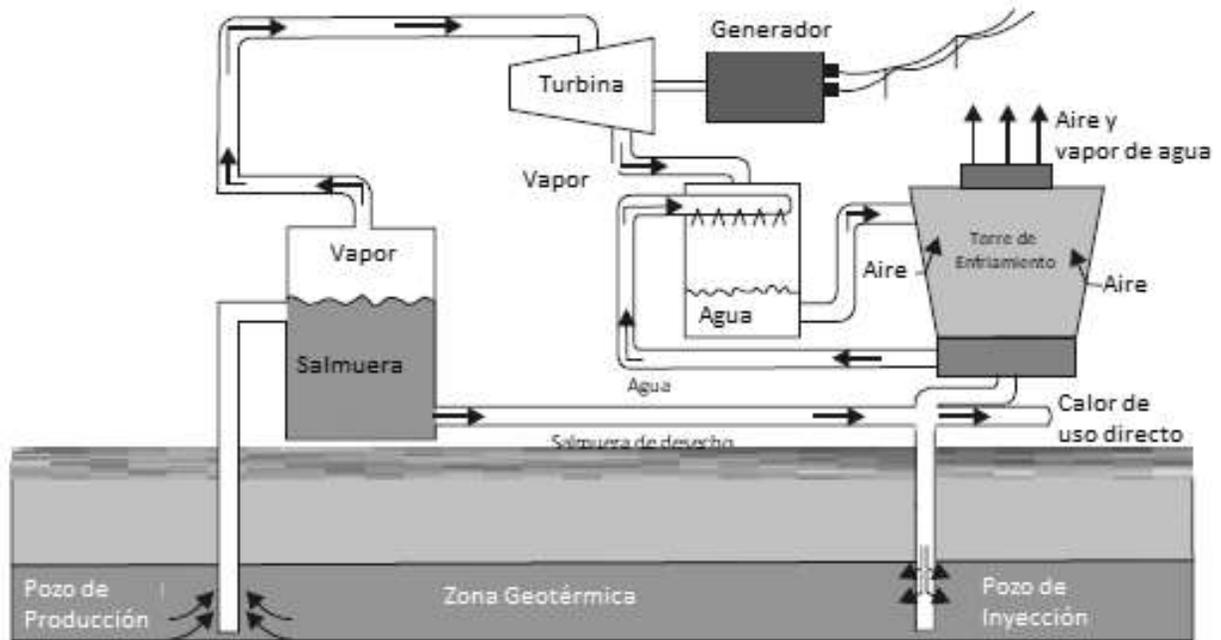


Figura 2-4. Central Geotérmica de vapor de destello [6]

Este tipo de centrales presentan las siguientes ventajas [7]:

- Proviene de un recurso inagotable.
- No producen gases contaminantes
- Son un gran complemento a otras fuentes renovables
- Son relativamente baratas, ya que no requieren estructuras adicionales como paneles solares o turbinas de viento para obtener energía

Sin embargo, este tipo de energía tiene dos grandes desventajas: La primera es que no es posible encontrar yacimientos de vapor con las condiciones adecuadas para producir energía eléctrica en muchos lugares, y la segunda es que no se produce mucha energía por cada ducto de vapor perforado [7].

2.5 Centrales Termoeléctricas

Las centrales termoeléctricas han sido y son las principales fuentes de energía eléctrica en México y en el mundo [1], consumiéndose un total equivalente de 11354.3 millones de toneladas de

petróleo [8] en los diversos combustibles que consumen este tipo de centrales, principalmente carbón, gas natural y petróleo.

Este tipo de centrales funciona a partir del ciclo Rankine, el cual es un ciclo termodinámico donde el combustible es quemado en una caldera con agua para convertirla en vapor de agua sobrecalentado, para después expandirse en una turbina y liberar parte de la energía almacenada en el vapor y luego pasar por un condensador para finalmente entrar de nuevo en la caldera, como se muestra en la figura 2.5.

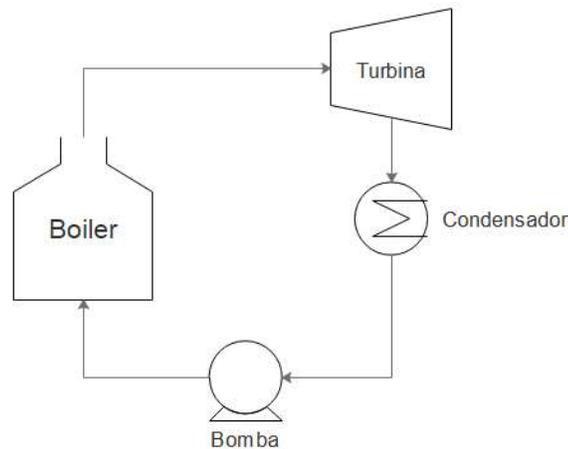


Figura 2-5. Diagrama de Central Termoeléctrica

La eficiencia de este ciclo puede ser mejorado al introducir, ya sea ciclos de recalentamiento o ciclos regenerativos. Para un ciclo de recalentamiento es necesario extraer el vapor de un punto adecuado de la turbina para ser recalentado a la misma temperatura con la que entro a la turbina, pero con una presión mayor debido a la expansión provocada en el primer paso de generación, este tipo de ciclo es utilizado cuando se tiene una presión alta en el vapor de agua [6].

El ciclo regenerativo consta de utilizar el calor remanente del vapor de agua para precalentar el condensado antes de que este entre a la caldera. Esto es realizado extrayendo vapor de agua en puntos específicos de la turbina, al igual que el ciclo de recalentamiento, pero este entra en intercambiadores de calor los cuales:

- Elevan la temperatura del condensado
- Llevan al vapor de agua a una temperatura adecuada para entrar a la bomba [5].

Todas las plantas termodinámicas cuentan con un equipo básico de operación, el cual permite generar electricidad a partir de un combustible. Este equipo es:

- Un horno para quemar el combustible
- Una caldera con agua para transformarla a vapor
- Una unidad de transformación de energía como un motor o una turbina
- Un sistema de tuberías para transportar el vapor y el condensado [7].

Sin embargo, existen variaciones del equipo necesario dependiendo del combustible utilizado, tales como circuitos de agua de enfriamiento, colectores de gases, circuito de carbón y cenizas, etc. Además es necesario colocar equipo adicional al utilizar alguno de los ciclos mencionados anteriormente, como intercambiadores de calor, bombas adicionales, o turbinas de más baja presión que la turbina principal.

No obstante, se profundiza más en los elementos principales de la central, el generador de vapor y la turbina.

2.5.1 Generador de Vapor

Un generador de vapor es un dispositivo que crea vapor de agua a una tasa, presión y temperatura deseada al quemar combustible en un horno. Éstos son utilizados en centrales a base de combustible fósiles y en centrales nucleares. Estos son una integración compleja entre el horno, un supercalentador, un recalentador, un evaporador, un economizador, un precalentador de aire y otros auxiliares [5], y éstos deben de cumplir con los siguientes requerimientos:

- Seguridad: Debe de ser seguro en condiciones operacionales
- Accesibilidad: Múltiples partes del generador deben de ser accesibles para su mantenimiento
- Capacidad: El generador debe de ser capaz de suministrar el vapor en las condiciones deseadas
- Eficiencia: Debe de absorber una cantidad máxima de calor producida por la quema del combustible en el horno [7].

Los generadores de vapor tienen la siguiente clasificación dependiendo de la forma en la cual es inyectado el calor en el condensado:

- Calderas acuotubulares: En este tipo de calderas, el agua circula a través de tubos y los gases de la combustión circulan alrededor de estos tubos, esto provoca que la presión sea colocada en los tubos y los tambores relativamente pequeños, por lo que pueden soportar presiones extremas. Requieren menos peso en relación a las calderas humitubulares, son menos propensas a explotar, pueden producir vapor a una mayor presión, son accesibles y pueden responder a cambios bruscos de vapor.
- Calderas humitubulares: Estas calderas cuentan con tubos internos por los cuales circulan los gases de combustión calientes, y el condensado rodea los tubos para extraer el calor de éstos. Las calderas humitubulares cuentan con un costo inicial bajo y son más compactas, sin embargo, son propensas a explotar, y requieren un volumen alto de agua debido a la baja circulación de ésta, por lo que no pueden proporcionar cambios bruscos de vapor, además de requerir una armazón mucho más gruesa en comparación de una caldera acuotubulares. Estas pueden tener la combustión de combustible externamente o internamente [6].

2.5.2 Turbina

La turbina de vapor es el primo motor que continuamente convierte la energía del vapor a alta temperatura y presión en trabajo angular, dejando vapor a baja temperatura para ser llevado al condensador. Esta conversión ocurre en dos pasos:

- El vapor sobrecalentado se expande en boquillas y sale a alta velocidad
- Los chorros de vapor a alta velocidad golpean los álabes de la turbina, los cuales están montados sobre una flecha, los cuales producen un par con el choque del vapor [5].

Al igual que los generadores de vapor, las turbinas tienen múltiples clasificaciones:

- Turbina de impulso: Si el flujo de vapor a través de las boquillas y los álabes de la turbina se realiza de tal modo que el vapor se expande solamente en las boquillas y la presión es constante en toda la turbina, se trata de una turbina de impulso.
- Turbina de impulso-reacción: En estas turbinas, existen cambios de presión en las boquillas y en la turbina. Este cambio de presión en los álabes produce una generación extra de energía cinética, y produce una mayor fuerza en la flecha de la turbina.

- Turbina axial: En este tipo de turbinas, el flujo de vapor es de modo radial. Esta incorpora dos flechas, cada una conectada a un generador independiente y a un disco fijo. Los dos juegos de álabes giran en dirección contraria entre sí, por lo que se produce una velocidad relativa del doble.
- Turbina tangencial: En este tipo de turbina, el flujo de vapor entra en dirección tangencial. Esta turbina es muy robusta, pero no muy eficiente. Las boquillas de esta turbina dirigen el vapor tangencialmente a hendiduras creadas en la periferia de la turbina, y en la salida de esta hendidura entra a otra más, y este proceso se repite varias veces.
- Turbina condensadora: En esta turbina, el vapor es condensado en un condensador y este fluido es utilizado para alimentar el generador de vapor.
- Turbina no condensadora: En estas turbinas, el vapor de agua que sale de la turbina no es realimentado al generador de vapor, sino que es arrojado a la atmósfera.

2.6 Central Termosolar

En una planta termosolar la energía del sol es utilizada para generar electricidad. Esto se realiza al concentrar los rayos del sol en tubos de metal llenos de agua, por lo que el agua aumenta su temperatura y se transforma en vapor. Este vapor es utilizado para mover una turbina de vapor conectada a un generador [6]. De este tipo de centrales existen tres tipos:

- Sistemas de concentración lineal: En estos sistemas, se concentra la energía solar utilizando espejos, los cuales son largos, rectangulares y curvos. Estos espejos enfocan la luz solar en tubos receptores que se extienden por toda la longitud de los espejos, por lo que la luz incrementa la temperatura del fluido que circula por los tubos. Dependiendo del fluido, este puede entrar directamente a una caldera o bien, a un intercambiador de calor para acondicionar otro fluido. Estos campos cuentan con un gran número de colectores en filas paralelas [9].
- Torres de energía solar: Este tipo de configuración usa un gran campo de espejos planos que siguen el sol, los cuales reflejan la luz solar a un receptor en la punta de la torre. La luz solar puede ser concentrada hasta 1500 veces, y este tipo de configuración

permite el almacenamiento de la energía calorífica al utilizar sales que se mantienen calientes por largos periodos de tiempo [9].

- Discos solares: Utilizan un disco de espejos similar a un disco satelital, el cual concentra la luz solar en un punto específico, en donde se transfiere el calor a un ducto con fluido, el cual es llevado a una turbina [9].

Capítulo 3 Diseño del suministrador de vapor por medio de colectores solares

Antes de iniciar el cálculo de la central con los colectores solares, es necesario saber el procedimiento con el cual se obtendrá la energía de salida, la energía de entrada y la eficiencia térmica de la central. Una vez obtenido el procedimiento, se realizarán los cálculos de una central con tres configuraciones comunes: simple, con recalentamiento, y regenerativo.

3.1 Central con ciclo Rankine Simple

Este tipo de centrales tiene la configuración que se muestra en la figura 3-1. Este ciclo consta de cuatro puntos, de los cuales se debe de obtener la entalpía(S) y la entropía(H) para calcular las potencia generada en la turbina y la consumida en la bomba, así como la energía inyectada en la caldera para llevar al agua a las condiciones deseadas.

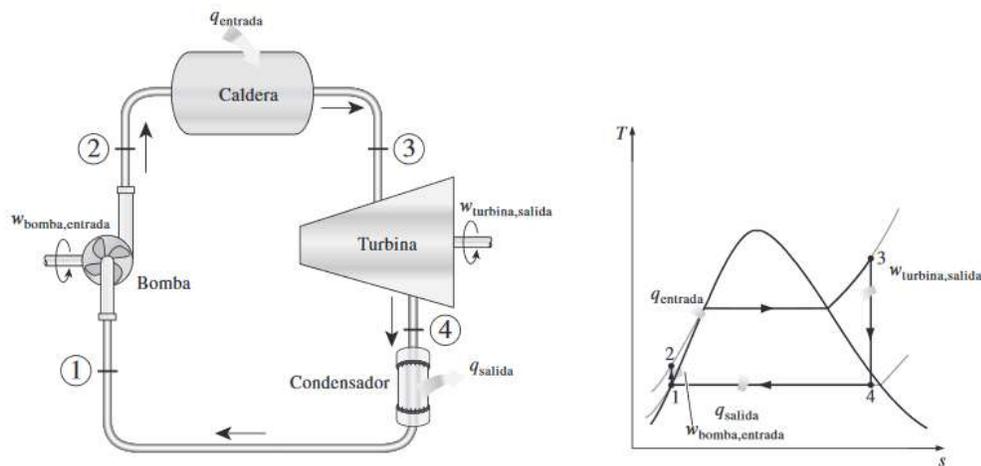


Figura 3-1. Ciclo Rankine Simple [10]

Para estos problemas se obtienen los datos de entalpía y entropía a partir de tablas de vapor, las cuales contienen estos datos a diferentes valores de presión o temperatura, así como para la condición de líquido saturado, vapor sobrecalentado o líquido comprimido. También es posible utilizar software que obtenga de forma precisa estos valores, agilizando los cálculos.

Para obtener la eficiencia energética de todo el ciclo es necesario utilizar las siguientes fórmulas:

$$\eta = \frac{W_t}{Q} \quad (3.1)$$

Donde

$$W_t = W_{turb} - W_p \quad (3.2)$$

Y se tiene que

$$W_{turb} = \dot{m}(H_{Tin} - H_{Tout}) \quad y \quad W_p = \dot{m}(v_{in}(P_{out} - P_{in})) \quad (3.3) \text{ y } (3.4)$$

Y

$$Q = \dot{m}(H_{Bout} - H_{Bin}) \quad (3.5)$$

En caso de tener mezcla de vapor

$$H_x = H_{fx} + x * H_{fgx} \quad (3.6)$$

Donde:

η	Eficiencia térmica de la central
W_t	Potencia total generada en la central
Q	Calor absorbido por la central
W_{turb}	Potencia generada en la turbina
W_p	Potencia consumida en la bomba de agua
\dot{m}	Flujo de vapor
H_x	Entropía en el punto “x” del ciclo, ya sea la entrada o salida de algún elemento.
P_x	Presion de entrada o salida
v_{in}	Volumen específico del fluido
H_{fx}	Entropía del fluido como líquido saturado
H_{fx}	Diferencia de entropía entre liquido saturado y vapor saturado
x	Calidad del vapor de agua.

Este procedimiento es más fácil de entender al aplicarlo a una central, por lo que se realiza el análisis de una central termoeléctrica con los siguientes datos:

Presión de diseño de turbina: 171.65 Bar

Temperatura de diseño de la turbina: 540.55 °C

Presión de escape: 0.075 Bar

Debido que las tablas de vapor están calculadas con presiones en Pascales, es necesario transformar la presión de Bars a Pascales, lo cual se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$1 \text{ Bar} = 100000 \text{ Pa} \quad (3.7)$$

Con esta transformación de presión, se puede obtener la entalpía y la entropía del punto 3 de la figura 3-1 utilizando las tablas de vapor. En este caso se utiliza la tabla de vapor sobrecalentado, y es necesario realizar una interpolación entre dos puntos para obtener los puntos operativos en la temperatura deseada, así como en la presión de la turbina. Además se observa que el fluido es transformado en líquido saturado por el condensador, por lo que este punto también se puede obtener de manera directa, conociendo la presión de operación. Los valores calculados de entalpía y entropía son los siguientes:

Entropía (s) a 17.165 MPa y 540.55 °C	6.4031 KJ/Kg * K
Entalpía (h) a 17.165 MPa y 540.55 °C	3418.3773 KJ/Kg
Entropía (s) a 7.5 kPa y 40.29 °C	0.5763 KJ/Kg * K
Entalpía (h) a 7.5 kPa y 40.29 °C	468.75 KJ/Kg

En la figura 3-1 también se puede observar que las transiciones entre los puntos 1 y 2, y 3 y 4 se realiza a entalpía constante, lo cual permite obtener de las tablas de vapor los valores de entropía de los puntos 2 y 4:

Entropía (s) del punto 4	6.4031	KJ/Kg * K
Entalpía (h) del punto 4	1995.094	KJ/Kg
Entropía (s) del punto 2	0.5763	KJ/Kg * K
Entalpía (h) del punto 2	150.9571	KJ/Kg

Con estos datos, se utilizan las fórmulas (2) a (6) para obtener la eficiencia de la central, con un flujo de vapor de 977000 Kg/hr:

De (3.3) se obtiene:

$$\begin{aligned}
 W_{turb} &= 977000 \frac{Kg}{hr} \left((3418.37729 - 1995.0914) \frac{KJ}{Kg} \right) = 1390550315 \frac{KJ}{hr} * \frac{1h}{3600s} \\
 &= 386263.97 \text{ KW} = 386.263 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

Y de (3.4) se tiene:

$$W_p = 977000 \frac{Kg}{hr} \left(0.001037 \frac{m^3}{Kg} (17165 - 75) \frac{KJ}{m^3} \right) = 17364123.3 \frac{KJ}{hr} * \frac{1h}{3600s}$$

$$= 4823.36KW = 4.82336 MW$$

De (3.5):

$$Q = 977000 \frac{Kg}{hr} \left((3418.377 - 150.9571) \frac{KJ}{Kg} \right) = 3192269526 \frac{KJ}{hr} * \frac{1h}{3600s}$$

$$= 886741.535 KW = 886.741 MW$$

Y finalmente de (3.1)

$$\eta = \frac{(386.263 - 4.82336) MW}{886.741 MW} = 0.43016$$

De este cálculo se observa que la central tiene una eficiencia del 43%, es decir que de toda la energía que es inyectada en la caldera, solamente es aprovechada el 43%, la energía restante no realiza ningún trabajo efectivo.

3.2 Central con ciclo Rankine con recalentamiento

Este ciclo es muy similar al ciclo anterior, como se muestra en la figura 3-2, con la diferencia de que en este ciclo el vapor de escape de la turbina es alimentada nuevamente a la caldera, y es llevada a vapor sobrecalentado con la finalidad de llegar a otra turbina e incrementar la potencia producida.

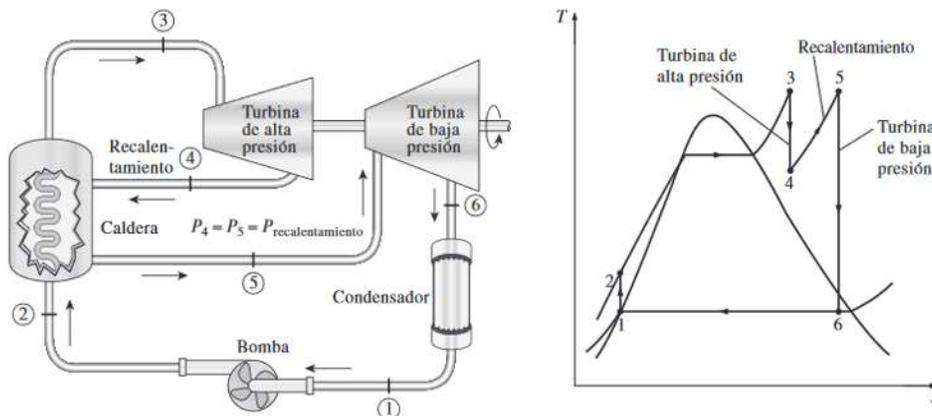


Figura 3-2. Ciclo RAnkine con recalentamiento [10]

Las fórmulas son casi las mismas que las vistas en la sección 3.1, Con el cambio de la energía calorífica inyectada a la central:

$$Q = \dot{m}((H_{Bout} - H_{Bin}) + (H_{Rout} - H_{Rin})) \quad (3.8)$$

$$W_{turb} = \dot{m}((H_{THin} - H_{THout}) + (H_{TLin} - H_{TLout})) \quad (3.9)$$

Con esta información, se procede a obtener la eficiencia térmica de la central anteriormente descrita, de la cual se conoce la siguiente información adicional:

Presión de salida de la turbina de alta presión: 60 Bar

Temperatura de diseño de la turbina de baja presión: 540 °C

De igual manera que la central anterior, se obtiene directamente de las tablas de vapor el punto operativo 1, 3 y 5 de la figura 3-2:

Entropía (s) a 17.165 MPa y 540.55 °C	6.4031	KJ/Kg * K
Entalpía (h) a 17.165 MPa y 540.55 °C	3418.3773	KJ/Kg
Entropía (s) a 7.5 kPa y 40.29 °C	0.5763	KJ/Kg * K
Entalpía (h) a 7.5 kPa y 40.29 °C	468.75	KJ/Kg
Entropía (s) a 6 MPa y 540 °C	7.0013	KJ/Kg * K
Entalpía (h) a 6 MPa y 540°C	3517.7541	KJ/Kg

Además, se observa que las transiciones entre 1 y 2, 3 y 4, y 5 y 6 se realizan a entalpía constante, por lo que estos datos son conocidos en esos puntos. Además se obtienen las entropías conociendo las presiones y entalpias de los puntos:

Entropía (s) del punto 2	0.5763	KJ/Kg * K
Entalpía (h) del punto 2	150.9571	KJ/Kg
Entropía (s) del punto 4	6.4031	KJ/Kg * K
Entalpía (h) del punto 4	3087.6102	KJ/Kg
Entropía (s) del punto 6	7.0013	KJ/Kg * K
Entalpía (h) del punto 6	2182.62	KJ/Kg

Con esta información, se obtiene la eficiencia térmica de la siguiente forma:

De (3.8):

$$W_{turb} = 977000 \frac{Kg}{hr} \left((3418.37729 - 3087.6102 + 3517.7541 - 2182.62) \frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$= 162758551 \frac{KJ}{hr} * \frac{1h}{3600s} = 452107.09 KW = 452.10709 MW$$

De (3.4) se tiene:

$$W_p = 977000 \frac{Kg}{hr} \left(0.001037 \frac{m^3}{Kg} (17165 - 75) \frac{KJ}{m^3} \right) = 17364123.3 \frac{KJ}{hr} * \frac{1h}{3600s}$$

$$= 4823.36KW = 4.82336 MW$$

De (3.7):

$$Q = 977000 \frac{Kg}{hr} \left((3418.377 - 150.9571 + 3517.75414 - 3087.61015) \frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$= 3612520204 \frac{KJ}{hr} * \frac{1h}{3600s} = 1003477.834 KW$$

$$= 1003.4778 MW$$

Y finalmente de (3.1):

$$\eta = \frac{(452.10709 - 4.82336) MW}{1003.4778 MW} = 0.5808$$

Se observa que se incrementó la eficiencia de la central de un 43% a un 58% al introducir un recalentamiento de vapor, pero hace necesario tener que adquirir una caldera especial que permita el recalentamiento y tener otra turbina en operación.

3.3 Central con ciclo Rankine regenerativo

El ciclo rankine regenerativo consta de extraer una pequeña porción del vapor de agua de al turbina e inyectarlo a un intercambiador de calor, con la finalidad de precalentar un poco el agua antes de que ésta entre a la caldera, y se muestra en la figura 3-3.

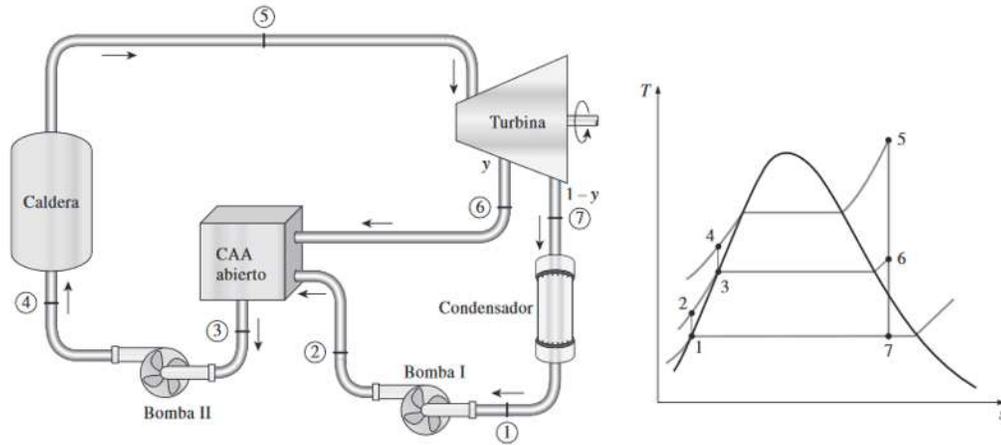


Figura 3-3. Ciclo Rankine regenerativo [10]

Este ciclo, al igual que el ciclo de recalentamiento, utiliza las mismas fórmulas que el ciclo Rankine simple, con la diferencia en las siguientes fórmulas:

$$W_p = W_{p1} + W_{p2} \quad (3.10)$$

$$W_{px} = \dot{m}_x (v_{in} (P_{out} - P_{in})) \quad (3.11)$$

$$W_T = \dot{m}_t * H_{in} - (\dot{m}_{ex} * H_{ex} + \dot{m}_{out} * H_{out}) \quad (3.12)$$

Para obtener \dot{m}_x en la división de vapor se necesita:

$$y = \frac{\dot{m}_6}{\dot{m}_{ex}} = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} \quad (3.13)$$

Con lo que el flujo que entra en la bomba 1 es

$$\dot{m}_{out} = (1 - y) * \dot{m}_1 \quad (3.14)$$

Donde:

- y Coeficiente de división de vapor.
- \dot{m}_{ex} Flujo de vapor de extracción
- \dot{m}_{out} Flujo de vapor de salida de la turbina

Con las fórmulas, se procede a realizar el análisis de la central vista en la sección 3.1, con el siguiente dato agregado:

Presión del vapor extraído: 40 Bar

Con esto, ya se tienen los valores de entalpía y entropía del punto 1, 5 y 7 del análisis de la sección 3.1, por lo que solo es necesario obtener los valores en los puntos 2, 3, 4 y 6. Se observa que el punto 3 se encuentra en líquido saturado, por lo que se obtiene directamente de tablas:

Entropía (s) del punto 3	2.7966	KJ/Kg * K
Entalpía (h) del punto 3	1087.4	KJ/Kg

Se observa además, que la entalpía en los 1 y 2, 3 y 4, así como 5, 6 y 7 son la misma, por lo que se conocen estos valores. Con la entalpía conocida y presiones conocidas, es posible obtener las entropías en los puntos faltantes:

Entropía (s) del punto 2	0.5763	KJ/Kg * K
Entalpía (h) del punto 2	171.95	KJ/Kg
Entropía (s) del punto 4	2.7966	KJ/Kg * K
Entalpía (h) del punto 4	1103.8825	KJ/Kg
Entropía (s) del punto 6	6.4031	KJ/Kg * K
Entalpía (h) del punto 6	2985.4626	KJ/Kg

Con lo que se obtiene la eficiencia de la siguiente manera:

De (3.12) se obtiene:

$$y = \frac{1087.4 - 171.95}{2985.4626 - 171.95} \frac{\frac{KJ}{Kg}}{\frac{KJ}{Kg}} = 0.3253$$

De (3.11) y (3.13):

$$\begin{aligned}
 W_{turb} &= 977000 \frac{Kg}{hr} * \left(3418.37729 \frac{KJ}{Kg} - \left(0.3253 * 2985.4626 \frac{KJ}{Kg} + (1 - 0.3253) * 1995.094 \frac{KJ}{Kg} \right) \right) \\
 &= 1075790708 \frac{KJ}{hr} * \frac{1h}{3600s} = 298830 \text{ KW} = 298.830 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

De (3.9) y (3.10) se tiene:

$$\begin{aligned} W_{p1} &= 659181.9 \frac{Kg}{h} * \left(0.001008 \frac{m^3}{Kg} * (4000 - 7.5) \frac{KJ}{m^3} \right) \\ &= 2652811 \frac{KJ}{hr} * \frac{1h}{3600s} = 736.8921KW \end{aligned}$$

De igual manera:

$$\begin{aligned} W_{p2} &= 317818.1 \frac{Kg}{h} * \left(0.001252 \frac{m^3}{Kg} * (17165 - 4000) \frac{KJ}{m^3} \right) \\ &= 5238462.259 \frac{KJ}{hr} * \frac{1h}{3600s} = 1455.128KW = 1.455128MW \end{aligned}$$

De (3.5):

$$\begin{aligned} Q &= 977000 \frac{Kg}{hr} \left((3418.37729 - 1103.8825) \frac{KJ}{Kg} \right) = 2261261410 \frac{KJ}{hr} * \frac{1h}{3600s} \\ &= 628128.169 KW = 628.12817 MW \end{aligned}$$

Y finalmente de (3.1):

$$\eta = \frac{(298.830 - 0.736892 - 1.455128) MW}{628.12817 MW} = 0.4722$$

Se observa que este tipo de centrales tiene una eficiencia menor a la central con recalentamiento, pero tiene la ventaja de que es necesario quemar una menor cantidad de combustible para mantener en operación.

3.4 Análisis con colectores solares

Para saber cuál es el área necesaria de colectores solares para llevar al agua a una temperatura deseada, es necesario tomar algunas consideraciones de diseño antes de realizar el análisis en la planta termoeléctrica:

1. Se utilizará el promedio diario de irradiación solar de la República Mexicana dado por la CONAGUA, que tiene un valor de 5.3 KWh/m² diario, con la finalidad de que el resultado se aproxime a la mayoría de los puntos en el país [11].

2. Se encuentran en desarrollo colectores solares de alta eficiencia, alcanzando valores de eficiencia de un 73% [12], pero estos se encuentran en fase de pruebas, por lo que se procede a utilizar un valor comercial de 60% de eficiencia [13].
3. Se considera la eficiencia del colector como constante durante todo el día, es decir, se ignora las variaciones de eficiencia debido al ángulo de irradiación y al incremento de la temperatura del colector.
4. La central es considerada como una central de generación base, es decir, la potencia que suministra es la misma durante todo el día.

Tomando en cuenta estas consideraciones, se utilizan las siguientes fórmulas para determinar la cantidad de colectores solares necesarios para llevar el fluido a un punto específico:

$$ET_{gen} = ET_{sol} * \eta_{col} \quad (3.15)$$

$$A_{colector} = \frac{Q_N}{ET_{gen}} \quad (3.16)$$

Donde:

ET_{gen}	Energía térmica generada por el colector solar dada en $\frac{KWh}{m^2 * dia}$
ET_{sol}	Energía térmica en la superficie del planeta generado por el sol, dado en $\frac{KWh}{m^2 * dia}$
η_{col}	Eficiencia del colector solar
$A_{colector}$	Área de colectores solares necesaria.
Q_N	Energía Necesaria

Con esta información, es posible calcular el área necesaria de colectores solares para calentar el fluido antes de que éste entre a la caldera, reduciendo la cantidad de combustible necesario para generar el vapor sobrecalentado a presión y temperatura deseada, y la posición de los colectores en la central se muestra en la figura 3-4.

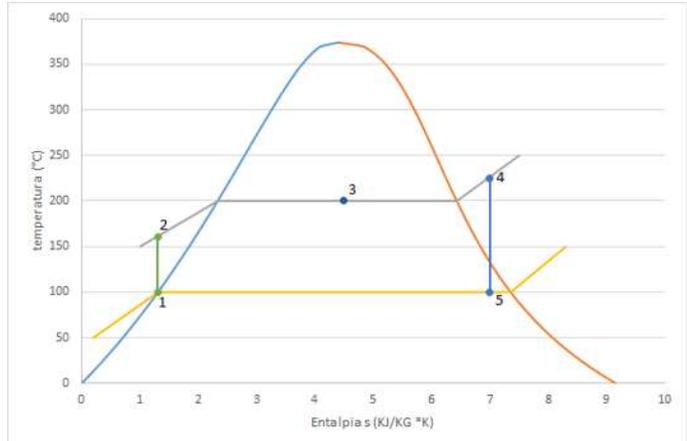
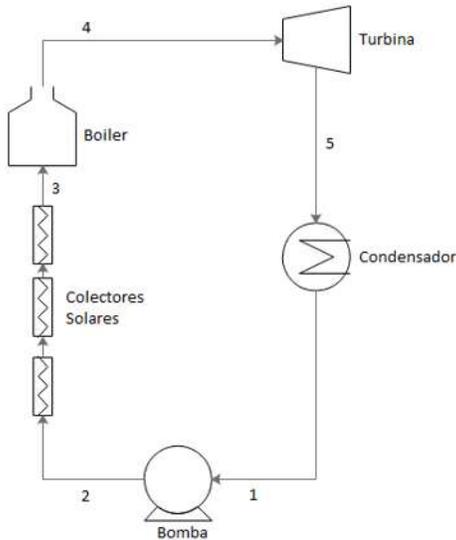


Figura 3-4. Modelo de central termoeléctrica con colectores solares

Se tiene además que la temperatura de saturación del agua a una presión de 17.165 MPa es de 353°C, lo cual es ideal para colectores solares ya que estos pueden elevar la temperatura del fluido mayores que 400°C [14], [15]. Dependiendo de las necesidades y posibilidades de la central, se puede realizar el análisis por medio de un punto específico en el cual se desea el vapor, o por medio de un área delimitada de colectores solares. Para el primer método, es necesario establecer un punto de operación de salida de los colectores solares, en este caso se decide por una mezcla de vapor al 50% a una presión de 17.165 MPa y una temperatura de saturación de 353°C, además de conocer que la entropía de saturación del fluido en estas condiciones es de $1697.2135 \frac{KJ}{Kg}$ y $2541.4795 \frac{KJ}{Kg}$ para líquido y vapor saturado respectivamente. Con esta información se obtienen los datos necesarios:

- Para el caso 1 y 2 de las secciones 3.1 y 3.2

$$H_{out,col} = 1697.2135 \frac{KJ}{Kg} + 0.5 * (2541.4795 - 1697.2135) \frac{KJ}{Kg} = 2119.3465 \frac{KJ}{Kg}$$

$$W_{col} = 977000 \frac{Kg}{h} (2119.3465 - 150.9571) \frac{KJ}{Kg} = 1923116444 \frac{KJ}{h} * \frac{1h}{3600s}$$

$$= 534199.0122 KW = 534.199 MW$$

Para un colector con un 60% de eficiencia se tiene:

$$ET_{gen} = 5.3 \frac{KWh}{m^2 * dia} * 0.6 = 3.18 \frac{KWh}{m^2 * dia}$$

Transformándolo a MW se obtiene:

$$ET_{gen} = 3.18 \frac{KWh}{m^2 * dia} * \frac{1 MW}{1000KW} * \frac{1 dia}{24 h} = 0.0001325 \frac{MW}{m^2}$$

Obteniendo el área necesaria de colectores:

$$A_{colector} = \frac{534.199 MW}{0.0001325 \frac{MW}{m^2}} = 4031690.566 m^2 = 4.031690 Km^2$$

Esto significa que con una superficie de aproximadamente 2 kilómetros por 2 kilómetros se obtiene el vapor en las condiciones deseadas. En cuestión de la eficiencia de la central, debido a que la misma cantidad de calor entra y la misma potencia mecánica sale de la turbina, la eficiencia no se incrementa o reduce, pero se ven afectados otros factores que se mostrarán en el capítulo 4.

- Para el caso 3 de la sección 3.3

$$H_{out,col} = 1697.2135 \frac{KJ}{Kg} + 0.5 * (2541.4795 - 1697.2135) \frac{KJ}{Kg} = 2119.3465 \frac{KJ}{Kg}$$

La entropía de entrada es igual a la entropía en el punto 4:

$$\begin{aligned} W_{col} &= 977000 \frac{Kg}{h} (2119.3465 - 1103.8825) \frac{KJ}{Kg} = 992108328 \frac{KJ}{h} * \frac{1h}{3600s} \\ &= 275585.6467 KW = 275.585 MW \end{aligned}$$

Para un colector con un 60% de eficiencia se tiene:

$$ET_{gen} = 5.3 \frac{KWh}{m^2 * dia} * 0.6 = 3.18 \frac{KWh}{m^2 * dia}$$

Transformándolo a MW se obtiene:

$$ET_{gen} = 3.18 \frac{KWh}{m^2 * dia} * \frac{1 MW}{1000KW} * \frac{1 dia}{24 h} = 0.0001325 \frac{MW}{m^2}$$

Obteniendo el área necesaria de colectores:

$$A_{colector} = \frac{275.585 \text{ MW}}{0.0001325 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2}} = 2079886.792 \text{ m}^2 = 2.079886 \text{ Km}^2$$

En este caso se tiene un área de aproximadamente la mitad del área necesaria en los casos anteriores, siendo necesario una superficie de aproximadamente 1 kilómetro por 2 kilómetros para satisfacer las necesidades de energía. De igual manera, la eficiencia no se ve afectada ya que la misma cantidad de calor es necesaria para producir la misma cantidad de potencia mecánica.

Para el segundo método de obtención de datos, es posible especificar el área disponible para colocar colectores solares, y así obtener la potencia que estos colectores pueden desarrollar. Para este caso, se utiliza un área de 1.5 Km² para obtener la cantidad de energía obtenida de los colectores, obteniendo los siguientes resultados:

- Para el caso 1 y 2 de las secciones 3.1 y 3.2

De la ecuación (3.16) se obtiene:

$$Q_n = 1500000 \text{ m}^2 * 0.0001325 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} = 198.75 \text{ MW}$$

Se obtiene la entropía de salida:

$$H_{out,col} = 150.9571 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + \left(\frac{198750000 \text{ W}}{977000 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}} * \frac{3600 \text{ J}}{\text{Wh}} * \frac{1 \text{ KJ}}{1000 \text{ J}} \right) = 883.301 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Este valor es menor al valor de entropía de líquido saturado, por lo que se determina que se tiene todavía un líquido comprimido al utilizar solamente 1.5 Km² de colectores solares en estos casos.

- Para el caso 3 de la sección 3.3

De la ecuación (3.16) se obtiene:

$$Q_n = 1500000 \text{ m}^2 * 0.0001325 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} = 198.75 \text{ MW}$$

Se obtiene la entropía de salida:

$$H_{out,col} = 1103.8825 \frac{KJ}{Kg} + \left(\frac{198750000W}{977000 \frac{Kg}{h}} * \frac{3600J}{Wh} * \frac{1KJ}{1000J} \right) = 1836.22641 \frac{KJ}{Kg}$$

Para obtener la calidad de la mezcla:

$$x = \frac{(1836.22641 - 1697.2135) \frac{KJ}{Kg}}{(2541.4795 - 1697.2135) \frac{KJ}{Kg}} = 0.1646$$

Con la limitante del espacio para colocar colectores solares, se observa que se redujo considerablemente la calidad del vapor que sale de estos dispositivos y entra a la caldera. Sin embargo, se reduce la cantidad de combustible necesario para llevar el fluido a vapor sobrecalentado en ambos casos, al inyectar energía al fluido antes de que la caldera coloque la energía restante.

Capítulo 4 Potencia y eficiencia de centrales termoeléctricas

Como se explicó en el capítulo anterior, la eficiencia de las centrales no se ve afectada debido a que la misma cantidad de energía calorífica es inyectada al fluido de trabajo, y la misma cantidad de trabajo es producido por la turbina. Sin embargo, al colocar los colectores solares se observa una reducción en la energía calorífica que tiene que inyectar la caldera al agua, lo cual conlleva a una reducción de la cantidad de combustible quemado para operar la central. En este capítulo se analiza la cantidad de combustible consumido por la central antes y después de colocar los colectores solares, así como la potencia que podría suministrar la turbina al quemar la misma cantidad de combustible y colocando los colectores solares.

4.1 Reducción de consumo de combustible

Antes de analizar las centrales, es necesario conocer el contenido calorífico de diferentes combustibles utilizados en las centrales. En este tipo de centrales, las cuales operan únicamente con vapor de agua, los combustibles más utilizados son el carbón, el gas natural y el combustóleo [16]. Estos combustibles tienen la capacidad calorífica de acuerdo a la tabla 4.1:

Tabla 4.1. Capacidad calorífica de diferentes combustibles utilizados en centrales eléctricas en sistema imperial	
<i>Combustible</i>	<i>Contenido Calorífico</i>
Gas Natural	$1035000 \frac{BTU}{ft^3}$ [17]
Carbón	19.146 millones de $\frac{BTU}{Tonelada Corta}$ [18]
Combustóleo	6.287 millones de $\frac{BTU}{barril}$ [19]

Es necesario transformar estas cifras a unidades del sistema internacional, es decir, transformar los BTU a Joules, los pies cúbicos y barriles a litros, así como las toneladas cortas a kilogramos. Por lo que se utilizan los siguientes factores de conversión para transformar las unidades:

$$1 \text{ BTU} = 1055.06 \text{ Joules} \quad (4.1)$$

$$1 \text{ ft}^3 = 28.3168 \text{ Litros} \quad (4.2)$$

$$1 \text{ Tonelada corta} = 907.185 \text{ Kilogramos} \quad (4.3)$$

$$1 \text{ barril} = 158.987 \text{ litros} \quad (4.4)$$

Con lo que se realiza la transformación de la tabla 4.1 a unidades del sistema internacional, lo cual facilitará los cálculos y la interpretación de los valores obtenidos.

<i>Combustible</i>	<i>Contenido Calorífico</i>
Gas Natural	38,563,000 $\frac{J}{L}$
Carbón	22,266,800 $\frac{J}{Kg}$
Combustóleo	41,721,400 $\frac{J}{L}$

Y para obtener el flujo de combustible que entra en la caldera para inyectar una potencia deseada en el fluido de trabajo se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Flujo de combustible} = \frac{\text{Potencia inyectada}}{\text{Contenido calorífico}} \quad (4.5)$$

4.1.1 Caso de la central con ciclo Rankine simple

Con los datos obtenidos en el capítulo 2 y en la tabla 2, se obtienen las tablas 4.3 y 4.4 donde se especifican los flujos de combustible en una central sin colectores y una central con colectores.

<i>Potencia en la caldera</i>	<i>Combustible</i>	<i>Flujo de combustible</i>
886.741 MW = 886741000 $\frac{J}{s}$	Gas Natural	22.994 $\frac{L}{s}$
	Carbón	39.8234 $\frac{Kg}{s}$
	Combustóleo	21.2538 $\frac{L}{s}$

Para el caso de los colectores solares, el trabajo de la caldera se ve reducido en la misma cantidad en que los colectores inyectan energía al fluido de trabajo. Se analizará el caso en que se

lleva el fluido de trabajo a una mezcla de vapor al 50%, para el cual los colectores solares inyectan una potencia al fluido de trabajo de 534.199 MW, con lo que la potencia de la caldera es de 352.542 MW. Con lo que se obtienen los resultados de la tabla 4.4, con la nueva potencia de la caldera.

<i>Potencia en la caldera</i>	<i>Combustible</i>	<i>Flujo de combustible</i>
$352.542 \text{ MW} = 352542000 \frac{J}{s}$	Gas Natural	$9.142 \frac{L}{s}$
	Carbón	$15.8326 \frac{Kg}{s}$
	Combustóleo	$8.4499 \frac{L}{s}$

4.1.2 Caso de la central con ciclo Rankine con recalentamiento.

En este tipo de centrales la caldera tiene que inyectar calor extra al fluido de trabajo para llevarlo a la temperatura de la turbina de baja presión, lo cual implica un incremento en el flujo de combustible de la caldera. Sin embargo, al tener un conjunto de turbinas, una de alta y otra de baja presión, es posible obtener un incremento en la potencia mecánica que entregan las turbinas. Es decir, por un incremento en el flujo de combustible se tiene un incremento sustancial en la potencia obtenida en la central, además de afectar la eficiencia de la central, incrementándola un poco en comparación de una central simple. En la tabla 4.5 se muestran los diferentes flujos de combustible en este tipo de centrales, observándose un incremento en dicho flujo como es de esperarse.

<i>Potencia en la caldera</i>	<i>Combustible</i>	<i>Flujo de combustible</i>
$1003.4778 \text{ MW} = 1003477800 \frac{J}{s}$	Gas Natural	$26.0217 \frac{L}{s}$
	Carbón	$45.066 \frac{Kg}{s}$
	Combustóleo	$24.518 \frac{L}{s}$

En la tabla 4.6 se muestran los flujos de combustible al colocar colectores solares que llevan al fluido de trabajo a una mezcla de vapor del 50%. En este caso, la potencia inyectada por la caldera es de 469.2788 MW.

Tabla 4.6. Flujo de combustible de una central con ciclo Rankine con recalentamiento con colectores solares		
<i>Potencia en la caldera</i>	<i>Combustible</i>	<i>Flujo de combustible</i>
469.2788 MW = 468278800 $\frac{J}{s}$	Gas Natural	12.1432 $\frac{L}{s}$
	Carbón	21.0303 $\frac{Kg}{s}$
	Combustóleo	11.2239 $\frac{L}{s}$

4.1.3 Caso de la central con ciclo Rankine regenerativo.

En el ciclo Rankine regenerativo, la caldera debe de realizar un trabajo menor, ya que el fluido de trabajo entra a una temperatura mayor, por lo que la entropía de éste es mayor. En la tabla 4.7 se muestran los flujos de combustible de la central de ejemplo.

Tabla 4.7. Flujo de combustible de una central con ciclo Rankine regenerativo sin colectores solares		
<i>Potencia en la caldera</i>	<i>Combustible</i>	<i>Flujo de combustible</i>
628.12817 MW = 628128170 $\frac{J}{s}$	Gas Natural	16.2884 $\frac{L}{s}$
	Carbón	28.2092 $\frac{Kg}{s}$
	Combustóleo	15.0553 $\frac{L}{s}$

En la tabla 4.8 se muestran los flujos de combustibles de la central de ejemplo con los colectores solares que llevan al fluido de trabajo una mezcla de vapor al 50%. En este caso la caldera inyecta una potencia de $628.12817MW - 275.585MW = 352.54317 MW$.

Tabla 4.8. Flujo de combustible de una central con ciclo Rankine regenerativo con colectores solares		
<i>Potencia en la caldera</i>	<i>Combustible</i>	<i>Flujo de combustible</i>
352.54317 MW = 352543170 $\frac{J}{s}$	Gas Natural	9.142 $\frac{L}{s}$
	Carbón	15.8326 $\frac{Kg}{s}$
	Combustóleo	8.4499 $\frac{L}{s}$

4.1.4 Análisis de cambio de consumo de combustible.

Con los datos obtenidos en las secciones anteriores, es posible hacer una comparativa en los cambios de flujo de combustible al colocar colectores solares. Debido a que la reducción de potencia inyectada por la caldera es la misma en cada caso, de igual forma será la reducción de consumo de combustible. Así, se muestran los cambios de flujos en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. Cambios de flujo de combustible en una central termoeléctrica				
Central Termoeléctrica de ciclo Rankine simple				
<i>Combustible</i>	<i>Flujo de combustible sin colectores solares</i>	<i>Flujo de combustible con colectores solares</i>	<i>Cambio de flujo de combustible</i>	<i>Porcentaje de reducción</i>
Gas Natural	$22.994 \frac{L}{s}$	$9.142 \frac{L}{s}$	$13.852 \frac{L}{s}$	60.24%
Carbón	$39.8234 \frac{Kg}{s}$	$15.8326 \frac{Kg}{s}$	$23.9908 \frac{Kg}{s}$	
Combustóleo	$21.2538 \frac{L}{s}$	$8.4499 \frac{L}{s}$	$12.8039 \frac{L}{s}$	
Central Termoeléctrica de ciclo Rankine con recalentamiento				
Gas Natural	$26.0217 \frac{L}{s}$	$12.1432 \frac{L}{s}$	$13.8785 \frac{L}{s}$	53.33%
Carbón	$45.066 \frac{Kg}{s}$	$21.0303 \frac{Kg}{s}$	$24.0357 \frac{Kg}{s}$	
Combustóleo	$24.518 \frac{L}{s}$	$11.2239 \frac{L}{s}$	$13.2941 \frac{L}{s}$	
Central Termoeléctrica de ciclo Rankine regenerativo				
Gas Natural	$16.2884 \frac{L}{s}$	$9.142 \frac{L}{s}$	$7.1464 \frac{L}{s}$	43.87%
Carbón	$28.2092 \frac{Kg}{s}$	$15.8326 \frac{Kg}{s}$	$12.3766 \frac{Kg}{s}$	
Combustóleo	$15.0553 \frac{L}{s}$	$8.4499 \frac{L}{s}$	$6.6045 \frac{L}{s}$	

De aquí se observa una reducción del consumo de combustible mayor al 40% en todos los casos, lo cual significa una reducción en la misma cantidad de gases de efecto invernadero y otros gases nocivos, y se obtiene la misma potencia en la central. Ahora se debe analizar el caso en que el flujo de combustible sea el mismo.

4.2 Aumento de potencia de la central

En este caso, se debe aumentar la potencia de los colectores a la potencia inyectada por la caldera antes de que se colocaran los colectores, por lo que el vapor de salida de la caldera tiene una entalpía mayor. En este caso, se considera que las condiciones de fluido a la salida de la turbina son las mismas que en el ejemplo base, solo cambian las condiciones de entrada.

4.2.1 Caso de la central con ciclo Rankine simple

Aquí, se tiene que calcular el punto de salida del vapor sobrecalentado, esto al sumar la potencia original de la caldera más la potencia de los colectores. Pero como ya se conoce el punto de salida de los colectores, se simplifica el cálculo del punto de salida, ya que solo se tiene que calcular la potencia necesaria para llevar a una mezcla de vapor al 100%, y de ahí los cálculos necesarios con la potencia restante en el área de vapor sobrecalentado. Se tiene entonces que la entropía del vapor a la salida de los colectores es de $2119.3465 \frac{KJ}{Kg}$, y la entropía para la mezcla de vapor al 100% es de $2541.4795 \frac{KJ}{Kg}$, por lo que la potencia que tiene que inyectar la caldera para llevar al fluido a este punto se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} W_{sat} &= 977000 \frac{Kg}{h} (2541.4795 - 2119.3465) \frac{KJ}{Kg} = 412423941 \frac{KJ}{Kg} * \frac{1h}{3600s} \\ &= 114562.2058KW = 114.562 MW \end{aligned}$$

La caldera originalmente inyecta una potencia de $886.741 MW$ para llevar el vapor a el punto deseado, por lo que queda una potencia de $772.1788 MW$ que la caldera puede inyectar al fluido de trabajo. Esto se calcula despejando la entropía de salida de la ecuación (3.5):

$$H_{Bout} = \frac{Q}{\dot{m}} + H_{Bin} \quad (4.6)$$

Con lo que se recalcula la entalpía de salida de la caldera y la potencia de salida de la turbina, utilizando las fórmulas (4.6) y (3.3), así como la eficiencia de la central con la ecuación (3.1).

De la ecuación (4.6) se obtiene:

$$H_{Bout} = \frac{\left(772178.8 \frac{KJ}{s}\right) * \frac{3600s}{1h}}{977000 \frac{Kg}{h}} + 2541.4795 \frac{KJ}{Kg} = 5386.764741 \frac{KJ}{Kg}$$

Utilizando la ecuación (3.3) se obtiene:

$$W_{turb} = 977000 \frac{Kg}{h} \left((5386.7647 - 1995.0914) \frac{KJ}{Kg} \right) = 3313664814 \frac{KJ}{h} * \frac{1h}{3600s} = 920462.4484 KW$$

$$= 920.462 MW$$

Con lo que se obtiene la eficiencia con la ecuación (3.1):

$$\eta = \frac{920.462 MW - 4.82336 MW}{1420.94 MW} = 0.6443 = 64.43\%$$

4.2.2 Caso de la central con ciclo Rankine con recalentamiento

Para este caso, ya no es necesario recalcular la potencia de la caldera para la salida de alta temperatura y presión, ya que es la misma que el caso anterior, por lo que sólo se recalcula la potencia de la turbina de alta presión y la eficiencia. Para esto, es necesario utilizar la fórmula (3.9).

Utilizando la ecuación (3.9) y la entropía de salida de la caldera:

$$W_{turb} = 977000 \frac{Kg}{h} \left((5386.7647 - 3087.6102 + 3517.7541 - 2182.62) \frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$= 3550699962 \frac{KJ}{h} * \frac{1h}{3600s} = 986305.5451 KW = 986.305 MW$$

Con lo que se tiene la eficiencia 1:

$$\eta = \frac{986.305 MW - 4.82336 MW}{1537.6768 MW} = 0.638 = 63.8\%$$

4.2.3 Caso de la central con ciclo Rankine regenerativo

Para este tipo de centrales, ya es necesario recalcular la potencia de la caldera, así como la potencia de la turbina y la eficiencia del ciclo. En este caso, la potencia que la caldera inyectaba originalmente es de 628.12817 MW, pero es necesario utilizar 114.562 MW para llevarlo a vapor saturado, por lo que quedan 513.56617 MW para inyectar al fluido. Con esto, y utilizando las fórmulas (4.6), (3.1), (3.11) y (3.13), se obtiene de nuevo la potencia de salida y la eficiencia.

De (4.6) se tiene la entropía de salida:

$$H_{Bout} = \frac{\left(513566.17 \frac{KJ}{s}\right) * \frac{3600s}{1 h}}{977000 \frac{Kg}{h}} + 2541.4795 \frac{KJ}{Kg} = 4433.842051 \frac{KJ}{Kg}$$

De (3.11) y (3.13) se obtiene la potencia de la turbina:

$$\begin{aligned} W_{turb} &= 977000 \frac{Kg}{hr} * \left(4433.842 \frac{KJ}{Kg} - \left(0.3253 * 2985.4626 \frac{KJ}{Kg} + (1 - 0.3253) * 1995.094 \frac{KJ}{Kg} \right) \right) \\ &= 2067899729 \frac{KJ}{hr} * \frac{1h}{3600s} = 574416.5915 KW = 574.416 MW \end{aligned}$$

Y la eficiencia:

$$\eta = \frac{(574.416 - 0.736892 - 1.455128) MW}{903.71317 MW} = 0.63319 = 63\%$$

Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El objetivo de esta tesis es el diseño de una central termoeléctrica a la cual se le colocan colectores solares con la finalidad de reducir el consumo de combustible para generar electricidad y mantener los beneficios que entrega la generación convencional a la red eléctrica. También se analizó el cambio de potencia generada al colocar los colectores solares y manteniendo la misma tasa de consumo de combustible.

Primeramente, fue necesario obtener los puntos de operación de una central termoeléctrica convencional para conocer la forma en que esta opera y la cantidad de energía inyectada a la caldera para producir energía en la turbina. Con estos datos obtenidos, se procedió a una obtener el área necesaria de colectores solares para llevar el fluido de trabajo a una mezcla de vapor a un 50% antes de que entre a la caldera, o bien, entregar un área determinada para colocar colectores solares y obtener el estado de salida de la mezcla de vapor.

Con esto, se determinó que es necesaria un área de 4 kilómetros cuadrados aproximadamente, en el caso de las centrales de ciclo simple y con recalentamiento, para llevar el agua a una mezcla del 50%, y en el caso de una central de ciclo regenerativo es necesaria un área de 2 kilómetros cuadrados para llevar el fluido a este punto. Al llevar a este punto el agua, se observan reducciones considerables de los consumos de combustible para generar la misma cantidad de potencia. Son reducciones de un 60.24% para una central de ciclo simple, de 53.33% para una central con recalentamiento y de 43.87% para una central con ciclo regenerativo, lo cual indica una reducción en la misma cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero en todos los casos. Esto significa dejar de consumir decenas de litros de gas natural o combustóleo, o decenas de kilogramos de carbón para generar energía eléctrica. Sin embargo, como ya se explicó antes, son necesarias grandes áreas de colectores solares, y estos generan, en cierta forma, contaminación visual y luminosa, ya que parte de los rayos solares son reflejados los colectores.

También se realizó el análisis de incrementar la potencia instalada en la central de energía, esto es, utilizar la misma cantidad de combustible y tener los colectores solares instalados para precalentar el agua. Esto significa realizar incrementar la potencia generada de una central de ciclo simple de 386.26 MW a 920.462 MW, o bien un incremento de 534.202 MW; esto provoca un

incremento de la eficiencia de la central de 43.01% hasta un 64.43%. En el caso de la central con ciclo de recalentamiento, se incrementó la potencia de 452.11 MW hasta 986.305 MW, con el cual se tiene un incremento en la eficiencia de 58.08% hasta 63.8%. Finalmente una central con ciclo regenerativo incrementa su potencia de 298.83 MW hasta 574 MW, con lo que se tiene un incremento de eficiencia de 47.22% a un 63.62%. Hay que recordar que la eficiencia se obtiene de la razón existente entre la energía de entrada y la energía de salida, lo que quiere decir que en la energía de entrada se toma en cuenta la potencia entregada por los colectores solares.

Por lo que se obtienen beneficios al utilizar ambos casos, ya sea dejar la misma potencia y utilizar una menor cantidad de combustible, o incrementar la potencia instalada en la central al utilizar la misma cantidad de combustible y colocar los colectores solares. En ambos casos se ayuda al medio ambiente y la red eléctrica se mantiene en las mismas condiciones operativas, lo cual permite colocar otras energías renovables como lo son parques fotovoltaicos o parques eólicos.

5.2 Recomendaciones

Las líneas futuras de investigación a este tema de tesis. Un primer paso sería realizar el análisis de una central con colectores, pero ahora analizar los elementos con sus respectivas eficiencias así como utilizar la curva de irradiación solar en un día determinado, para obtener un panorama más acertado del beneficio de los colectores. También es necesario realizar un estudio a una central real, así como los costos que conlleva la instalación de los colectores solares, como costos de los colectores solares, costo de instalación, costo de cambio de equipo, etc. Otra rama de investigación es la aplicación de esta tecnología a otras centrales que utilicen el ciclo Rankine, como son las centrales geotérmicas, centrales de biomasa o las centrales de ciclo combinado, y realizar el mismo estudio realizado en la presente tesis con la finalidad de obtener un portafolio de posibles centrales que se puedan beneficiar de esta tecnología.

Referencias

- [1] Secretaría de Energía, «Prospectiva del Sector Eléctrico,» Ciudad de México, 2015.
- [2] National Aeronautics and Space Administration, «Sun - In Depth,» [En línea]. Available: <https://solarsystem.nasa.gov/planets/sun/indepth>. [Último acceso: 24 Septiembre 2017].
- [3] M. Höök, «Decline and depletion rates of oil production: a comprehensive investigation,» 2013. [En línea]. Available: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/roypta/372/2006/20120448.full.pdf>. [Último acceso: 24 Septiembre 2017].
- [4] F. Ballenilla, «La sostenibilidad desde la perspectiva del agotamiento de los combustibles fósiles, un problema socio-ambiental relevante,» 2005. [En línea]. Available: <http://cervantes.cpd.ua.es/personal/fernando.ballenilla/Preocupacion/ArticuloSostenibilidadInvestigacionEscuela55.pdf>. [Último acceso: 24 Septiembre 2017].
- [5] P. K. Nag, Power Plant Engineering, New Delhi: McGraw-Hill, 2008.
- [6] A. K. Raja, A. P. Srivastaba y M. Dwivedi, Power Plant Engineering, New Delhi: New Age International, 2006.
- [7] S. K. Sahu, «Notes for Power Plant Engineering,» 2016. [En línea]. Available: https://lecturenotes.in/materials/1968-power-plant-engineering?utm_source=subjectpage&utm_medium=web&utm_campaign=materialpage. [Último acceso: 01 Octubre 2017].
- [8] bp, «BP Statistical Review of World Energy June 2017,» BP Statistical Review of World Energy, Londres, 2017.
- [9] U.S. Energy Information Administration, «Solar Thermal Power Plants,» 28 11 2016. [En línea]. Available: https://www.eia.gov/energyexplained/?page=solar_thermal_power_plants. [Último acceso: 1 Octubre 2017].
- [10] Y. A. Cengel, Termodinámica, Ciudad de México: McGraw Hill, 2009.
- [11] CONAGUA, «Mapas de irradiacion solar en México,» 15 Febrero 2012. [En línea]. Available: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/presentacion1.pdf>. [Último acceso: 29 Octubre 2017].
- [12] Solar Power Engineering, «NREL: This parabolic trough 73% efficient,» 3 Septiembre 2010. [En línea]. Available: <https://www.solarpowerworldonline.com/2010/09/nrel-says-skyfuels-parabolic-troughs-are-73-efficient/>. [Último acceso: 29 Octubre 2017].

- [13] NEPSOLAR, «Technical Data for the PolyTrough 1800,» 2013. [En línea]. Available: http://www.nep-solar.com/wp-content/uploads/2013/11/NEP-Solar-Polytrough1800_Datasheet.pdf. [Último acceso: 29 Octubre 2017].
- [14] ETSAP, IRENA, «Solar Heat for Industrial Processes,» Enero 2015. [En línea]. Available: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_ETSAP_Tech_Brief_E21_Solar_Heat_Industrial_2015.pdf. [Último acceso: 30 Octubre 2017].
- [15] E. L. Michael Geyer, «EuroTrough - Parabolic Trough Collector Developed for Cost Efficient Solar Power Generation,» 4 Septiembre 2002. [En línea]. Available: <http://www.fika.org/jb/resources/EuroTrough.pdf>. [Último acceso: 30 Octubre 2017].
- [16] Power Plant Emissions of North America, «Fossil Fuels Used to Generate Electricity,» [En línea]. Available: <http://www2.cec.org/site/PPE/fossil-fuels>. [Último acceso: 18 Noviembre 2017].
- [17] U.S. Energy Information Administration, Octubre 2017. [En línea]. Available: https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/sec13_4.pdf. [Último acceso: 18 Noviembre 2017].
- [18] U.S. Energy Information Administration, «Approximate Heat Content of Coal and Coal Coke,» Octubre 2017. [En línea]. Available: https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/sec13_5.pdf. [Último acceso: 18 Noviembre 2017].
- [19] U.S. Energy Information Administration, «Approximate Heat Content of Petroleum and Other Liquids,» Octubre 2017. [En línea]. Available: https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/sec13_1.pdf. [Último acceso: 18 Noviembre 2017].