



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ANÁLISIS DE UNA CENTRAL
TERMOELÉCTRICA CON LA
CONTRIBUCIÓN DE COLECTORES
PARABÓLICOS SOLARES

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

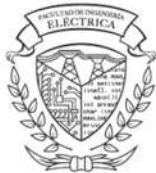
Ingeniero Electrónico

PRESENTA:

Janeth González Vázquez

ASESOR:

Dr. Gilberto González Avalos



Morelia, Michoacán, Junio 2021

A mis padres por impulsarme a ser una profesionalista, por inculcarme que la herencia más valiosa es la educación. A mis hermanas y hermano por ser un pilar fundamental en mis días.
Janeth.

Reconocimientos

La realización de esta tesis fue posible gracias a la asesoría del Dr. Gilberto González Avalos. Se agradecen las revisiones de la Mtra. Lizbeth Soto Ruvalcaba.

Cabe agradecer, a mis profesores por compartir sus conocimientos de forma eficaz, a mis compañeros por la colaboración en el trabajo en equipo.

Por último, un agradecimiento a todas aquellas personas que en forma directa o indirecta contribuyeron para que esta tesis se pudiera llevar a cabo.

Índice general

Resumen	VII
Abstract	IX
Abreviaciones	XI
Nomenclatura	XIII
Glosario de términos	XVII
1. Introducción	1
1.1. Marco Teórico	1
1.1.1. Energía y Fuentes de energía	1
1.1.2. Energía Solar	2
1.1.2.1. Energía Solar Fotovoltaica	3
1.1.2.2. Energía Solar Térmica	4
1.1.2.3. Energía Solar Pasiva	5
1.1.3. Programa Sectorial de Energía 2020-2024	6
1.2. Justificación	8
1.3. Objetivos	8
1.4. Metodología	8
1.5. Estructura de la Tesis	9
2. Antecedentes de las Centrales Eléctricas	11
2.1. Antecedentes de las Centrales Eléctricas	11
2.1.1. Tipos de Centrales Eléctricas	12
2.1.2. Central Termoeléctrica	14
2.1.2.1. Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado	16
2.1.2.2. Ciclo Brayton	17
2.1.2.3. Ciclo Rankine	18
2.1.2.4. Ciclo de Recalentamiento	20

ÍNDICE GENERAL

2.1.2.5. Ciclo Regenerativo	22
2.2. Antecedentes de los Colectores Solares	24
2.2.1. Clasificación de los Colectores Solares	25
2.2.1.1. Colectores Solares sin Concentración	27
2.2.1.2. Colectores Solares con Concentración	28
2.2.2. Colectores solares cilíndrico parabólicos	29
2.2.3. Elementos Principales	30
2.2.4. Pérdidas de un CCP	32
2.2.4.1. Pérdidas Geométricas	32
2.2.4.2. Pérdidas Ópticas	33
2.2.4.3. Pérdidas Térmicas	34
2.2.5. Balance Energético de un CCP	35
3. Modelado de una Termoeléctrica con Colectores Solares	37
3.1. Modelado de un CCP	37
3.1.1. Tabla de características del CCP	40
3.2. Análisis de una Central Termoeléctrica con CCP	41
3.2.1. Propuesta de funcionamiento horario	41
3.2.2. Análisis Mediante el Ciclo Rankine	42
3.2.3. Análisis Mediante el Ciclo Regenerativo a 15 bar	47
3.2.4. Análisis Mediante el Ciclo Regenerativo a 20 bar	50
3.2.5. Análisis Mediante el Ciclo de Recalentamiento	53
3.2.6. Análisis Mediante el Ciclo Regenerativo con Recalentamiento	57
4. Conclusiones y Recomendaciones	61
4.1. Conclusiones	61
4.2. Recomendaciones	63
A. Tablas	65
B. Códigos	69
Bibliografía	73

Resumen

El presente trabajo es un análisis de una central termoeléctrica con la contribución de colectores parabólicos solares (colectores solares cilindro parabólicos). Esto se realizó mediante los ciclos térmicos de: Ciclo Rankine, Ciclo de Recalentamiento y el Ciclo Regenerativo, se comparó la eficiencia y potencia total generada en cada ciclo para obtener el más viable.

Análisis.
Ciclos térmicos.
Comparar.
Eficiencia.
Potencia total generada.
Viable.

Abstract

The present work is an analysis of a thermoelectric power plant with the contribution of parabolic solar collectors (parabolic trough solar collectors). This was done using the thermal cycles of: Rankine Cycle, Reheat Cycle and the Regenerative Cycle, the efficiency and total power generated in each cycle was compared to obtain the most viable one.

Abreviaciones

DOF	Diario Oficial de la Federación
SENER	Secretaría de Energía
EPE	Empresa productiva del Estado
CCP	Colector Solar Cilíndrico Parabólico
PROSENER	Programa Sectorial de Energía 2020-2024
CT	Central termoeléctrica
CRG	Ciclo Regenerativo
CRC	Ciclo de Recalentamiento
CRGRC	Ciclo Regenerativo con Recalentamiento

Nomenclatura

e	Eficiencia
W_{ELEC}	Potencia eléctrica
W_N	Trabajo neto
W_b	Trabajo de la bomba
W_t	Trabajo total
Q	Calor absorbido
h	Entalpía
C	Razón de concentración
C_p	Calor específico
A_a	Área de apertura del concentrador en el colector solar
A_r	Área del receptor del colector solar
ρ	Reflectividad (pérdida óptica)
τ	Transmisividad (pérdida óptica)
α	Absortividad (pérdida óptica)
γ	Factor de interceptación (pérdida óptica)
S_1	Radiación solar absorbida por el tubo absorbente por unidad de superficie
I	Radiación solar incidente

η_{opt}	Rendimiento óptico pico
Q_L	Pérdidas térmicas totales
D	Diámetro del tubo
L	Longitud del tubo absorbente
T_{abs}	Temperatura media del tubo absorbente
T_a	Temperatura ambiente
T_b	Temperatura del agua
T_s	Temperatura de sobrecalentado
T_{ent}	Temperatura de entrada
T_{sal}	Temperatura de salida
Re	Número de Reynolds
$\bar{N}u$	Número de Nusselt
q	Calor útil
P	Presión
S	Entropía
\dot{m}	Flujo de másico

Glosario de términos

Silicio	Elemento químico de núm. atóm. 14, tiene propiedades semiconductoras, tiene gran aplicación en la industria electrónica para la fabricación de transistores y células solares. (Símb. Si).
Entropía	La entropía es una medida del desorden de un sistema. Un sistema termodinámico puede tener entropía cuando se encuentra en un estado especificado por ciertas variables macroscópicas; volumen, energía, presión y temperatura.
Isentrópico	Un proceso isentrópico es un proceso termodinámico, en el cual la entropía del fluido o gas permanece constante.
Isobaras	El proceso isobárico es el proceso de compresión mediante el cual el volumen y la temperatura de un gas varían mientras que la presión se mantiene constante.
Parábola	Curva abierta formada por dos líneas o ramas simétricas respecto de un eje y en que todos sus puntos están a la misma distancia del foco y de la directriz
Intrínseco	Que es inherente a la naturaleza de una cosa.

1.1. Marco Teórico

1.1.1. Energía y Fuentes de energía

La **energía** es la capacidad que poseen los cuerpos para poder efectuar un trabajo a causa de su constitución (energía interna), de su posición (energía potencial) o de su movimiento (energía cinética). Es una magnitud homogénea con el trabajo, por lo que se mide en las mismas unidades, es decir en *julios* en el Sistema Internacional. Según la forma o el sistema físico en que se manifiesta, se consideran diferentes formas de energía: térmica, mecánica, eléctrica, química, electromagnética, nuclear, solar, etc. (1)

Una **fente de energía** es cualquier material o fenómeno que a partir del cual se pueda obtener energía. Se pueden clasificar las fuentes de energía en renovables o no renovables.

- *Fuentes de energía no renovables*

Cuando se refiere a fuentes de energía no renovables se trata de los combustibles fósiles como; el carbón, el petróleo, el gas natural y las reacciones químicas entre determinados materiales (baterías).

- *Fuentes de energías renovables*

Son aquellas energías que provienen de recursos naturales que no se agotan y a los que se puede recurrir de manera permanente. Su impacto ambiental es nulo en la emisión de gases de efecto invernadero como el CO_2 . Se consideran energías renovables, la energía solar, energía eólica, energía geotérmica, energía hidráulica, energía mareomotriz y la biomasa.

1.1.2. Energía Solar

La energía solar es una energía renovable a escala humana, es decir es una energía basada en la utilización de recursos naturales capaces de renovarse. Se obtiene a partir de la radiación electromagnética del sol popularmente descrita como rayos del sol, ésta radiación se puede utilizar para climatizar edificios ó realizar una serie de trasformaciones de energía para obtener energía eléctrica.

En la actualidad existen básicamente tres formas para utilizar la energía solar. En la Figura 1.1, se muestra el mapa conceptual de los tipos de energía solar .

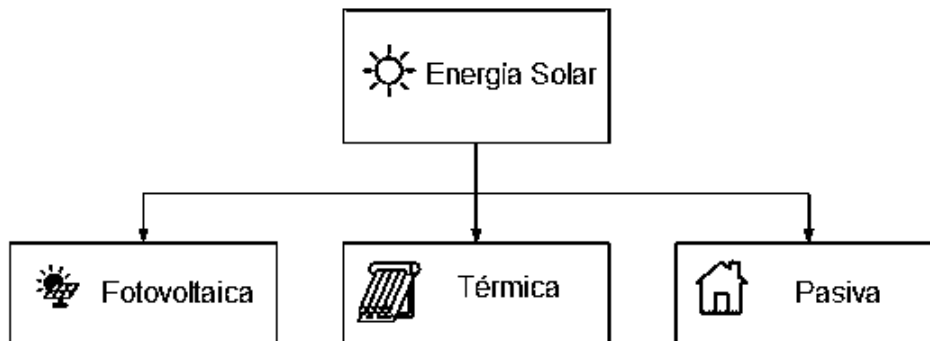


Figura 1.1. Tipos de energía solar.

1.1.2.1. Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es aquella que se obtiene al convertir la luz solar en electricidad, utilizan para ello unas placas solares formadas por células fotovoltaicas (*de silicio o de germanio*) las cuales se basan en el efecto fotoeléctrico. El efecto fotoeléctrico consiste en absorber fotones (partículas lumínicas) y emisión de electrones, generando una corriente eléctrica.

La electricidad generada por parte de los sistemas de energías solar fotovoltaica tienen la capacidad de abastecer a través de un regulador solar sistemas de 12V/24V/48V de corriente continua con baterías o bien de 220V/380V de corriente alterna a través de un inversor, los cuales se dividen en dos tipos de sistemas, sin conexión a la red (off-grid) y conectados a la red (on-grid) como se muestra en la Figura 1.2.

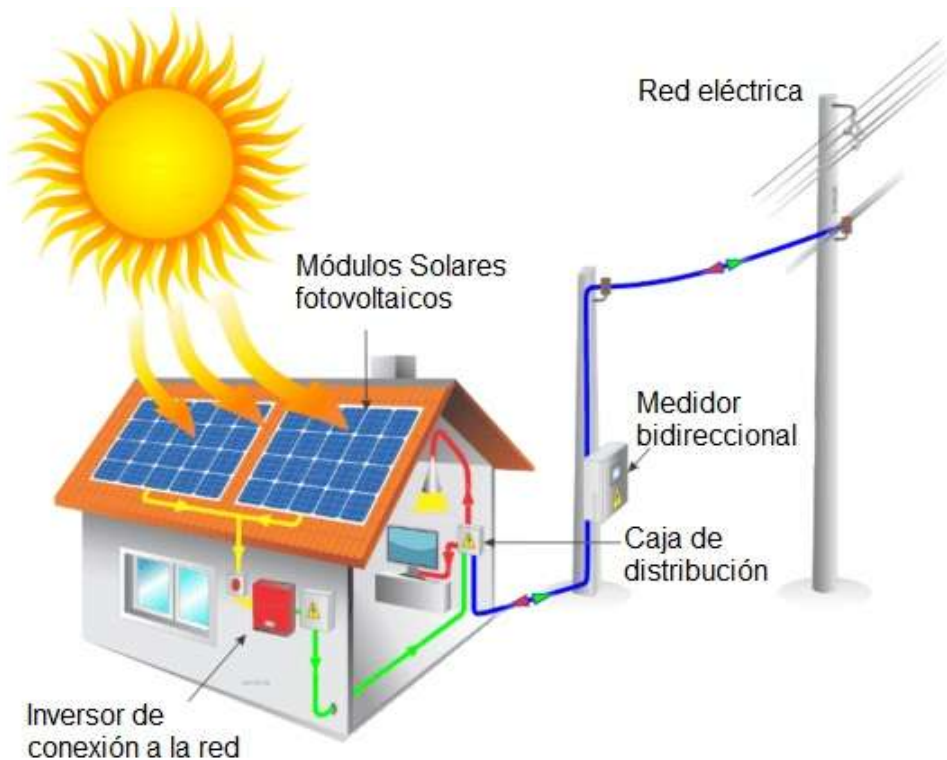


Figura 1.2. Sistema de conexión a red en on-grid. (2)

1. INTRODUCCIÓN

1.1.2.2. Energía Solar Térmica

La energía solar térmica también se puede denominar termosolar, se obtiene cuando la radiación solar calienta un fluido a través de dispositivos llamados colectores para obtener el fluido a temperatura mayor que la inicial ó convertir el fluido a vapor.

La energía solar térmica se puede clasificar según su escala de temperatura en:

- **Alta temperatura**

Planta termosolar o central térmica solar, trabajan con temperaturas por encima de los 500 °C .

- **Media temperatura**

Utilizan dispositivos que concentran la radiación solar, trabajan con temperaturas entre los 100 y 300 °C.

- **Baja temperatura**

Instalaciones en viviendas, formada por colectores o captadores solares instalados en el tejado o en una parte soleada del edificio, éstos trabajan con temperaturas menores de 65°C. En la Figura 1.3, se muestra un termotanque solar ó calentador de agua de uso doméstico.

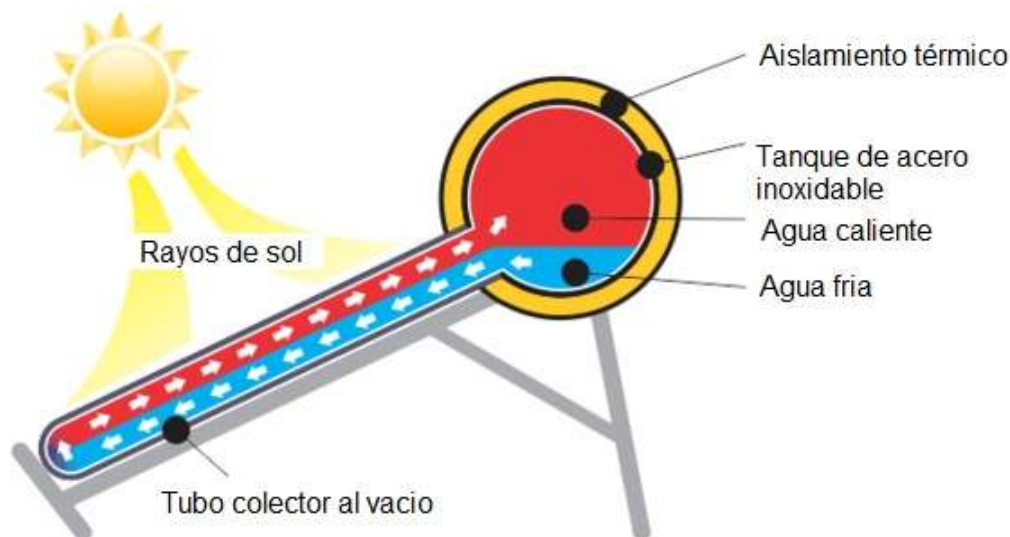


Figura 1.3. Funcionamiento de termotanque solar. (3)

1.1.2.3. Energía Solar Pasiva

Esta energía se obtiene principalmente con la arquitectura bioclimática: el diseño de edificios donde, con el uso de diferentes materiales y orientaciones, se consigue la adaptación de los edificios a la climatología de la zona.

En la Figura 1.4, se muestra un ejemplo de energía solar pasiva donde se capta la radiación solar de forma diferente según la estación del año. (Las flechas representan el ángulo de inclinación de los rayos del sol según la estación del año.)

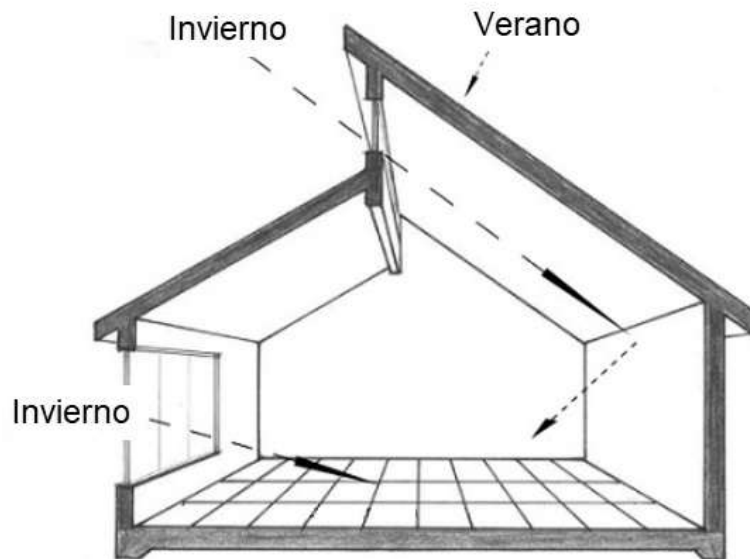


Figura 1.4. Sistema de calefacción solar pasivo.

1.1.3. Programa Sectorial de Energía 2020-2024

Este programa plantea alcanzar la autosuficiencia energética en México para el año 2024.

El 9 de julio de 2020, se publicó en el DOF el Programa Sectorial de Energía 2020-2024. Dicho documento es el instrumento rector de la planeación de la política energética nacional para ese horizonte de tiempo, siendo la SENER responsable de conducirla. El Programa contempla seis objetivos prioritarios que la política energética debe alcanzar para el año 2024, los cuales tienen asociadas metas que indican el cumplimiento de dichos objetivos en 2024.⁽⁴⁾

Los objetivos del Plan Sectorial de Energía son:

1. Alcanzar y mantener la autosuficiencia energética.
2. Fortalecer a las Empresas Productivas del Estado EPE.
3. Organizar las capacidades científicas, tecnológicas e industriales para la transición energética.
4. Elevar el nivel de eficiencia y sustentabilidad en la producción y uso de las energías.
5. Asegurar el acceso universal a las energías.
6. Fortalecer al sector energético nacional para que constituya la base que impulse el desarrollo del país.

Cada uno de estos objetivos tiene asociadas tres metas que indican el grado de cumplimiento de los mismos, por lo que el Programa contiene 18 metas a cumplir en 2024.

Dentro del objetivo 6 que es “*Fortalecer al sector energético nacional para que constituya la base que impulse el desarrollo del país*”, sub-objetivo 4 “*Elevar el nivel de eficiencia y sustentabilidad en la producción y uso de las energías en el territorio nacional*” se tiene que; el sector eléctrico debe aumentar el uso de las energías limpias para aprovechar de manera sustentable todos los recursos energéticos de la Nación, que le permitan contar con fuentes alternativas para la generación de energía eléctrica.

Para lograr la transición energética, se promueve la generación de energía renovable aislada o interconectada. La incorporación de las energías renovables en la matriz energética nacional se realiza de manera ordenada, promoviendo el aprovechamiento óptimo de los recursos renovables disponibles según las características de cada región del país, asegurando así que se cumplan los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del sistema eléctrico y mejoramiento del balance de la matriz energética. (5)

En la Figura 1.5, se muestran ejemplos de fuentes de energía renovables.



Figura 1.5. Fuentes de energía renovables.

En septiembre del 2020 fue otorgada la suspensión indefinida en contra del Programa Sectorial de Energía (Prosener) 2020-2024. (6)

1.2. Justificación

Este documento se enfoca en el modelado de colectores solares en Termoeléctricas como una variante para obtener energía eléctrica, ya que debido al crecimiento de población y al crecimiento económico, se requiere una abundante generación de energía.

Las energías fósiles como el carbón, el gas natural y el petróleo ya no son una alternativa viable dado que son energías no renovables, además estas producen gases que fomentan el efecto invernadero y dañan la capa de ozono.

Por lo tanto, este modelado ofrece una posibilidad a mediano o largo plazo para obtener energía renovable termosolar aprovechando parte de la instalación de una central Termoeléctrica.

1.3. Objetivos

El objetivo general es realizar el análisis de una central termoeléctrica con la contribución de colectores parabólicos solares, para determinar su viabilidad tomando como parámetros: la eficiencia y la potencia total generada.

El objetivo específico es ofrecer una alternativa al sector energético Mexicano para cuando se reactive el Programa Sectorial de Energía 2020-2024.

1.4. Metodología

El **diseño** de la tesis es tipo “*investigación aplicada*”, puesto que en este tipo de diseño se enfoca en adquirir conocimientos científicos o técnicos nuevos, que están orientados a un objetivo práctico determinado, como lo es este modelado.

El **enfoque** es “*cuantitativo*”, ya que dicho enfoque se centra en un problema de estudio delimitado y concreto, este pretende predecir y regular un resultado. Los resultados tienen validez y confiabilidad puesto que se utiliza la lógica y razonamiento deductivo para su obtención.

1.5. Estructura de la Tesis

Este trabajo está dividido en 4 capítulos. El capítulo 1, contiene una introducción sobre la energía solar, su clasificación y sus usos. Así como la perspectiva energética de los próximos años en México. También dentro de este capítulo está la justificación, los objetivos y la metodología del presente trabajo.

El capítulo 2, engloba los antecedentes de las centrales eléctricas, y los colectores solares, así como sus ecuaciones de balance energético. Dentro de los antecedentes de las centrales termoeléctricas se puntualiza en los ciclos Rankine, de recalentamiento y regenerativo.

El capítulo 3, se tiene tanto el diseño de los colectores solares como el diseño del modelado de una central termoeléctrica con colectores solares.

En el capítulo 4, se plasman los resultados obtenidos y las conclusiones a las que se llegaron.

Antecedentes de las Centrales Eléctricas

2.1. Antecedentes de las Centrales Eléctricas

La industria de la energía eléctrica nace con el descubrimiento de la primera lámpara incandescente por *Thomas A. Edison* en 1879. La primera central eléctrica moderna apareció en el año de 1882. Iniciando así la era moderna de la electricidad. En la Figura 2.1, se muestra la primera central eléctrica puesta en funcionamiento.(7)

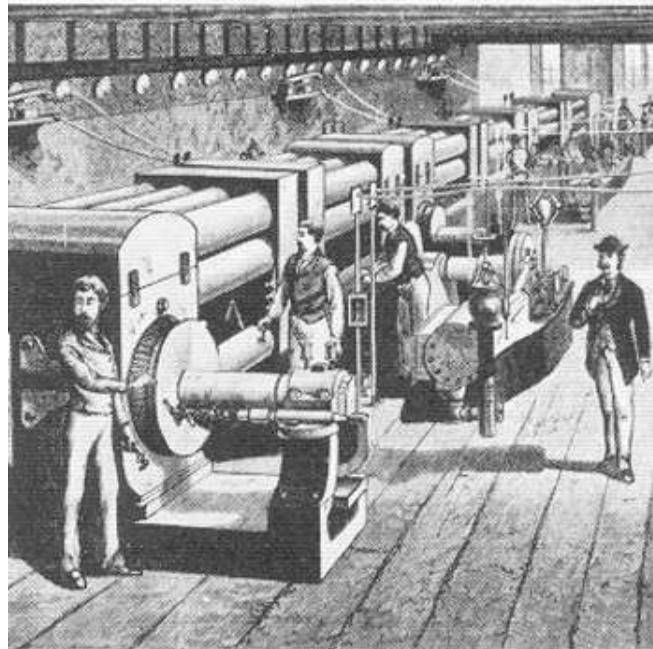


Figura 2.1. Primera Central Eléctrica.

2. ANTECEDENTES DE LAS CENTRALES ELÉCTRICAS

Aunque la estación sólo atendía inicialmente a 59 consumidores sobre una superficie de una milla cuadrada, constituyó la primera aplicación a gran escala de la electricidad al servicio público y señaló el nacimiento de la moderna industria de fuerza y alumbrado eléctrico. La primera central hidroeléctrica basada en el sistema de Edison, entro en funcionamiento en Appleton, Wisconsin el (30 de septiembre de 1882).(7)

Durante los primeros años todas las centrales generaron corriente continua la cual tenía la desventaja de pérdidas relativamente grandes de potencia al ser transmitida a larga distancia. Para el año de 1886 comenzó a funcionar la primera central norteamericana que utilizaba corriente alterna (ca) en Great Barrington (Massachusetts).

El empleo de ca permitió aumentar la potencia de la electricidad para su transmisión a grandes distancias y posteriormente a la tensión deseada en subestaciones o transformadores. Con lo que las pérdidas por envío se redujeron al mínimo. De no ser por este procedimiento la transmisión y distribución de energía eléctrica jamás hubiera presentado el enorme incremento que adquirió posteriormente. Para la última década del siglo XIX la corriente continua representaba el 90 % de la capacidad generadora de las centrales eléctricas, en 1902 había descendido al 39 % y en 1907 al 18 %. Para el año 1956 apenas y era el 1 % de la capacidad generadora.

El motor de inducción descubierto en 1888 por *Nikola Tesla* permitió transformar de modo conveniente y eficaz la corriente alterna en potencia mecánica y abrió el camino al empleo de la electricidad como fuente de energía para las máquinas industriales. La electricidad que hasta 1900 se limitó a suministrar potencia para el alumbrado, comenzaba ya a impulsar motores, producir energía térmica y realizar múltiples funciones en los procesos industriales.(7)

2.1.1. Tipos de Centrales Eléctricas

- *Central Hidroeléctrica*

Esta aprovecha las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos para transformarlas en energía eléctrica renovable.(8) Esto se realiza mediante turbinas hidráulicas acopladas a generadores eléctricos.

- *Parque Eólico*

Es una central eléctrica donde la producción de la energía se consigue a partir de la fuerza del viento, mediante aerogeneradores que aprovechan las corrientes de aire.(9) Un aerogenerador eléctrico convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica.

- *Central Nuclear*

Es una instalación industrial en la que se genera electricidad a partir de la energía nuclear que se libera en forma de energía térmica mediante una reacción nuclear de fisión en cadena en la vasija de un reactor nuclear.(10)

- *Central Geotérmica*

Esta aprovecha el calor de las profundidades de la Tierra para producir electricidad renovable. A través de las fracturas en los estratos rocosos, el agua caliente y los vapores suben a la superficie, donde son interceptados por los pozos geotérmicos de extracción. (11)

- *Central Mareomotriz*

Se transforma el movimiento de la marea a energía eléctrica. Eso se logra mediante diques con turbinas en su parte inferior, los cuales se llenan y se vacían con cada movimiento de la marea, activando las turbinas que generan la electricidad.

- *Central Termoeléctrica*

Produce energía eléctrica utilizando como fuente de energía el calor. La central termoeléctrica clásica utiliza calor que proviene de la quema de los combustibles fósiles como el carbón, el gas natural y derivados del petróleo.

- *Central de Biomasa*

Es una central termoeléctrica dedicada a la producción de energía eléctrica a partir de la combustión de materiales vegetales como son maderas y papel. Pero también pueden usarse para generar electricidad otra materia orgánica como son residuos de origen humano o cultivos orientados a ese fin. (12)

2.1.2. Central Termoeléctrica

Una central termoeléctrica es una instalación en donde se produce energía eléctrica. Para producir energía eléctrica se realizan distintas transformaciones de energía dentro de la central, iniciando de energía química a energía calorífica mediante la transformación del combustible (petróleo, gas, carbón, etc.) a flama y gases calientes.

Funcionamiento del equipo principal de una termoeléctrica

a) Generador de vapor (caldera)

La caldera genera calor mediante la quema de combustible. Está recubierta por tuberías de circulación de agua a su alrededor, este es el sistema de generación de vapor.

El agua que recorre este sistema se calienta debido a la transferencia de calor procedente de la quema de combustible, y se evapora rápidamente. El vapor generado está sobrecalentado y es liberado a alta presión.

b) Turbina

La salida del proceso anterior, es decir, el vapor de agua generado debido a la quema de combustible, acciona un sistema de turbinas que transforma la energía cinética del vapor en movimiento rotatorio.

c) Condensador

Con la finalidad de garantizar la eficiencia del proceso, el vapor de agua que acciona las turbinas es enfriado y distribuido dependiendo de si puede ser reutilizado o no.

El condensador enfría el vapor mediante un circuito de agua fría, que bien puede provenir de un cuerpo de agua cercano, o reutilizarse de algunas de las fases intrínsecas del proceso de generación termoeléctrica.

d) Generador eléctrico

La turbina se encuentra conectada a un generador eléctrico, mediante un eje en común. A través del principio de inducción electromagnética, el movimiento del eje hace que el rotor del generador se movilice.

Este movimiento, a su vez, induce una tensión eléctrica en el estator del generador, con lo cual se transforma la energía mecánica proveniente de las turbinas, en energía eléctrica.

e) Bomba

La bomba se encargada de impulsar el agua del condensador hacia el generador de vapor.

En la Figura 2.2, se muestra el esquema de una central termoeléctrica donde se indican cada uno de los componentes, del equipo principal anteriormente mencionado.

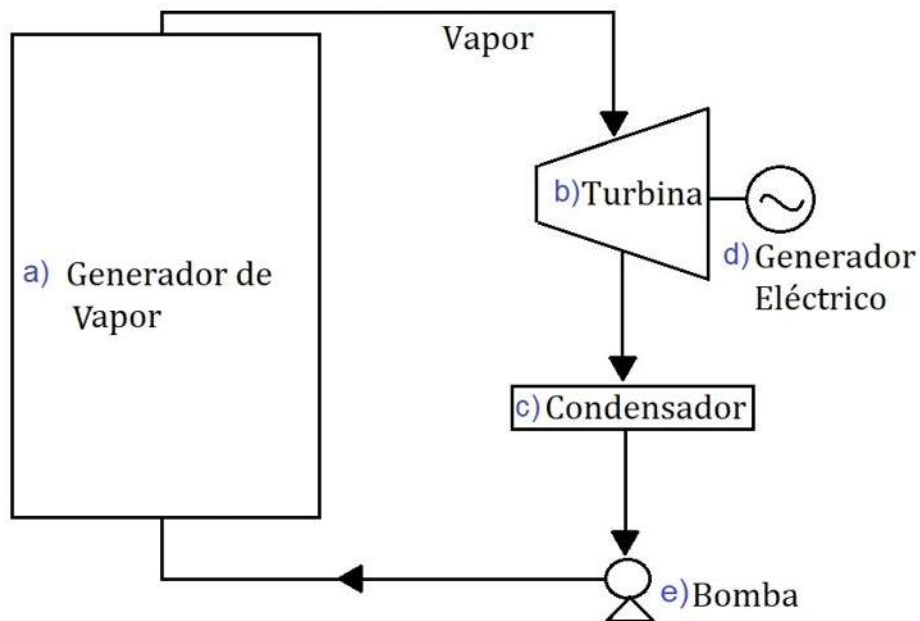


Figura 2.2. Esquema de una Central Termoeléctrica.

2. ANTECEDENTES DE LAS CENTRALES ELÉCTRICAS

2.1.2.1. Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado

La central termoeléctrica de ciclo combinado es aquella en la que se genera energía eléctrica mediante la utilización de dos turbinas en donde se tienen dos ciclos termodinámicos; Brayton y Rankine.

En la Figura 2.3, se muestra el esquema de funcionamiento de una central de ciclo combinado.

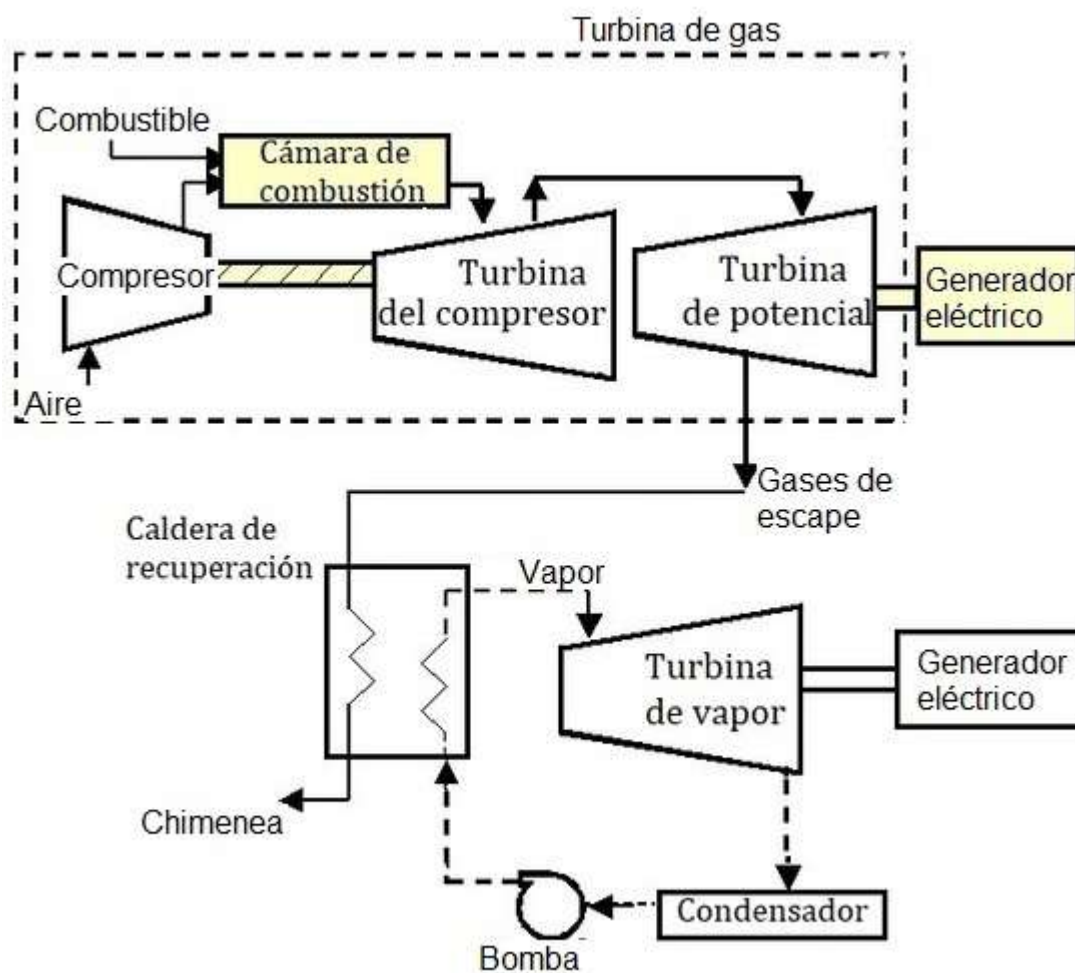


Figura 2.3. Esquema de una Central de Ciclo Combinado.

2.1.2.2. Ciclo Brayton

Este modela el comportamiento de una turbina de gas, al tomar el aire directamente de la atmósfera y se somete a un calentamiento y compresión para aprovecharlo como energía mecánica o eléctrica.

Funcionan de la siguiente manera en ciclo abierto:

- 1) El aire es comprimido a alta presión en el compresor.
- 2) El aire pasa a la cámara de combustión donde se mezcla con el combustible.
- 3) Después los gases de combustión pasan por la turbina de gas donde se expansionan y su energía calorífica se transforma en energía mecánica, transmitiendo al eje.
- 4) Los gases salen de la turbina de gas se llevan a una caldera de recuperación de calor para producir vapor, a partir de este momento tenemos un ciclo de agua-vapor convencional.

A la salida de la turbina el vapor se condensa (transformándose nuevamente en agua) y vuelve a la caldera para empezar un nuevo ciclo de producción de vapor. En la Figura 2.4, se muestra el esquema del funcionamiento del Ciclo Brayton.

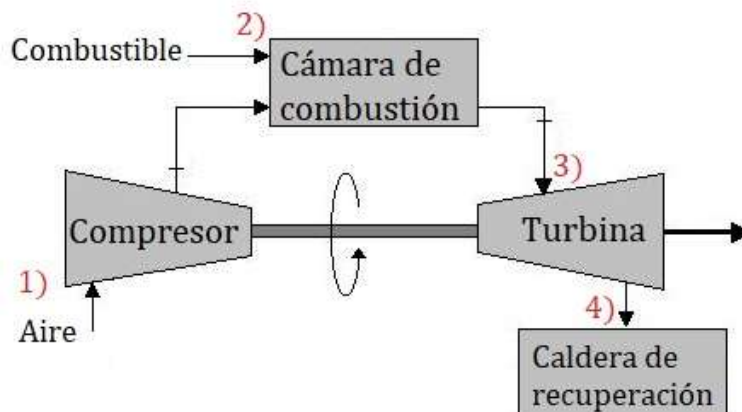


Figura 2.4. Ciclo Brayton.(13)

2.1.2.3. Ciclo Rankine

El ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico compuesto por dos transformaciones isoentrópicas y dos isóbaras. Su propósito es transformar el calor en trabajo. Este ciclo es generalmente adoptado en centrales termoeléctricas para la producción de energía eléctrica.

El funcionamiento se muestra en la Figura 2.6, se calienta el agua en una caldera hasta evaporarla y elevar la presión del vapor, obteniendo el vapor saturado a una presión P_1 , éste es suministrado a una turbina donde produce energía cinética a costa de perder presión, en otras palabras se expande isoentrópicamente hasta la presión P_2 .

En el condensador se transforma el vapor húmedo isobárica a isotérmicamente, en líquido saturado mediante la remoción de calor, es decir de vapor pasa a estado líquido. 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 isoentrópicamente hasta alcanzar la presión P_4 en palabras más simples la bomba subirá la presión para nuevamente poder introducir el líquido a la caldera.

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

En la Figura 2.5, se muestran los diagramas de P - V y T - S del Ciclo Rankine.

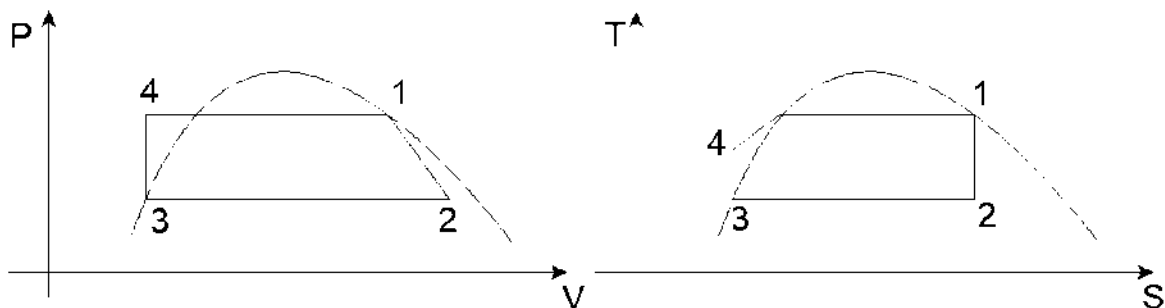


Figura 2.5. Diagramas P - V y T - S del Ciclo Rankine.

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

$$e = \frac{\text{Trabajo neto}}{\text{Trabajo o energía entregada al sistema}}$$

Donde el trabajo neto es:

$$W_N = W_t - W_b$$

Por lo tanto

$$e = \frac{W_t - W_b}{\text{Trabajo o energía entregada al sistema}} \quad (2.1)$$

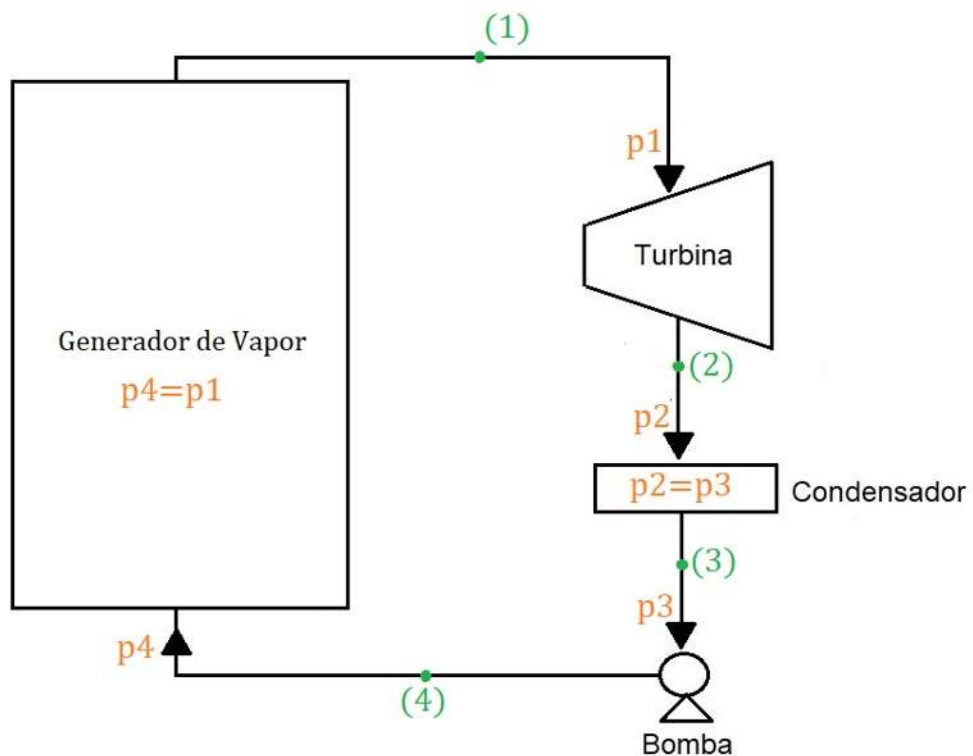


Figura 2.6. La planta de generación de vapor ideal.

2.1.2.4. Ciclo de Recalentamiento

El Ciclo de Recalentamiento (CRC) es cuando el vapor después de haber pasado por parte de la turbina, se extrae para llevarse al generador de vapor y eliminar la humedad recalentándose a presión constante, como se muestra en la Figura 2.7.

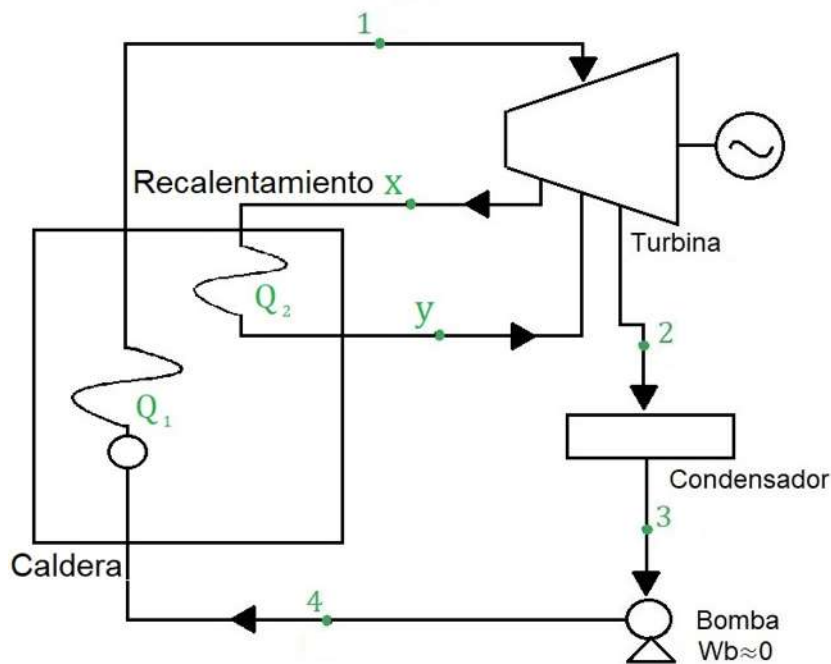


Figura 2.7. Ciclo de recalentamiento.(14)

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

$$e = \frac{(h_1 - h_x) + (h_y - h_2)}{Q_1 + Q_2} \quad (2.2)$$

Donde:

- Q_1 Calor que absorbe el agua en la caldera.
- Q_2 Calor que absorbe el vapor en el recalentador.

Sí, el calor que absorbe el agua en la caldera es:

$$Q_1 = h_1 - h_4 \quad (2.3)$$

Mientras el calor que absorbe el vapor en el recalentador es,

$$Q_2 = h_y - h_x \quad (2.4)$$

Entonces la eficiencia en la etapa de recalentamiento se tiene al sustituir la Ec. 2.3 y la Ec. 2.4 en la Ec.2.2,

$$e = \frac{(h_1 - h_x) + (h_y - h_2)}{(h_1 - h_4) + (h_y - h_x)} \quad (2.5)$$

Para obtener la eficiencia global se toman en cuenta las pérdidas en el generador. Es importante recalcar que en la eficiencia del ciclo Rankine hay que tomar en cuenta las pérdidas en el generador, por lo tanto se puede definir la eficiencia global como,

$$e_g = \frac{W_{ELEC}}{XW_V} \quad (2.6)$$

Donde:

- W_{ELEC} Potencia eléctrica generada.
- W_V Potencia calorífica entregada al ciclo en el generador de vapor.

Si se toma en cuenta la energía que consume la planta para su operación, se define la eficiencia neta así,

$$N = \frac{W_{ELEC} - W_{SER}}{W_V} \quad (2.7)$$

Sí

- W_{SER} Potencia para servicios propios (bombas, alumbrado etc.) ésta puede llegar a ser hasta un 5 % de la potencia eléctrica generada.

2.1.2.5. Ciclo Regenerativo

El Ciclo Regenerativo (CRG) tiene como idea básica 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.(14)

En la Figura 2.8, se muestra el esquema del funcionamiento del Ciclo Regenerativo.

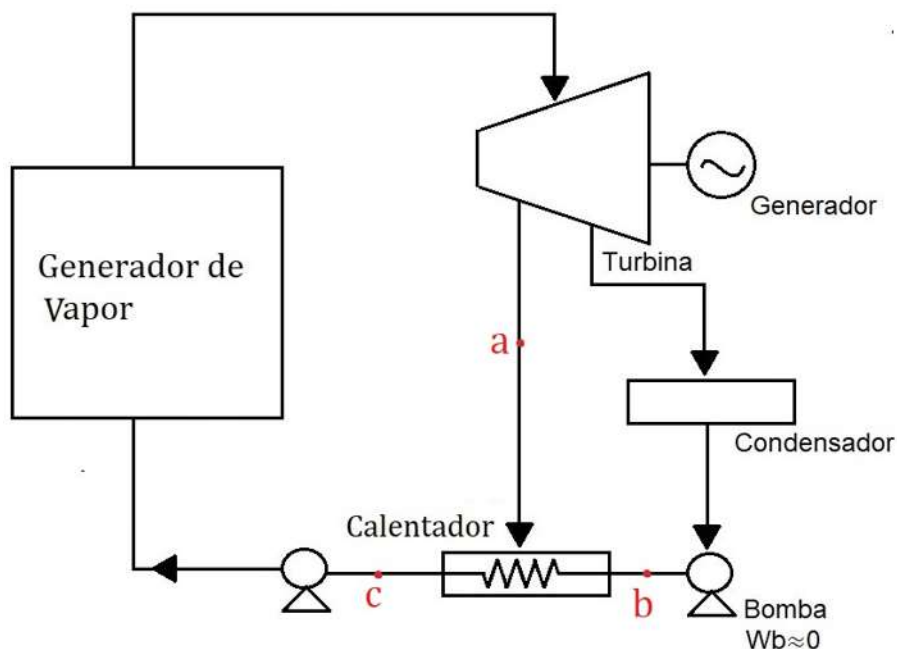


Figura 2.8. Ciclo Regenerativo con calentador de contacto directo.

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 del condensador deben ser las mismas, por lo que es necesario otra bomba para introducir el agua a la caldera.(14)

Para este caso el flujo de masa de vapor en la extracción se determina mediante un balance de masa de vapor en extracción se determina mediante un balance de masa y energía considerando las diferencias de energía cinética y potencial se

tiene:

$$\begin{aligned} m_b h_b + m_a h_a &= m_c h_c \\ m_b + m_a &= m_c \end{aligned} \quad (2.8)$$

Si

$$m_c = m_1 \quad (2.9)$$

$$m_b = m_c - m_a \quad (2.10)$$

Sustituyendo la Ec. 2.9 y la Ec. 2.10 en la Ec. 2.8 se tiene:

$$\begin{aligned} (m_c - m_a)h_b + m_a h_a &= m_1 h_c \\ m_1 h_b - m_a h_b + m_a h_a &= m_1 h_c \\ m_a (h_a - h_b) &= m_1 (h_c - h_b) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Se puede escribir la Ec. 2.11 así:

$$\frac{m_a}{m_1} = \frac{h_c - h_b}{h_a - h_b} \quad (2.12)$$

Si:

$$h_b = h_3 = h_{f2} \quad (2.13)$$

$$h_c = h_{fa} \quad (2.14)$$

Entonces, se sustituye la Ec. 2.13 y la Ec. 2.14 en la Ec. 2.11 se tiene:

$$\frac{m_a}{m_b} = \frac{h_{fa} - h_{f2}}{h_a - h_{f2}} \quad (2.15)$$

Por lo tanto la eficiencia del ciclo es:

$$\begin{aligned} e &= \frac{m_1 (h_1 - h_a) + (m_1 - m_a) (h_a - h_2)}{m_1 (h_1 - h_4)} \\ e &= \frac{(h_1 - h_a) + (1 - \frac{m_a}{m_1}) (h_a - h_2)}{h_1 - h_4} \end{aligned} \quad (2.16)$$

2.2. Antecedentes de los Colectores Solares

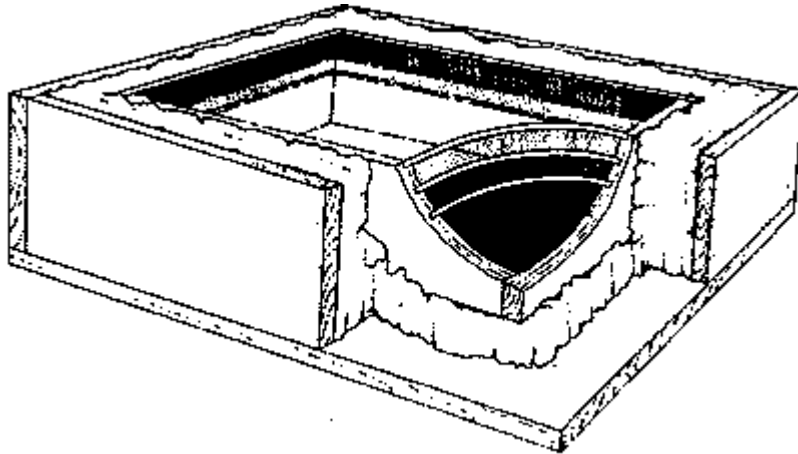


Figura 2.9. Caja caliente de Saussure. (15)

El primer colector solar fue fabricado por el suizo Nicholas de Saussure (1740-1799), y estaba compuesto por una cubierta de vidrio y una placa metálica negra encerrada en una caja con su correspondiente aislamiento térmico. Este colector solar se utilizó para cocinar alimentos que se introducían en su interior. (16) En la Figura 2.9, se muestra el esquema del primer colector solar.

Los colectores solares aprovechan la radiación del sol para producir energía solar térmica, la cual se puede transformar a energía mecánica y/o energía eléctrica.

De forma genérica, un colector solar está constituido en esencia por un absorbente que recoge la energía solar, una cubierta transparente y un tubo o tubos por los que circula el fluido termo-portador.(17)

Elementos Principales

- **Cubierta o tubo transparente:**
Provocar el efecto invernadero, reducir las pérdidas, asegurar la estanqueidad del colector al agua y al aire.
- **Absorbedor:**
Recibe la radiación solar y la convierte en calor que se transmite al fluido caloportador.
- **Aislamiento:**
Reducir las pérdidas térmicas en la parte trasera del absorbedor que debe ser de baja conductividad térmica. Los materiales pueden ser lana de vidrio, lana de roca, corcho, polietileno o poliuretano.
- **Carcasa:**
Protege y soporta los elementos del colector, permitiendo además anclar y sujetar el colector a la estructura de montaje. Debe resistir los cambios de temperatura y debe resistir la corrosión.

2.2.1. Clasificación de los Colectores Solares

Éstos se pueden clasificar según la geometría del absorbedor también llamado la razón de concentración.

La razón de concentración se define como el cociente del área de apertura del concentrador entre el área de absorción del receptor, denotado por la letra “C”:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (2.17)$$

Por lo tanto, los colectores solares se dividen en dos grandes grupos según la razón de concentración; colectores solares sin concentración y colectores solares con concentración.

En la Figura 2.10, se muestran los diferentes colectores en función de la razón de concentración, así como el rango de temperaturas a las que se puede llegar.

2. ANTECEDENTES DE LAS CENTRALES ELÉCTRICAS

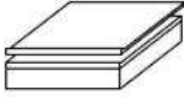


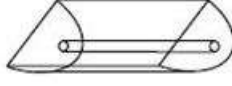
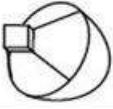

		Nombre	Croquis	Razón de concentración "C"	Rango Temperatura alcanzada [C°]	
Estacionario	Absorbedor plano	Capataador plano de agua/aire		$C \leq 1$	$30 < T^a < 250$	
		Tubos de vacio		$C \leq 1$	$50 < T^a < 200$	
Seguidores	Seguimiento a un eje	Absorbedores tubulares	Colector Parabólico Compuesto CPC		$1 < C < 15$	$70 < T^a < 300$
		Absorbedores tubulares	Colector Cilíndrico Parabólico CCP		$15 < C < 40$	$70 < T^a < 350$
	Seguimiento a dos ejes	Absorbedores puntuales	Disco Parabólico		$100 < C < 1000$	$70 < T^a < 1500$
			Torre Central		$100 < C < 1500$	$150 < T^a < 1500$

Figura 2.10. Clasificación de los colectores solares según la razón de concentración. (17)

2.2.1.1. Colectores Solares sin Concentración

Los colector solar sin concentración son placas expuestas directamente al Sol, sin ningún elemento auxiliar, donde $C \leq 1$. Los cuales no superan los $70^{\circ}C$ aproximadamente, por lo que son usados en las aplicaciones de la energía solar térmica de baja temperatura. Sus ventajas son su simplicidad, facilidad de construcción y menor mantenimiento.(18)

Este tipo de colectores se subdivide a su vez en tres grupos, de menor a mayor complejidad técnica:(19)

- Colectores no vidriados.
- Colectores de placa plana.
En la Figura 2.11, se muestra el esquema del colector de placa plana.
- Colectores avanzados.
(En este último conjunto, podemos distinguir otras tres tecnologías.)
 - Colectores con superficies selectivas en el absorbedor.
 - Colectores evacuados.
 - Colectores con tubos de vacío.

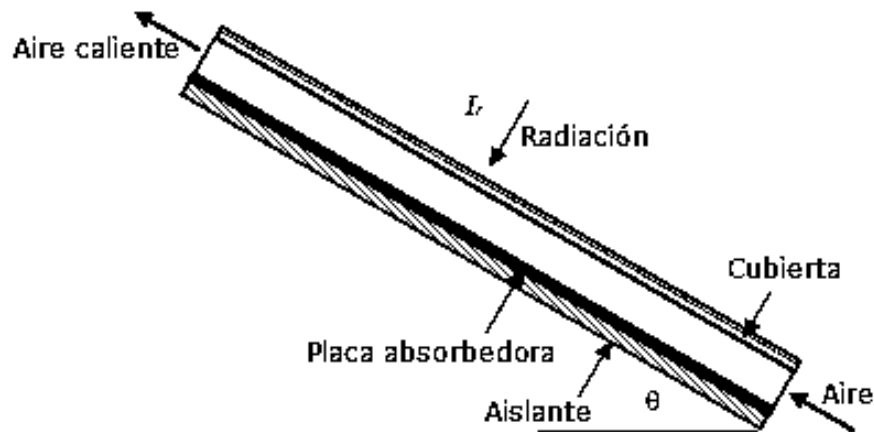


Figura 2.11. Esquema del colector solar de placa plana. (20)

2.2.1.2. Colectores Solares con Concentración

En los colectores solares con concentración ($C > 1$) se modifica el sistema de captación al incorporar espejos o lentes apoyados de materiales selectivos, para concentrar la radiación solar, y así poder alcanzar mayores temperaturas.

En la Figura 2.12, se muestra un ejemplo de colector solar con concentración.

Elementos Principales

- Reflector:
Reflejar y proyectar la radiación solar de forma concentrada sobre el tubo absorbedor.
- Tubo Absorbedor o Receptor:
Recibe la radiación solar y la convierte en calor que se transmite al fluido caloportador.
- Estructura Metálica y Cimientos:
Base metálica anclada al suelo que soporta y sujeta los elementos del colector.

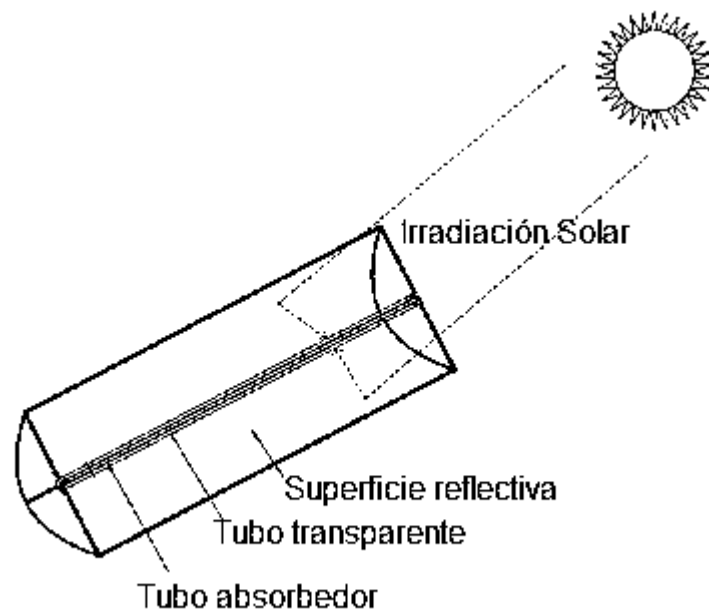


Figura 2.12. Esquema de colector solar parabólico.

2.2.2. Colectores solares cilíndrico parabólicos

Los colectores solares cilíndrico parabólicos o también llamados colectores parabólicos solares son captadores con concentración que tienen un esquema que aprovecha las propiedades de las parábolas: todo rayo que choque sobre la parábola será reflejado en dirección a un punto llamado *foco*.

Es decir, que si se crea alguna superficie reflectora en forma de parábola, y se coloca un tubo receptor en ubicación exacta del foco, entonces este tubo recibirá todos los rayos solares de la superficie reflectora, logrando así una alta concentración de rayos solares sobre una pequeña región. Este tipo de colectores llegan hasta los $400^{\circ}C$.(21)

Cuando aparezcan las iniciales CCP se refiere a los colectores cilindro parabólicos. En la Figura 2.13, se muestra un CCP.



Figura 2.13. Sistema de energía solar de Jucosol con colectores solares cilindro parabólicos en Chile. (22)

2.2.3. Elementos Principales

Los elementos principales de los CCP son los siguientes:

■ Reflector Cilíndrico Parabólico

El objetivo de este elemento es reflejar y concentrar sobre el *receptor* la radiación solar directa incidente sobre la superficie. (17)

Físicamente se podría decir que es un espejo curvo que forma en una de sus dimensiones una parábola, el cual concentra sobre su línea focal toda la radiación reflejada.

Los materiales comúnmente usados son:

- Plásticos recubiertos con películas de plata o aluminio.
- Chapas metálicas.
- Vidrios sobre los que se depositan una capa de plata junto con un protector de base de cobre y pintura epoxi.

La ventaja de los espejos de plata sobre los de aluminio es que la reflectividad de la plata es $>92\%$, está es sensiblemente mayor que la del aluminio que es $<87\%$, aunque el coste de fabricación es similar.(23)

■ Tubo de Absorción o Receptor

El objetivo de este elemento es recibir la radiación solar y la convierte en calor, el rendimiento global del colector depende en gran parte de la calidad termodinámica del absorbente.

En su estructura puede ser de dos tubos, uno interior y otro exterior;

- Tubo interior
Es metálico de elevada absorvidad $>90\%$ y de baja emisividad $<30\%$ en el espectro infrarrojo, lo que se traduce en un elevado rendimiento térmico.
- Tubo exterior
Es de cristal y tiene el objetivo de reducir las pérdidas térmicas por convección del tubo metálico, así como de protegerlo frente a las condiciones meteorológicas adversas.

Ambos tubos suelen llevar un tratamiento para aumentar la transmisividad de la radiación solar, lo que causa un aumento del rendimiento óptico del colector.(17)

- **Sistema de Seguimiento Solar**

El objetivo de este elemento es aprovechar la mayor parte de horas posibles de luz, de forma que la radiación solar llegue lo más perpendicularmente posible al colector, esto se realiza a través un mecanismo de seguimiento a dos ejes o a un único eje, que pueden ser eléctricos, hidráulicos ó mecánicos según el propósito de dicho sistema.

- **Estructura de soporte y cimiento**

El objetivo es dar rigidez al conjunto de elementos que lo componen, a la vez que hacer de interfase con la cimentación del propio colector.

Hasta el momento, las estructuras utilizadas por los CCP son todas metálicas al igual que los apoyos o pilares.(19)

En la Figura 2.14, se muestran los elementos principales de un CCP, los cuales fueron anteriormente mencionados.

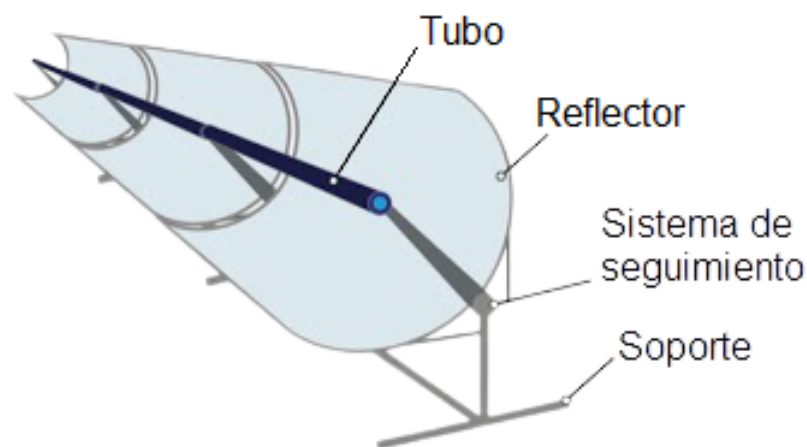


Figura 2.14. Elementos principales de un CCP.

2.2.4. Pérdidas de un CCP

El rango de temperatura ideal para trabajar con captadores cilindro parabólicos es $150^{\circ}C - 400^{\circ}C$. Para temperaturas superiores, las pérdidas térmicas de este tipo de captadores son altas y reducen su rendimiento (23).

Las pérdidas pueden ser debido a diferentes factores, éstos factores se agrupan en:

2.2.4.1. Pérdidas Geométricas

Las pérdidas geométricas sobre un CCP resultan esencialmente por la existencia de un ángulo de incidencia sobre el colector, se consideran:

- Efecto coseno
La potencia solar interceptada por el área de captación es proporcional al coseno del ángulo de incidencia.
- Pérdidas por final de colector
Causadas por el aumento del ángulo de incidencia, parte de los rayos del Sol reflejados por los espejos, éstos no son capaces de interceptar el tubo absorbedor.
- Pérdidas por bloqueos
Dichas pérdidas son provocadas por bloqueos y sombras de elementos estructurales proyectadas sobre la superficie de los espejos.
- Pérdidas por la modificación de algunas propiedades
Éstas aparecen cuando se modifican algunas propiedades ópticas del CCP, como: reflectividad de los espejos, transmisividad del tubo de vidrio y absorptividad del recubrimiento selectivo del tubo metálico.

2.2.4.2. Pérdidas Ópticas

Las pérdidas ópticas son causadas por las estructuras de componentes, ya que los materiales de los componentes no son ideales.

Las imperfecciones provocan que solo una parte de la radiación solar directa que incide sobre la abertura del concentrador parabólico llegue al fluido que circula por el interior del tubo absorbedor (23), por lo tanto se tienen:

- Reflectividad ρ

La superficie reflectante (espejo) no es un reflector perfecto, es decir, no todos los rayos del sol que incidan sobre la parábola serán reflejados.(19)

- Transmisividad τ

El vidrio que recubre al tubo absorbedor no es un material absolutamente transparente, esto es, que existirá una pequeña parte de la radiación reflejada en la parábola que no llegará al absorbedor ya que será tanto absorbida por el vidrio como reflejada.(19)

- Absortividad α

El material que recubre al tubo absorbedor no es un absorbente perfecto, luego de nuevo hay que considerar otra fracción de energía que no va a llegar al fluido. (19)

- Factor de interceptación γ

Otras causas de diferente índole, como imperfecciones macroscópicas y microscópicas, errores de posicionamiento o seguimiento del colector y por deformaciones en la estructura del colector, ya sea por su peso propio (poco influyentes) o por la acción del viento (muy influyentes), otra parte de la energía no alcanzará la superficie del tubo absorbedor.(19)

Las pérdidas ópticas son iguales a la división de la radiación solar absorbida por el tubo absorbente por unidad de superficie entre la radiación solar incidente(24):

$$\alpha = \frac{S_1}{I} \quad (2.18)$$

El **rendimiento óptico pico** del CCP (η_{opt}) que es el producto de los cuatro parámetros de las pérdidas ópticas,

$$\eta_{opt} = \rho \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot \tau \quad (2.19)$$

2.2.4.3. Pérdidas Térmicas

Las pérdidas térmicas se producen principalmente en: el tubo absorbedor y en la tubería de fluido térmico. En la Figura 2.15, se muestran las pérdidas térmicas que están formadas por:

- Pérdidas térmicas en la cubierta de vidrio por convección natural, h_1 .
- Pérdidas térmicas en la cubierta de vidrio por radiación térmica, h_{r21} .
- Pérdidas térmicas entre cubierta del tubo de vidrio y tubo metálico por conducción y convección, h_{r23} .

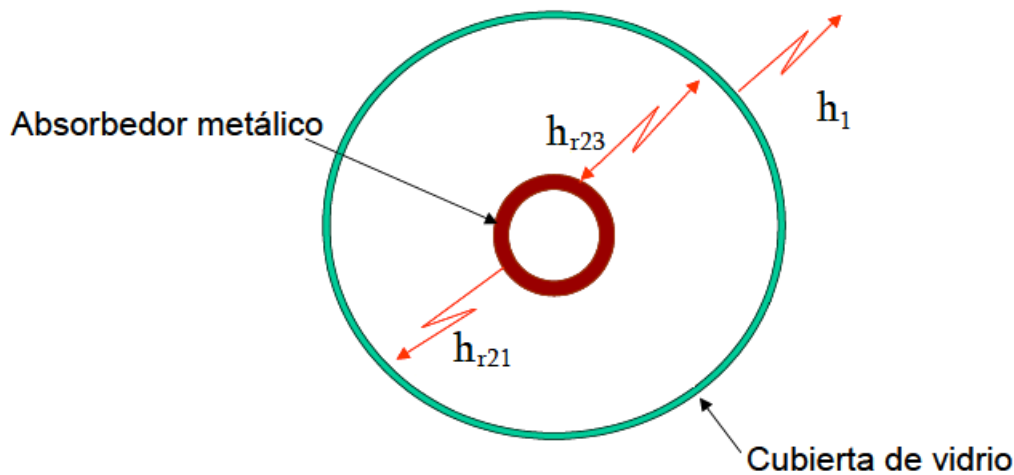


Figura 2.15. Pérdidas térmicas de un CCP.

Vienen dadas por:

$$Q_L = U_L \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot (T_{abs} - T_{amb}) \quad (2.20)$$

Donde:

- Q_L Pérdidas térmicas totales.
- D Diámetro exterior del tubo absorbente.
- L Longitud del tubo absorbente.
- T_a Temperatura ambiente.
- T_{abs} Temperatura media del tubo absorbente.

2.2.5. Balance Energético de un CCP

Considerando los antecedentes anteriormente mencionados, la razón de concentración Ec. 2.17, también se puede expresar como:

$$C = \frac{4 \cdot A}{L \cdot \pi \cdot D^2} \quad (2.21)$$

Teniendo presente los tres tipos de pérdidas descritas en la sección 2.2.4 se tiene que el rendimiento global del CCP es,

$$\eta_{global} = \frac{Q_{\acute{u}til}}{Q_{sol}} \quad (2.22)$$

Donde $Q_{\acute{u}til}$ es la energía térmica útil suministrada por el colector, en términos de incremento que experimenta el fluido de trabajo en el colector:

$$Q_{\acute{u}til} = Q_m \cdot (h_{sal} - h_{ent}) \quad (2.23)$$

Donde:

Q_m Caudal másico del fluido de trabajo.

h_{ent} Entalpía del fluido de trabajo a la entrada al colector.

h_{sal} Entalpía del fluido de trabajo a la salida del colector.

Q_{sol} es la energía solar incidente sobre un colector cilindro parabólico y viene dada por:

$$Q_{sol} = S_c \cdot I_o \cdot \cos \theta \quad (2.24)$$

Donde:

S_c Área de apertura de la superficie reflexiva del colector.

I_o Radiación solar directa.

θ Ángulo de incidencia.

Modelado de una Termoeléctrica con Colectores Solares

3.1. Modelado de un CCP

Condiciones del modelado del CCP

Para simplificar el modelado del colector, se hicieron las siguientes suposiciones. (24)

- El CCP tienen un rendimiento térmico de estado estable.
- La caída de temperatura a través de la cubierta del tubo vidrio y el tubo metálico es insignificante.
- Las pérdidas por polvo y suciedad del CCP se consideran insignificantes.
- El CCP está libre de fugas de aire.
- Las temperaturas de funcionamiento de los componentes del CCP y las temperaturas medias del aire son uniformes.

3. MODELADO DE UNA TERMOELÉCTRICA CON COLECTORES SOLARES

Propuesta del diseño de un CCP

Para la propuesta del diseño de un CCP se consideró una temperatura ambiente de $T_a = 30^\circ C$ y un diámetro del tubo $D = 5 \text{ cm}$.

También se consideraron las propiedades del agua a $40^\circ C$ (A.1), donde:

$$\begin{aligned}T_b &= 40^\circ C \\C_p &= 4178 \text{ J/kg}^\circ C \\ \rho &= 992.3 \text{ kg/m}^3 \\ k &= 0.633 \text{ W/m}^\circ C \\ \nu &= 0.658 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg} \\ \dot{m} &= 0.005 \text{ kg/s} \quad (25)\end{aligned} \tag{3.1}$$

Se pretende obtener a la salida del CCP vapor sobrecalentado, con las siguientes características:

$$T_s = 260^\circ C \tag{3.2}$$

Sí,

$$T_{ent} = T_b - T_a = 10^\circ C$$

$$T_{sal} = T_s - T_b = 220^\circ C$$

Los cálculos para obtener la longitud del tubo se basaron en el libro Energía Solar de *Manrique*. (26)

Aplicando la primera ley de la termodinámica a todo el tubo.

$$q = \pi DLh(T_s - T_b) = \dot{m}C_p(T_{sal} - T_{ent}) \tag{3.3}$$

Despejando la longitud L:

$$L = \frac{\dot{m}C_p(T_{sal} - T_{ent})}{\pi Dh(T_s - T_b)}$$

El número de Reynolds, (Agua líquida dentro del tubo)

$$\begin{aligned}Re &= \frac{4\dot{m}}{\pi D\rho\nu} \\ &= 194.55\end{aligned} \tag{3.4}$$

El número de Nusselt, (Agua líquida dentro del tubo)

$$\begin{aligned}\bar{N}u &= 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \\ &= 2.81\end{aligned}\tag{3.5}$$

El coeficiente de transferencia de calor (coeficiente de película) es,

$$\begin{aligned}\bar{h} &= \frac{\bar{N}uk}{D} \\ &= 35.23 \text{ W/m}^2\text{°C}\end{aligned}\tag{3.6}$$

Sustituyendo el valor de los elementos para obtener la longitud del tubo (L),

$$\begin{aligned}L &= \frac{(0.0058)(4178)(220 - T_{ent})}{\pi(0.03175)(2784.3)(260 - 40)} \\ &= 3.60 \text{ m}\end{aligned}\tag{3.7}$$

Por lo tanto, evaluando la Ec. 3.3 se obtiene que:

$$\begin{aligned}q &= \pi DLh(T_s - T_b) \\ q &= \pi(0.05)(3.6)(35.23)(260 - 40) \\ q &= 4386.90 \text{ W} \\ q &= 43.86 \text{ kW}\end{aligned}\tag{3.8}$$

Razón de Concentración del CCP

Para obtener C se sustituyen los valores en la Ec. 2.17:

$$\begin{aligned}C &= \frac{A_a}{A_r} \\ &= \frac{5.9450}{0.5660} \\ &= 10.50\end{aligned}\tag{3.9}$$

3. MODELADO DE UNA TERMOELÉCTRICA CON COLECTORES SOLARES

3.1.1. Tabla de características del CCP

Parámetro	Variable	Valor	Unidades
Temperatura ambiente	T_a	30	$^{\circ}C$
Temperatura del agua	T_b	40	$^{\circ}C$
Temperatura de sobrecalentado	T_s	260	$^{\circ}C$
Temperatura de entrada	T_{ent}	10	$^{\circ}C$
Temperatura de salida	T_{sal}	220	$^{\circ}C$
Diámetro del tubo	D	0.05	m
Longitud del tubo	L	3.60	m
Área recepción	A_r	0.566	m^2
Área de Apertura	A_a	5.945	m^2
Concentración	C	10.50	—
Número de Reynolds	Re	194.55	—
Número de Nusselt	$\bar{N}u$	2.81	—
Coefficiente de película	\bar{h}	35.23	$W/m^2^{\circ}C$
Calor útil	q	43.86	kW

3.2. Análisis de una Central Termoeléctrica con CCP

3.2.1. Propuesta de funcionamiento horario

En el bloque de generación de vapor se tiene, el CCP en paralelo a una caldera, donde estos se estarán conmutando a través de válvulas para que trabaje uno u otro según la propuesta de trabajo. Dichos horarios se eligieron en base a la captación de radiación solar por los CCP.

La propuesta de horario de trabajo en la central termoeléctrica es la siguiente:

- 7hrs a 18hrs

El calentamiento del CCP se tiene y las válvulas B y D estarán abiertas y las válvulas A y C estarán cerradas, Figura 3.1. Sólo estará en funcionamiento el sobrecalentador.

- 18hrs a 7hrs

El calentamiento será con el generador de vapor consumiendo combustible, las válvulas A y C estarán abiertas y las válvulas B y C cerradas.

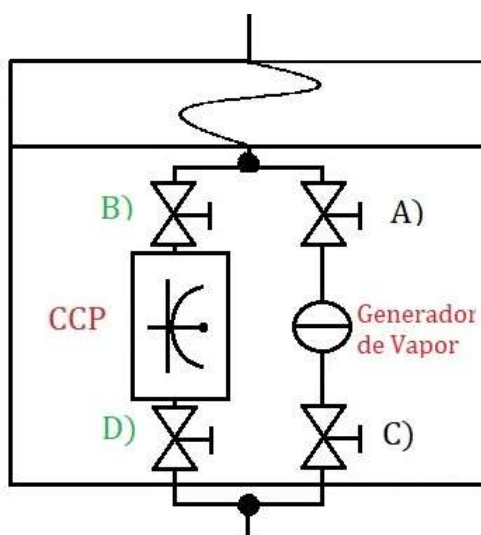


Figura 3.1. Válvulas abiertas en el horario de 7hrs a 18hrs.

3. MODELADO DE UNA TERMOELÉCTRICA CON COLECTORES SOLARES

Aparentemente, se tendría un gasto de combustible alto pero sólo de 18hrs a 23hrs (6:00pm a 11:00pm) estaría operando a plena capacidad, de 23hrs a 7hrs (11:00pm a 7:00am) estará operando a muy baja capacidad de acuerdo a la curva de demanda diaria.

3.2.2. Análisis Mediante el Ciclo Rankine

En el esquema de la Figura 3.2, se muestra el ciclo Rankine para una central termoeléctrica con CCP.

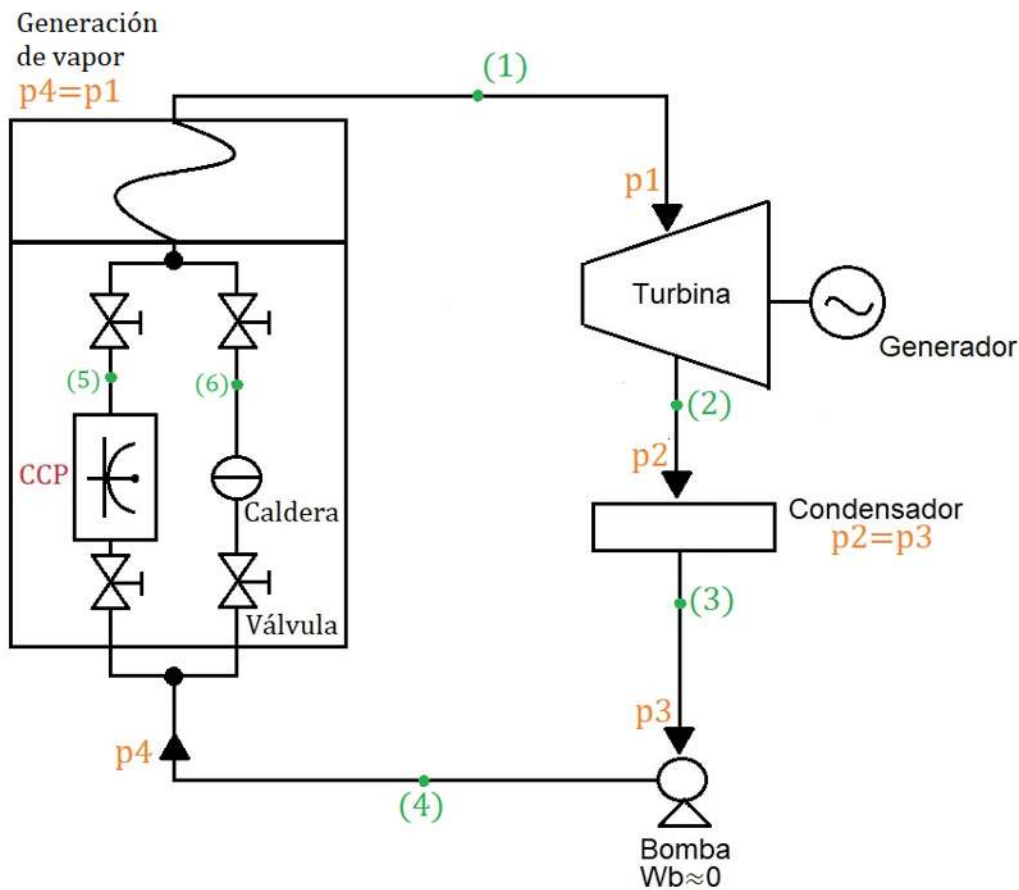


Figura 3.2. Esquema del funcionamiento una central termoeléctrica.

Como se había mencionado en el sección 2.1.2, una central termoeléctrica tiene como objetivo producir energía eléctrica.

La energía eléctrica se produce como resultado de una serie de transformaciones de energía, las cuales se realizan dentro de la central, a partir de la energía química almacenada en un combustible.(14)

Se consideró para el modelado una planta de generación de vapor ideal, la cual se puede analizar mediante el Ciclo Rankine, mencionado en la sección 2.1.2.3.

El CCP puede entregar temperatura hasta de $T = 260^{\circ}C$ (3.1), considerando las pérdidas de calor el CCP entrega vapor saturado seco a una temperatura aproximada a $250^{\circ}C$.

Por lo tanto, los valores a considerar para la central termoeléctrica para el punto S (vapor seco) son:

$$\begin{aligned}P_s &= 40bar \\T_s &= 250.4^{\circ}C \\h_s &= 2801.4 \text{ kJ/kg}\end{aligned}$$

El sobrecalentamiento se tendrá de $T_s = 250.40^{\circ}C$ hasta $T_1 = 400^{\circ}C$ recordando que es un proceso a presión constante $P_1 = P_s$.

Entonces el punto (1) del esquema de la Figura 3.2 es:

$$\begin{aligned}P_1 &= 40bar \\T_1 &= 400^{\circ}C\end{aligned}\tag{3.10}$$

Considerando las propiedades del agua (A.2), el vapor sobrecalentado a presión de P_1 se tiene en las tablas de vapor que la entalpía del vapor al salir de la caldera y entrar a la turbina es:

$$h_1 = 3213.6 \text{ kJ/kg}$$

La entropía correspondiente es:

$$S_1 = 6.7690 \text{ kJ/kgK}$$

En el punto (2), sí

$$P_2 = 0.1bar$$

Se tiene en la tabla de presiones las siguientes propiedades del agua saturada, líquido-vapor (A.4):

Entalpía

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

3. MODELADO DE UNA TERMOELÉCTRICA CON COLECTORES SOLARES

Entropía

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

$$S_{f2} = 0.6493 \text{ kJ/kgK}$$

$$S_{g2} = 8.1502 \text{ kJ/kgK}$$

$$\begin{aligned} S_{fg2} &= S_{g2} - S_{f2} \\ &= 8.1502 - 0.6493 \\ &= 7.5009 \text{ kJ/kgK} \end{aligned} \tag{3.11}$$

En una turbina de vapor el proceso es adiabático reversible, es decir, isoentrópico $S_1 = S_2$, en el punto (2) el vapor es húmedo

$$S_2 = S_{f2} + x_2 S_{fg2} = S_1 \tag{3.12}$$

Despejando x_2 de la Ec. 3.12

$$x_2 = \frac{S_1 - S_{f2}}{S_{fg2}} \tag{3.13}$$

Sustituyendo la Ec. 3.13 para obtener x_2

$$x_2 = \frac{6.7690 - 0.6493}{7.5009} = 0.8158$$

La entalpía en el punto (2) es:

$$h_2 = h_{f2} + x_2 h_{fg2} \tag{3.14}$$

Sustituyendo la Ec. 3.14 para obtener h_2

$$h_2 = 191.83 + (0.8158)(2392.8) = 2143.8762 \text{ kJ/kg}$$

En el punto (3)

Es líquido saturado a la presión 2, ya que $P_2 = P_3$ entonces:

$$h_3 = h_{f2} = 191.83 \text{ kJ/kg}$$

Despreciando el trabajo de la bomba $W_b \simeq 0$.

$$h_4 \simeq h_3$$

El calor del CCP es:

$$\begin{aligned} Q_{CCP} &= h_s - h_4 \\ &= 2801.4 - 191.83 = 2609.57 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (3.15)$$

El calor necesario en el sobrecalentador es:

$$\begin{aligned} Q_{SOB} &= h_1 - h_5 \\ &= 3213.6 - 2801.4 \\ &= 412.20 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (3.16)$$

El trabajo desarrollado por la turbina de vapor es:

$$\begin{aligned} W_t &= h_1 - h_2 \\ &= 3213.6 - 2143.8762 \\ &= 1069.7238 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Para el diseño presentado para el CCP en la sección 3.1 se tiene que:

$$\dot{m} = 0.005 \text{ kg/s} \quad (3.18)$$

La potencia generada, considerando una eficiencia del tubo generador de $\eta_{tg} = 0.85$ es:

$$\begin{aligned} P_G &= \eta_{tg} \dot{m} W_t \\ &= (0.85)(0.005)(1069.7238) \\ &= 4.5463 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Debido a la baja potencia de generación se propone el arreglo de 10 CCP en paralelo, como se muestra en la Figura 3.3.

Cada CCP es alimentado por un flujo de $\dot{m} = 0.005 \text{ kg/s}$ y el flujo total del sistema es:

$$\begin{aligned} \dot{m}_s &= 10 \cdot \dot{m} \\ &= (10)(0.005) \\ &= 0.05 \text{ kg/s} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Por lo tanto, la potencia total generada será

$$\begin{aligned} P_{GT} &= 10 \cdot P_G \\ &= (10)(4.5463) \\ &= 45.463 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.21)$$

3. MODELADO DE UNA TERMOELÉCTRICA CON COLECTORES SOLARES

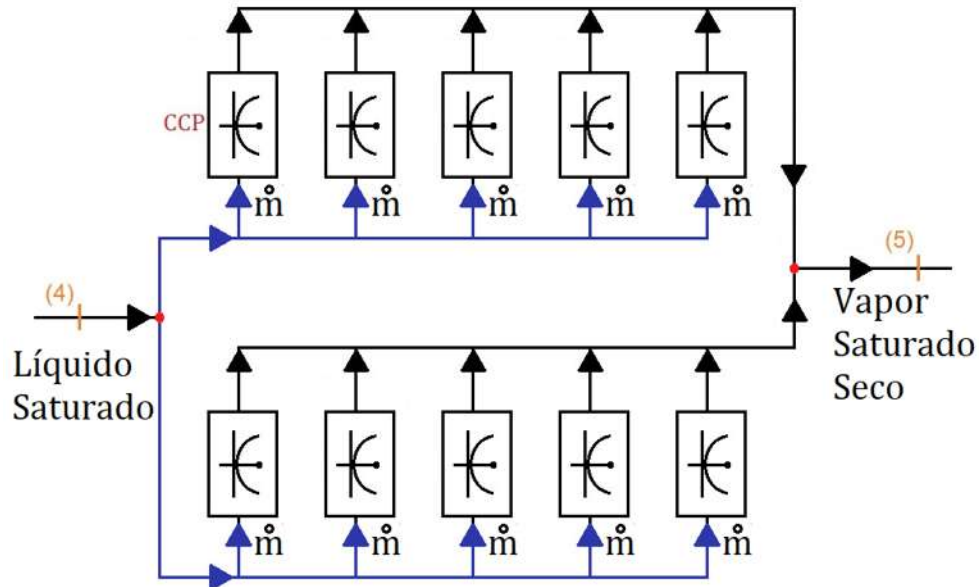


Figura 3.3. Esquema del arreglo con CCP para obtener mayor potencia.

Para el cálculo la **eficiencia** (e_1) se utiliza la Ec. 2.1, se tiene en cuenta que trabajo de la bomba es:

$$W_b \simeq 0$$

Por lo tanto, la eficiencia de la central termoeléctrica sin CCP es:

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{W_t}{Q_{CCP} + Q_{SOB}} 100 \% \\ &= \frac{1069.7238}{2609.57 + 412.20} 100 \% \\ &= 35.4006 \% \end{aligned} \quad (3.22)$$

La eficiencia de la central termoeléctrica con CCP es:

$$\begin{aligned} e_2 &= \frac{W_t}{Q_{SOB}} 100 \% \\ &= \frac{1069.7238}{412.20} 100 \% \\ &= 259.5157 \% \end{aligned} \quad (3.23)$$

3.2.3. Análisis Mediante el Ciclo Regenerativo a 15 bar

En el esquema de la Figura 3.4, se puede observar el ciclo regenerativo con calentador de contacto directo, como se vio en la sección 2.1.2.5 con este ciclo se extrae parte del vapor que ya ha sido usado en la turbina y se usa para calentar el agua de alimentación a la caldera o al CCP según el horario.

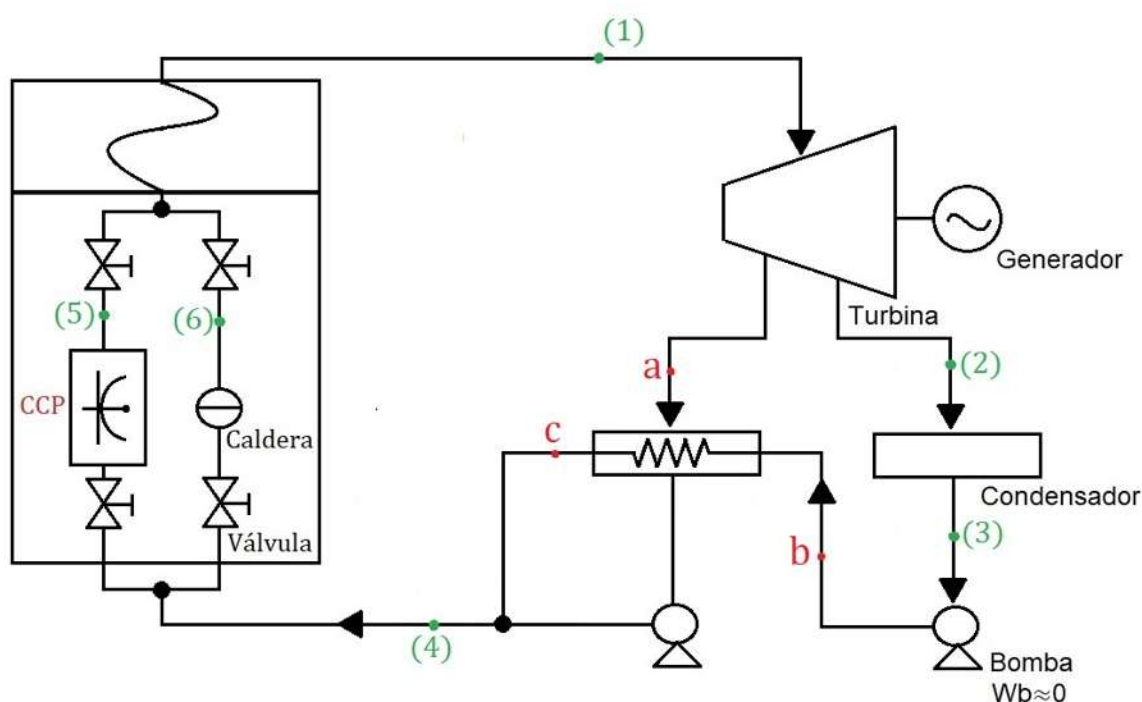


Figura 3.4. Esquema del funcionamiento de una central termoelectrica con CCP con ciclo regenerativo.

Sí

$$S_1 = S_a = 6.7690 \text{ kJ/kgK}$$

$$P_a = 15 \text{ bar}$$

Por lo tanto la entalpía (A.4) es:

$$h_{fa} = 844.84 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{fga} = 1947.3 \text{ kJ/kg}$$

Entropía

$$S_{fa} = 2.3150 \text{ kJ/kgK}$$

3. MODELADO DE UNA TERMOELÉCTRICA CON COLECTORES SOLARES

$$S_{ga} = 6.4448 \text{ kJ/kgK}$$

$$\begin{aligned} S_{fga} &= S_{ga} - S_{fa} \\ &= 6.4448 - 2.3150 \\ &= 4.1298 \text{ kJ/kgK} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Sí $S_1 = S_a$

$$S_a = S_{fa} + x_a S_{fga} = S_1 \quad (3.25)$$

Despejando y sustituyendo x_a de la Ec. 3.25

$$x_a = \frac{S_1 - S_{fa}}{S_{fga}} \quad (3.26)$$

$$x_a = \frac{6.7690 - 2.3150}{4.1298} = 1.0785$$

Sí se quiere elevar la temperatura a $T_2 = 280^\circ\text{C}$ se tienen los siguientes datos (A.3),

	T ($^\circ\text{C}$)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg)
	240	2899.3	6.6628
	280	2992.7	6.8381
Δ	40	93.4	0.1753
Arreglo	15.7672	36.8165	0.0691

Para conservar la entropía de $S_a = 6.7690 \text{ kJ/kgK}$, se realizaron los siguientes ajustes a los valores de: temperatura, entalpía y entropía.

$$\begin{aligned} T_a &= 280 - 15.7672 = 264.2328^\circ\text{C} \\ h_a &= 2992.7 - 36.816 = 2955.8835 \text{ kJ/kg} \\ S_a &= 6.8381 - 0.0691 = 6.769 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Considerando la Ec. 2.15 obtenida del balance de flujo de masas del ciclo regenerativo de la sección 2.1.2.5 se tiene,

$$\begin{aligned} \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1} &= \frac{h_{fa} - h_{f2}}{h_a - h_{f2}} \\ &= \frac{844.84 - 191.83}{2955.8835 - 191.83} \\ &= 0.2362 \end{aligned} \quad (3.28)$$

Teniendo presente los valores de entropía utilizados en el ciclo Rankine, el trabajo total desarrollado por la turbina de vapor es:

$$\begin{aligned}
 W_t &= \dot{m}_1(h_1 - h_a) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_a)(h_a - h_2) \\
 &= (h_1 - h_a) + \left(1 - \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1}\right)(h_a - h_2) \\
 &= (3213.6 - 2955.8835) + (1 - 0.2362)(2955.8835 - 2143.8762) \\
 &= 877.9276 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

Recordando que la eficiencia del tubo generador es $\eta_{tg} = 0.85$ y que la Ec. 3.19 de la potencia generada es:

$$\begin{aligned}
 P_G &= \eta_{tg} \dot{m} W_t \\
 &= (0.85)(0.005)(877.9276) \\
 &= 3.7311 \text{ kW}
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

Por lo tanto, la potencia total generada es:

$$\begin{aligned}
 P_{CT} &= 10 \cdot P_G \\
 &= (10)(3.7311) \\
 &= 37.31 \text{ kW}
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

El calor del CCP es:

$$\begin{aligned}
 Q_{CCP} &= h_s - h_{fa} \\
 &= 2801.4 - 844.84 \\
 &= 1956.56 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

La eficiencia de la central termoeléctrica sin CCP es:

$$\begin{aligned}
 e_1 &= \frac{W_t}{Q_{CCP_g} + Q_{SOB}} 100 \% \\
 &= \frac{877.9276}{1956.56 + 412.20} 100 \% \\
 &= 37.0627 \%
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

3.2.4. Análisis Mediante el Ciclo Regenerativo a 20 bar

Sí

$$P_7 = 20\text{bar}$$

Por lo tanto la entalpía (A.4) es:

$$h_{f7} = 908.79 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{fg7} = 1890.70 \text{ kJ/kg}$$

Entropía

$$S_{f7} = 2.4474 \text{ kJ/kgK}$$

$$S_{g7} = 6.3409 \text{ kJ/kgK}$$

$$\begin{aligned} S_{fg7} &= S_{g7} - S_{f7} \\ &= 6.3409 - 2.4474 \\ &= 3.8935 \text{ kJ/kgK} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Sí $S_1 = S_7$

$$S_7 = S_{f7} + x_7 S_{fg7} \quad (3.35)$$

Despejando y sustituyendo x_7 de la ecuación anterior:

$$\begin{aligned} x_7 &= \frac{S_1 - S_{f7}}{S_{fg7}} \\ &= \frac{6.7690 - 2.4474}{3.8935} \\ &= 1.1099 \end{aligned} \quad (3.36)$$

∴ Es vapor sobrecalentado.

Sí se quiere elevar la temperatura a $T = 320^\circ\text{C}$ se tienen los siguientes datos (A.3):

	T ($^\circ\text{C}$)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg)
	280	2976.4	6.6828
	320	3069.5	6.8452
Δ	40	93.1	0.1624
Arreglo	18.7684	43.6836	0.0762

Ya que se quiere conservar la entropía de $S_7 = 6.7690 \text{ kJ/kgK}$, los ajustes para los valores correspondientes a $T = 320^\circ\text{C}$ son:

$$\begin{aligned} T_7 &= 320 - 18.7684 = 301.2315^\circ\text{C} \\ h_7 &= 3069.5 - 43.6836 = 3025.8164 \text{ kJ/kg} \\ S_7 &= 6.8452 - 0.0762 = 6.7690 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (3.37)$$

Las condiciones de salida del proceso de recalentamiento son:

$$\begin{aligned} P_8 &= P_7 = 20 \text{ bar} \\ T_8 &= 400^\circ\text{C} \\ h_8 &= 3247.6 \text{ kJ/kgK} \\ S_8 &= 7.1271 \text{ kJ/kgK} \end{aligned}$$

Por lo tanto, en el punto 2

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{S_1 - S_{f2}}{S_{fg2}} \\ &= \frac{7.1271 - 0.6493}{7.5009} \\ &= 0.8636 \end{aligned} \quad (3.38)$$

La entalpía es:

$$\begin{aligned} h_2 &= h_{f2} + x_2 h_{fg2} \\ &= 191.82 + (0.8636)(2392.8) \\ &= 2258.2520 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (3.39)$$

El calor del CCP es:

$$\begin{aligned} Q_{CCP} &= h_s - h_{f2} \\ &= 2801.4 - 191.82 \\ &= 2609.57 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (3.40)$$

El trabajo total es:

$$\begin{aligned} W_t &= (h_1 - h_7) + (h_8 - h_2) \\ &= (3213.6 - 3025.8164) + (3230.9 - 2258.2520) \\ &= 1177.1315 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (3.41)$$

3. MODELADO DE UNA TERMOELÉCTRICA CON COLECTORES SOLARES

El calor inyectado al ciclo es:

$$\begin{aligned} Q_{REC} &= h_8 - h_7 \\ &= 3247.6 - 3025.8164 \\ &= 221.7836 \end{aligned} \quad (3.42)$$

Por lo tanto

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_{CCP} + Q_{SOB} + Q_{REC} \\ &= 2609.57 + 412.2 + 221.7836 \\ &= 3243.5536 \end{aligned} \quad (3.43)$$

La eficiencia es:

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{W_t}{Q_1} \\ &= \frac{1177.1315}{3243.5536} 100\% \\ &= 36.2914\% \end{aligned} \quad (3.44)$$

Recordando que la eficiencia del tubo generador es $\eta_{tg} = 0.85$ y que la Ec. 3.19 de la potencia generada es:

$$\begin{aligned} P_G &= \eta_{tg} \dot{m} W_t \\ &= (0.85)(0.005)(1177.1315) \\ &= 5.0028 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.45)$$

Por lo tanto, la potencia total generada es:

$$\begin{aligned} P_{GT} &= 10 \cdot P_G \\ &= (10)(5.0028) \\ &= 50.028 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.46)$$

3.2.5. Análisis Mediante el Ciclo de Recalentamiento

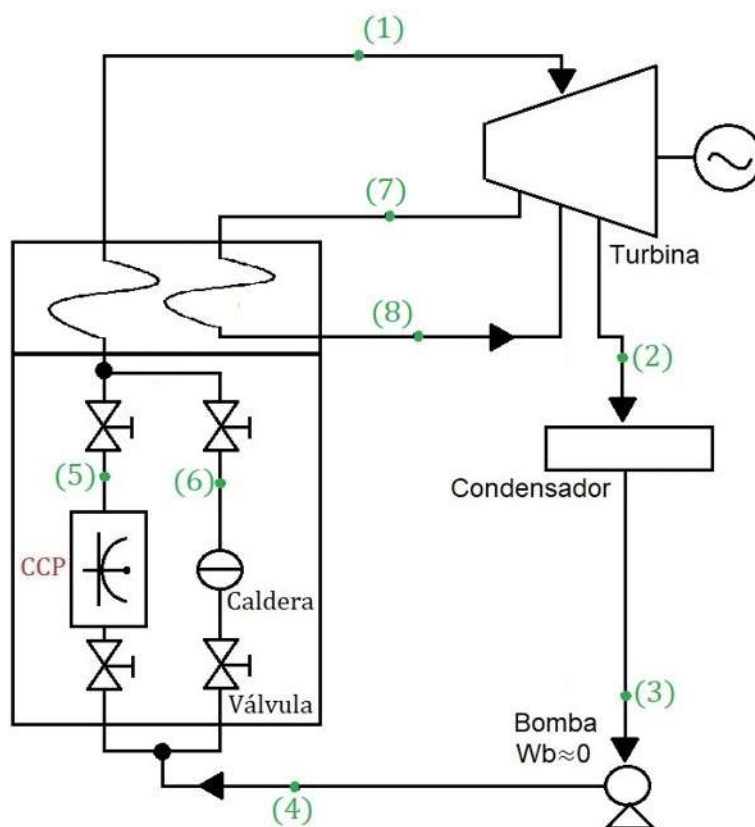


Figura 3.5. Esquema de una central termoeléctrica con CCP con Ciclo de Recalentamiento.

En la Figura 3.5, se muestra el esquema de una central termoeléctrica con CCP con ciclo de recalentamiento. Para este caso se tiene presente que:

$$P_1 = 40 \text{ bar}$$

$$T_1 = 400^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 3213.6 \text{ KJ/Kg}$$

$$S_1 = 6.7690 \text{ KJ/KgK}$$

El recalentamiento es a una presión $P_7 = 30 \text{ bar}$, por lo tanto la entalpía (A.4) es:

$$h_{f7} = 1008.4 \text{ kJ/kg}$$

3. MODELADO DE UNA TERMOELÉCTRICA CON COLECTORES SOLARES

Entropía $h_{fg7} = 1795.7 \text{ kJ/kg}$

$$S_{f7} = 2.6457 \text{ kJ/kgK}$$

$$S_{g7} = 6.1869 \text{ kJ/kgK}$$

$$\begin{aligned} S_{fg7} &= S_{g7} - S_{f7} \\ &= 6.1869 - 2.6457 \\ &= 3.5412 \text{ kJ/kgK} \end{aligned} \quad (3.47)$$

Sí

$$S_1 = S_7 = S_{f7} + x_7 S_{fg7} \quad (3.48)$$

Despejando y sustituyendo x_7 de la Ec. 3.48:

$$\begin{aligned} x_7 &= \frac{S_1 - S_{f7}}{S_{fg7}} \\ &= \frac{6.7690 - 2.6457}{3.5412} \\ &= 1.1643 \end{aligned} \quad (3.49)$$

∴ Es vapor sobrecalentado.

	T ($^{\circ}C$)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg)
	320	3043.4	6.6245
	360	3138.7	6.7801
Δ	40	95.3	0.1556
Arreglo	2.8534	6.7983	0.0111

Los ajustes a T_7 , h_7 y S_7 son:

$$\begin{aligned} T_7 &= 360 - 2.8534 = 357.1466^{\circ}C \\ h_7 &= 3138.7 - 6.7983 = 3131.9017 \text{ kJ/kg} \\ S_7 &= 6.7801 - 0.0111 = 6.7690 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (3.50)$$

Las condiciones de salida del proceso de recalentamiento son:

$$P_8 = P_7 = 30 \text{ bar}$$

$$T_8 = 400^{\circ}C$$

$$h_8 = 3230.9 \text{ KJ/Kg}$$

$$S_8 = 6.9212 \text{ KJ/KgK}$$

En el punto (2) se tiene x_2 es:

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{S_8 - S_{fa}}{S_{fga}} \\ &= \frac{6.9212 - 0.6493}{7.5009} = 0.8361 \end{aligned} \quad (3.51)$$

La entalpía es:

$$\begin{aligned} h_2 &= h_{f2} + x_2 h_{fg2} \\ &= 191.83 + (0.8361)(2392.8) \\ &= 2192.45 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (3.52)$$

Sí $h_3 = h_{f2}$ y $h_4 \simeq h_3$ el calor del CCP es:

$$\begin{aligned} Q_{CCP} &= h_s - h_4 \\ &= 2801.4 - 191.83 = 2609.57 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (3.53)$$

Despreciando el trabajo de la bomba $W_b \simeq 0$, el trabajo desarrollado por la turbina de vapor es:

$$\begin{aligned} W_t &= (h_1 - h_7) + (h_8 - h_2) \\ &= (3213.6 - 3131.9017) + (3230.9 - 2192.45) \\ &= 1120.1483 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (3.54)$$

Sí $\eta_{tg} = 0.85$ la potencia generada es:

$$\begin{aligned} P_G &= \eta_{tg} \dot{m} W_t \\ &= (0.85)(0.005)(1120.1483) \\ &= 4.7606 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.55)$$

Por lo tanto, la potencia total generada es:

$$\begin{aligned} P_{GT} &= 10 \cdot P_G \\ &= (10)(4.7606) \\ &= 47.606 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.56)$$

3. MODELADO DE UNA TERMOELÉCTRICA CON COLECTORES SOLARES

El calor inyectado al ciclo es:

$$\begin{aligned} Q_{REC} &= h_8 - h_7 \\ &= 3230.9 - 3131.9017 \\ &= 98.9983 \end{aligned} \quad (3.57)$$

Por lo tanto

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_{CCP} + Q_{SOB} + Q_{REC} \\ &= 2609.57 + 412.2 + 98.9983 \\ &= 3120.7683 \end{aligned} \quad (3.58)$$

La eficiencia es:

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{W_t}{Q_1} \\ &= \frac{1120.1483}{3120.7683} 100\% \\ &= 35.8933\% \end{aligned} \quad (3.59)$$

3.2.6. Análisis Mediante el Ciclo Regenerativo con Recalentamiento

En la Figura 3.6, se muestra el esquema de una central termoeléctrica con CCP analizada mediante el ciclo regenerativo con recalentamiento. Para éste caso se tiene que:

bar	°C	kJ/kg	kJ/kgC
$P_1 = 40$	$T_1 = 400.00$	$h_1 = 3213.60$	$S_1 = 6.7690$
$P_7 = 20$	$T_7 = 301.23$	$h_7 = 3025.81$	$S_7 = 6.7690$
$P_8 = 20$	$T_8 = 400.00$	$h_8 = 3247.60$	$S_8 = 7.1271$

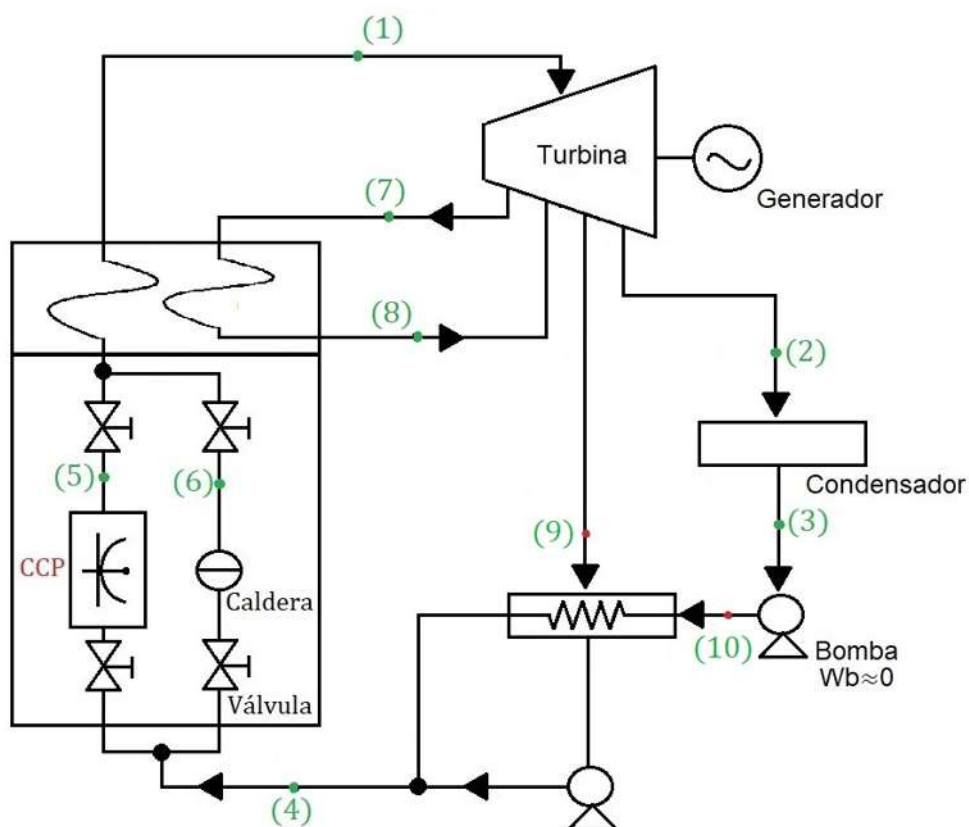


Figura 3.6. Esquema de una central termoeléctrica con CCP con ciclo regenerativo con recalentamiento.

3. MODELADO DE UNA TERMOELÉCTRICA CON COLECTORES SOLARES

Si

$$P_a = 15\text{bar}$$

Se tiene que:

$$S_8 = S_a = S_{fa} + x_a S_{fga} \quad (3.60)$$

Por lo tanto al despejar y sustituir x_a de la ecuación anterior se tiene:

$$\begin{aligned} x_a &= \frac{S_8 - S_{fa}}{S_{fga}} \\ &= \frac{7.1271 - 2.3150}{4.1298} \\ &= 1.1652 \end{aligned} \quad (3.61)$$

∴ Es vapor sobrecalentado.

Se tienen los siguientes datos para $T = 360^\circ\text{C}$:

	T ($^\circ\text{C}$)	h (kJ/kg)	S (kJ/kg)
	320	3081.9	6.9938
	360	3169.2	7.1363
Δ	40	87.3	0.1424
Arreglo	2.5824	5.6362	0.0092

De modo que:

$$\begin{aligned} T_9 &= 360 - 2.5824 = 357.4157^\circ\text{C} \\ h_9 &= 3169.25 - 5.63626 = 3163.5638 \text{ kJ/kg} \\ S_9 &= 7.1363 - 0.0092 = 7.1271 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (3.62)$$

Por lo tanto x_2 es:

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{S_8 - S_{f2}}{S_{fg2}} \\ &= \frac{7.1271 - 0.6493}{7.5009} \\ &= 0.8636 \end{aligned} \quad (3.63)$$

La entalpía es:

$$\begin{aligned} h_2 &= h_{f2} + x_2 h_{fg2} \\ &= 191.82 + (0.8636)(2392.8) \\ &= 2258.2520 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (3.64)$$

De modo que el balance de flujo másico es:

$$\begin{aligned}\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1} &= \frac{h_{fa} - h_{f2}}{h_a - h_{f2}} \\ &= \frac{844.84 - 191.83}{3163.5638 - 191.83} \\ &= 0.2197\end{aligned}\quad (3.65)$$

Así que el trabajo total es:

$$\begin{aligned}W_t &= (h_1 - h_7) + (h_8 - h_a) + \left(1 - \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_1}\right)(h_a - h_2) \\ &= (3213.6 - 3025.81) + (3247.60 - 3163.5638) + \\ &\quad (1 - 0.2197)(3163.5638 - 2258.2520) \\ &= 978.2409 \text{ kJ/kg}\end{aligned}\quad (3.66)$$

El calor inyectado al ciclo es:

$$\begin{aligned}Q_{REC} &= h_8 - h_7 \\ &= 3247.6 - 3025.8164 \\ &= 221.7836\end{aligned}\quad (3.67)$$

$$\begin{aligned}Q_{CCP} &= h_5 - h_4 \\ &= 2801.4 - 844.84 \\ &= 1956.56\end{aligned}\quad (3.68)$$

$$\begin{aligned}Q_{SOB} &= h_1 - h_5 \\ &= 3213.6 - 2801.4 \\ &= 411.6\end{aligned}\quad (3.69)$$

Por lo tanto

$$\begin{aligned}Q_1 &= Q_{CCP} + Q_{SOB} + Q_{REC} \\ &= 1956.56 + 411.6 + 221.7836 \\ &= 2589.95\end{aligned}\quad (3.70)$$

3. MODELADO DE UNA TERMOELÉCTRICA CON COLECTORES SOLARES

La eficiencia es:

$$\begin{aligned} e &= \frac{W_t}{Q_1} 100 \% \\ &= \frac{978.2409}{2589.95} 100 \% \\ &= 37.77 \% \end{aligned} \tag{3.71}$$

Al sustituir la Ec. 3.19 se tiene que la potencia generada es:

$$\begin{aligned} P_G &= \eta_{tg} \dot{m} W_t \\ &= (0.85)(0.005)(978.24095) \\ &= 4.1575 \text{ kW} \end{aligned} \tag{3.72}$$

Por lo tanto, la potencia total generada es:

$$\begin{aligned} P_{GT} &= 10 \cdot P_G \\ &= (10)(4.1575) \\ &= 41.575 \text{ kW} \end{aligned} \tag{3.73}$$

Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

Una central termoeléctrica convencional utiliza la energía calorífica proveniente de la quema de los combustibles fósiles como fuente de energía para producir energía eléctrica.

Como lo indica la sección 3.2.1 para empezar a introducir las energías limpias en termoeléctricas convencionales la propuesta es, colocar un sistema de CCP en paralelo al generador de vapor de la central (caldera). La radiación solar es baja durante las 23hrs a 7hrs, por lo tanto en estas horas se conmutará a través de válvulas a la caldera y de 7hrs a 18hrs a los CCPs de modo que se tiene una central termoeléctrica híbrida.

Se realizó un modelado teórico de un colector solar cilíndrico parabólico donde se obtuvo que el calor útil de CCP es $q = 43.86 \text{ kW}$.

Del análisis a una central termoeléctrica con los ciclos Rankine, Regenerativo y de Recalentamiento, se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 4.1.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tabla 4.1: Tabla de comparación entre los análisis a una CT con diferentes ciclos.

Parámetro	Rankine	CRG	CRG 2	CRC	CRGRC
P_1 (bar)	40	15	20	40	40
W_t (kJ/kg)	1069.72	877.93	1177.13	1120.15	978.24
e_1 (%)	35.40	37.06	36.29	35.89	37.77
P_{GT} (kW)	45.46	37.31	50.03	47.61	41.58

Teniendo en cuenta la tabla anterior y la mejor opción respecto eficiencia y potencia es el ciclo regenerativo con recalentamiento en donde tenemos una eficiencia de 37.77% y una potencia total generada de 41.58kW, dicha potencia entra dentro del rango de potencia de los CCPs.

A modo general se tienen las siguientes ventajas y desventajas del análisis.

Ventajas:

- Ofrece una alternativa viable para el uso de fuentes de energía renovables.
- Compara teóricamente de los ciclos según su potencia y eficiencia.

Desventajas:

- El análisis es térmico y teórico es decir no incorpora pruebas físicas ni costos de infraestructura.
- Los resultados varían según las particularidades de cada planta y colectores.

Dado que el objetivo general de éste trabajo era: *Realizar el análisis de una central termoeléctrica con la contribución de colectores parabólicos solares, para determinar su viabilidad tomando como parámetros: la eficiencia y la potencia total generada*, éste objetivo fue logrado al modelar, analizar y comparar los valores obtenidos con los ciclos con apoyo de la Tabla 4.1.

El objetivo específico, que era: *Ofrecer una alternativa al sector energético Mexicano para cuando se reactive el Programa Sectorial de Energía 2020-2024*, este objetivo fue logrado simbólicamente, ya que para ser una alternativa real es necesario mayor estudio, puesto que se deben tener en cuenta particularidades como: geográficas, de infraestructura y de equipo.

4.2. Recomendaciones

Para aumentar la potencia total generada de la central termoeléctrica se recomienda modificar el arreglo de la Figura 3.3 de 10 CCPs a 100 CCPs, Figura 4.1.

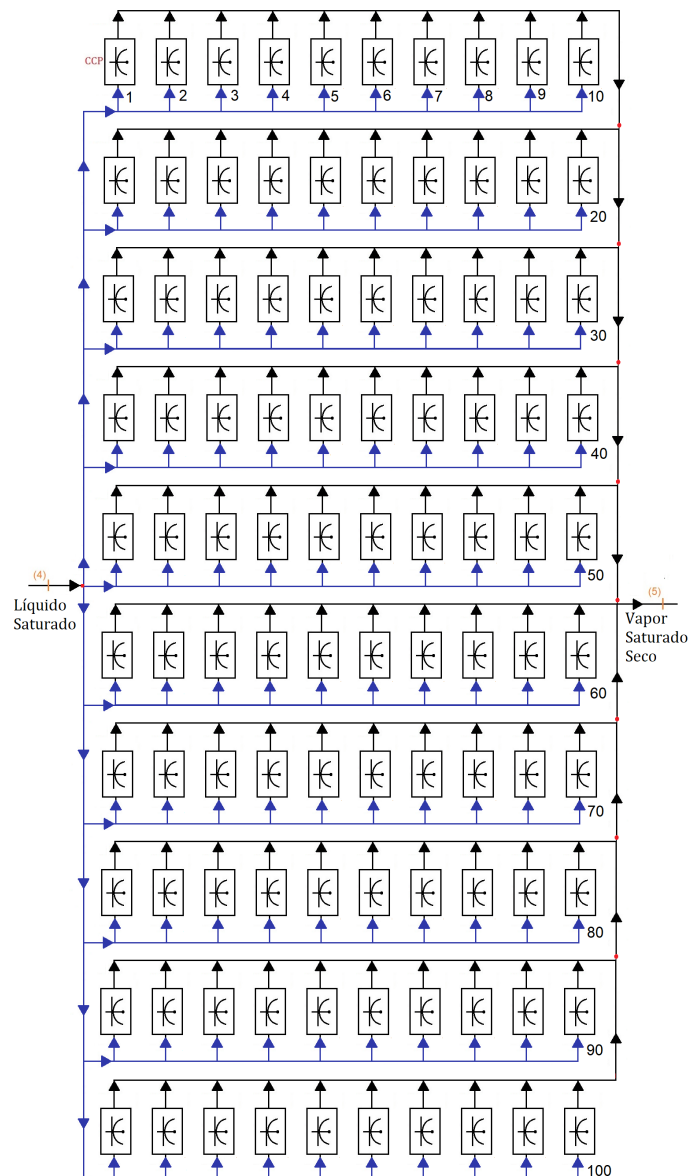


Figura 4.1. Esquema del arreglo con 100 CCP para obtener mayor potencia.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Por lo tanto la ecuación que representa dicha modificación es,

$$P_{GT} = (\eta_{tg} \dot{m} W_t) \cdot 100$$

En la Tabla 4.2, se puede observar la potencia total general para cada ciclo con el arreglo de 100 colectores parabólicos solares.

Tabla 4.2: Tabla de comparación potencia total generada con los diferentes ciclos.

Parámetro	Rankine	CRG	CRG 2	CRC	CRGRC
P_{GT} (kW)	454.6	373.1	500.3	476.1	415.8

Apéndice A

Tablas

AGUA

Temperatur °C	Densidad ρ (Kg/m ³)	Calor específico c_p J/Kg°C	Conductiv. térmica "k" W/m°C	Dif. térmica $\alpha \cdot 10^6$ (m ² /seg)	Visc. dinám. $\eta \cdot 10^6$ N.seg/m ²	Visc. cinem. $\nu \cdot 10^6$ (m ² /seg)	Nº de Prandt Pr
0	999,9	4226	0,558	0,131	1794	1,789	13,7
20	998,2	4182	0,597	0,143	1004	1,006	7,02
40	992,3	4178	0,633	0,151	653,0	0,658	4,34
60	983,2	4181	0,658	0,155	470,0	0,478	3,02
80	971,8	4194	0,673	0,165	353,7	0,364	2,22
100	958,4	4211	0,682	0,169	281,0	0,294	1,75
120	943,1	4245	0,685	0,171	233,0	0,247	1,45
140	926,1	4279	0,687	0,172	198,2	0,214	1,24
160	907,6	4338	0,682	0,173	171,5	0,189	1,10
180	887,0	4413	0,678	0,172	153,5	0,173	1,00
200	864,8	4501	0,665	0,170	129,0	0,160	0,94
220	840,5	4606	0,656	0,168	126,0	0,150	0,89
240	812,2	4752	0,639	0,164	116,0	0,143	0,87
260	784,0	4944	0,614	0,157	107,5	0,137	0,87
280	750,8	5204	0,583	0,150	101,4	0,135	0,92
300	712,5	6594	0,543	0,132	94,1	0,132	1,02

Figura A.1. Tabla de las propiedades del agua - sección 3.1.

A. TABLAS

$P = 40 \text{ bar} = 4,0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 250,4^\circ\text{C}$)				
T $^\circ\text{C}$	v m^3/kg	u kJ / kg	h kJ / kg	s $\text{kJ} / \text{kg K}$
Sat	0,04978	2602,3	2801,4	6,0701
280	0,05546	2680,0	2901,8	6,2568
320	0,06199	2767,4	3015,4	6,4553
360	0,06788	2845,7	3117,2	6,6215
400	0,07341	2919,9	3213,6	6,7690
440	0,07872	2992,2	3307,1	6,9041
500	0,08643	3099,5	3445,3	7,0901
540	0,09145	3171,1	3536,9	7,2056
600	0,09885	3279,1	3674,4	7,3688
640	0,1037	3351,8	3766,6	7,4720
700	0,1110	3462,1	3905,9	7,6198
740	0,1157	3536,6	3999,6	7,7141

Figura A.2. Tabla de vapor sobrecalentado de las propiedades del agua - sección 3.2.

$p = 15,0 \text{ bar} = 1,5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 198,32^\circ\text{C}$)				
T $^\circ\text{C}$	v m^3/kg	u kJ / kg	h kJ / kg	s $\text{kJ} / \text{kg K}$
Sat	0,1318	2594,5	2792,2	6,4448
200	0,1325	2598,1	2796,8	6,4546
240	0,1483	2676,9	2899,3	6,6628
280	0,1627	2748,6	2992,7	6,8381
320	0,1765	2817,1	3081,9	6,9938
360	0,1899	2884,4	3169,2	7,1363
400	0,2030	2951,3	3255,8	7,2690
440	0,2160	3018,5	3342,5	7,3940
500	0,2352	3120,3	3473,1	7,5698
540	0,2478	3189,1	3560,9	7,6805
600	0,2668	3293,9	3694,0	7,8385
640	0,2793	3364,8	3783,8	7,9391

Figura A.3. Tabla de las propiedades del agua del vapor sobrecalentado a $P=15\text{bar}$ - sección 2.1.2.5.

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m ³ /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg		Entropía kJ/kg K	
		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
		sat. $v_f \times 10^3$	sat. v_g	sat. u_f	sat. u_g	sat. h_f	vaporiz. h_{fg}	sat. s_f	sat. s_g
0.04	28.96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	0,4226	8,4746
0.06	36.16	1,0064	23,739	151,53	2425,0	151,53	2415,9	0,5210	8,3304
0.08	41.51	1,0084	18,103	173,87	2432,2	173,88	2403,1	0,5926	8,2287
0.10	45.81	1,0102	14,674	191,82	2437,9	191,83	2392,8	0,6493	8,1502
0.20	60.06	1,0172	7,649	251,38	2456,7	251,40	2358,3	0,8320	7,9085
0.30	69.10	1,0223	5,229	289,20	2468,4	289,23	2336,1	0,9439	7,7686
0.40	75.87	1,0265	3,993	317,53	2477,0	317,58	2319,2	1,0259	7,6700
0.50	81.33	1,0300	3,240	340,44	2483,9	340,49	2305,4	1,0910	7,5939
10.0	179.9	1,1273	0,1944	761,68	2583,6	762,81	2015,3	2,1387	6,5863
15.0	198.3	1,1539	0,1318	843,16	2594,5	844,84	1947,3	2,3150	6,4448
20.0	212.4	1,1767	0,09963	906,44	2600,3	908,79	1890,7	2,4474	6,3409

Figura A.4. Tabla de las propiedades del agua saturada (líquido-vapor) - sección 3.2.

- Código de Scilab para el cálculo de las características geométricas y térmicas del CCP.

```
//Propiedades del agua a 40
tb=40
p=994.59
cp=4178
v=0.658e-6
k=0.628
Pr=4.34

//Datos
ts=260
ta=30
D=0.05
m=0.005
rd=481.8182
ang=90
hent=42.01

tent=tb-ta
tsal=ts-tb
Re=[(4*m)/( %pi*D*p*v)]
Nu=0.023*Re^0.8*Pr^0.4
h=(Nu*k)/D
L=(m*cp*(220-tent))/( %pi*D*h*(ts-tb))
ar=D* %pi*L
La=D*33
```

B. CÓDIGOS

```
aa=(La)*L
C=aa/ar
q1=m*cp*(tsal-tent)
q2=%pi*D*L*h*tsal
qsol=aa*rd*(cos(ang)*-1)
qm=q1/(cp*(tsal-tent))
qutil=qm*(hs-hent)
ngb=qutil/qsol
printf('m=%4f\n',m);
printf('Re=%2f\n',Re);
printf('Nu=%2f\n',Nu);
printf('h=%2f\n',h);
printf('L=%2f\n',L);
printf('ar=%4f\n',ar);
printf('aa=%4f\n',aa);
printf('C=%4f\n',C);
printf('q=%4f\n',q1);
printf('qm=%4f\n',qm);
printf('qsol=%4f\n',qsol);
printf('qutil=%4f\n',qutil*10);
printf('ngb=%4f\n',ngb*100);
```

- Código de Scilab para el cálculo del ciclo Rankine.

```
//CICLO RANKINE para CT con CCP
ps=40;
t1=400;
h1=3213.6;
s1=6.7690;
ts=257.65
hs=2801.4
ntg=0.85
pg=30000
m=.005

//Para p=0.1
plb=0.1;
hf2=191.83;
hfg2=2392.8;
sf2=0.6493;
sg2=8.1502;
```

```

printf( 'CICLO_RANKINE\n' );
p1=ps;
s2=sf2
sfg2=(sg2-sf2)
printf( 'sfg2=_%5f\n', sfg2 );
x2= (s1-sf2)/sfg2
printf( 'x2=_%f\n', x2 );
h2=hf2+(x2*hf2)
printf( 'h2=_%f\n', h2 );
h4=hf2
h3=h4
qccp=hs-h4
printf( 'qccp=_%f\n', qccp );
qsob=h1-hs
printf( 'qsob=_%f\n', qsob );
wt=h1-h2
printf( 'wt=_%f\n', wt );
pg=ntg*m*wt
printf( 'pg=_%f\n', pg );
pgt=pg*10
printf( 'pgt=_%f\n', pgt );
es=(wt/(qccp+qsob))*100
printf( 'es=_%f\n', es );
ec=(wt/(qsob))*100
printf( 'ec=_%f\n', ec );

```


Bibliografía

- [1] Foro Nuclear. ¿Qué es la energía? <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-distintas-fuentes-de-energia/que-es-la-energia/>, 2021. 1
- [2] Solartik. Energía fotovoltaica. <https://solartik.com.ar/energia-solar-fotovoltaica-paneles-solares/>, 2021. 3
- [3] Inductar. Termotanques solares. http://www.inductar.com.ar/?page_id=12, 2018. 4
- [4] Vázquez Pérez J. T. Análisis del Plan Sectorial de Energía 2020-2024: La viabilidad de la autosuficiencia energética. <https://ciep.mx/analisis-del-plan-sectorial-de-energia-2020-2024-la-viabilidad-de-la-autosuficiencia-energetica/#:~:text=El%20Plan%20Sectorial%20de%20Energ%C3%ADa,la%20consecuci%C3%B3n%20de%20este%20objetivo.>, 2020. 6
- [5] SENER. Programa Sectorial de Energía 2020-2024. *Diario Oficial de la Federación*, 2020. 7
- [6] Chávez I. Prosener queda suspendido indefinidamente. <https://energiahoy.com/2020/09/22/prosener-queda-suspendido-indefinidamente/>, 2020. 7
- [7] Definiciones. Historia de la generación de energía y las centrales eléctricas. https://www.definiciones-de.com/Definicion/de/historia_de_la_generacion_de_energia_y_las_centrales_electricas.php, 2015. 11, 12
- [8] Fundación Endesas. Central hidroeléctrica. <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-hidroelectrica>, 2019. 12

BIBLIOGRAFÍA

- [9] Fundación Endesas. Parque eólico. <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-parque-eolico>, 2019. 13
- [10] Foro nuclear. ¿cómo funciona una central nuclear? <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/como-funciona-una-central-nuclear/>, 2021. 13
- [11] Enel. Central geotérmica. <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-geotermica/central-geotermica>, 2021. 13
- [12] Endesax. Centrales de biomasa: infografía para conocer su funcionamiento. <https://www.endesax.com/es/recursos/historias/centrales-de-biomasa>, 2020. 13
- [13] Rivera Chávez E. Turbina de gas. http://eribera.bo.tripod.com/ciclo_brayton.html, 2021. 17
- [14] González Avalos G. Notas de Clase - Centrales Eléctricas II. *Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UMSNH*, 2021. 18, 20, 22, 43
- [15] Solar Cookers. Horace de saussure and his hot boxes of the 1700's. <http://solarcooking.org/saussure.htm>, 2021. 24
- [16] Global Solare. Historia de la energía solar. <https://globalsolare.com/blog/historia-energia-solar>, 2021. 24
- [17] Paredes Velasco C. Diseño de captador solar cilindrico parabolico para aplicaciones rurales en paraguay. *Escuela Tecnica Superior De Ingenieros De Minas*, pages 6–28, 2012. 24, 26, 30
- [18] Natureduca. Energías - alternativas: Colectores solares - 1a parte. <https://natureduca.com/energias-alternativas-colectores-solares-01.php>, 2021. 27
- [19] Balado Leal E. Prototipo de campo de colectores solares cilindro-parabólicos para generación de calor a alta temperatura. *Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior*, pages 15–25, 2011. 27, 31, 33
- [20] Koulibaly A. Modelación de un colector solar para calentamiento de aire. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012015000300007, 2015. 27
- [21] Pinedo Araujo A. Vista de análisis teórico-experimental del colector solar cilíndrico parabólico automatizado con espejos reflectantes. *ECIPERU*, 7:3–5, 2019. 29

- [22] Linescope. Jucosol solar. https://www.youtube.com/watch?v=xgdyNL6vKK8&ab_channel=LINESCOPE/, 2014. 29
- [23] Zarza Moya E. Captadores cilindroparábolicos. *EOI*, pages 33–44, 2016. 30, 32, 33
- [24] Karim M.A. Mathematical modelling and performance analysis of different solar air collectors. *IJUM Engineering Journal*, 16:47–55, 2015. 33, 37
- [25] Vidriales Escobar L.G. Colector de canal parabólico para la generación directa de vapor para calor de proceso. *Centro De Investigación En Energía - UNAM*, 2007. 38
- [26] Manrique J. A. *Energía Solar*. Harla S.A. de C.V., 723 edition, 1984. 38