



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Tesis:
**ANÁLISIS DE TERMOELÉCTRICAS DE
CICLOS COMBINADOS**

Para obtener el Título de:
INGENIERO ELECTRICISTA

Presenta:
JUAN RÉGULO CORTÉS GARCÍA

Asesor:
DR. GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS



Morelia Michoacán.
Diciembre 2021



MESA DE SINODALES

Presidente: DR. GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS

Vocal: M.C. TIZOC LÓPEZ LÓPEZ

Vocal: ING. GUSTAVO SAUCEDO ZAVALA

Suplentes

Vocal: DR. CARLOS MANUEL SÁNCHEZ GONZÁLEZ

Vocal: DR. J. AARÓN PADILLA GARCÍA

Morelia, Michoacán. México.

Diciembre 2021.

Asesor de Tesis

DR. GILBERTO GONZÁLEZ AVALOS

Firma

Agradecimientos

A Dios que me ha dado la motivación y los medios con los cuales tener logros y cumplir metas día con día.

A mis padres, a quienes debo y agradezco esta herencia que me han dejado al darme estudios y todo su apoyo económico y moral.

A mi asesor de tesis, Dr. Gilberto Gonzáles Avalos, quien me ha apoyado en el desarrollo de mi tesis y ha estado al pendiente de mis avances para titulación. Así también agradezco a los profesores que conforman la mesa sinodal por haberse dado tiempo para revisar esta tesis y darme sus sugerencias.

Al Ing. Ignacio Franco Torres, quien aparte de colaborar con mi asesor en el desarrollo de mi tesis, me ha apoyado y motivado moralmente con sus enseñanzas y consejos personales.

A mis profesores, los cuales se han encargado de proporcionarme la instrucción necesaria para mi formación profesional.

A mis compañeros de la facultad, con los que no solamente nos apoyamos académicamente sino también de manera personal como amigos.

A mi amigo David Ramírez Ortíz, quien, además de darme su amistad y apoyo desde hace muchos años, en esta ocasión colabora poniendo el toque de su talento realizando el diseño de la portada de esta tesis.

A todas esas personas, familiares y amigos que en algún momento de mi carrera me apoyaron de alguna manera contribuyendo al logro de esta meta que hoy celebro.

Dedicatoria

Dedico este trabajo de graduación a mi Padre $\ddagger$, y a mi Madre que han estado durante toda mi vida apoyándome a cada momento y siempre creyendo en mí. Ellos quienes con amor y dedicación me han enseñado el camino para ser un hombre de bien, y con este logro recordando todo el sacrificio que ellos han hecho y la paciencia que me han tenido les dedico este nuevo paso de mi vida.

A mi hermana, la cual me ha apoyado también siempre incondicionalmente, y a quien hoy le digo que “no hay nada imposible”, que los límites están en uno mismo.

Índice

Agradecimientos	i
Dedicatoria	ii
Índice	iii
Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	viii
Glosario de Términos	x
Capítulo 1.....	1
1.1. Termoeléctricas actuales.....	2
1.2. Objetivo	3
1.3. Justificación	3
1.4. Metodología.....	5
1.5. Contenido de la tesis	5
Capítulo 2 Antecedentes de las centrales eléctricas.....	6
2.1. Introducción	6
2.2. Clasificación de las plantas eléctricas	8
2.3. Plantas termoeléctricas	9
2.4. Plantas geotermoeléctricas	10
2.5. Plantas de turbinas de gas	11
2.6. Plantas de diésel o gasolina	11
2.7. Plantas nucleoeeléctricas	12
2.8. Plantas solares	14
2.8.1. Central fototérmica.....	15

2.8.2. Central fotovoltaica	16
2.9. Centrales hidroeléctricas	18
2.10. Central eólica.....	19
2.11. Plantas undimotrices	20
2.12. Plantas mareomotrices	21
2.13. Clasificación de centrales en base a su disposición	22
2.13.1. Centrales de base o de carga base	22
2.13.2. Centrales de carga pico	23
2.13.3. Centrales de reserva.....	23
2.13.4. Centrales de bombeo.....	23
2.14. Ciclo combinado de gas y de vapor.....	24
2.15. Ciclo combinado gas-vapor clásico, con o sin quemado de combustible en el recuperador	25
2.16. Ciclo combinado gas-vapor, con generador de gases y de vapor, simultáneo, con aire a presión.....	26
Capítulo 3 Modelado de una central termoeléctrica con ciclo combinado.....	28
3.1. Introducción	28
3.2. Termoeléctricas de ciclo combinado	28
3.3. Configuraciones habituales en centrales de ciclo combinado	32
3.3.1. Configuración multi-eje 1x1.....	36
3.3.2. Configuración mono-eje 1x1 con embrague	37
3.3.3. Configuración mono-eje 1x1sin embrague.....	39
3.3.4. Configuración 2x1	40
3.4. Parámetros característicos de una central termoeléctrica de ciclo combinado.....	43
3.5. La turbina de gas en una central de ciclo combinado.....	45

3.6. El generador eléctrico.....	47
3.7. El generador de vapor por recuperación de calor (HRSG)	49
3.8. El ciclo de agua-vapor	51
3.9. La turbina de vapor.....	52
3.10. Los sistemas eléctricos.....	54
3.11. Impacto ambiental de las centrales de ciclo combinado.....	56
Capítulo 4 Potencia de generación de una central termoeléctrica de ciclo combinado.....	58
4.1. Introducción	58
4.2. Potencia de una central termoeléctrica de ciclo combinado multi eje 1x1	59
4.3. Potencia de una central termoeléctrica de ciclo combinado multi eje 1x1 con recalentamiento	65
4.4. Potencia de una central termoeléctrica de ciclo combinado multi-eje 2x1	69
Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones	72
5.1. Conclusiones	72
5.2. Recomendaciones	73
Bibliografía	74

Resumen

El presente trabajo de titulación, describe los tipos de centrales termoeléctricas y su funcionamiento para conocer la forma en que se lleva a cabo la generación de electricidad. Así también se describen otros tipos de centrales alternas, como lo son las centrales fotovoltaicas y las eólicas, entre otras.

Como caso de estudio se aborda específicamente el tema de centrales termoeléctricas de ciclo combinado, en donde a partir de un caso planteado se realiza el análisis de los ciclos Rankine y Brayton que caracterizan a estas plantas o centrales, donde los resultados finales nos demuestran cómo este último ciclo mencionado aumenta la eficiencia y las ventajas de una central térmica simple, que únicamente utiliza Ciclo Rankine, y la importancia que tienen ante el impacto ambiental.

Como profesional en la carrera de Ingeniero Electricista se deben adquirir habilidades de análisis para el planteamiento de soluciones y mejoras en la industria eléctrica, por lo que en este documento se expone matemáticamente un caso propuesto basado en parámetros y características implementados comúnmente en la industria mexicana.

Palabras Clave

Central Termoeléctrica, Generación, Ciclo Combinado, Centrales Alternas
Análisis, Eficiencia, Impacto Ambiental.

Abstract

This degree work describes the types of Thermoelectric Power Plants and their operation to know the way in which electricity generation is carried out. This also describes other types of alternate power plants, such as photovoltaic and wind power plants, among others.

As a case study, the subject of Combined Cycle Thermoelectric Power Plants is specifically addressed, where from a case raised the analysis of the Rankine and Brayton Cycles that characterize these plants or Power Plants is carried out, where the final results show us how this The last mentioned Cycle increases the efficiency and advantages of a simple Thermal Power Plant, which only uses Rankine Cycle, and the importance they have regarding the environmental impact.

As a professional in the Electrical Engineer career, analysis skills must be acquired to propose solutions and improvements in the electrical industry, so this document mathematically exposes a case based on parameters and characteristics implemented in the Mexican industry.

Keywords

Thermoelectric Power Plant, Generation, Combined Cycle, Alternative Power Plants Analysis, Efficiency, Environmental Impact.

Lista de Figuras

Capítulo 1

Figura 1. 1. Centrales de generación eléctrica actuales.	1
Figura 1. 2. Diagrama de funcionamiento de una central de ciclo convencional.	3

Capítulo 2

Figura 2. 1. Componentes principales de una central termoeléctrica.....	9
Figura 2. 2. Generación geotérmica.....	11
Figura 2. 3. Generador eléctrico de diésel.	12
Figura 2. 4. Diagrama de una central nuclear.	12
Figura 2. 5. Componentes de una central nucleoelectrica.	13
Figura 2. 6. Esquema de la central nuclear de Laguna Verde.	14
Figura 2. 7. Central solar.....	15
Figura 2. 8. Esquema de una central fototérmica. Fuente: http://www.unesa.es	16
Figura 2. 9. Componentes de una central fotovoltaica	17
Figura 2. 10. Corte de una central hidroeléctrica.	18
Figura 2. 11. Parque eólico.	19
Figura 2. 12. Pelamis.	21
Figura 2. 13. Central mareomotriz.....	22
Figura 2. 14. Corte de una central hidroeléctrica de bombeo.	24
Figura 2. 15. Ciclo combinado gas-vapor clásico con alimentación directa de combustible, con o sin (Í´ abierto o cerrado) quemado de combustible adicional en el recuperador.	25

Capítulo 3

Figura 3. 1 Vista interior de una turbina de gas de la firma SIEMENS.....	30
Figura 3. 2 Turbina de vapor de la firma SIEMENS.	30
Figura 3. 3 Configuración mono-eje.....	33

Figura 3. 4. Configuración $N \times 1 \times 1$	34
Figura 3. 5. Configuración $N \times 1$	35
Figura 3. 6. Configuración $N \times N \times 1$	35
Figura 3. 7. Esquema de una configuración multi-eje 1×1	36
Figura 3. 8. Ciclo combinado en configuración 1×1 multi-eje.	37
Figura 3. 9. Ciclo Combinado en configuración 1×1 mono-eje (con generador en el centro).	39
Figura 3. 10. Ciclo combinado en configuración 1×1 mono-eje (con generador al extremo del eje).	40
Figura 3. 11. Diagrama de la configuración 2×1	40
Figura 3. 12. Ciclo combinado en configuración 2×1	42
Figura 3. 13. Configuraciones especiales de ciclo combinado.....	42

Capítulo 4

Figura 4. 1. Diagrama de una central de ciclo combinado.	59
Figura 4. 2. Diagrama de una central de ciclo combinado con recalentamiento.	66
Figura 4. 3. Diagrama de una central termoeléctrica de ciclo combinado muti-eje 2×1	69

Glosario de Términos

Aerocondensadores: Son intercambiadores de calor que utilizan el aire atmosférico en lugar de agua u otro refrigerante líquido.	Geiser: Abertura de origen volcánico en la corteza de la Tierra de la cual brotan vapor, gases y agua muy caliente de manera intermitente y generalmente turbulenta.
Axial: Que es relativo al eje.	Heliostatos: Un heliostato es un dispositivo que consiste fundamentalmente en un espejo animado de un cierto movimiento rotatorio y que sirve para dirigir los rayos del Sol en una determinada dirección, a pesar del movimiento de la Tierra respecto al Sol.
Convección: se define como el calor transmitido en un líquido o en un gas como consecuencia del movimiento real de las partículas calentadas en su seno.	HRCG: High Rankine Combustion Generator.
Cultivos energéticos: También llamados cultivos agroenergéticos, es aquel cultivo agrícola, forestal o acuático, cuya producción parcial o total se utiliza como materia prima para generar energía aprovechable.	HRSG: High Rankine Single Generator.
Efluentes: Son los líquidos residuales que salen de la instalación.	IGCC: Integrated Generator Combined Cycle.
Entalpía: es la cantidad de calor que un sistema termodinámico libera o	ISCC: Integrated Solar Combined Cycle.

absorbe del entorno que lo rodea cuando está a una presión constante, entendiendo por sistema termodinámico cualquier objeto.	
Entropía: Magnitud termodinámica que mide la parte de la energía no utilizable para realizar trabajo y que se expresa como el cociente entre el calor cedido por un cuerpo y su temperatura absoluta.	Potencia osmótica: es la energía obtenida por la diferencia en la concentración de la sal entre el agua de mar y el agua de río. El residuo en este proceso es únicamente agua salobre
Fisión: Rotura o división de un núcleo atómico pesado en dos o más fragmentos de tamaño aproximadamente igual, acompañados de algunos neutrones y de gran cantidad de energía.	Reservorio: también denominado géiser (véase definición)
Fusión: Reacción nuclear en la que dos núcleos de átomos ligeros, en general el hidrógeno y sus isótopos (deuterio y tritio), se unen para formar otro núcleo más pesado, generalmente liberando partículas en el proceso.	Ría: Penetración que forma el mar en la costa por la desembocadura de un río a causa del hundimiento de una parte del litoral.
Gasóleo: Líquido volátil, de aspecto oleoso, que está constituido por una mezcla de hidrocarburos y se obtiene por destilación fraccionada del petróleo bruto; se emplea como combustible en calefacción y en motores pesados y diésel.	Sistema redundante: ingeniería de computadores, son aquellos en los que se repiten aquellos datos o hardware de carácter crítico que se quiere asegurar ante los posibles fallos que puedan surgir por su uso continuado.

Capítulo 1

Introducción

La generación de electricidad por medio de centrales térmicas, es una de las formas más utilizadas por los países en vías de desarrollo, ya que su inversión económica es menor en comparación con centrales eléctricas de otro tipo. Sin embargo, estas plantas son altamente contaminantes al ambiente en muchos sentidos, por lo cual es primordial un control óptimo para el mejor aprovechamiento de todos los recursos de manera responsable.

En la Figura 1. 1, se muestra una ilustración con las principales plantas de generación eléctrica.



Figura 1. 1. Centrales de generación eléctrica actuales.

1.1. Termoeléctricas actuales

La mayoría de las centrales generadoras son termoeléctricas, las cuales a su vez se derivan en:

- **Centrales térmicas clásicas:** también llamadas termoeléctricas o simplemente térmicas, las cuales obtienen la energía necesaria para generar electricidad a partir del uso de combustibles fósiles como el carbón, el gas natural y sus derivados.
- **Centrales térmicas solares:** estas centrales aprovechan la radiación solar para lograr el calentamiento del fluido que, posteriormente convertido en vapor, haga girar la turbina de un generador.
- **Centrales geotérmicas:** aprovechan del calor interno de la Tierra, el cual es transmitido a través de los cuerpos de roca caliente por medio de geísers o reservorios por conducción y convección.
- **Centrales nucleares:** son centrales altamente eficientes, las cuales utilizan como combustible Uranio o Plutonio, los cuales son materiales fisionables con los que se realiza una reacción nuclear.
- **Centrales de biomasa:** este tipo de centrales obtienen la energía de la combustión de residuos forestales, agrícolas o de cultivos energéticos.
- **Centrales de incineración de Residuos Sólidos Urbanos RSU:** el combustible que hace operar este tipo de centrales es la basura, la cual es tratada previamente de manera adecuada para poder realizar una combustión.

Podemos decir que todas estas centrales tienen el mismo principio de funcionamiento, donde lo que se diferencia en cada una de ellas es la fuente que produce la energía calorífica necesaria para producir, a su vez, la energía mecánica que logre el giro del conjunto turbina-generator.

A continuación, en la Figura 1. 2, se muestra el diagrama básico de funcionamiento de una central térmica clásica o convencional:

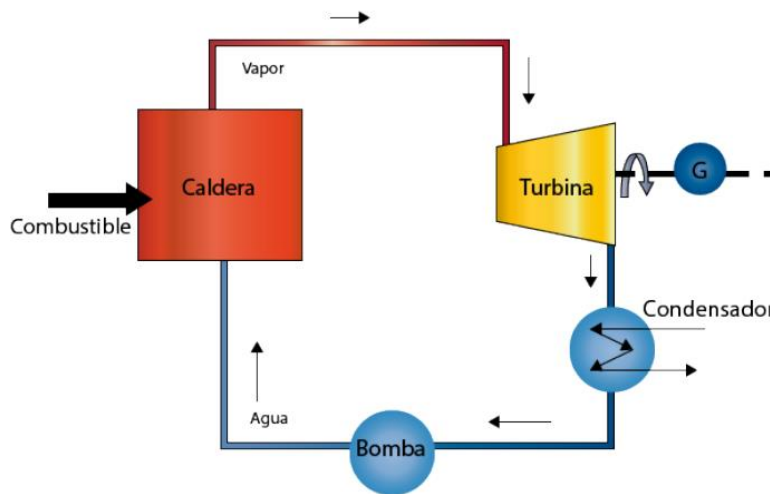


Figura 1. 2. Diagrama de funcionamiento de una central de ciclo convencional.

Si se comparan todas las anteriores centrales, como ya mencionamos, les rige el mismo principio de funcionamiento, y todas tienen una caldera (también llamada generador de vapor), sin embargo, en una central geotérmica la caldera está dada de manera natural por el reservorio, por el cual se obtiene la energía calorífica de la Tierra.

1.2. Objetivo

Conocer y analizar las centrales termoeléctricas de ciclo combinado determinando la potencia de cada etapa y su correspondiente eficiencia en algunas configuraciones.

1.3. Justificación

En función de las materias primas que se utilicen para la generación de energía, además de las tecnologías y procesos implementados, los principales impactos ambientales asociados a las centrales termoeléctricas tienen relación con las

emisiones a la atmósfera, consumo de agua y alteración del ecosistema acuático, descargas de residuos líquidos, manejo de residuos sólidos y de materiales peligrosos, y emisiones acústicas. Ante toda acción habrá una reacción y de esto no se exime la generación termoeléctrica.

Las centrales termoeléctricas al ser más económicas, son más utilizadas, sin embargo, su alto índice de contaminación por emisiones de gases al medio ambiente es un asunto que no debe ser despreciable. Por lo cual, se deben analizar y verificar constantemente los procesos en la generación eléctrica para así poder implementar de manera oportuna acciones de mantenimiento, control y/o actualización del sistema intentando siempre estar en un compromiso con el cuidado del Planeta. En todo momento el ingeniero debe estar pendiente del nivel de demanda de energía para así valorar el estado actual y el demandado con la intención de validar y actuar ante un cambio necesario que deba ser aplicado al proceso de generación y con ello seguir obteniendo el más alto óptimo rendimiento de todos los procesos requeridos en la central termoeléctrica.

Dentro de las centrales termoeléctricas encontramos las de ciclo combinado, en las que este documento enfoca su análisis, las cuales basan su funcionamiento en el ciclo Brayton y en el ciclo Rankine.

El ciclo Brayton, es uno de los ciclos termodinámicos de más amplia aplicación, al ser la base del motor de turbina de gas, por lo que el producto del ciclo puede ir desde un trabajo mecánico que se emplee para la producción de electricidad en los quemadores de gas natural o algún otro aprovechamiento como en la aeronáutica. Se trata un ciclo termodinámico que, en términos simples, consiste en una etapa de compresión adiabática, una etapa de calentamiento isobárico y una expansión adiabática de un fluido termodinámico compresible.

Por su parte, el ciclo Rankine es un ciclo termodinámico idealizado de un motor térmico de presión constante que convierte parte del calor en trabajo mecánico. El calor se suministra externamente a un circuito cerrado, que generalmente usa agua (en fase líquida y de vapor) como fluido de trabajo. En

contraste con el ciclo de Brayton, el fluido de trabajo en el ciclo de Rankine experimenta el cambio de fase de una fase líquida a una de vapor y viceversa. Así que, integrando ambos ciclos podemos obtener un producto más eficiente en una central termoeléctrica.

Es imprescindible que los ingenieros busquemos siempre estar innovando e implementando nuevas mejoras con el fin de que las formas de generación de energía sean más eficientes y, sobre todo, cuidando siempre al Planeta.

1.4. Metodología

Se recaba información mediante bibliografías y documentación que permite conocer y analizar los sistemas de ciclo combinado para así poder calcular su potencia y eficiencia.

1.5. Contenido de la tesis

En el Capítulo 1 se presenta una breve introducción de lo que son las centrales termoeléctricas, así como el porqué del análisis de este tipo de centrales y lo que se pretende con el mismo.

En el Capítulo 2 se abordan antecedentes de las centrales termoeléctricas para dar un panorama general de su funcionamiento.

En el Capítulo 3 se desarrolla el modelado de una central termoeléctrica de ciclo combinado en varias configuraciones.

En el Capítulo 4 se propone un caso de una termoeléctrica de ciclo combinado realizando el análisis matemático donde se determina la potencia y eficiencia.

En el Capítulo 5 se tienen las conclusiones y recomendaciones posteriores a los resultados del análisis de potencia y eficiencia de una central termoeléctrica de ciclo combinado.

Capítulo 2

Antecedentes de las centrales eléctricas

2.1. Introducción

La energía eléctrica ha tenido un impacto sumamente importante en el desarrollo de la sociedad y del mundo entero en infinitud de rubros, pudiendo casi decir que la “electricidad hace girar al mundo”, puesto que de esta dependen la mayoría de los procesos productivos, así como las comunicaciones que hoy en día son sumamente importantes, y en general, la electricidad vista como una necesidad básica en los hogares de un país.

La industria de la energía eléctrica surge con el descubrimiento de la primera lámpara incandescente, el cual fue logrado por *Thomas Alva Edison* en 1879, sin embargo, ya desde hacía casi tres siglos se daban avances en el campo de la electricidad, como, por ejemplo, se ideó un procedimiento de iluminación eléctrica basado en el uso de lámparas de luz de arco, las cuales consistían en un par de electrodos de carbono en forma de barras dispuestas una sobre otra de forma vertical. Estos electrodos se calentaban hasta la incandescencia al saltar un arco entre uno y otro electrodo.

Tal invento de *Edison* no tendría una aplicación masiva sin una difusión, por lo cual tuvo que crear un sistema de generación y distribución integral, desde dínamos hasta los fusibles y casquillos. Tal tarea daría pie al surgimiento de la primera planta generadora termoeléctrica en la calle Pearl de Nueva York el 4 de septiembre de 1882 por el mismo *Edison*, iniciando así la era moderna de la electricidad.

En sus inicios, la planta generadora de *Edison* suministraba energía únicamente a 59 usuarios en un área de 1 milla cuadrada, constituyó la primera aplicación a gran escala de la electricidad al servicio público.

La primera central hidroeléctrica basada en el sistema de *Edison*, entró en funcionamiento en Appleton, Wisconsin el 30 de septiembre de 1882.

Durante los inicios de las centrales generadoras, estas generaban únicamente corriente continua, la cual presentaba pérdidas importantes de potencia al ser transmitida a largas distancias. Cuatro años más tarde, para 1886 comenzó a operar la primera central norteamericana de corriente alterna en Great Barrington, Massachusetts. Con la implementación de este tipo de corriente se logró aumentar la potencia de la energía eléctrica para así transmitirla a grandes distancias y posteriormente reducirla a los voltajes deseados por medio de transformadores en las subestaciones, con lo que las pérdidas en la transmisión fueron reducidas considerablemente.

Posteriormente, los diversos sistemas eléctricos de corriente continua fueron desplazados por los de corriente alterna: al inicio de la última década del siglo XIX, la corriente continua representaba el 90% de la capacidad generada en las centrales. Posteriormente, para 1902 ya había descendido al 39%, en 1907 al 18% y ya en 1956 representaba únicamente el 1% de la capacidad generada.

Este significativo cambio fue gracias al descubrimiento del motor de inducción realizado por *Nikola Tesla*, lo cual permitió transformar de un modo más 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. Así, sin la implementación de la electricidad en corriente alterna la transmisión y distribución jamás hubiese podido tener el enorme incremento que se dio posteriormente.

La electricidad que hasta 1900 se limitaba únicamente a suministrar potencia para el alumbrado, comenzó entonces a impulsar motores, producir energía térmica y realizar funciones en los múltiples procesos industriales.

El uso y la transformación de la energía que nos proporciona la naturaleza es tema fundamental en la ingeniería para así tener un mejor aprovechamiento de la misma. La energía mecánica es una de las principales formas de energía utilizadas para satisfacer las necesidades, sin embargo, para producirla se debe pasar por una serie de transformaciones de otras energías, por ejemplo, con la energía potencial del agua o la energía cinética del viento podemos tener la energía mecánica que haga mover una turbina, la cual acoplada a un generador produzca energía eléctrica.

La energía se puede clasificar como:

Energía primaria, la cual es obtenida directamente de la naturaleza, como el petróleo, el carbón, el sol, el viento, gas natural, etc.

Energía secundaria, dada por la transformación de la energía primaria, por ejemplo, la gasolina, el diésel y entre otras la electricidad. (Yusta Loyo, 2011)

2.2. Clasificación de las plantas eléctricas

La energía eléctrica es producida a partir de la transformación de energía primaria, así que partiendo de allí podemos clasificar las centrales eléctricas en:

a) Termoeléctricas:

- De vapor.
- De turbina de gas.
- Geotérmicas.
- Motores de combustión interna.
- Nucleoeléctricas (de fisión).

b) Hidroeléctricas.

c) Eólicas.

Además, existen otras fuentes alternas de energía, es decir, otras alternativas de generación de energía eléctrica, las cuales se pretende tengan un desarrollo a nivel industrial a principios o mediados del siglo XXI. Estas fuentes alternas son:

- Plantas Solares.
- Mareomotrices.
- Nucleares de Fusión.

A las plantas de vapor se les denomina convencionales.

2.3. Plantas termoeléctricas

Se les denomina termoeléctricas a las centrales eléctricas que generalmente utilizan un combustible como fuente de calor para transformar este calor en energía mecánica y finalmente a su vez en energía eléctrica. En la Figura 2. 1, se muestran los componentes esenciales de una central termoeléctrica.

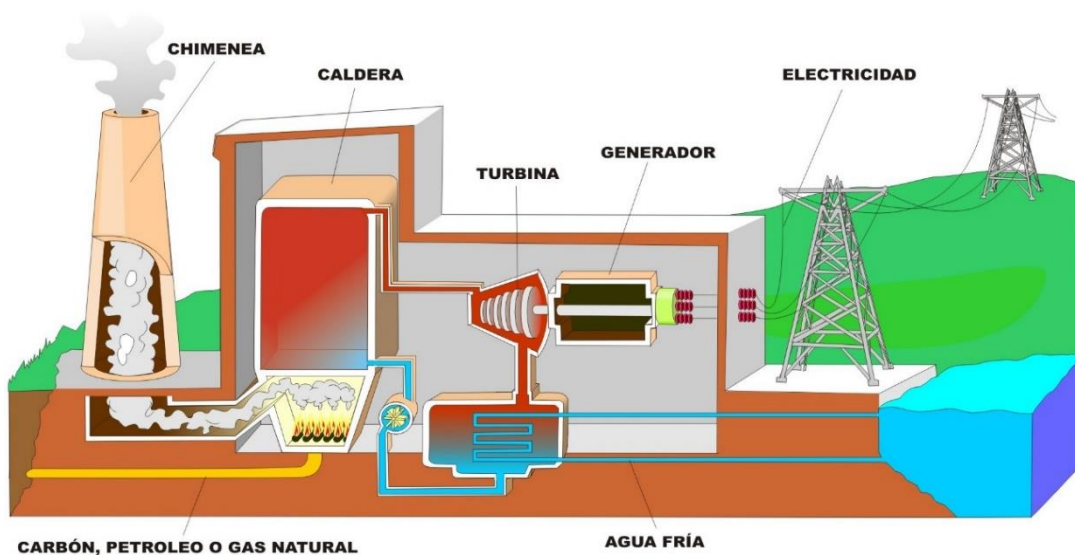


Figura 2. 1. Componentes principales de una central termoeléctrica.

En éste tipo de plantas se utiliza la energía calorífica producida de la quema de un combustible comercial como el petróleo, carbón, etc., éste calor lo absorbe el agua del generador de vapor, la cual se transforma en vapor el que es enviado a la turbina, siendo en esta donde se transforma la energía térmica del vapor en energía mecánica produciendo un movimiento giratorio en la flecha, la cual está acoplada al rotor del generador llegando así la energía mecánica a este, el cual mediante esta energía y un campo magnético realiza la transformación de energía que da lugar a la energía eléctrica, la cual se transmite y distribuye a los centros de consumo.

Actualmente en México, es la forma más común mediante la cual se genera energía eléctrica, teniendo un índice del 70% aproximadamente del total de la generación eléctrica del país.

2.4. Plantas geotermoeléctricas

Estas plantas son muy similares a las anteriores, sin embargo, no tienen un generador de vapor como tal, ya que este se obtiene del subsuelo.

México es rico en yacimientos geotérmicos, y en la actualidad se tiene una planta de este tipo cerca de Mexicali, Baja California llamada Planta Cerro Prieto, la cual tiene una capacidad instalada de 720 MW; Los Azufres, Michoacán de 242 MW; Los Hornos, Puebla con 94MW; Las Tres Vírgenes, Baja California Sur con 10MW y así como Domo San Pedro en Nayarit con igual capacidad, según datos del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIEGEO).

En la Figura 2. 2, se muestra una vista de corte transversal de una Central Geotermoeléctrica donde se observan las fuentes térmicas que la conforman.

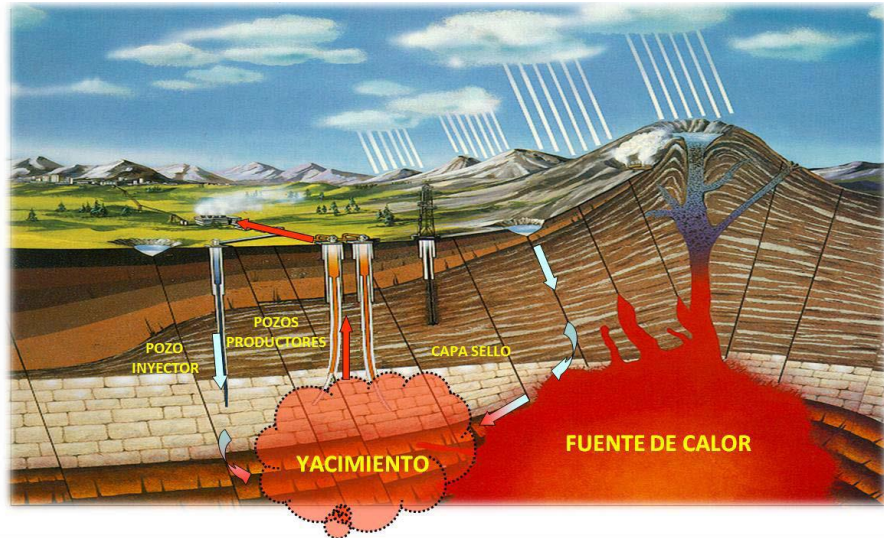


Figura 2. 2. Generación geotérmica.

2.5. Plantas de turbinas de gas

En este tipo de plantas, el compresor comprime un gas, que generalmente es aire, el cual se lleva a la cámara de combustión donde se quema un combustible, aumentando así la energía del gas. Posteriormente, se lleva a la turbina con alta presión y alta temperatura, en esta la energía de los gases se transforma en energía mecánica, moviendo a su vez al rotor del generador eléctrico en el que finalmente se produce la energía eléctrica.

México actualmente cuenta con algunas plantas de este tipo, de pequeñas capacidades, generando aproximadamente un 2% de la energía total.

2.6. Plantas de diésel o gasolina

Estas plantas son de pequeña potencia, las cuales son normalmente utilizadas como plantas de emergencia. Constan de un motogenerador donde el motor puede ser diésel o gasolina, siendo este el primo motor del generador.

A continuación, se muestra un generador eléctrico movido por un motor de combustión (Figura 2. 3).



Figura 2. 3. Generador eléctrico de diésel.

2.7. Plantas nucleoelectricas

Las plantas de generación nuclear se asemejan en mucho a las convencionales con la diferencia importante, que para generar el vapor constan de un reactor nuclear, el cual consume un combustible nuclear (uranio, por ejemplo) y mediante una reacción nuclear, fisión, se produce gran cantidad de calor, el cual es absorbido por un fluido (pudiendo ser agua), el cual es convertido en vapor con el que se alimenta la turbina.

En la Figura 2. 4, se muestra el diagrama de una central nuclear donde se puede notar la similitud con una central termoeléctrica convencional.

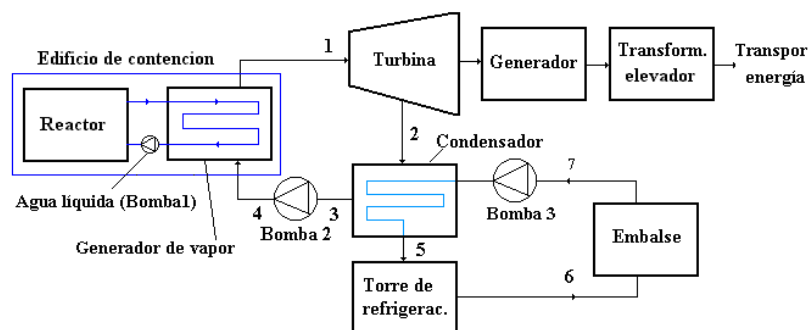


Figura 2. 4. Diagrama de una central nuclear.

El combustible nuclear se encuentra en el interior de un depósito herméticamente cerrado, junto con un sistema de control de la reacción nuclear y un fluido refrigerante constituyendo lo que se llama un reactor nuclear. El calor generado por el combustible del reactor y transmitido después a un refrigerante se emplea para producir vapor de agua, que acciona el conjunto turbina-alternador, generando la energía eléctrica.

En la Figura 2. 5, se aprecian los componentes principales de una central eléctrica nuclear.



Figura 2. 5. Componentes de una central nucleoelectrica.

La central se ha realizado con un diseño específico que provee estructuras civiles adecuadas, sistemas duplicados que responden al fallo previsto de uno de ellos y coeficientes de sobredimensionamiento para resistir el sismo máximo esperable, proteger contra las radiaciones ionizantes, prevenir los accidentes posibles y mitigar sus consecuencias. Por este motivo, los edificios de una central nuclear en comparación con una convencional de similar potencia son mucho más robustos y más grandes para alojar los sistemas redundantes instalados.

La operación de este tipo de centrales eléctricas conlleva una preocupación mayor, por lo cual está sujeta a la supervisión de organismos nacionales e internacionales, con el objetivo de asegurar que cumpla con las regulaciones necesarias para una operación segura.

México cuenta con una central de este tipo llamada Laguna Verde. Esta central nuclear pertenece a CFE y está situada en el municipio de Alto Lucero de Gutiérrez Barrios, ubicado en el Estado de Veracruz, la cual cuenta con una capacidad de 1640 MW instalada en dos generadores de 820 MW.

En la Figura 2. 6, se muestra el esquema de la central nuclear de Laguna Verde.

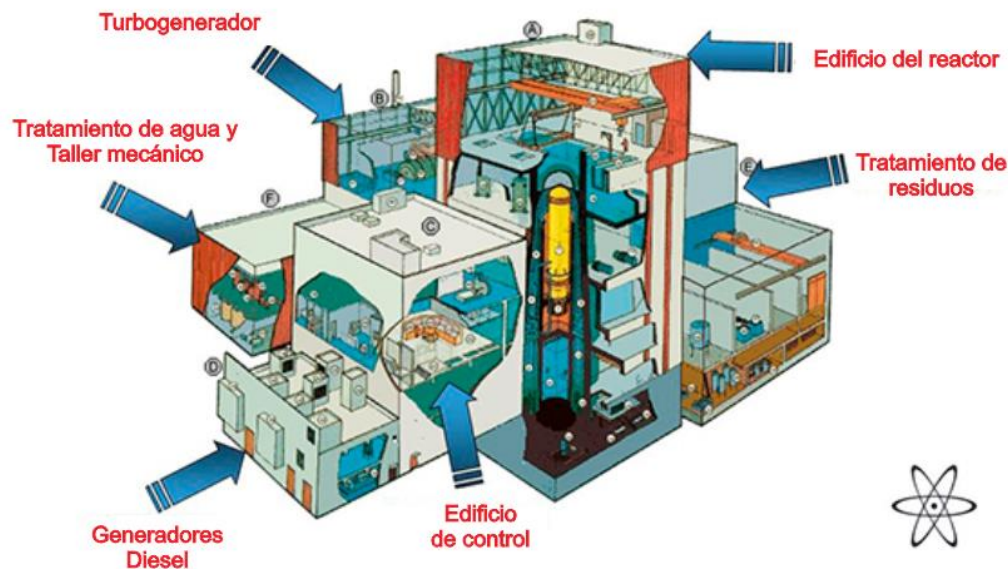


Figura 2. 6. Esquema de la central nuclear de Laguna Verde.

2.8. Plantas solares

En una central de este tipo se aprovecha la radiación solar para producir energía eléctrica. Este proceso puede realizarse mediante la utilización de un proceso fototérmico, o de un proceso fotovoltaico.

A continuación, en la Figura 2. 7, se muestra la toma aérea de una Central solar.



Figura 2. 7. Central solar.

2.8.1. Central fototérmica

En las centrales solares que emplean el proceso fototérmico, el calor de la radiación solar calienta un fluido y produce vapor que se dirige hacia la turbina produciendo luego energía eléctrica. El proceso de captación y concentración de la radiación solar se efectúa en unos dispositivos llamados heliostatos, que actúan automáticamente para seguir la variación de la orientación del Sol respecto a la Tierra.

Existen diversos tipos de centrales solares de tipo térmico, pero las más comunes son las de tipo torre, con un número grande de heliostatos que reflejen la luz solar hacia un depósito que contiene un líquido. Para una Central de este tipo con solo 10 MW, la superficie ocupada por los heliostatos es de 20 ha.

La Figura 2. 8, muestra los componentes que integran una central solar térmica.

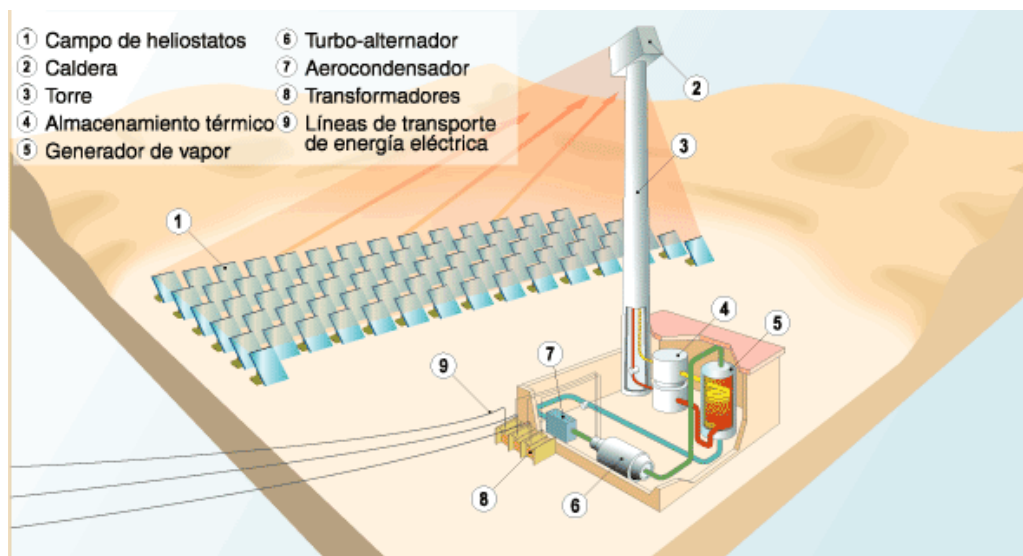


Figura 2. 8. Esquema de una central fototérmica. Fuente: <http://www.unesa.es>.

2.8.2. Central fotovoltaica

Las centrales solares que emplean el proceso fotovoltaico hacen incidir la radiación solar sobre una superficie de un cristal de semiconductor, llamada célula solar, y produce en forma directa una corriente eléctrica por efecto fotovoltaico.

Este tipo de centrales se están instalando en países donde el transporte de energía eléctrica se debería realizar desde mucha distancia, y hasta ahora su empleo es básicamente para iluminación y algunas aplicaciones domésticas.

Una central fotovoltaica es una central eléctrica compuesta básicamente por módulos fotovoltaicos y un inversor. Los paneles fotovoltaicos son los encargados de transformar la radiación solar, en energía eléctrica de corriente continua. El inversor es el equipo electrónico que tiene por función, convertir la energía de corriente continua producida por los módulos fotovoltaicos, en energía de corriente alterna de características similares a las de la red eléctrica.

En la Figura 2. 9, se muestran las partes que integran a una central fotovoltaica.

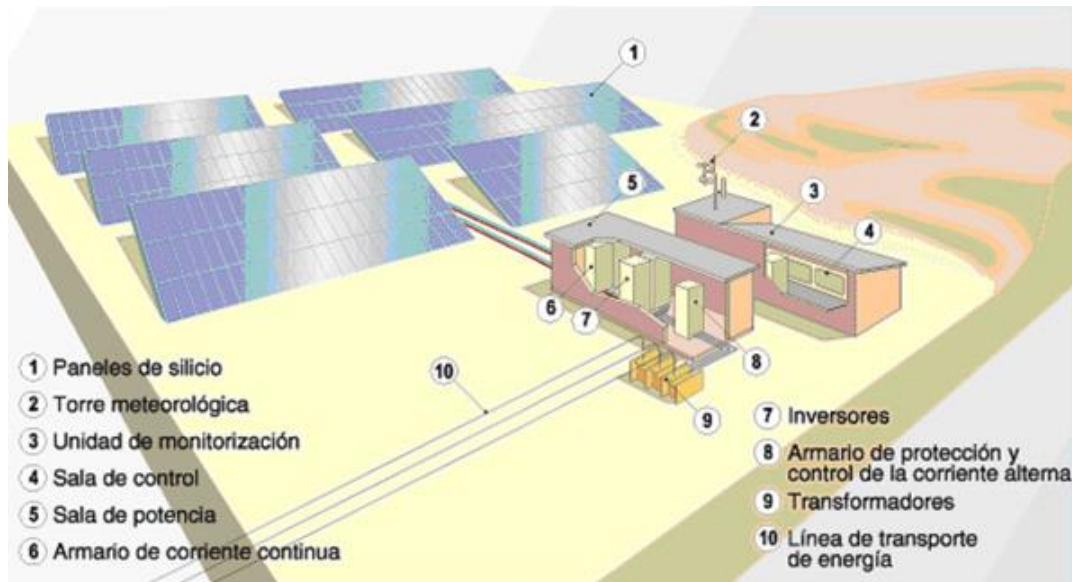


Figura 2. 9. Componentes de una central fotovoltaica

La instalación solar funciona como una pequeña central de producción de electricidad, que, mediante el inversor, inyecta la energía producida a la red de distribución eléctrica.

La energía producida no se aprovecha directamente, sino que se inyecta en la red y puede ser utilizada por cualquier usuario del sistema eléctrico. De esta forma, esto permite que toda la energía generada por los módulos solares se utilice, incluso en días festivos o épocas de vacaciones donde el consumo propio puede ser prácticamente nulo.

Sin embargo, este tipo de generación presenta desventajas y una de ellas es la de ser intermitente, ya que depende de la captación de los rayos solares, por lo que ante la ausencia del Sol o ante la variación de la nubosidad la generación de energía eléctrica de los paneles se torna afectada, incluso en la oscuridad deja de haber generación.

2.9. Centrales hidroeléctricas

Una central hidroeléctrica es aquella en la que la energía potencial del agua almacenada en un embalse se transforma en la energía cinética necesaria para mover el rotor de un generador y posteriormente transformarse en energía eléctrica.

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

En la Figura 2. 10, se muestran los componentes principales de una central hidroeléctrica.

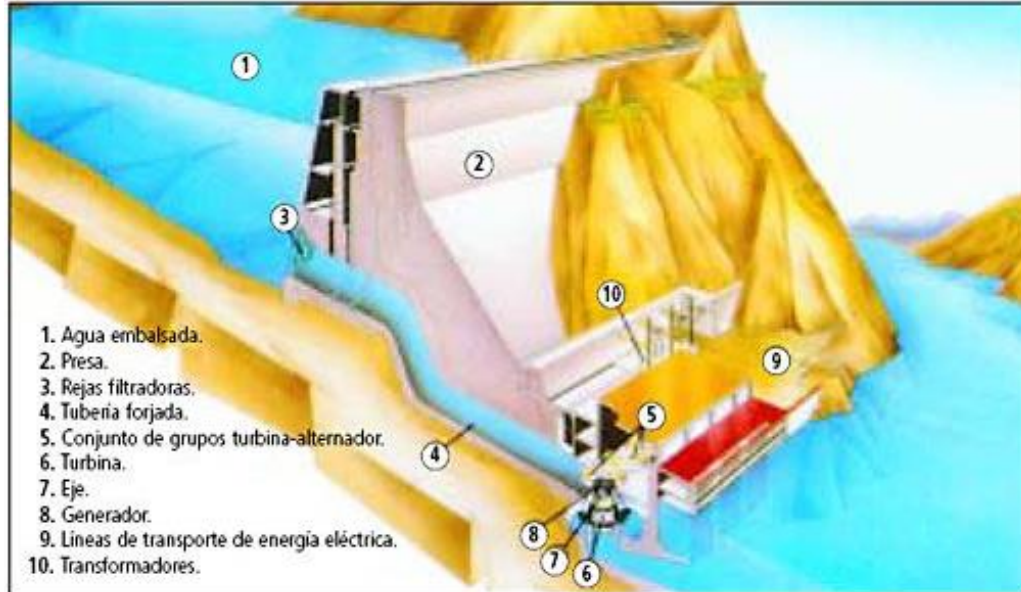


Figura 2. 10. Corte de una central hidroeléctrica.

2.10. Central eólica

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

A pesar de que aproximadamente un 1% de la energía solar que recibe la Tierra se transforma en movimiento atmosférico, esta energía no se distribuye uniformemente, lo que limita su aprovechamiento.

Existen además limitaciones tecnológicas para superar potencias de un MegaWatt. Su funcionamiento está limitado a un rango de velocidades del viento y un parque eólico demanda extensiones de terreno grandes. Además, el número de horas que una central eólica está disponible para producir energía eléctrica, por ejemplo, en España está en el orden de entre el 20% y el 30% de las horas al año, valor bajo si se compara con los de las centrales térmicas y nucleares que consiguen cifras hasta del 93%. Otro aspecto que limita su importancia es que, debido a la intermitencia del viento, no garantiza potencias para abastecimiento de puntas de demanda.

En la Figura 2. 11, se puede observar la disposición de los aerogeneradores en un parque eólico.



Figura 2. 11. Parque eólico.

2.11. Plantas undimotrices

La energía undimotriz es la energía producida por el movimiento de las olas marinas; el oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar, aunque este resulta muy irregular, podemos lograr un aprovechamiento para la obtención de energía.

Para este tipo de generación se han creado distintas máquinas, como la instalación de turbinas en el fondo del mar unidas a boyas, las cuales transmiten el movimiento de las olas hasta las turbinas, generando electricidad. Básicamente, las olas acceden a una cámara de aire, elevando el nivel de agua comprimiendo el aire del interior que, finalmente, será expulsado por una apertura superior, accionando una turbina o, lo que es lo mismo, se produce energía eléctrica.

Otro sistema, el conocido como "serpientes marinas" robóticas, -Anaconda (un proyecto de Checkmate Seaenergy) ó Pelamis- han sido así nombradas en honor a su forma. Consiste en la instalación de unas máquinas flotantes que obtienen energía del movimiento de sus distintas partes articuladas.

Aunque hay instalaciones que funcionan con éxito, algunas están en fase experimental y, tanto estas como las comerciales, todavía son escasas. Como ocurre con otros tipos de energías del mar (potencia osmótica, maremotérmica, energía de las corrientes o mareomotriz), también la energía de las olas está todavía en estudio y mejora. Sobre todo, teniendo en cuenta la enorme fuente de energía limpia y renovable que pueden ofrecernos el mar, un recurso igualmente inagotable.

En la Figura 2. 12, se muestra el convertidor Pelamis que transforma la energía del movimiento de las olas en electricidad.



Figura 2. 12. Pelamis.

2.12. Plantas mareomotrices

La energía de las mareas se transforma en electricidad en las denominadas centrales mareomotrices, que funcionan como un embalse tradicional de río. El depósito se llena con la marea y el agua se retiene hasta la bajamar para ser liberada después a través de una red de conductos estrechos, que aumentan la presión, hasta las turbinas que generan la electricidad. El costo de mantenimiento de este tipo de centrales es muy elevado.

El lugar ideal para instalar una Central mareomotriz es un estuario, una bahía o una ría donde penetre el agua al mar.

La construcción de una central mareomotriz es solo posible en lugares con una diferencia de al menos 5 metros entre la marea alta y la baja.

El agua, al pasar por el canal de carga hacia el mar, acciona la hélice de la turbina y esta, al girar, mueve un generador que produce electricidad.

En la Figura 2. 13, se muestran los componentes de una central mareomotriz.

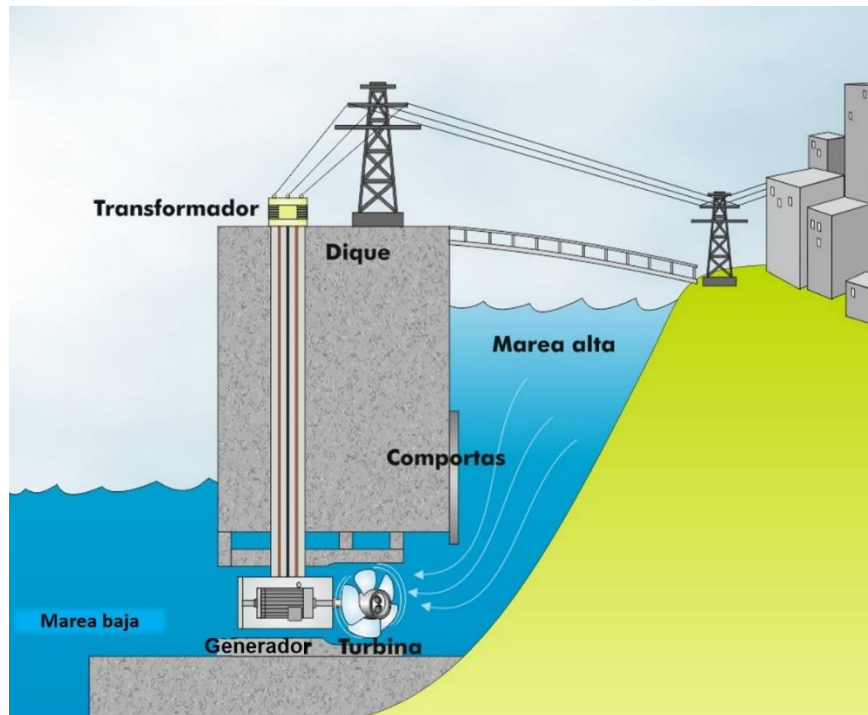


Figura 2. 13. Central mareomotriz.

2.13. Clasificación de centrales en base a su disposición

De forma general, también podemos clasificar a las centrales dependiendo del tipo de servicio que van a dar:

- Centrales de base o de carga base.
- Centrales de carga pico.
- Centrales de reserva.
- Centrales de bombeo.

2.13.1. Centrales de base o de carga base

Estas son las centrales destinadas a suministrar la mayor parte de la energía eléctrica que demanda un sistema en forma continua, por lo general son centrales termoeléctricas de las de mayor potencia en el sistema, algunas hidroeléctricas y las nucleoelectricas.

2.13.2. Centrales de carga pico

Son aquellas que suministran la energía eléctrica en las horas de demanda pico; pueden ser centrales hidroeléctricas que operen en forma combinada para base y carga pico algunas o bien, para cubrir picos no muy elevados por medio de plantas de gas o ciclo combinado ya que estas pueden entrar en operación de manera más rápida.

2.13.3. Centrales de reserva

Son aquellas que tienen como finalidad sustituir en forma parcial o total a las centrales hidráulicas usadas para carga base cuando falta agua o bien, se presenta alguna falla en la parte eléctrica. La operación de estas centrales se puede decir que es intermitente. Por lo general son pequeñas plantas termoeléctricas o termoeléctricas de baja eficiencia.

2.13.4. Centrales de bombeo

Este tipo de centrales son hidroeléctricas en las cuales se aprovecha el sobrante de potencia en la central durante las horas de poca demanda para llevar el agua de un lago o un río hasta un depósito mediante bombas centrifugas que se accionan por medio de los generadores de la central, siendo utilizados como motores. En los periodos de gran demanda trabajan como generadores.

La Figura 2. 14, describe las partes de una central hidroeléctrica de bombeo.

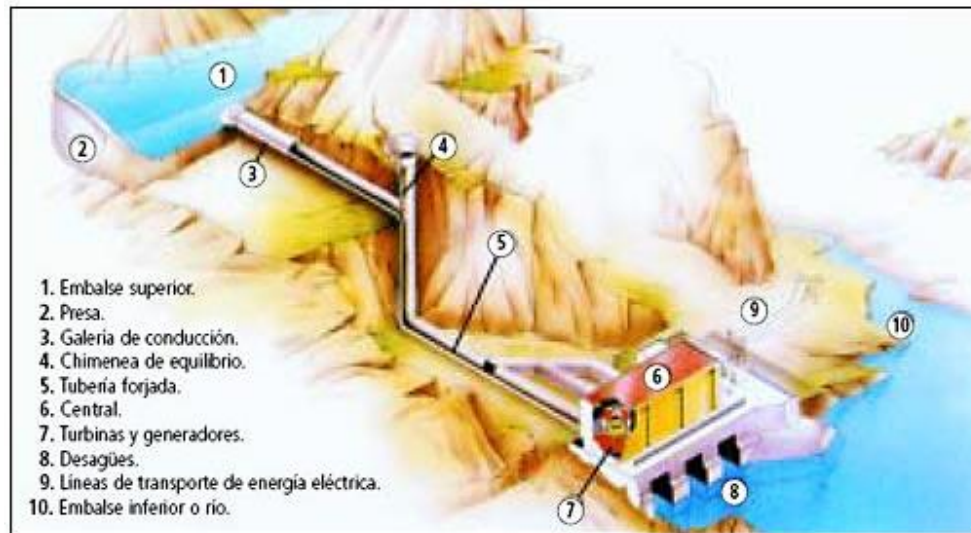


Figura 2. 14. Corte de una central hidroeléctrica de bombeo.

Una central eléctrica no almacena energía, sino que su producción sigue a la demanda solicitada por los usuarios. Como esta demanda es variable a lo largo del día, y con la época del año, las centrales eléctricas pueden funcionar con una producción variable. Sin embargo, la eficacia aumenta si la producción es constante; para ello existe un camino para almacenar la energía producida en horas de bajo consumo, y usarla en momentos de fuerte demanda, mediante las centrales hidráulicas de bombeo. Estas centrales tienen dos embalses situados a cotas diferentes. El agua almacenada en el embalse superior produce electricidad al caer sobre la turbina, como antes se indicó, cubriendo las horas de fuerte demanda. El agua llega posteriormente al embalse inferior, momento en que se aprovecha para bombear el agua desde el embalse inferior al superior, usando la turbina como motor, si fuera reversible, o el alternador.

2.14. Ciclo combinado de gas y de vapor

Se denomina ciclo combinado a la conjugación de dos ciclos térmicos, uno que opera con turbina de gas y otro con turbina de vapor, con el fin de utilizar mejor

el calor necesario en la conversión energética, y de elevar el rendimiento térmico global.

Este ciclo gas-vapor encuentra su fundamentación en el hecho de que la turbina de gas expulsa gases con alta energía calorífica los que se busca utilizar en un ciclo de vapor.

Los gases de escape de la turbina de gas con o sin quemado de combustible adicional, sirven de fuente caliente del ciclo de vapor.

2.15. Ciclo combinado gas-vapor clásico, con o sin quemado de combustible en el recuperador

Este ciclo clásico combinado de gas-vapor es el que se representa esquemáticamente en la Figura 2. 15.

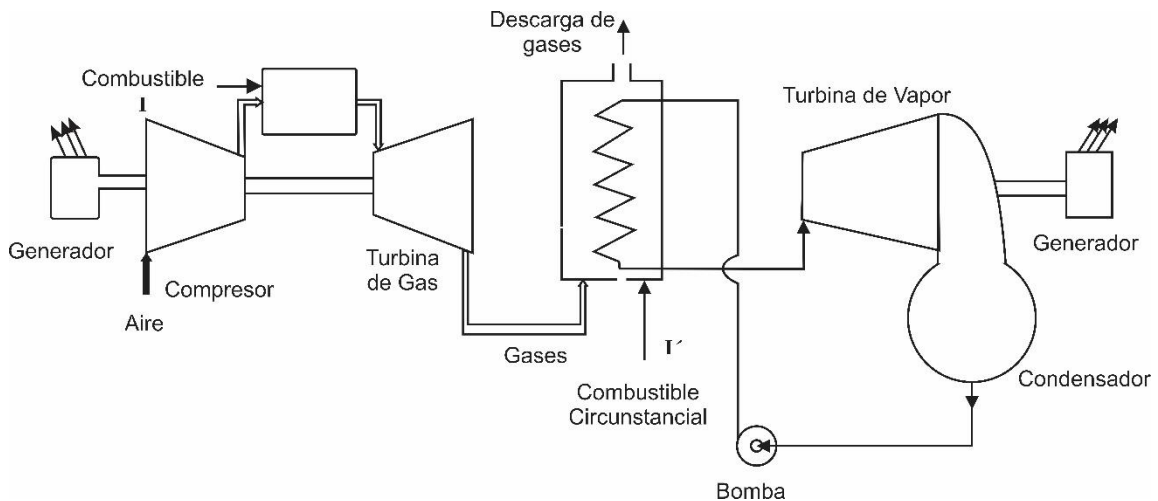


Figura 2. 15. Ciclo combinado gas-vapor clásico con alimentación directa de combustible, con o sin (I' abierto o cerrado) quemado de combustible adicional en el recuperador.

El ciclo de gas está representado por la línea doble. El ciclo de vapor, por la línea sencilla. En el recuperador los gases ceden energía calorífica al ciclo de vapor. El viene a ser la caldera o fuente caliente del ciclo.

El recuperador puede ser un simple intercambiador de calor de los gases con el agua, sin calor adicional. O bien, se puede quemar en el combustible adicional, con el exceso de aire que traen los gases, o inyectando aire secundario, con lo que se incrementa el calor disponible se eleva la temperatura y se mejora el rendimiento de éste.

La temperatura de los gases expulsados por la turbina de gas es del orden de 400 a 450°C, y en ciertos casos alcanza los 500°C. este nivel de temperatura prefijado determinará el quemado o no del combustible adicional en el recuperador, de acuerdo a la temperatura de trabajo que se imponga a la turbina de vapor. En ciertos casos 450° o 500°C es satisfactoria.

Estas temperaturas vienen condicionadas por la forma de compartir la potencia entre los dos ciclos de gas y de vapor. Como también debe estar definida la temperatura alta del ciclo de gas, que puede ser del orden de 1000°C o más, e igualmente la presión de descarga en el condensador de la turbina de vapor (del orden de 0.5bar). las temperaturas involucran a los flujos de masa en cada Ciclo, para un ponderado equilibrio de potencias. El rendimiento térmico del ciclo combinado va a depender de la temperatura alta y baja del mismo (Encinas, 1984).

2.16. Ciclo combinado gas-vapor, con generador de gases y de vapor, simultáneo, con aire a presión

La particularidad fundamental del mismo es que la generación de vapor se efectúa en el propio combustor de la turbina de gas con aire a presión y con alimentación directa de combustible. El calor de los gases expulsados por la turbina se aprovecha aquí para precalentar el condensado y el agua de alimentación del ciclo de vapor.

La ventaja que puede encontrarse a este arreglo es que se reduce el volumen del generador de vapor y se puede trabajar a temperaturas altas en el ciclo de

vapor sin combustión secundaria. Ofrece más dificultades el control de temperaturas, la instalación suele ser más costosa que la del ciclo clásico y el rendimiento térmico inferior, por lo que está menos desarrollado (Encinas, 1984).

Capítulo 3

Modelado de una central termoeléctrica con ciclo combinado

3.1. Introducción

A medida que los países se desarrollan, el consumo de energía va en aumento en forma similar, el crecimiento demográfico trae como consecuencia un incremento en la necesidad de suministro de satisfactores que básicamente se pueden agrupar como: vivienda, alimento y energéticos. En esto último entra el suministro de energía eléctrica.

Cada día crece la demanda energética con la implementación de más aparatos y sistemas de automatización, no solo en las industrias y oficinas sino también en los hogares, donde además ya existe un sinnúmero de gadgets a los cuales nos hemos apegado para vivir el día a día, mismos que requieren energía eléctrica para su funcionamiento. Así mismo podemos mencionar la tendencia que tiene la industria automotriz a depender cada día más de la electricidad, no solo para sus procesos de fabricación, sino también como la energía que mueva sus autos en lugar del combustible.

El consumo de energía eléctrica puede cambiar debido a diversos factores, pero de cualquier manera se espera que no existan cambios demasiado sustanciales a lo largo del tiempo para que este estudio sobre las centrales eléctricas de ciclo combinado siga conservando validez.

3.2. Termoeléctricas de ciclo combinado

Una central de ciclo combinado es una planta que produce energía eléctrica con un generador accionado por una turbina de combustión, que utiliza como

combustible principal gas natural. En este proceso las altas temperaturas de los gases de escape de la combustión son aprovechados para calentar agua en una caldera de recuperación (HRCG) que produce vapor de agua aprovechable para accionar una segunda turbina. Esta segunda turbina, de vapor, puede accionar el mismo generador que la de gas u otro distinto. Se conjugan así las ventajas de los ciclos termodinámicos de gas y de vapor, ya que se logra una alta temperatura de absorción en el ciclo de la turbina de gas con eficiencias hasta del 55%.

Los fabricantes de turbinas de gas y plantas de ciclo combinado indican las siguientes razones para justificar el mayor uso de los mismos:

- Disponibilidad de grandes volúmenes de gas natural.
- Posibilidad de uso de otros combustibles, además del gas natural: gasóleo, GLP, carbón gasificado, etc., con rendimientos elevados, pero con limitaciones en el funcionamiento de los quemadores.
- Elevados rendimientos con buen factor de carga.
- Alta disponibilidad de estas centrales, pueden funcionar sin problemas hasta 8300 horas equivalentes al año.
- Menores emisiones de CO_2 por kWh producido.
- Menores requerimientos de refrigeración respecto a una central convencional de igual potencia, en torno a un 35%.
- Corto plazo de construcción, que oscila en torno a los dos y tres años.
- Posibilidad de comenzar a generar el 65% de la potencia total en un corto espacio de tiempo, que puede rondar los 12-14 meses.
- Economía en la inversión. Los ciclos combinados son la tecnología de generación más barata.
- Debido al alto grado de automatización, requieren de menor cantidad de recursos humanos para su mantenimiento y control que una central tradicional, por lo que los costos de explotación son menores.

En la Figura 3. 1, muestra el corte de una turbina de gas de la firma SIEMENS.

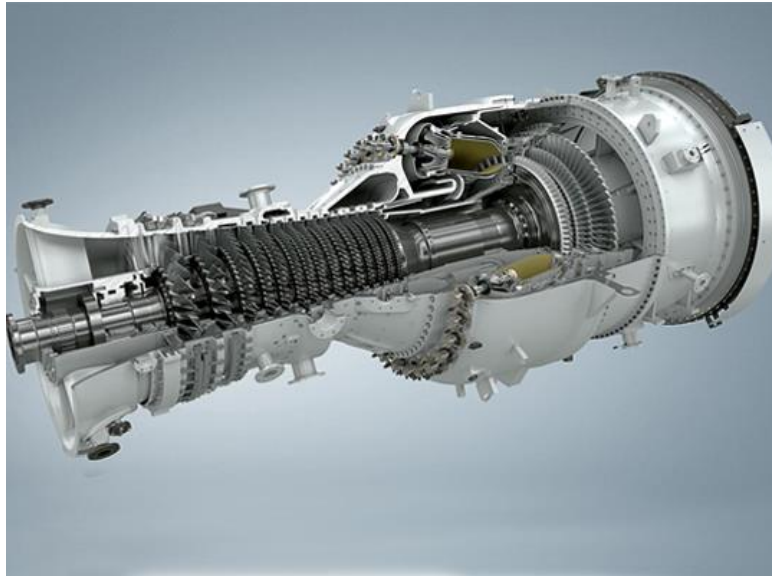


Figura 3. 1 Vista interior de una turbina de gas de la firma SIEMENS.

En la Figura 3. 2, se muestra la vista interior de una turbina de vapor de la firma SIEMENS.

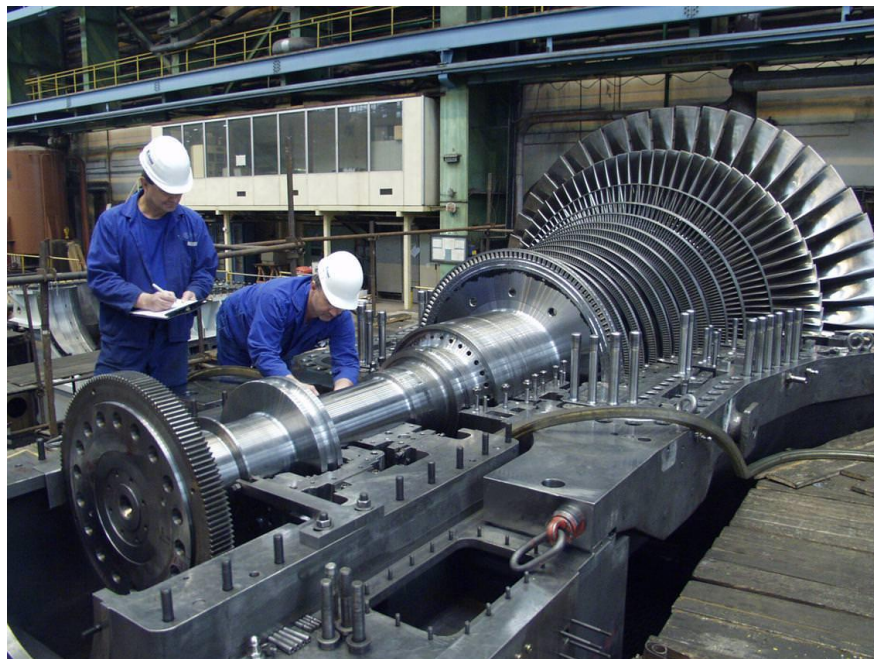


Figura 3. 2 Turbina de vapor de la firma SIEMENS.

Los elementos comunes a cualquier central de ciclo combinado son los siguientes:

- La **turbina de gas o el conjunto de ellas**: La turbina de gas es la responsable de liberar la energía química contenida en el combustible, transformado una parte en energía mecánica que mueve el eje del alternador, y otra parte en energía térmica que sale por el escape y que se aprovecha como fuente de calor en el generador de vapor.
- El **generador de vapor**: encargado de convertir la energía contenida en los gases de escape de la turbina de gas en energía potencial, en forma de vapor a una presión y temperatura determinada.
- El **ciclo agua-vapor**, que es el conjunto de elementos encargados de transportar este vapor en las condiciones adecuadas desde el generador de vapor hasta la turbina de vapor.
- La **turbina de vapor**, encargada de convertir la energía potencial del vapor en energía mecánica rotativa.
- El **generador o generadores**, que acoplados a los ejes de las turbinas de gas y vapor se encargan de transformar la energía mecánica rotativa en energía eléctrica.
- **Sistema eléctrico**, que permite tanto la alimentación de los equipos auxiliares de la planta, como la exportación de la energía eléctrica producida.
- El **sistema de alimentación de combustible**. Las centrales de ciclo combinado tienen como combustible principal el gas natural, aunque en muchos casos se cuenta con combustible diésel de cierta calidad (mayor calidad que el utilizado en automoción) bien como combustible principal y único, o bien como combustible alternativo al gas natural.
- **Sistemas de refrigeración**: Al final, siempre una parte de la energía térmica contenida en el combustible no será aprovechada en la planta y debe ser evacuada al medio ambiente que rodea ésta. Puede evacuarse bien al aire, a través de aerocondensadores o de torres de refrigeración, o

bien al agua de un cauce público (un río o el mar), a través del condensador. Un objetivo muy importante del diseño de una central de ciclo combinado es minimizar esta cantidad de calor desaprovechada y evacuada al aire o al agua.

- **Sistema de tratamiento de agua.** Tanto el sistema de refrigeración como el de aprovechamiento de calor requieren unas especificaciones en las características físico-químicas del fluido que utilizan (generalmente agua) que requiere de una serie de sistemas para su tratamiento y control.
- Otros **sistemas auxiliares**, como la planta de tratamiento de efluentes, el sistema contra incendios o el de producción de aire comprimido.
- **Sistema de control**, que se encarga del gobierno de las instalaciones, normalmente muy automatizadas.

3.3. Configuraciones habituales en centrales de ciclo combinado

En la configuración de un ciclo combinado gas-vapor es relativamente habitual que varias turbinas de gas alimenten con el vapor que producen sus calderas de recuperación de calor a una única turbina de vapor. Este hecho obliga a presentar una clasificación atendiendo al número de equipos principales existentes en la central.

Los equipos vistos hasta ahora pueden combinarse de varias formas, dando lugar a diferentes configuraciones de central de ciclo combinado. Cada una de ellas tiene sus ventajas e inconvenientes, que hacen que en determinadas ocasiones sea preferible construir una planta de acuerdo a una configuración determinada, y en otras, una configuración diferente. Hay que tener en cuenta siempre que la potencia total de las turbinas de vapor de la instalación debe ser aproximadamente igual a la mitad de las potencias de las turbinas de gas con las que cuente la instalación (RENOVETEC, s.f.).

La disposición relativa de los ejes de la turbina de gas y de la turbina de vapor, según se encuentren alineados o no, hace que se pueda establecer otra

clasificación atendiendo al número de ejes principales de que consta el tren de potencia:

- Centrales mono-eje.
- Centrales multi-eje.

La Figura 3. 3, muestra la configuración mono-eje, la cual es la más sencilla de todas.



Figura 3. 3 Configuración mono-eje.

La configuración mono-eje supone que una turbina de gas y una turbina de vapor se unen en un mismo eje para accionar un único generador. Es una solución barata y efectiva, que permite además ahorrar costos de ingeniería, ya que la solución mono-eje suele estar ya prediseñada.

Además, en los mono-eje, el generador puede estar en el extremo del eje (mayor facilidad de mantenimiento) o entre la turbina de gas y la de vapor. En este último caso hay un embrague que acopla la turbina de vapor con el eje de la turbina de gas y el generador, permitiendo producir energía funcionando solo la turbina de gas.

Las configuraciones más comúnmente utilizadas en las centrales de ciclo combinado gas-vapor en operación comercial en la actualidad son las siguientes:

- Configuraciones 1x1: una turbina de gas alimenta a una caldera de recuperación de calor y produce vapor para un único ciclo Rankine.
- Configuraciones 2x1: dos turbinas de gas que alimentan cada una de ellas a su correspondiente caldera de recuperación de calor y producen vapor para un único ciclo Rankine.

- También son posibles las configuraciones 3x1, 4x1, etc.

Es importante destacar que, para las configuraciones 2x1 y 3x1, cuando por una situación operativa de la Central al menos una de las calderas está fuera de servicio y la otra funcionando, existe la posibilidad de que puedan producirse retornos de vapor desde el colector común de vapor a las calderas que están fuera de servicio. Si esto ocurre, pueden producirse daños a los tubos y materiales no aleados de la caldera. Para evitarlo, y desde el proceso de especificación, se debe poner especial énfasis en una alta calidad de las válvulas de retención y cierre.

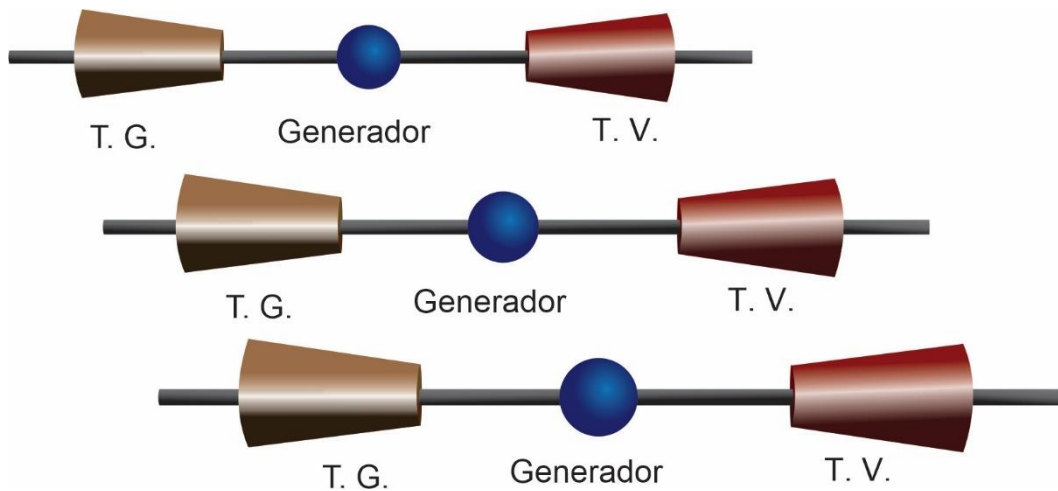


Figura 3. 4. Configuración Nx1x1.

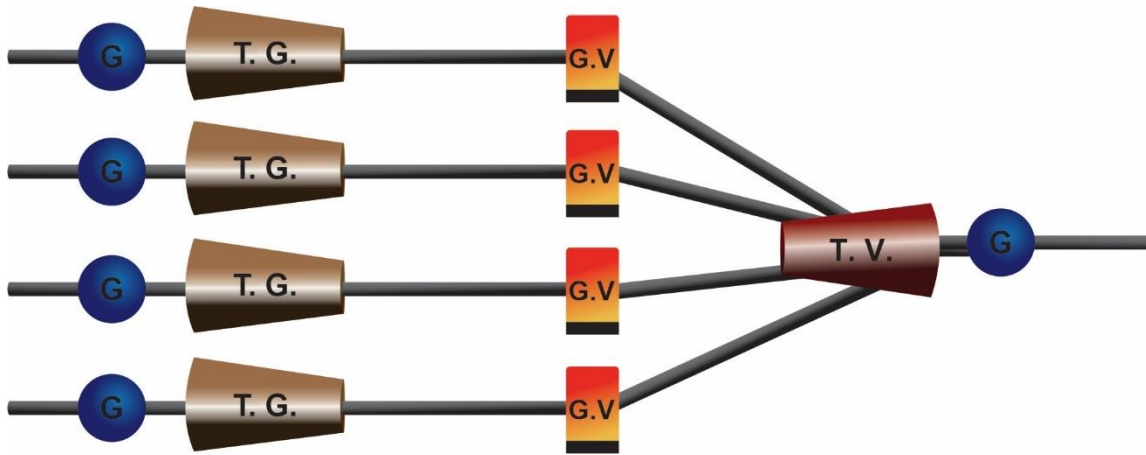


Figura 3. 5. Configuración Nx1.

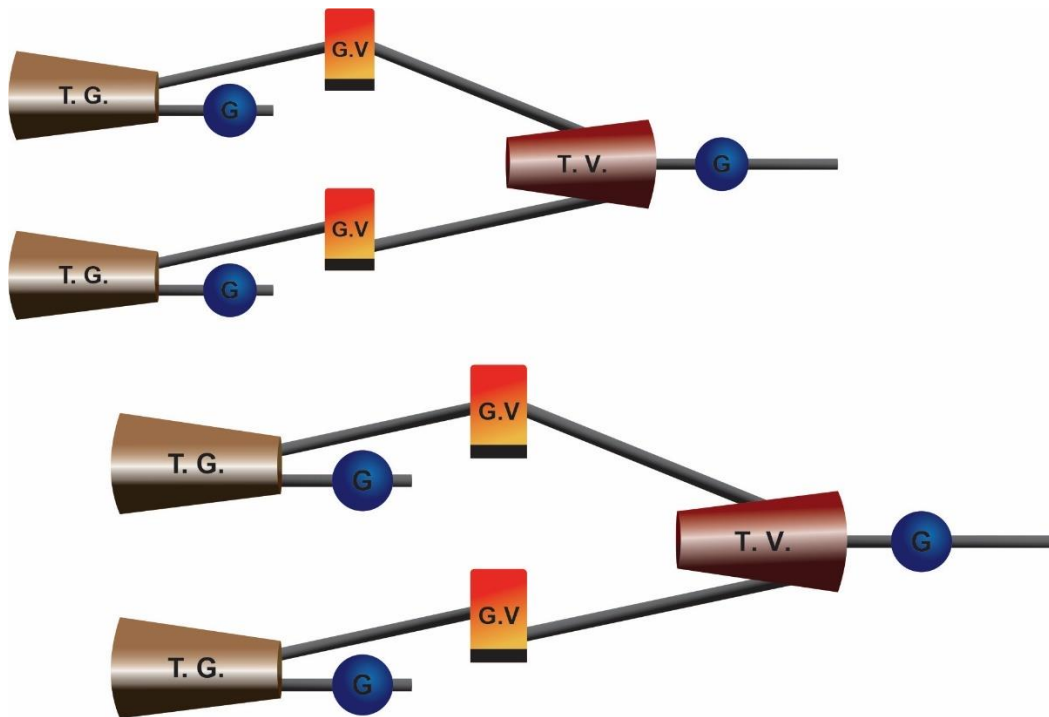


Figura 3. 6. Configuración NxNx1.

3.3.1. Configuración multi-eje 1x1

La segunda configuración posible, consiste en diseñar centrales de ciclo combinado en las que la turbina de gas y la turbina de vapor no estén unidas, y ambas se conecten a su propio generador, tal como se muestra en la Figura 3. 7.

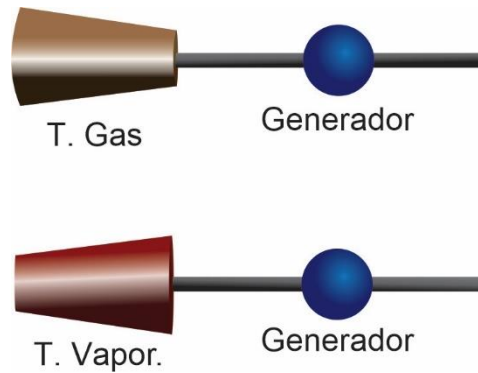


Figura 3. 7. Esquema de una configuración multi-eje 1x1.

Las ventajas de esta configuración son las siguientes:

- Posibilidad de funcionamiento con solo una turbina de gas, derivando los gases a la atmósfera si fuese necesario.
- Mayor disponibilidad de la turbina de gas, al poder operar esta en caso de una avería en la turbina de vapor.
- Admite el condensador con disposiciones axial e inferior.
- Al disponer de dos alternadores puede suministrar energía eléctrica con dos tensiones.
- Fácil mantenimiento de generadores y turbinas.

Inconvenientes:

- Requiere dos generadores y dos transformadores con el consiguiente incremento de inversión.
- Mayor necesidad de área.
- Puente grúa más grande.

La Figura 3. 8, muestra la configuración de un ciclo combinado multi-eje 1x1.

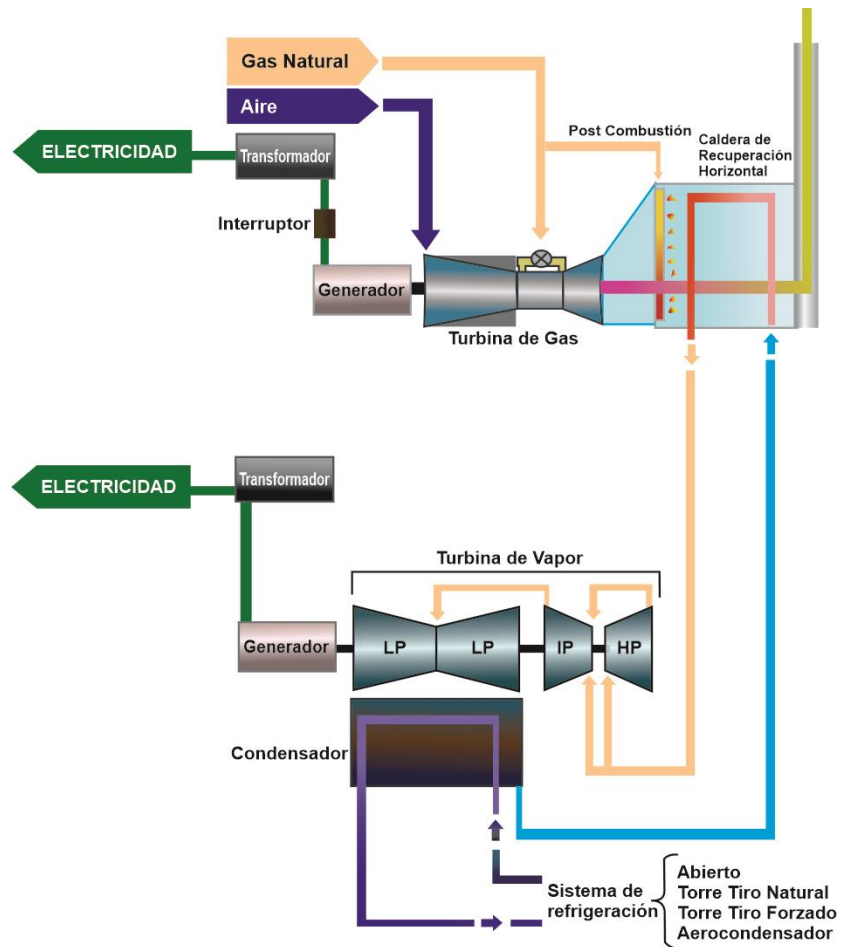


Figura 3. 8. Ciclo combinado en configuración 1x1 multi-eje.

3.3.2. Configuración mono-eje 1x1 con embrague

Ventajas:

- Requiere un alternador menos que la configuración multi-eje.
- El generador, al estar ubicado entre la turbina de gas y la de vapor, proporciona un mayor equilibrio a todo el conjunto.
- Menor coste de inversión que la configuración multi-eje.

- Menor coste de obra civil. Esto es debido a la menor altura necesaria del pedestal del turbogenerador, al poder disponer el condensador de forma axial.
- Puente grúa de menor luz que la configuración multi-eje.
- Menor espacio requerido que la configuración multi-eje.
- El embrague requiere un sistema de arranque más sencillo al poder independizar el rodaje de la turbina de gas de la de vapor. A diferencia del montaje sin embrague, en esta configuración no es necesaria una caldera auxiliar para el calentamiento previo del vapor en el arranque de la turbina.

Inconvenientes:

- Menor flexibilidad de operación que la configuración multi-eje, ya que en general esta configuración no suele llevar chimenea de by-pass.
- Evacuación de energía a través de un solo generador y por tanto menor fiabilidad del conjunto. En la configuración multi-eje cada alternador a través de su transformador puede alimentar sistemas de transporte con diferentes tensiones.
- Mayor dificultad en la revisión del generador, al tener que desplazarlo lateralmente para poder extraer su rotor.
- No es posible el montaje y la puesta en marcha por fases, a diferencia de la configuración multi-eje.

La Figura 3. 9, muestra la configuración de un ciclo combinado mono-eje 1x1 con generador en el centro.

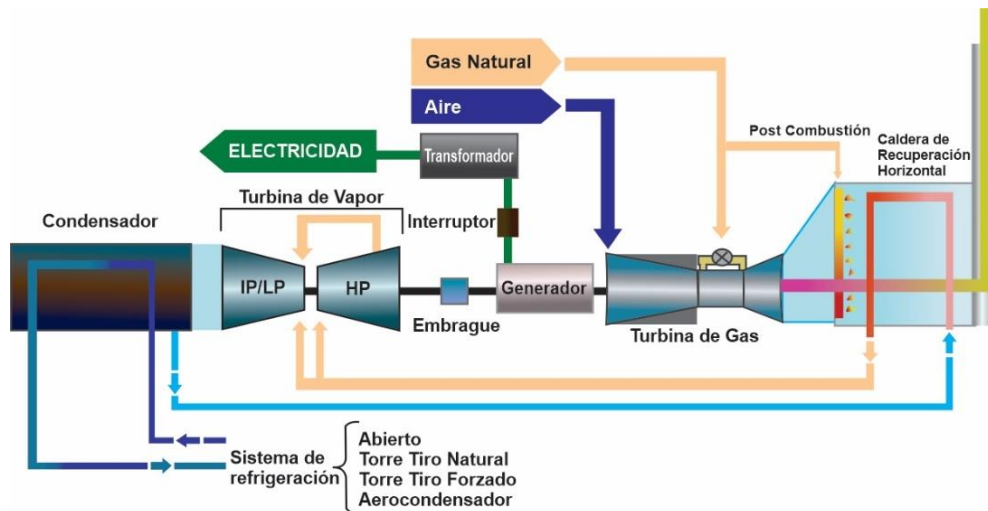


Figura 3. 9. Ciclo Combinado en configuración 1x1 mono-eje (con generador en el centro).

3.3.3. Configuración mono-eje 1x1sin embrague

Las ventajas e inconvenientes con respecto a la configuración multi-eje son similares a las descritas en la configuración mono-eje con embrague, teniendo las siguientes diferencias (RENOVETEC, s.f.):

- El hecho de disponer el generador en un extremo facilita su revisión e inspección.
- Al no situar el condensador en posición axial, esta configuración requiere un pedestal de mayor altura y mayor inversión en obra civil que en la configuración mono-eje con embrague.
- Frente al resto de configuraciones, el arrancador estático de la turbina de gas es de mayor potencia, al tener que arrastrar la turbina de vapor en el inicio del rodaje.
- Requiere una caldera auxiliar en los arranques para proporcionar vapor de cierres, vapor de vacío (si este se hace con eyectores) y refrigeración inicial de la turbina de vapor durante el rodaje.

La Figura 3. 10, muestra el detalle de la configuración 1x1 mono-eje con generador al extremo del eje.

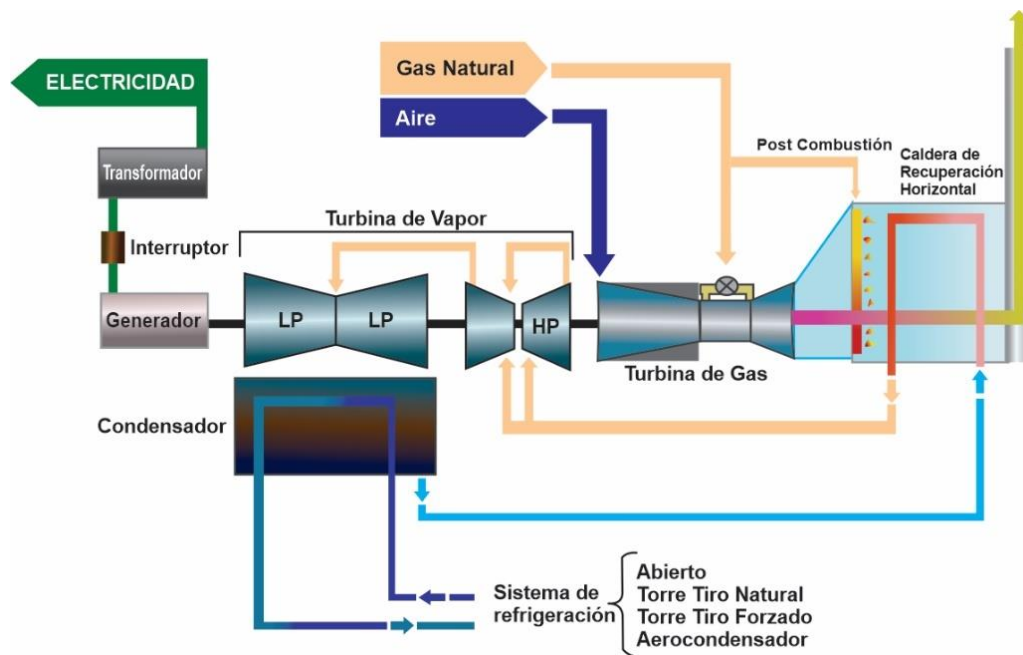


Figura 3. 10. Ciclo combinado en configuración 1x1 mono-eje (con generador al extremo del eje).

3.3.4. Configuración 2x1

La configuración 2x1 es sin duda la más habitual para una central de ciclo combinado de nueva construcción, por diferentes razones. En esta configuración la planta cuenta con dos turbinas de gas de igual potencia, acopladas cada una a su propio generador y con salida de gases a dos generadores de vapor (HRSG) independientes. En el siguiente diagrama de la Figura 3. 11, podemos observar la disposición de los componentes en esta configuración (RENOVETEC, s.f.).

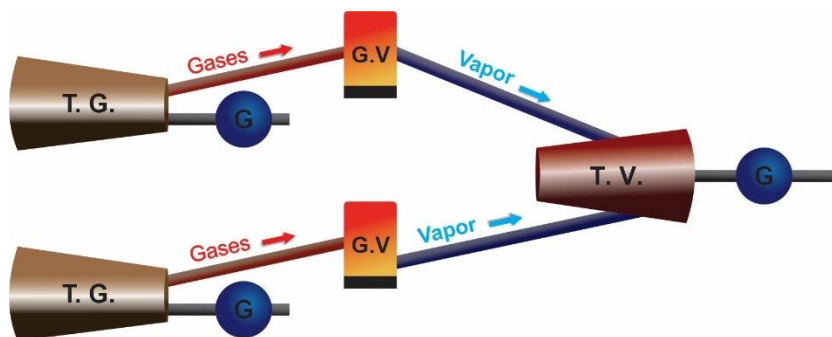


Figura 3. 11. Diagrama de la configuración 2x1.

Ventajas:

- Menor costo de inversión que dos mono-ejes de la misma potencia (aproximadamente un 10%).
- Mayor flexibilidad de operación, al posibilitar el funcionamiento con una turbina de gas y una turbina de vapor y arrancar de forma rápida la segunda turbina de gas.
- Mejor rendimiento a cargas parciales, y especialmente al 50% de carga, al poderse reducir la potencia en solo una de las turbinas de gas.
- Fácil acceso para el mantenimiento de los generadores.
- Equipos de arranque estáticos de turbina de gas pequeños.
- No es necesaria una caldera auxiliar.
- Posibilidad de emplear alternadores refrigerados por aire al ser estos de menor potencia.

Inconvenientes:

- La avería de la turbina de vapor deja fuera de servicio todo el ciclo combinado si no se dispone de by-pass de gases en las turbinas de gas.

En la Figura 3. 12, se presenta la configuración de ciclo combinado 2x1.

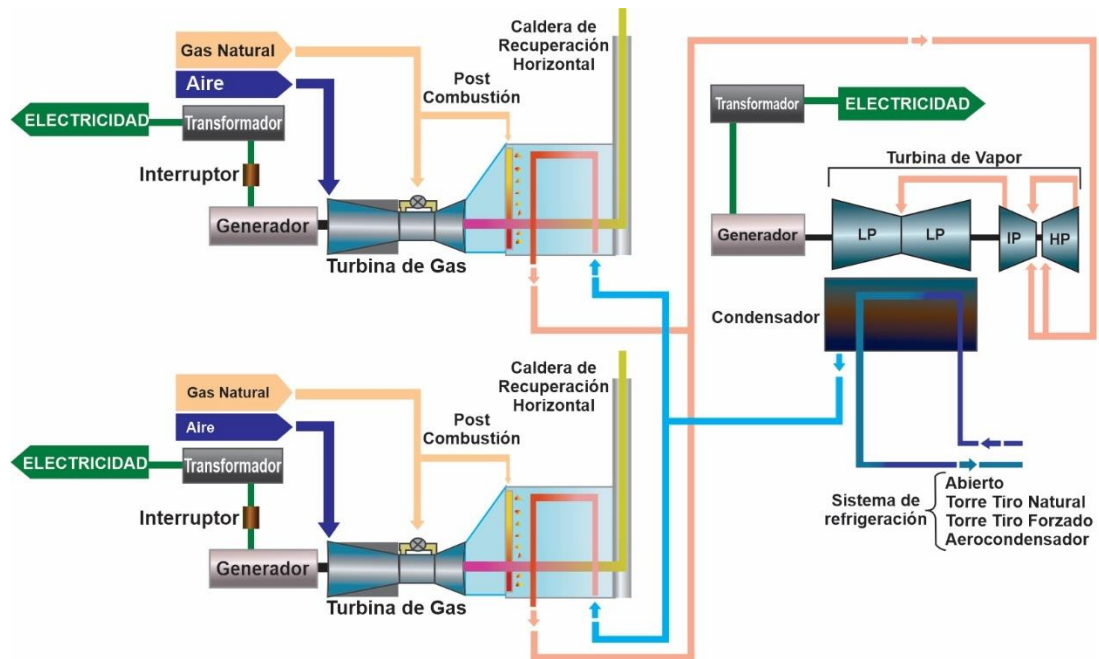


Figura 3. 12. Ciclo combinado en configuración 2x1.

Hay otras configuraciones especiales como pueden ser centrales ISCC y centrales IGCC mostradas en la Figura 3. 13.

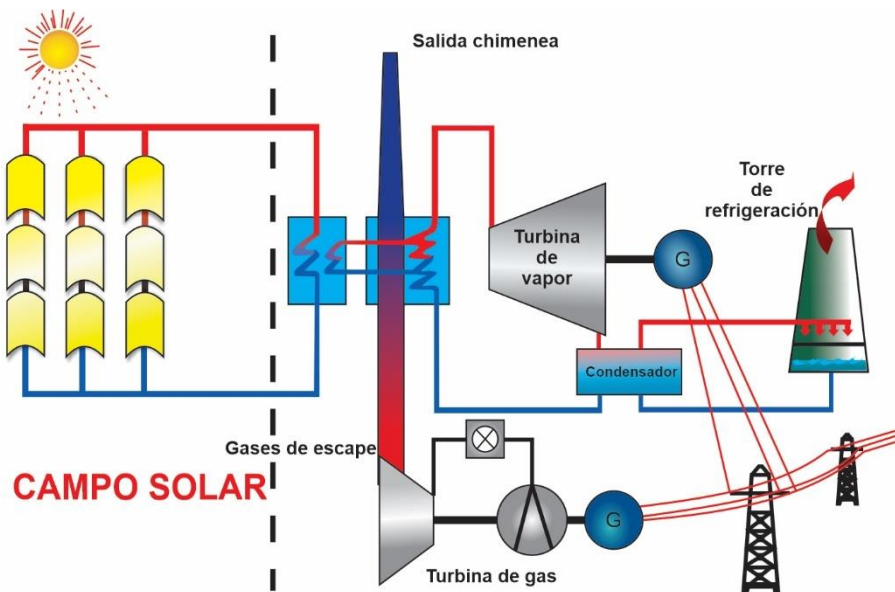


Figura 3. 13. Configuraciones especiales de ciclo combinado.

3.4. Parámetros característicos de una central termoeléctrica de ciclo combinado

Toda Central termoeléctrica tiene parámetros característicos que la definen. Al identificar estos parámetros podemos darnos una idea completa de las características de la instalación. A continuación, se mencionan los parámetros característicos propios de una central de ciclo combinado (RENOVETEC, s.f.).

- Potencia bruta y neta.

Al hablar de la potencia de una Central de generación estamos hablando del principal parámetro característico de esta.

En una central de ciclo combinado la potencia depende de las condiciones ambientales. Por tanto, informar sobre la potencia que puede alcanzar la instalación requiere indicar exactamente en qué condiciones se expresa.

- Marca y modelo de la turbina de gas.

Teniendo en cuenta que todo el diseño de una central de ciclo combinado se realiza en función de la turbina de gas elegida, para caracterizar a una de estas centrales es preciso indicar quien es el tecnólogo y cuál es el modelo elegido de turbina.

- Configuración.

Uno de los parámetros característicos de un ciclo combinado será la configuración adoptada de las turbinas de gas y vapor.

- Rendimiento global.

El rendimiento es el cociente entre la energía eléctrica generada en un periodo de tiempo y la energía térmica aportada en forma de combustible en el mismo periodo, ambos expresados en las mismas unidades:

- Heat Rate.

El Heat Rate (HR) o consumo específico es otra forma de indicar el rendimiento.

Se define como la cantidad de energía térmica, necesaria para generar un kW•h de energía eléctrica.

- Combustibles empleados.

Es conveniente, a la hora de caracterizar un ciclo combinado, indicar tanto el combustible principal que utiliza la central como el combustible auxiliar disponible en caso de que el suministro del principal fallara

- Tipo de HRSG.

Conviene indicar que tipo de generador de vapor se ha elegido para cada una de las turbinas: horizontal o vertical. También es conveniente indicar si cuenta o no con postcombustión.

- Niveles de presión del ciclo agua-vapor.

Los ciclos combinados pueden tener configurado el ciclo agua-vapor con uno, dos o tres niveles de presión.

- Tipo de refrigeración.

Una central de ciclo combinado puede disponer de tres tipos de sistemas de refrigeración para evacuar el calor latente de condensación del vapor a la salida de la turbina: ciclo abierto, ciclo semiabierto y ciclo cerrado.

- Tipo de generador.

Los generadores empleados en un ciclo combinado pueden ser de 2 o de 4 polos, dependiendo de la velocidad a la que giren las turbinas.

- Posibilidad de arranque desde cero tensión.

Muchas centrales, especialmente las que se instalan en países en vías de desarrollo o en zonas de especial inestabilidad de la red eléctrica, disponen de la

posibilidad de arrancar desde cero, sin tensión de referencia y sin alimentación externa de los sistemas auxiliares.

- Tensión de generación.

La tensión del generador es proporcional a la velocidad de giro y a la intensidad del campo magnético del rotor.

- Tensión de salida.

Independientemente de la tensión del generador, la planta se conecta con la red de un país en algún punto, a una tensión determinada por la propia red. Un parámetro característico de una central de ciclo combinado es sin duda la tensión de salida de la instalación. Esta tensión define además el transformador principal, que debe transformar la tensión de generación en tensión de salida.

- Tipo de subestación.

El tipo de subestación también caracteriza una central de ciclo combinado. La subestación elevadora puede ser de intemperie, que es lo más habitual por ser lo más barato, o subestación blindada.

3.5. La turbina de gas en una central de ciclo combinado

Las turbinas de gas son turbomáquinas que, de un modo general, pertenecen al grupo de máquinas térmicas generadoras y cuya franja de operación va desde pequeñas potencias (30 KW para las microturbinas) hasta 500 MW para los últimos desarrollos (RENOVETEC, s.f.).

Sus principales ventajas son su pequeño peso y volumen en relación a su potencia, y la flexibilidad de su operación. Esto hace que sean máquinas cuyo uso para determinadas aplicaciones, especialmente las referidas a la generación de electricidad y a la propulsión de buques y aviones, esté en claro aumento.

Las turbinas de gas no son todas iguales, es evidente. Hay diferentes tipologías que pueden clasificarse de acuerdo con al menos tres criterios: el origen de su diseño, el tipo de cámara de combustión y el número de ejes que contiene.

Los parámetros que definen una turbina de gas, y que figuran normalmente en la ficha de datos técnicos que se incluye en el manual de operación y mantenimiento de la turbina o en los folletos publicitarios de la misma, son los siguientes:

- Datos identificativos.
- Tipo de turbina.
- Características constructivas.
- Parámetros técnicos.
- Prestaciones.

La turbina de gas tiene una serie de componentes que normalmente forman un bloque completo que se suministra ensamblado y probado. Los principales componentes de este bloque son:

Compresor de aire: La función del compresor es elevar la presión del aire de combustión (una vez filtrado) antes que entre en la cámara de combustión, en una relación que varía según la turbina.

Cámara de combustión: En ella tiene lugar la combustión, a presión constante, del gas combustible junto con el aire. Esta combustión a presión obliga a que el combustible sea introducido a un nivel de presión adecuado, que oscila entre 16 y 50 bar en caso de combustibles gaseosos, y superior en caso de combustibles líquidos.

Turbina de expansión: En la turbina es donde tiene lugar la conversión de la energía contenida en los gases de combustión, en forma de presión y temperatura elevada a potencia mecánica.

Rotor: El rotor o eje es el elemento al que se unen los álabes, y es el que 'acumula' o recibe la energía mecánica rotativa que le transfiere el fluido gaseoso que circula desde la cámara de combustión hasta el escape. Este rotor también

comunica la energía necesaria para el accionamiento del compresor, transfiriendo la energía necesaria a los álabes para que realicen el trabajo mecánico de la compresión.

Carcasa: La carcasa es el elemento que proporciona la estanquidad necesaria para que los gases circulen entre los diferentes puntos de la turbina manteniendo las diferencias de presión oportunas.

Cojinetes o rodamientos: Son el elemento que une carcasa y rotor, es decir, la pieza que une las partes fijas con las partes móviles de la turbina permitiendo el movimiento relativo entre ellas.

Elementos auxiliares: Estos pueden ser, el Sistema de filtración de aire de combustión, Sistema antihielo, Silenciador, Sistema de limpieza del compresor, Sistema de arranque, Sistema de lubricación, Refrigeración / Ventilación, Sistema antiincendios y de detección de gas.

Las turbinas de gas pueden utilizar dos tipos de combustibles:

- Gaseosos: gas natural, propano e hidrógeno.
- Líquidos: gasóleos, GLP, gasolinas y en algunos casos muy raros fuel-óleos de bajo contenido en azufre.

3.6. El generador eléctrico

El generador eléctrico rotativo es una máquina capaz de convertir el movimiento rotativo de un eje en energía eléctrica. En el caso concreto de las centrales de ciclo combinado el eje que acciona el generador está unido a una turbina de gas o a una de vapor (RENOVETEC, s.f.).

El generador eléctrico rotativo de corriente alterna se basa en el hecho de que al hacer girar unos cables que forman un circuito eléctrico cerrado en el interior de un campo magnético, en el circuito se genera una corriente de voltaje e intensidad variable: cuando la superficie encerrada por los hilos que forman el circuito eléctrico bobina se encuentra en posición completamente perpendicular a las

líneas del campo magnético el voltaje y la intensidad se hacen máximas, y cuando en cambio la superficie encerrada por los hilos es paralela a las líneas del campo magnético la tensión y la intensidad que circula por el circuito eléctrico se hacen cero.

Es posible clasificar los generadores eléctricos rotativos de acuerdo con diferentes criterios. Los más importantes son los siguientes:

- De acuerdo con el tipo de corriente.

De acuerdo con el tipo de corriente que generan, existen dos tipos de generadores: generadores de corriente continua y generadores de corriente alterna.

- De acuerdo con la velocidad de giro.

Los generadores pueden girar a una velocidad fija marcada definida por la frecuencia de la red eléctrica a la que están conectados o pueden tener una velocidad variable, que no se ajusta exactamente a la frecuencia de la red. Los primeros se denominan 'síncronos', y Los segundos se denominan 'asíncronos'.

- De acuerdo con el tipo de refrigeración.

De acuerdo con el tipo de refrigeración, los generadores se dividen en tres tipos principales: refrigerados por aire en circuito abierto, refrigerados por aire en circuito cerrado o refrigerados por otro gas, como el hidrógeno.

- De acuerdo con el número de fases.

De acuerdo con el número de fases con los que cuenta el generador, existen dos tipos principales: los generadores síncronos de corriente alterna monofásicos y los generadores trifásicos.

- Por el tipo de polos: Generadores de polos salientes, y Generadores de polos lisos.

Un generador tiene una serie de parámetros que lo identifican, y que dan una idea cuantitativa de las características o propiedades del generador. Estos parámetros, para cualquier máquina, se denominan 'parámetros característicos' o prestaciones. Los principales parámetros característicos de un generador son los siguientes: Potencia aparente máxima, Potencia activa y coseno, Intensidad máxima, Voltaje de generación, Número de polos del rotor, Número de fases del estator, Velocidad de rotación, Corrientes de excitación nominales, Razón de corto circuito RCC, Tipo de refrigeración, Tipo de excitatriz, Clase de servicio, Tipo de aislamiento, Grado de protección, La placa de características, La hoja de datos técnicos del generador.

3.7. El generador de vapor por recuperación de calor (HRSG)

Uno de los componentes principales más importantes y más problemáticos de una central térmica de ciclo combinado es el generador de vapor encargado de aprovechar el calor contenido en los gases de escape y convertirlo en energía potencial, en forma de vapor con una presión y una temperatura determinada.

Existen diferentes tipos de calderas, cada una es la solución ideal para un tipo de planta, por lo que uno de los trabajos de la ingeniería que diseña una central de ciclo combinado es la selección del tipo de caldera y del fabricante que más convenga al proyecto, no el más barato o el que indique en su oferta un plazo de construcción menor.

Las principales características que distinguen una caldera de recuperación de una caldera de combustión convencional son las siguientes:

- La caldera de recuperación se diseña teniendo en cuenta las características específicas de la turbina de gas a la que se va a acoplar.
- Al ser la temperatura de los gases relativamente baja (pese a la postcombustión, en el caso de turbinas) la transmisión de calor se efectúa principalmente por convección.

- La velocidad de paso de los gases viene limitada por la necesidad de mantener unas pérdidas de carga bajas. Esto hace que el coeficiente de transmisión de calor sea bajo, lo que obliga a disponer de una gran superficie de calentamiento.
- Al ser la diferencia entre la temperatura de los gases y el medio a calentar (agua o vapor) baja, y al ser bajo también el coeficiente de transmisión de calor, se diseña el evaporador y economizador con aletas.

Los parámetros más importantes que definen las características de un generador de vapor por recuperación de calor son:

- Tipo de caldera.
- Caudal de vapor producido.
- Presión y temperatura del vapor producido.
- Niveles de presión.
- Pinch Point.
- Diferencia entre la temperatura de saturación de vapor en las condiciones de vaporización y la temperatura del agua líquida a la entrada del vaporizador.
- Superficie de calefacción.

Los generadores de vapor deben estar dotados de una serie de elementos de seguridad, de acuerdo con el código de diseño elegido por la caldera y de acuerdo con las legislaciones de cada estado en el que se instalan. En general las seguridades de una caldera son:

- Válvulas de Seguridad.
- Válvulas del circuito de agua de alimentación.
- Válvulas de circuito de vapor.
- Indicadores de nivel.
- Sistema de alimentación de agua.
- Seguridad contra descargas eléctricas.
- Mirillas.

- Seguridad contra fallo de corriente eléctrica.
- Seguridad del aporte calorífico máximo.
- Órganos de regulación, seguridad y control por tratarse de generadores automáticos.
- Seguridad de presión máxima de vapor.
- Seguridad de presencia de llama.
- Seguridad de encendido para quemadores con encendido automático.
- Seguridades por bajo nivel de líquido.

3.8. El ciclo de agua-vapor

El ciclo agua-vapor de una central de ciclo combinado es relativamente simple, o al menos más simple que el de otras centrales termoeléctricas que emplean en ciclo Rankine para la transformación de la energía contenida en un combustible en energía mecánica rotativa. La sencillez se debe a que no requiere de los precalentadores de alta y baja presión para conseguir buenos valores de presión.

No obstante, el ciclo agua-vapor de una central de ciclo combinado se complica a medida que se añaden niveles de presión, de forma que con un nivel de presión el ciclo es relativamente simple, con dos niveles de presión en el HRSG la red de tubería se complica algo más y con tres niveles de presión la complejidad es elevada.

El sistema denominado ciclo agua-vapor se compone a su vez de al menos cinco subsistemas:

- El sistema de condensado, que incluye el condensador principal, el condensador de vapor de sellos y las bombas de condensado, denominadas a veces bombas de extracción.
- Sistema de agua de alimentación, que engloba el tanque de agua de alimentación, el desgasificador y las bombas de alta presión que alimentan los diversos circuitos del HRSG.

- El sistema de vapor, que incluye válvulas de atemperación, válvulas de bypass y las tuberías que componen el circuito de vapor.
- El sistema de vapor de sellos.
- El sistema de dosificación y muestreo.

El vapor es uno de los fluidos más comúnmente utilizados para calentar equipos o instalaciones en cualquier tipo de industria: química, petroquímica, alimentación, farmacéutica, en procesos de como el de producción de papel, lavandería, humidificación y en todos aquellos procesos en los que se requiera transportar calor a cortas distancias.

En una central de ciclo combinado se pueden encontrar hasta tres tipos diferentes de vapor, atendiendo a las características de presión y temperatura del fluido: Vapor saturado, Vapor sobrecalentado y Vapor recalentado.

El esquema que representa el ciclo agua–vapor en una central de ciclo combinado depende de los niveles de presión que tenga la central. Las configuraciones más habituales son tres: un nivel de presión, dos niveles, y la configuración de mayor rendimiento y mayor coste, con tres niveles de presión.

3.9. La turbina de vapor

La turbina de vapor de una central de ciclo combinado es un equipo robusto y sencillo, y como máquina industrial, es una máquina madura, bien conocida y muy experimentada.

Se conoce casi todo de ella, de su comportamiento mecánico y de sus principios de funcionamiento termodinámicos. Más del 50 % de la energía eléctrica generada en el mundo se produce diariamente con turbinas de vapor.

La turbina es el equipo encargado de transformar energía potencial en forma de presión de vapor en energía cinética de rotación.

El funcionamiento es aparentemente sencillo: se introduce vapor a una temperatura y presión determinadas; el vapor se expande, y al expandirse se acelera. Esa energía cinética del vapor se transfiere a unos álabes unidos a un eje rotor, haciendo girar éste. A la salida de la turbina, el vapor que se introdujo tiene una presión y una temperatura notablemente inferior, que puede ser incluso menor que la presión atmosférica.

La turbina es un equipo tan conocido y robusto que si se respetan una serie de normas elementales tiene una vida útil larga y exenta de problemas. Las cuatro normas que hay que cumplir de forma estricta son las siguientes:

- Utilizar un vapor de las características físico-químicas apropiadas.
- Respetar las instrucciones de operación en arranques, durante las variaciones de carga y durante las paradas del equipo, especialmente las rampas de calentamiento y enfriamiento del equipo.
- Respetar las consignas de protección del equipo, y si se observa algún síntoma de mal funcionamiento (vibraciones, temperaturas elevadas, falta de potencia, etc.) se debe parar y revisar el equipo. En ningún caso se deben sobrepasar los límites establecidos de determinados parámetros para poder continuar con ella en marcha o poder arrancarla. No deben alterarse pues los valores de las alarmas y consignas de protección, y es necesario vigilar de forma constante los avisos que emite el sistema de control.
- Realizar los mantenimientos programados con la periodicidad prevista por el fabricante.

Las turbinas de vapor se clasifican de acuerdo a diferentes criterios. Así, es posible clasificarlas según la forma de transformación de la energía en los álabes, la presión de entrada, la presión en el escape, y su conexión con otras turbinas para sumar su energía mecánica a un eje.

Los principales elementos que componen una turbina de vapor son: sistema de admisión, rotor, carcasa, cojinetes de apoyo, de bancada o radiales, cojinete de

empuje o axial, sistema de lubricación, sistema de extracción de vahos, sistema de refrigeración de aceite, sistema de aceite de control, filtro del aceite de lubricación, aceite de elevación de eje, sistema de sellado de vapor, virador, etc.

El sistema de control es un sistema independiente del sistema de control de la Central, y tiene como única misión el funcionamiento automático de la turbina. Además de controlar determinadas variables y actuar sobre una serie de dispositivos para garantizar un funcionamiento seguro del equipo, ayudan a hacer comprensible al operador el funcionamiento de la turbina y de los elementos asociados.

Existen una serie de elementos que están relacionados con la turbina de vapor, aunque no forman parte de ella. Entre estos elementos están los siguientes: Bancada, Nave de turbina, Puente grúa y Reductor.

3.10. Los sistemas eléctricos

La energía eléctrica producida en el generador tiene que abandonar la central para ser consumida en la red eléctrica de una zona, o incluso en algunos casos, para alimentar una industria, una población o un pequeño grupo de consumidores.

El transformador principal de una central eléctrica, o los transformadores principales en el caso de que la Central cuente con más de un generador tiene como función elevar la tensión desde el voltaje que generación hasta el del punto de conexión con la red. El transformador principal es sin duda el principal elemento del sistema de alta tensión.

Se denomina transformador a una máquina electromagnética que permite aumentar o disminuir el voltaje o tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia.

Los transformadores más habituales empleados en centrales eléctricas como transformador principal de salida son sin duda los transformadores sumergidos con depósito de expansión, de intemperie y trifásicos.

Un transformador trifásico sumergido en aceite de refrigeración con depósito de expansión consta de las siguientes partes principales:

- Bornes.
- Núcleo.
- Devanados.
- Sistema de refrigeración.
- Aisladores pasantes de salida.
- Instrumentación y protecciones.

Se denominan “estación eléctrica” a un conjunto de equipos y sistemas que permiten la conexión de dos redes eléctricas de corriente alterna que están a la tensión más alta posible, es decir a la más alta tensión normalizada de transporte de corriente alterna.

Una subestación es un conjunto de equipos y sistemas cuyo objetivo es enlazar dos redes eléctricas entre sí, en la que al menos una de ellas está a una tensión inferior a la correspondiente a las estaciones eléctricas.

Los elementos principales de una subestación de intemperie, la más habitual en una central de ciclo combinado para enlazar los generadores con la red eléctrica en la que vuelca la energía producida son: Seccionadores de línea, de barras y de puesta a tierra, Interruptor principal, Transformadores de tensión, Transformadores de intensidad, Conjunto de elementos de protección contra rayos, Protecciones eléctricas y Puesta a tierra.

3.11. Impacto ambiental de las centrales de ciclo combinado

En pleno siglo XXI cuando se quiere abordar un proyecto industrial de cualquier naturaleza hay que estudiar cual será el impacto ambiental de la actividad. Aunque es cierto que aún existen países en los que no es obligatorio. Estos estudios previos tienen un objetivo: determinar una serie de medidas correctoras que eviten que el medioambiente sufra un impacto negativo inasumible.

El Estudio de Impacto Ambiental se define como “el conjunto de estudios y sistemas técnicos que permiten estimar los efectos que la ejecución de un determinado plan, programa, proyecto, obra o actividad causa sobre el medio ambiente”.

Un ciclo combinado emite una serie de gases a la atmósfera que están normalmente vigilados de acuerdo con la normativa de cada país y con los compromisos internacionales que éstos adquieren.

Los efluentes líquidos de una central de ciclo combinado provienen del circuito de refrigeración y de los distintos procesos que se llevan a cabo. En cuanto al agua de refrigeración, las características del vertido dependen del sistema de refrigeración (circuito abierto o circuito cerrado, con torre de refrigeración) y del origen del agua que se utilice (agua de mar o agua dulce).

El ruido es un aspecto medioambiental cuya importancia ha ido aumentando en los últimos años. Es difícil definir el ruido con precisión.

Residuos tóxicos y peligrosos: como pueden ser:

- Aceites usados
- Envases de productos químicos
- Filtros de aire de entrada a turbina de gas u
- Otros residuos sólidos no tóxicos.

Una central de ciclo combinado puede verse afectada por accidentes o situaciones anómalas que supongan un riesgo medioambiental. Las normas ISO

14000 y la propia lógica indican que es necesario estudiar esos accidentes potenciales y modos de funcionamiento anormales que pudieran tener un impacto medioambiental negativo, para tratar de minimizar sus efectos.

Algunos ejemplos pueden ser: Roturas de tuberías de aguas de refrigeración, Derrames de aceites, Derrames de ácido sulfúrico o Fugas de metano entre otros.

Capítulo 4

Potencia de generación de una central termoeléctrica de ciclo combinado

4.1. Introducción

En este capítulo, se aborda matemáticamente el análisis de una central termoeléctrica de ciclo combinado. En el capítulo 1 se describen las centrales termoeléctricas y en la Figura 1.2 se ilustran los componentes que conforman una central termoeléctrica convencional. En esta ocasión se centra la atención en las de ciclo combinado multi-eje, donde se analizan para conocer el efecto que tienen las variables sobre el comportamiento total del ciclo, donde primeramente se estudian los resultados que nos arroja una configuración multi-eje 1x1.

Dado que siempre estamos en la búsqueda de una mejora en la eficiencia, como segundo análisis se agrega una etapa de recalentamiento y así se demuestra el aporte que se tiene con ello para su eficiencia.

La revista de Ingeniería Innovativa publicada en diciembre de 2018 menciona que el diseño de los sistemas térmicos y la optimización de las centrales termoeléctricas pueden tener diferentes enfoques, ya que existen diferentes maneras de incrementar la eficiencia del Ciclo modificando parámetros de operación que afecten directamente a la presión o temperatura del ciclo. Por ejemplo, Silvetri (1992), analizó una Central carboeléctrica de 100MW estudiando la importancia de varios parámetros de operación para optimizar el diseño de la turbina, concluyendo que es conveniente incrementar la presión y temperatura del ciclo para incrementar la potencia y eficiencia del ciclo.

Sin embargo, esta solución está limitada por la resistencia de los materiales de construcción, específicamente sobre la presión de recalentamiento, determina que al incrementar la presión se incrementa la temperatura del vapor recalentado, lo cual reduce las pérdidas en el ciclo.

Finalmente, como última parte de nuestro análisis, se exponen los resultados que se obtienen al tener una central de ciclo combinado, pero ahora en Multi-eje 2x1. Ya que como se puede ver en capítulos anteriores, esta configuración de Multi Eje 2x1 es de las más utilizadas por sus bajos costos de inversión, comparados con otras centrales de misma potencia, por lo cual se aplica el análisis para describir qué mejoras se obtienen respecto a los resultados de anteriores modelos.

4.2. Potencia de una central termoeléctrica de ciclo combinado multi eje 1x1

La Figura 4. 1, muestra la disposición de elementos en una central termoeléctrica de ciclo combinado.

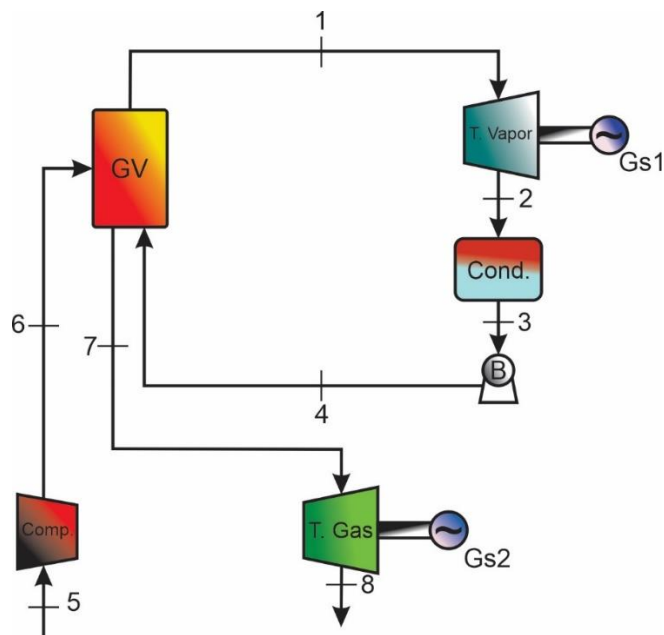


Figura 4. 1. Diagrama de una central de ciclo combinado.

En este documento no se abordan detalles técnicos de materiales, como ya se mencionó, la intención es demostrar matemáticamente el cambio en la eficiencia del ciclo térmico propuesto.

En la Figura 4.1, se tiene una central termoeléctrica convencional formada por: generador de vapor, turbina de vapor, condensador y bomba. El ciclo termodinámico que permite analizar esta central es el ciclo Rankine. Así mismo, la sección de la planta de turbina de gas está formada por: compresor, en lugar de la cámara de combustión se introduce al generador de vapor para suministrarle las características de calor al gas que realiza el trabajo mecánico en la turbina de gas y finalmente la descarga del gas a la atmósfera. Esta sección sigue el comportamiento de acuerdo al ciclo Brayton. Por lo tanto, se tiene un sistema de ciclo combinado.

Las condiciones del vapor suministrado a la turbina son: $P_1=40\text{bar}$ y $T_1=500^\circ\text{C}$

Determinando un vapor sobrecalentado cuya entalpía y entropía de acuerdo a las tablas de vapor son: $h_1=3445.3\text{ KJ/Kg}$ y $S_1=7.0901\text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$, respectivamente.

Las condiciones de salida del vapor en la turbina de vapor son: $P_2=0.20\text{bar}$ donde sus características de vapor húmedo de acuerdo a las tablas de vapor son: $h_{F2}=251.40$, $h_{Fg2}=2358.30$, $S_{F2}=0.8320$ y $S_{g2}=7.9085$, calculando la entropía S_{Fg2}

$$\begin{aligned} S_{Fg2} &= S_g - S_{F2} = 7.9085 - 0.8320 \\ &= 7.0765 \end{aligned}$$

El proceso en la turbina de vapor es a entropía constante, por lo cual $S_1=S_2$.

En el punto 2 el vapor es húmedo.

$$S_2 = S_{F2} + X_2 S_{Fg2} ; h_2 = h_{F2} + X_2 h_{Fg2}$$

$$S_1 = S_2 = S_{F2} + X_2 S_{Fg2}$$

Despejando la calidad del vapor X_2 ,

$$X_2 = \frac{S_1 - S_{F2}}{S_{Fg2}} = \frac{7.0901 - 0.8320}{7.0765} = 0.8843$$

Ahora, se determina la entalpía del vapor a la salida de la turbina:

$$h_2 = h_{F2} + X_2 h_{Fg2} = 251.40 + 0.8843(2358.3)$$

$$h_2 = 2336.8446$$

El trabajo desarrollado por la turbina de vapor está dado por:

$$W_t = h_1 - h_2 = 3445.3 - 2336.8446$$

$$W_t = 1108.45454 \text{ kJ/kg}$$

Para una potencia de generación de $P_1=300\text{MW}$ con una eficiencia del turbogenerador de $n_{tg}=0.9$, el flujo de vapor es calculado por:

$$P_1 = \dot{m}_v * n_{tg} * W_t;$$

$$\dot{m}_v = \frac{P_1}{n_{tg} W_t} = \frac{300 \text{ MW}}{0.9(1108.4554 \text{ kJ/kg})}$$

$$\dot{m}_v = 300.7187 \text{ Kg/s}$$

Representado en Toneladas por hora tenemos:

$$\dot{m}_v = 1082.5875 \text{ Tn/h}$$

La cantidad de calor que se le suministra al sistema es:

$$Q = h_1 - h_4$$

Despreciando el trabajo de la bomba, por ser de una magnitud pequeña,

$$h_4 = h_3$$

El condensador elimina la componente de vapor del vapor húmedo, por lo que,

$$h_3 = h_{f2}$$

entonces,

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

$$Q = 3445.3 - 251.40 = 3193.9 \text{ KJ/Kg}$$

y la eficiencia del sistema correspondiente a la sección termoeléctrica está definida por:

$$\eta_1 = \frac{W_t}{Q} 100\%$$

$$\eta_1 = \frac{1108.4554}{3193.9} 100\% = 34.70\%$$

Ahora, las condiciones del aire para la sección de la planta de turbina de gas son descritas por

$$T_5 = 20^\circ\text{C} = 293\text{k}$$

$$T_7 = 500^\circ\text{C} = 773\text{k}$$

Considerando un factor $\beta = S$ para la relación de compresión del compresor,

$$\beta = S = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_6}{P_5}$$

$$P_5 = 1 \text{ Kg/cm}^2$$

además, las condiciones del gas, en este caso el aire, son:

$$K = 1.4$$

$$C_p = 1.005 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$$

Asumiendo que la potencia eléctrica generada es de $P_2 = 100MW$, ya que la sección de turbina de gas es complemento a la energía total generada por sistema de ciclo combinado.

La eficiencia de la sección de la turbina de gas está definida por la relación de compresión y por el tipo de gas, por lo tanto, está dada por:

$$e = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{K-1}{K}}} = 1 - \frac{1}{5^{\frac{1.4-1}{1.4}}} = 0.3686$$

$$e_{\%} = 36.86\%$$

Ahora bien, de acuerdo al comportamiento de un gas en el ciclo Brayton se puede establecer las siguientes expresiones,

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

Entonces para el sistema dado en la Figura 4.1 se tiene,

$$\frac{T_6}{T_5} = \beta^{\frac{K-1}{K}}$$

La temperatura en el punto 5 es conocida y se obtiene la temperatura en el punto 6,

$$T_6 = T_5 \beta^{\frac{K-1}{K}} = (393^{\circ}K) \left(5^{\frac{1.4-1}{1.4}}\right) = 464.05^{\circ}K$$

Además, en el generador de vapor la presión es constante, por lo que $P_6=P_7$

y debido a que el aire se adquiere del medio ambiente y se deposita en el mismo $P_5= P_8$.

Utilizando, nuevamente las relaciones en un proceso de acuerdo al ciclo Brayton,

$$\frac{T_7}{T_8} = \left(\frac{P_7}{P_8}\right)^{\frac{K-1}{K}} = \left(\frac{P_6}{P_5}\right)^{\frac{K-1}{K}} = \beta^{\frac{K-1}{K}}$$

La temperatura a la descarga por la turbina de gas es obtenida por:

$$T_8 = \frac{T_7}{\beta^{\frac{K-1}{K}}} = \frac{773^{\circ}k}{5^{\frac{1.4-1}{1.4}}} = 488.06^{\circ}K$$

El trabajo desarrollado por el compresor es determina por:

$$W_c = C_p(T_2 - T_1)$$

$$W_c = C_p(T_5 - T_6) = (1.005 \text{ KJ/Kg}^{\circ}K)(293^{\circ}k - 464.05^{\circ}K)$$

$$W_c = -171.9052 \text{ KJ/Kg}$$

Siendo el signo negativo un indicativo que el compresor consume energía.

El trabajo que proporciona la turbina de gas está dado por:

$$W_t = C_p(T_7 - T_8)$$

$$W_t = (1.005 \text{ KJ/Kg}^{\circ}K)(773^{\circ}k - 488.06^{\circ}K)$$

$$W_t = 286.36 \text{ KJ/Kg}$$

Por lo tanto, el trabajo útil es la diferencia de los trabajos generados y consumidos,

$$W = W_t + W_c = 286.36 \text{ KJ/Kg} + 171.9052 \text{ KJ/Kg}$$

$$W = 114.45 \text{ KJ/Kg}$$

Asumiendo una eficiencia del turbogenerador, $\eta_2 = 0.9$.

$$P_2 = m_a \eta_2 w$$

considerando la potencia dada, entonces, el flujo de aire necesario es:

$$\dot{m}_a = \frac{P_2}{\eta_{2W}} = \frac{100MW}{(0.9) \left(114.45 \frac{KJ}{Kg} \right)}$$

$$\dot{m}_a = 970.8266 \frac{Kg}{s}$$

En términos de Toneladas por hora lo expresamos de la siguiente manera:

$$\dot{m}_a = 3494.97 \frac{Ton}{hr}$$

La potencia total por las dos turbinas de vapor y gas está definida por:

$$W_{tT} = W_t + W = 1108.45 \frac{KJ}{Kg} + 114.54 \frac{KJ}{Kg}$$

$$W_{tT} = 1222.9 \frac{KJ}{Kg}$$

La cantidad de calor que se suministra al flujo de vapor y al flujo de aire en el generador de vapor está dado por:

$$Q = 3193.9 \frac{KJ}{Kg}$$

Por lo tanto, la eficiencia del sistema completo de ciclo combinado se obtiene mediante la siguiente expresión,

$$e_T = \frac{W_{tT}}{Q} 100\% = \frac{1222.9 \frac{KJ}{Kg}}{3193.9 \frac{KJ}{Kg}} 100 = 38.28\%$$

4.3. Potencia de una central termoeléctrica de ciclo combinado multi eje 1x1 con recalentamiento

En la Figura 4. 2, se muestra la configuración de la anterior central, pero ahora agregando una etapa de recalentamiento en la sección de la termoeléctrica, las condiciones de la sección de turbina de gas son las mismas que las descritas en la sección 4.2.

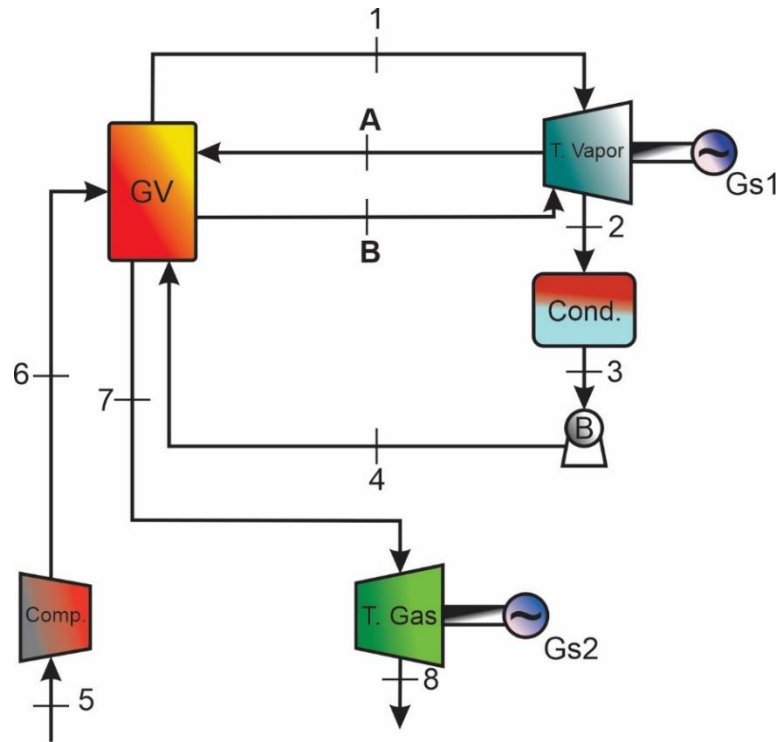


Figura 4. 2. Diagrama de una central de ciclo combinado con recalentamiento.

Las condiciones de entrada del vapor a la turbina de vapor son $P_1=40\text{bar}$, $T_1=500^\circ\text{C}$, $h_1=3445.3$, $S_1=7.0901$, donde se tiene un vapor sobrecalentado con la entalpía y entropía obtenidas por las tablas de vapor correspondientes a la presión y temperatura definidas.

La etapa de recalentamiento se da a $P_A=20\text{bar}$ y $T_B=500^\circ\text{C}$.

Vapor húmedo.

$P_2= 0.20\text{bar}$, $h_{F2}=251.40$, $h_{Fg2}=2358.3$

$S_{f2}= 0.8320$, $S_{g2}= 7.9085$, $S_{fg2}=7.0765$

El trabajo desarrollado por la turbina de vapor con una etapa de recalentamiento es expresado por:

$$W_t = (h_1 - h_a) + (h_B - h_2)$$

En el punto A, a la salida de la turbina y la entrada a la etapa de recalentamiento, es a una presión de $P_A = 20\text{bar}$, obteniendo las características de este vapor se tiene: $h_{FA} = 908.79$, $h_{FGA} = 1890.7$, $S_{FA} = 2.4474$, $S_{gA} = 6.3409$

$$S_{FGA} = S_{gA} - S_{FA} = 3.8935$$

El proceso de 1 a A en la turbina de vapor es isoentrópico, $S = S_A$, suponiendo que el vapor en A es húmedo $S_A = S_{FA} + X_A S_{FGA}$

$$X_A = \frac{S_1 - S_{FA}}{S_{FGA}} = \frac{7.0901 - 2.4474}{3.8935} = 1.1924$$

Como la calidad en el punto A es mayor a 1, no es vapor húmedo sino vapor sobrecalentado en el punto A, entonces, de las tablas de vapor sobrecalentado, se tiene:

Tabla 4.1. Temperatura, entalpía y entropía.

T	h	s
360	9159.3	6.9917
400	3247.6	7.1271 7.0901
$\Delta = 40$	88.3	0.1354
10.9305	24.1292	0.037
389.0695	3223.4708	7.0901

Realizando una interpolación se obtienen las características del vapor en el punto A, cuya entalpía es $h = 3223.4708$ y la entropía es $S = 7.0901$

En el punto B $P_B = 20\text{bar}$, $T_B = 500^\circ\text{C}$, el proceso de recalentamiento es a presión constante donde $P_A = P_B$, $h_B = 3467.6$, $S_B = 7.4317$

Ahora analizando la sección de la turbina de vapor de B a 2, el proceso es a entropía constante $S_B=S_2$,

$$S_B = S_2 = S_{F2} + X_2 S_{Fg2}$$

Obteniendo la calidad del vapor en esta sección se tiene:

$$X_2 = \frac{S_8 - S_{F2}}{S_{Fg2}}$$

$$X_2 = \frac{7.4317 - 0.8320}{7.0765} = 0.9326$$

y la entalpía del vapor a la salida de la turbina es:

$$h_2 = h_{F2} + X_2 h_{Fg2} = 251.40 + (0.9326)(2358.3) = 2450.8026$$

El trabajo en la turbina de vapor con esta etapa de recalentamiento se obtiene,

$$W_t = (3445.3 - 3223.4708) + (3467.6 - 2450.8026)$$

$$W_t = 1238.6266$$

La eficiencia individual de la sección termoeléctrica es,

$$e = \frac{W_t}{Q} 100\%$$

En este caso, el calor que se le suministra al vapor en el generador de vapor es

$$Q = (h_1 - h_{F2}) + (h_B - h_A)$$

$$Q = (3445.3 - 251.40) + (3467.6 - 3223.4708)$$

$$Q = 3438.0292$$

Sustituyendo, la eficiencia de la sección termoeléctrica está dada por:

$$e = \frac{1238.6266}{3438.0292} 100\% = 36.02\%$$

La sección de la planta de turbina de gas no sufre alteraciones respecto a lo calculado en la sección 4.2 por lo que el trabajo total del sistema es:

$$Wt_T = 1238.6266 + 114.45 = 1353.0766$$

Siendo la eficiencia global del sistema de ciclo combinado dada por:

$$e = \frac{1353.0766}{3438.0292} 100\% = 39.35\%$$

4.4. Potencia de una central termoeléctrica de ciclo combinado multi-eje 2x1

La Figura 4. 3, muestra la disposición de un ciclo combinado multi-eje 2x1.

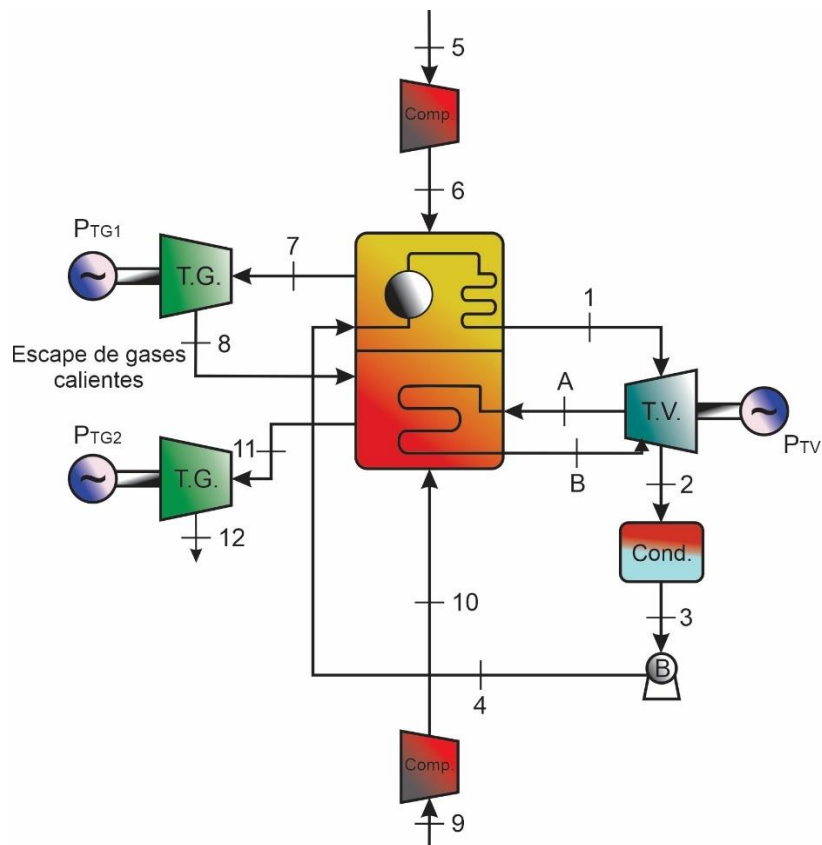


Figura 4. 3. Diagrama de una central termoeléctrica de ciclo combinado muti-eje 2x1.

Las condiciones del sistema de generación con la turbina de vapor con ciclo de recalentamiento son las ya descritas en la sección anterior, en donde,

$$W_{tV} = 1238.6266 \text{ KJ/Kg}$$

$$Q_{Gv} = 3438.0292 \text{ KJ/Kg}$$

Para una potencia de generación de $P_{TV}=300\text{MW}$ con una eficiencia del turbo-generator de $n_{TV}=0.9$ la cantidad de flujo de vapor es definida por:

$$\dot{m}_{TV} = \frac{P_{TV}}{n_{TV}W_{TV}} = \frac{300 \times 10^3 \text{ KJ/s}}{0.9 (1238.6266 \text{ KJ/Kg})}$$

$$\dot{m}_{TV} = 269.1152 \text{ Kg/s} = 968.8149 \text{ Ton/hr}$$

Se plantea que el generador de vapor, caliente el gas en T7 hasta las condiciones requeridas de 500°C , por lo tanto, se tienen las condiciones ya descritas $PTG1=100\text{MW}$, $WTG1=114.45\text{KJ/Kg}$ y $mTG1=3494.97\text{Ton/hr}$.

Para la turbina de gas 2, se plantea una turbina igual a 1, solamente que la etapa de recalentamiento del generador de vapor y los gases de escape calientes de la turbina de gas 1 le proporcionarán al gas la temperatura en $T11=500^\circ\text{C}$.

Por lo tanto, el trabajo total desarrollado por el sistema formado por tres turbinas está dada por,

$$W_T = W_{TV} + W_{TG} + W_{TG2}$$

$$W_T = 1238.6266 + 114.45 + 114.45$$

$$W_T = 1467.5266 \text{ KJ/Kg}$$

La cantidad de vapor que se le suministra al sistema es,

$$Q_{GV} = 3438.0292 \text{ KJ/Kg}$$

Finalmente, la eficiencia de este sistema de ciclo combinado es,

$$\eta_T = \frac{W_T}{Q_{GV}} 100\% = \frac{1467.5266}{3438.0292} 100\%$$

$$\eta_T = 42.6851\%$$

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

El desarrollo industrial y económico de México ha sido un factor para el constante crecimiento de la demanda de energía eléctrica; lo que conlleva a la necesidad de construir nuevas plantas de generación que cubran esta demanda requerida.

Los grandes productores de energía eléctrica, tales como la Comisión Federal de Electricidad y los Productores Independientes, optan por centrales de ciclo combinado, ya que su tecnología es una de las más eficientes, tienen mayor flexibilidad de operación, un bajo costo de construcción y además un menor impacto ambiental que cualquier otro tipo de tecnología equivalente.

Con la integración del ciclo Brayton al ciclo Rankine se logra tener eficiencias mayores de lo cada uno por sí solo tendría. Así también adicionando una etapa de recalentamiento se aprovecha aún más la turbina de vapor, traduciéndose así también en eficiencia.

Afortunadamente, se logró cumplir el objetivo planteado en esta tesis, en el análisis de centrales termoeléctricas de ciclo combinado, obteniendo los resultados de potencia y eficiencia de las secciones de flujo de vapor y flujo de aire, para posteriormente obtener la eficiencia de la Central completa.

Esta tesis presenta un análisis primario de este tipo de centrales, por lo que se puede posteriormente analizar centrales con la mayoría de los equipos que la componen.

5.2. Recomendaciones

Buscar siempre la eficiencia y el mayor aprovechamiento responsable de los recursos. Y como hemos visto, un ciclo Combinado con recalentamiento dará mejores resultados.

Así mismo, para obtener resultados más realistas se puede incorporar la eficiencia de los equipos secundarios que forman parte de las secciones de turbina de vapor y turbina de gas.

Bibliografía

1. Cicloscombinaos.com/tipos de Centrales de Ciclo Combinado
2. http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/102621/cf-sepulveda_rs.pdf?sequence=3&isAllowed=y
3. <http://www.CiclosCombinados.com/index.php/3-configuraciones-habituales>
4. <http://www.cicloscombinados.com/index.php/5-el-impacto-medioambiental-de-las-c-t-de-ciclo-combinado>
5. <http://www.errroreshistoricos.com/curiosidades-historicas/la-primera-vez-en-la-historia/1775-la-primera-central-electrica-de-la-historia.html>
6. <http://www.turbinasdegas.com/las-turbinas-de-gas>
7. <https://books.google.com.mx/books?id=ewgppqAAACAAJ&dq=centrales+electricas&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwui9d-lvbzeAhUP26wKHWI0DtwQ6AEILTAB>
8. https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_Brayton
9. <https://solar-energia.net/definiciones/central-fotovoltaica.html>
10. https://www.definiciones-de.com/Definicion/de/historia_de_la_generacion_de_energia_y_las_Centrales_electricas.php
11. <https://www.ecologiaverde.com/que-es-la-energia-undimotriz-372.html>
12. https://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Innovativa/vol2num8/Revista_de_Ingenieria_Innovativa_V2_N8_1.pdf
13. <https://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/faqas-sobre-energia/capitulo-10/115510-132-ique-contaminacion-producen-las-centrales-termoelectricas>
14. <https://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/faqas-sobre-energia/capitulo-8>
15. <https://www.google.com.mx/search?q=Configuración+mono-eje+1x1+con+embrague&client=opera&hs=GZa&tbm=isch&source=iu&ict>

x=1&fir=0bAQxYW7V0ESjM%253A%252CQ4mU23CbJNeCHM%252C_
&usg=AI4_-

16. https://www.google.com.mx/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=2ahUKEwjV077i1dDeAhVnja0KHYv4Dg8Q5TV6BAgBEAs&url=http%3A%2F%2Fwww.sma.gob.cl%2Findex.php%2Fdocumentos%2Fdocumentos-de-interes%2Fdocumentos%2Fguias-sma%2Fdoc_download%2F217-guia-sma-termoelectricas&psig=AOvVaw23GwAO5i-ufQx4_MgMO4zV&ust=1542174442548386
17. <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-ciclo-de-rankine-ciclo-de-la-turbina-de-vapor-definicion/kR4cXcKi8vGEWiNqG0tkTtBB31g8g&sa=X&ved=2ahUKEwinxdu6gpnfAhUE16wKHdYSApUQ9QEwAXoECAUQBA#imgsrc=AA78HVTALM-FHM>
18. Turbomáquinas de Fluido Compresible (Manuel Polo Encinas, 1984 Editorial Limusa)
19. World Nuclear Association. «Nuclear Power in Mexico». Consultado el 28 de noviembre de 2016. – Laguna verde fragmento.