



UNIVERSIDAD DON BOSCO

VICERRECTORÍA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN DE PLANTA DE POTENCIA DE VAPOR
USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

PARA OPTAR AL GRADO DE:

MAESTRA EN GESTIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES

ASESOR:

MS. OSCAR FERNANDO CIDEOS NUÑEZ

PRESENTADO POR:

ARQ. GEORGINA ELIZABETH SOLANO CANTISANO

SEPTIEMBRE DE 2016

Antiguo Cuscatlán, La libertad, EL SALVADOR, CENTROAMÉRICA.

RESUMEN EJECUTIVO

Cada año el consumo energético aumenta. Más del 50% de la energía eléctrica mundial producida diariamente se genera con turbinas de vapor. Las plantas de potencia de vapor transforman la energía contenida en el vapor de agua en energía eléctrica, al hacer pasar el vapor de agua a través de un turbogenerador. Los ciclos de vapor más utilizados en la industria de generación eléctrica basan su funcionamiento en el ciclo termodinámico de Rankine. Los constantes adelantos tecnológicos y el estudio a profundidad del ciclo, han permitido mejorar el desempeño y eficiencia del ciclo termodinámico de vapor. Los avances tecnológicos han permitido aumentar los valores límite de los puntos de operación de estos ciclos, permitiendo incrementar la temperatura y presión de operación en la caldera pasando de presiones subcríticas a supercríticas y ultrasupercríticas¹.

Se cuenta en la actualidad con un gran número de herramientas tecnológicas en las cuales diseñar y optimizar modelos de ciclos termodinámicos. Los modelos termodinámicos nos permiten comprender la interrelación entre los componentes de un ciclo. A través de la optimización de un modelo termodinámico de un ciclo de potencia podemos conocer las condiciones de operación del ciclo para los cuales una variable es óptima, así como saber cómo el cambio en los parámetros de una variable del proceso afecta el desempeño del ciclo.

En esta tesis se realizará una propuesta de metodología de optimización para 5 ciclos de vapor usando algoritmos genéticos, teniendo como función objetivo la maximización de la eficiencia del ciclo. Para realizar dicha optimización se utiliza Engineering Equation Solver (EES). El programa EES tiene la ventaja de incorporar una librería de propiedades termodinámicas de distintos fluidos de trabajo, dentro de los que se encuentra el vapor de agua, así como un módulo para optimización usando algoritmos genéticos.

Se formularan modelos de ciclos termodinámicos de vapor considerando calentadores abiertos de agua de alimentación, calentadores cerrados de agua de alimentación con drenes hacia adelante y calentadores cerrados de agua de alimentación con drenes hacia atrás.

Entre más conocimiento se tiene del funcionamiento de un ciclo de vapor mejor será su desempeño desde el punto de vista operativo, ya sea que se busque reducir costos de operación, generar más potencia en la turbina u optimizar el consumo de combustible o del fluido de trabajo.

¹ (Kimura, Sato, Bergins, Imano, & Saito)

ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO.....	2
ÍNDICE.....	I
ÍNDICE DE TABLAS	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IV
SIGLAS.....	VI
ABREVIATURAS	VII
SÍMBOLOS	VIII
PRÓLOGO.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3 LÍMITES	3
1.4 ALCANCES	3
CAPITULO 2.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 PLANTAS DE POTENCIA EN EL MUNDO Y EL SALVADOR.....	4
2.2 CICLO DE POTENCIA RANKINE SIMPLE (CPRS).....	6
2.2.1 BOMBA DE ALIMENTACIÓN.	7
2.2.2 CALDERA.	9
2.2.3 TURBINA.	11
2.2.4 CONDENSADOR.....	16
2.2.5 ALGORITMO.....	18
2.2.6 ANÁLISIS GLOBAL DEL CICLO: TRABAJO NETO Y EFICIENCIA TÉRMICA NETA.	19
2.2.7 RESTRICCIONES DEL CICLO.	21
2.3 CICLO DE POTENCIA RANKINE CON RECALENTAMIENTO (CPRR).	22
2.4 CICLO DE POTENCIA RANKINE REGENERATIVO (CPRRE).	25
2.4.1 CICLO DE POTENCIA RANKINE REGENERATIVO CON CALENTADOR ABIERTO (CPRRECA).....	25
2.4.2 CICLO DE POTENCIA RANKINE REGENERATIVO CON CALENTADOR CERRADO (CPRRECC).....	27
CAPÍTULO 3.....	29
3. MÉTODO CUANTITATIVO.....	29
3.1 MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN.....	29

3.2 ALGORITMOS GENÉTICOS (AG)	29
3.3 COMPONENTES DE UN AG	29
3.4 CRITERIO DE CONVERGENCIA	32
3.5 PARÁMETROS IMPORTANTES DE UN ALGORITMO GENÉTICO	32
3.6 COMPARACIÓN DE LOS AG CON LAS TÉCNICAS TRADICIONALES DE OPTIMIZACIÓN	32
3.7 CARACTERÍSTICAS DE LOS ALGORITMOS BASADOS EN EL CICLO DE POTENCIA RANKINE	32
3.8 CARACTERÍSTICAS PARA DETERMINAR SI ES POSIBLE USAR UN AG EN EL ANÁLISIS ACTUAL	32
3.9 ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN	33
CAPÍTULO 4	34
4. APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	34
4.1 CICLO DE POTENCIA RANKINE SIMPLE. EJEMPLO 1	34
4.2 CICLO DE POTENCIA RANKINE SIMPLE CON RECALENTAMIENTO. EJEMPLO 2	38
4.3 CICLO DE POTENCIA RANKINE CON RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN, CALENTADOR ABIERTO. EJEMPLO 3	43
4.4 CICLO DE POTENCIA RANKINE CON RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN. CALENTADOR ABIERTO, CALENTADOR CERRADO CON DRENES HACIA ADELANTE	46
4.4.1 EJEMPLO 4	46
4.5 CICLO DE POTENCIA RANKINE CON RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN. CALENTADOR ABIERTO Y CALENTADOR CERRADO CON DRENES HACIA ATRÁS	51
4.5.1 EJEMPLO 5	51
CAPÍTULO 5	54
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
5.1 CONCLUSIONES	54
5.2 RECOMENDACIONES	55
GLOSARIO	56
BIBLIOGRAFÍA	58

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. ECUACIONES DE VARIABLES DESCONOCIDAS PARA EL MODELADO DE LA BOMBA.	9
TABLA 2. ECUACIONES DE VARIABLES DESCONOCIDAS PARA EL MODELADO DE LA CALDERA.	11
TABLA 3. ECUACIONES DE VARIABLES DESCONOCIDAS MODELAR EL ESTADO TERMODINÁMICO A LA SALIDA DE LA TURBINA SEGÚN HIPÓTESIS 1.	14
TABLA 4. ECUACIONES DE VARIABLES DESCONOCIDAS MODELAR EL ESTADO TERMODINÁMICO A LA SALIDA DE LA TURBINA SEGÚN HIPÓTESIS 2.	16
TABLA 5. ECUACIONES DE VARIABLES DESCONOCIDAS, CONDENSADOR.	17
TABLA 6. ECUACIONES, POTENCIA DESARROLLADA POR LA TURBINA	19
TABLA 7. ECUACIÓN DE TRABAJO NETO DEL CICLO RANKINE SIMPLE.	20
TABLA 8. ECUACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL CICLO RANKINE SIMPLE.....	20
TABLA 9. ECUACIONES DE VARIABLES DESCONOCIDAS PARA EL MODELADO DE LA TURBINA DE BAJA PRESIÓN.	24
TABLA 10. ECUACIONES PARA MODELADO DEL CICLO DE POTENCIA RANKINE REGENERATIVO CON CALENTADOR ABIERTO.	27
TABLA 11. CUADRO DE SOLUCIÓN ÓPTIMA, EJEMPLO 1.....	36
TABLA 12. SOLUCIÓN DE PUNTOS DE EVALUACIÓN, EJEMPLO 1.....	36
TABLA 13. CUADRO DE SOLUCIÓN ÓPTIMA, EJEMPLO 2.....	39
TABLA 14. SOLUCIÓN DE PUNTOS DE EVALUACIÓN, EJEMPLO 2.....	40
TABLA 15. SOLUCIÓN ÓPTIMA, EJEMPLO 3.....	44
TABLA 16. SOLUCIÓN DE PUNTOS DE EVALUACIÓN, EJEMPLO 3.....	45
TABLA 17. SOLUCIÓN ÓPTIMA, EJEMPLO 4.....	47
TABLA 18. SOLUCIÓN DE PUNTOS DE EVALUACIÓN, EJEMPLO 4.....	48
TABLA 19. SOLUCIÓN, EJEMPLO 4A.....	49
TABLA 20. SOLUCIÓN DE PUNTOS DE EVALUACIÓN, EJEMPLO 4A.	50
TABLA 21. SOLUCIÓN ÓPTIMA, EJEMPLO 5.....	52
TABLA 22. SOLUCIÓN DE PUNTOS DE EVALUACIÓN, EJEMPLO 5.....	53
TABLA 23. CUADRO RESUMEN.	54

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: DIAGRAMA DE PROPIEDADES DEL CICLO RANKINE IDEAL	1
FIGURA 2: PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ELECTRICIDAD SEGÚN FUENTE PRIMARIA DE ENERGÍA AÑO 2014.....	4
FIGURA 3: INYECCIONES NETAS DE ELECTRICIDAD SEGÚN FUENTE PRIMARIA DE ENERGÍA AÑO 2014.....	5
FIGURA 4: DIAGRAMA DE FLUJO DE UN CICLO DE POTENCIA RANKINE SIMPLE	6
FIGURA 5: DIAGRAMA DE TEMPERATURA – ENTROPÍA.....	6
FIGURA 6: BOMBA DE ALIMENTACIÓN.....	7
FIGURA 7: CALDERA.....	10
FIGURA 8: TURBINA.....	12
FIGURE 9. CONDENSADOR	17
FIGURA 10. ALGORITMO CICLO RANKINE SIMPLE.....	18
FIGURA 11 DIAGRAMA DE FLUJO DE UN CICLO DE POTENCIA RANKINE CON RECALENTAMIENTO.	22
FIGURA 12. DIAGRAMA DE TEMPERATURA – ENTROPÍA DE CPRR.	22
FIGURA 13. CICLO DE POTENCIA RANKINE REGENERATIVO CON CALENTADOR ABIERTO. .	25
FIGURA 14. CICLO DE POTENCIA RANKINE REGENERATIVO CON CALENTADOR CERRADO. DRENES CON BOMBEO HACIA DELANTE.	27
FIGURA 15. CALENTADORES CERRADOS.....	27
FIGURA 16. ALGORITMO GENÉTICO SIMPLIFICADO.	31
FIGURA 17. DIAGRAMA DE FLUJO, CICLO DE POTENCIA RANKINE SIMPLE, EJEMPLO 1.	35
FIGURA 18. DIAGRAMA T-S, EJEMPLO 1.....	35
FIGURA 19. DIAGRAMA DE FLUJO, CICLO DE POTENCIA RANKINE CON RECALENTAMIENTO, EJEMPLO 2.....	38
FIGURA 20. DIAGRAMA T-S, EJEMPLO 2.....	39
FIGURA 21. GRÁFICA DE OPTIMIZACIÓN DE PRESIÓN DEL CONDENSADOR VERSUS EFICIENCIA TÉRMICA. EJEMPLO 2.....	41
FIGURA 22. GRÁFICA DE OPTIMIZACIÓN DE TEMPERATURA DE ENTRADA A LA TURBINA VERSUS EFICIENCIA TÉRMICA. EJEMPLO 2.....	42
FIGURA 23. GRÁFICA DE OPTIMIZACIÓN DE PRESIÓN DE LA CALDERA VERSUS EFICIENCIA TÉRMICA. EJEMPLO 2.....	42
FIGURA 24. DIAGRAMA DE FLUJO, CICLO DE POTENCIA RANKINE CON RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN, EJEMPLO 3.....	43
FIGURA 25. DIAGRAMA T-S, EJEMPLO 3.....	44

FIGURA 26. DIAGRAMA DE FLUJO, CICLO DE POTENCIA RANKINE CON RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN, EJEMPLO 4.....	46
FIGURA 27. DIAGRAMA T-S, EJEMPLO 4.....	47
FIGURA 28. DIAGRAMA T-S, EJEMPLO 4A.	49
FIGURA 29. DIAGRAMA DE FLUJO, CICLO DE POTENCIARANKINE CON RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN, EJEMPLO 5.....	51
FIGURA 30. DIAGRAMA T-S, EJEMPLO 5.....	52

SIGLAS

AG	Algoritmo genético
EES	Engineering Equation Solver
NCAR	National Center for Atmospheric Research

ABREVIATURAS

Ec.	Ecuaciones
BA	Bomba de alimentación
CPRR	Ciclo de Potencia Rankine Regenerativo
CPRRE	Ciclo de Potencia Rankine con Recalentamiento
CPRS	Ciclo de Potencia Rankine Simple
TAP	Turbina de alta presión
TBP	Turbina de baja presión

SÍMBOLOS

Factor Baumann

Función

Entalpía (kJ/kg)

Flujo másico (kg/s)

Presión (bar)

Calor transferido por unidad de masa (kJ/kg)

Entropía (kJ/kg)

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Volumen específico (m^3/kg)

Trabajo específico (kJ/kg)

Calidad del vapor

Alfabeto griego

Diferencia de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Eficiencia isentrópica de la bomba (%)

Eficiencia isentrópica de la turbina (%)

Eficiencia térmica neta (%)

Densidad (kg/m^3)

Subíndices

Comportamiento ideal (como en)

Trabajo de la bomba (como en)

Condensador (como en)

PRÓLOGO

El diseño de las plantas de potencia de vapor está basado en el ciclo termodinámico de Rankine. A mayor eficiencia del ciclo habrá una mejor relación de consumo de combustible contra potencia generada. Para aumentar el trabajo del ciclo de Rankine se busca incrementar el área bajo la curva del diagrama T-s. Una forma de lograr esto es aumentando la temperatura de transferencia de calor en la caldera y disminuyendo la temperatura de rechazo de calor en el condensador.

El aumento de la temperatura a la cual el calor se transfiere al fluido de trabajo tiene como limitante las propiedades mecánicas y de operación de los componentes del sistema, entre ellos intercambiadores de calor, tuberías, bombas, turbina, calderas, etc. La temperatura de rechazo de calor en el condensador está limitada por las condiciones del medio ambiente.

La tecnología actual nos permite analizar diseños de plantas de potencia complejos. Obtener, por ejemplo, las condiciones de operación óptima de los equipos en función de la máxima eficiencia térmica alcanzable por la tecnología actual. Realizar un modelo termodinámico es útil para comprender la interrelación entre los componentes del modelo termodinámico, y poder predecir el comportamiento del sistema bajo determinadas condiciones de operación. Entre más detallado un modelo más realista la respuesta que el mismo brindará.

Desarrollar una metodología de optimización de plantas de potencia de vapor usando algoritmos genéticos permitirá desarrollar sobre una base sólida, modelos con los cuales experimentar y comprender la interrelación entre los componentes del modelo, predecir el comportamiento del sistema bajo determinadas condiciones de operación, entre otros. Por tal motivo en esta tesis se desarrollará un método de optimización del funcionamiento termodinámico de plantas de potencia de vapor, utilizando algoritmos genéticos.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En esta tesis se realizará una propuesta de metodología de optimización para plantas de potencia de vapor usando algoritmos genéticos.

El funcionamiento de las plantas de potencia de vapor que aquí se tratan, está basado en el ciclo termodinámico de Rankine, que se define por cuatro procesos (Ver Fig.1). (1-2) Compresión adiabática de líquido, (2-3) adición de calor isobárico, (3-4) expansión adiabática del vapor hasta una presión baja, (4-1) rechazo isobárico de calor. “Este ciclo ha demostrado suministrar la máxima eficiencia termodinámica en la producción de vastas cantidades de energía, en incontables aparatos técnicos, y parece destinado a ser la fuente principal de energía mecánica durante bastante tiempo”².

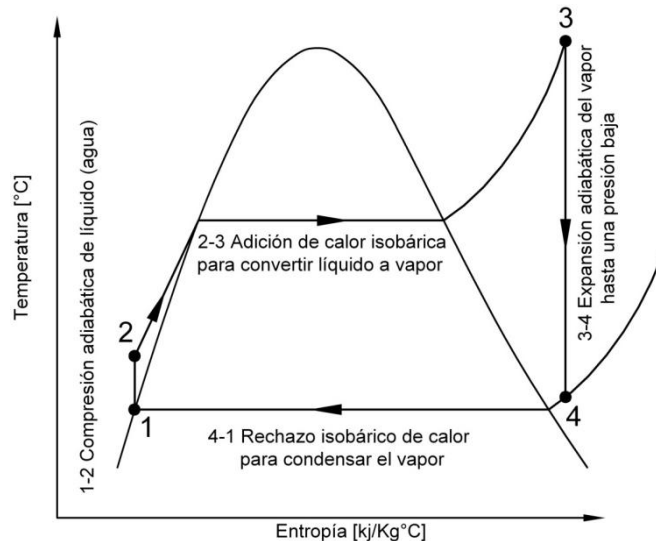


FIGURA 1: DIAGRAMA DE PROPIEDADES DEL CICLO RANKINE IDEAL³

La demanda constante de la mejora de la eficiencia de los ciclos de potencia ha producido algunas modificaciones innovadoras en el ciclo de vapor ⁴ de entre los cuales se destacan el ciclo con recalentamiento y regenerativos. Para el caso del primero, el ciclo Rankine con recalentamiento, la expansión del vapor en la turbina ocurre al menos en dos etapas, una etapa de alta presión y otra de baja presión. Cuando el fluido de trabajo sale de la etapa de alta presión regresa a la caldera donde se recalienta para ingresar a la siguiente etapa de la turbina que trabaja a una presión más baja que la original.

² , 2006, p. 373)

³ Elaboración propia.

⁴ (Cengel & Boles, 2006, p. 561)

En el ciclo Rankine regenerativo el fluido de trabajo extraído en uno o varios puntos es utilizado para precalentar el agua a la entrada de la caldera y disminuir la cantidad de calor necesario en la caldera para la vaporización.

La manera más económica de mejorar la rentabilidad de una empresa es entender su proceso de producción. En el caso de las plantas de potencia de vapor conocer las condiciones óptimas de operación y poder compararla con las condiciones de operación existentes, permite al encargado de operaciones comprender con mayor profundidad el proceso de producción y lo capacita para poder realizar cambios que mejoren la eficiencia del ciclo de potencia generando el menor impacto en los costos de producción.

El algoritmo genético es un método de optimización dispuesto especialmente para este fin, ya que “Los Algoritmos Genéticos son métodos adaptativos, generalmente usados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros”⁵.

Uno de los programas computacionales para probar este método de optimización es el programa Engineering Equation Solver (EES)⁶. EES es un programa comercial de ingeniería para la resolución de ecuaciones adecuado para el análisis termodinámico. Cuenta con un método de solución utilizando Algoritmos Genéticos. El software incluye las propiedades termodinámicas de una gran cantidad de fluidos, incluyendo el vapor. De requerirse alguna propiedad termodinámica se puede obtener a partir de una llamada a una función.

⁵ (Gestal)

⁶ (F-Chart Software)

1.1 Objetivo general

Diseñar un método de optimización de la eficiencia térmica de plantas de potencias de vapor partiendo de un diseño definido (ciclo Rankine simple, con recalentamiento, regenerativo) aplicando un algoritmo genético.

1.2 Objetivos específicos

- Formular modelos termodinámicos del ciclo Rankine considerando calentadores de agua de alimentación abiertos, calentadores cerrados con drenes hacia adelante y calentadores cerrados con drenes hacia atrás;
- Calcular las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo en los diferentes estados del ciclo Rankine en EES;
- Optimizar la eficiencia térmica de los ciclos Rankine evaluados, usando la herramienta de Algoritmo Genético en EES.

1.3 Límites

- Las pérdidas o irreversibilidades de la bomba y la turbina se tomaran en cuenta a través de las eficiencias isentrópicas de los dispositivos,
- Para evitar cavitación en las bombas del condensador y calentadores se proveerá un pequeño subenfriamiento del líquido;
- La calidad del vapor en la última etapa de la turbina será 90%.
- El actual trabajo no incluirá un cálculo de costos.
- Este trabajo incluye el procedimiento para determinar las condiciones de operación de la cadera, la turbina, el condensador y la bomba de alimentación.

1.4 Alcances

- Desarrollar algoritmos que optimicen la eficiencia energética de plantas de potencia de vapor;
- Representar gráficamente los valores óptimos;
- Comparar la eficiencia energética óptima según el diseño de planta (ciclo Rankine simple, con recalentamiento, regenerativo).

CAPITULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Plantas de potencia en el mundo y El Salvador.

Las plantas de potencia tienen como objetivo la generación de energía eléctrica a partir de diferentes tecnologías. La tecnología más usada a nivel mundial para la generación eléctrica son las plantas de potencia de vapor que transforman la energía interna del vapor de agua en energía cinética y producen energía eléctrica. Como puede verse en la figura a continuación, más del 50 % de la energía eléctrica generada en el mundo se produce diariamente con turbinas de vapor.

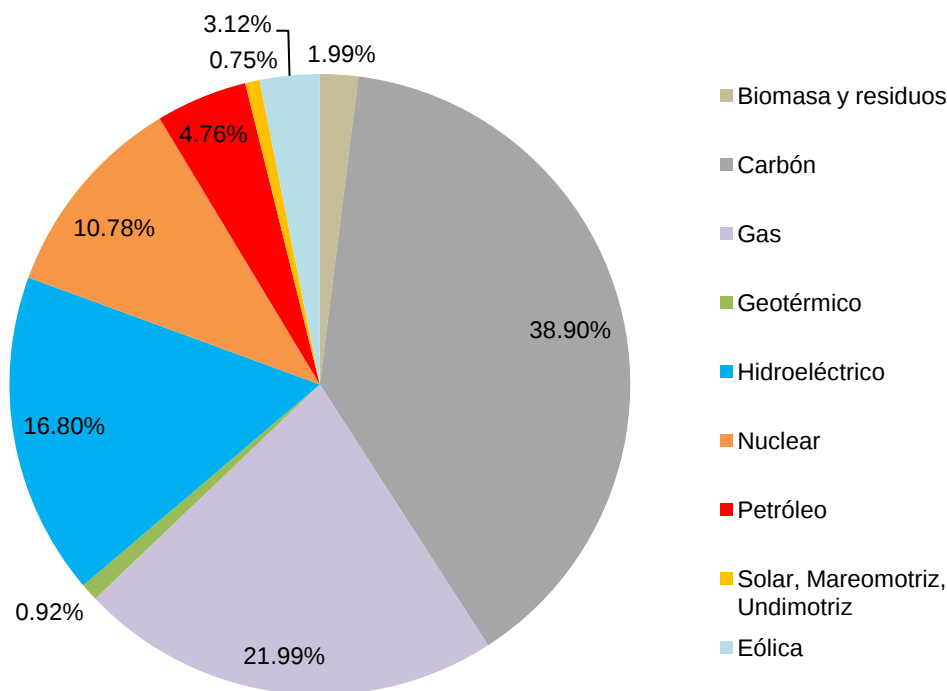


FIGURA 2: PRODUCCIÓN MUNDIAL DE ELECTRICIDAD SEGÚN FUENTE PRIMARIA DE ENERGÍA AÑO 2014⁷.

Las fuentes de energía primaria usada para vaporizar el agua, varían. Las Centrales Térmicas combustionan combustible fósil, las Centrales Nucleares fisiónan átomos de uranio o plutonio, las Centrales Termosolares usan la radiación solar, las Centrales de Biomasa usan combustión de biomasa, las Centrales de Cogeneración usan Gas Natural.

⁷ Elaboración propia. Datos 2014 Producción Mundial de electricidad (tsp-data-portal.org)

Las Centrales Geotérmicas no necesitan vaporizar el agua, extraen el fluido de trabajo de los reservorios en el manto terrestre.

Como puede verse en la figura a continuación, El Salvador continúa con su alta dependencia de los combustibles fósiles y produce aproximadamente el 30% de su energía por medio de plantas de vapor.

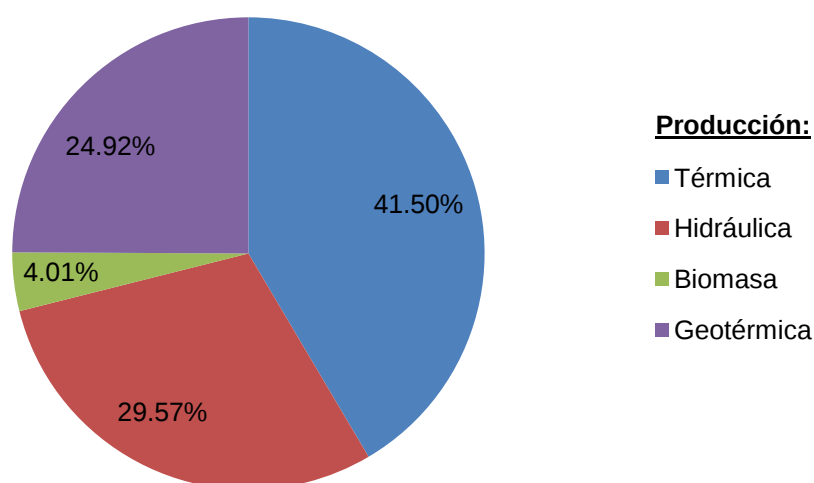


FIGURA 3: INYECCIONES NETAS DE ELECTRICIDAD SEGÚN FUENTE PRIMARIA DE ENERGÍA AÑO 2014⁸.

⁸ Elaboración propia. Datos 2014, obtenidos (Boletín de Estadísticas Eléctricas No.16, p. 58)

2.2 Ciclo de Potencia Rankine Simple (CPRS).

Las centrales térmicas con turbinas a vapor basan su funcionamiento en el Ciclo de Potencia Rankine. Entre los componentes principales de un Ciclo de Potencia Rankine Simple (CPRS, en adelante) se encuentran los siguientes elementos: Bomba de alimentación, caldera (evaporador), turbina, generador y condensador (ver figura a continuación).

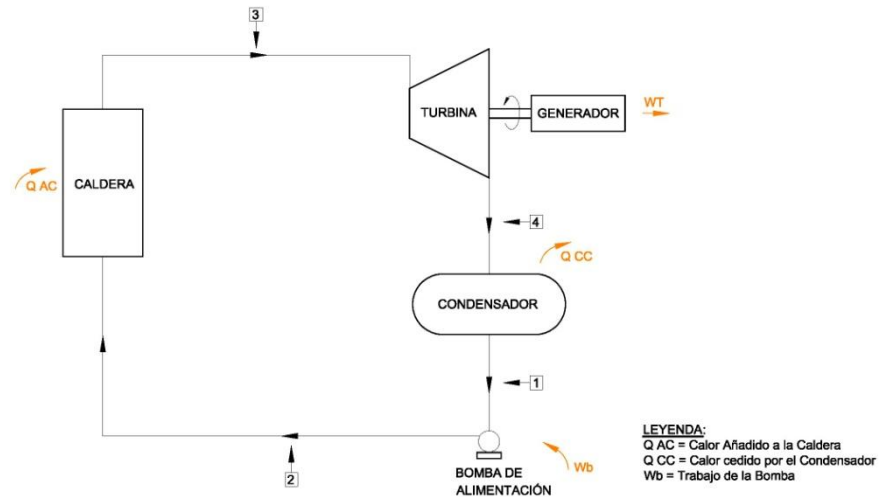


FIGURA 4: DIAGRAMA DE FLUJO DE UN CICLO DE POTENCIA RANKINE SIMPLE⁹.

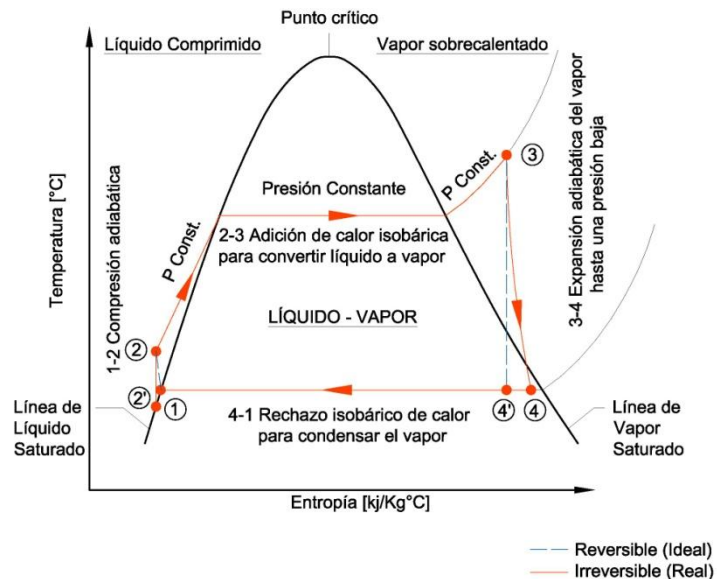


FIGURA 5: DIAGRAMA DE TEMPERATURA – ENTROPÍA¹⁰

⁹ Elaboración propia.

Los componentes principales de la figura 4 (Diagrama de flujo de un ciclo de potencia Rankine simple) son descritos a continuación.

2.2.1 Bomba de alimentación.

Proceso de 1 a 2. Compresión adiabática. El fluido en fase líquida entra a la bomba a la presión y temperatura del condensador (punto 1 en la figura a continuación). La presión del fluido se incrementa hasta llegar a la presión de trabajo del evaporador o caldera (punto 2 en la figura a continuación).

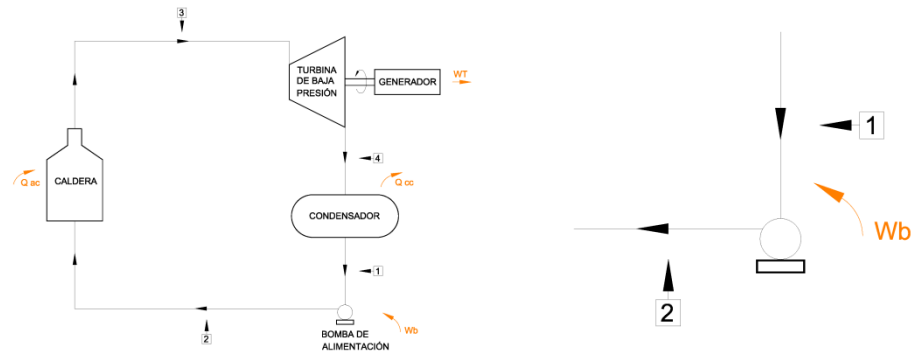


FIGURA 6: BOMBA DE ALIMENTACIÓN¹¹.

Punto 1. Entrada a la bomba de alimentación.

Se establece el sistema de ecuaciones que determina el estado termodinámico del fluido de trabajo a la entrada de la bomba de alimentación a partir de los siguientes datos conocidos:

Datos conocidos: , , ,

- : Presión del condensador.
- : Temperatura a la salida de la turbina (Ver inciso 2.2.3 Turbina).
- : Grado de subenfriamiento en el condensador.
- : Eficiencia isentrópica de la bomba.
- : Calidad del fluido a la entrada de la bomba (fase líquida)

Ecuaciones independientes:

Temperatura de entrada a la bomba de alimentación (T_1):

(Ec. 1)

¹⁰ Elaboración propia

¹¹ Elaboración propia.

Entalpía a la entrada de la bomba de alimentación (h_1):

(Ec.2)

Entropía a la entrada de la bomba de alimentación (s_1):

(Ec.3)

Volumen Específico en la bomba de alimentación ():

(Ec. 4)

Punto 2. Salida de la bomba de alimentación.

El sistema de ecuaciones para determinar el estado termodinámico a la salida de la bomba se establece a partir de los siguientes datos conocidos.

Datos conocidos:

: Presión a la salida de la bomba de alimentación.

Ecuaciones independientes:

Presión a la salida de la bomba de alimentación :

(Ec.5)

Temperatura a la salida de la bomba de alimentación :

(Ec.6)

Trabajo isentrópico de la bomba de alimentación ():

(Ec.7)

Entalpía a la salida de la bomba de alimentación :

(Ec.8)

Entropía a la salida de la bomba de alimentación :

(Ec.9)

Algoritmo. El modelo de la bomba tiene:

- 14 variables (, , , , , , , , , , , , , , ,)
- 9 ecuaciones independientes, dado que , son conocidos.
- 9 variable desconocidas () en el modelo de la bomba de alimentación.

Como se muestra en la tabla a continuación el modelo de la bomba tiene cero grados de libertad (9 ecuaciones y 9 variables desconocidas), lo cual lo hace matemáticamente consistente.

Ecuación	Variables
1	Temperatura a la entrada de la bomba
2	Entalpía a la entrada de la bomba
3	Entropía a la entrada de la bomba
4	Volumen específico en la bomba
5	Presión a la salida de la bomba
6	Temperatura a la salida de la bomba
7	Trabajo realizado por la bomba
8	Entalpía a la salida de la bomba
9	Entropía a la salida de la bomba

TABLA 1: ECUACIONES DE VARIABLES DESCONOCIDAS PARA EL MODELADO DE LA BOMBA.

El trabajo por unidad de masa en la bomba, como puede verse en la ecuación 7 de la tabla anterior, depende del estado inicial y final del fluido de trabajo así como de la cantidad de fluido que mueve.

2.2.2 Caldera.

Proceso de 2 a 3. Adición de calor a presión constante. El fluido proveniente de la bomba entra a la caldera, se calienta a presión constante hasta cambiar de fase y salir como vapor. Ver la representación gráfica del proceso 2 a 3 en la figura a continuación.

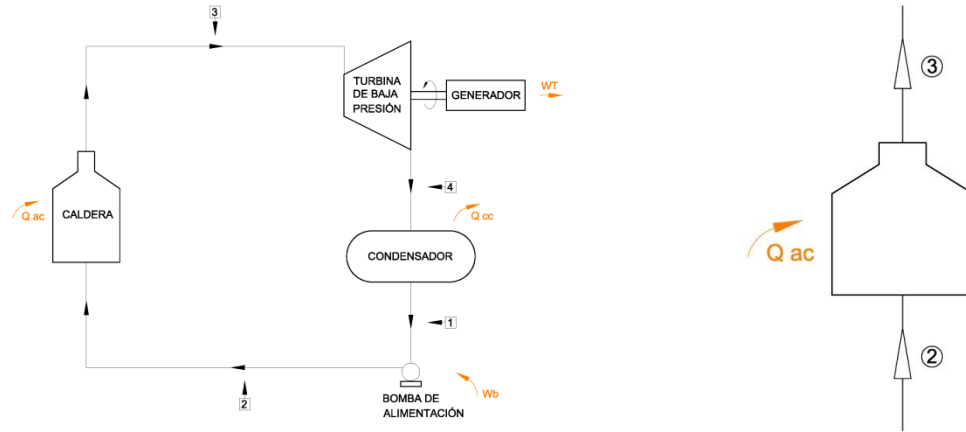


FIGURA 7: CALDERA¹².

Punto 3. Salida de la caldera.

Se asume que el fluido de trabajo no sufre pérdidas energéticas en el transcurso recorrido entre la salida de la bomba de alimentación y la entrada a la caldera. Por lo tanto las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo a la salida de la bomba de alimentación y a la entrada a la caldera serán las mismas.

Datos conocidos:

- : La presión de la caldera es un dato conocido.
- : La temperatura de salida de la caldera es un dato conocido.
- : Entalpía a la entrada de la caldera (Ver Ec. 8).

Ecuaciones independientes:

Entalpía a la salida de la caldera : (Ec. 10)

Entropía a la salida de la caldera : (Ec. 11)

Calor proporcionado por una fuente externa : (Ec.12)

¹² Elaboración propia.

Algoritmo. El modelo de la caldera tiene:

- 6 variables ().
- 3 ecuaciones independientes, dado que son conocidas.
- 3 variable desconocidas en el modelo de la caldera (, ,).

El modelo de la caldera tiene cero grados de libertad, 3 ecuaciones y 3 variables desconocidas, lo cual lo hace matemáticamente consistente.

Ecuaciones		Variables	
10			Entalpía de vapor saturado
11			Entropía de vapor saturado
12			Calor añadido a la caldera

TABLA 2. ECUACIONES DE VARIABLES DESCONOCIDAS PARA EL MODELADO DE LA CALDERA.

2.2.3 Turbina.

El análisis de la turbina depende de la calidad del vapor. Según la norma UNE 12953 Parte 10 que define los requisitos para la calidad del agua de alimentación y del agua de la caldera. El vapor puede estar *saturado o sobrecalentado* a la entrada de las turbinas. En el presente estudio serán considerados dos tipos de turbinas, turbinas secas y turbinas húmedas. Serán consideradas turbinas secas a aquellas en donde el vapor a la salida de la turbina es vapor seco. Las turbinas húmedas serán aquellas en donde el vapor a la salida de la turbina se encuentra en fase de mezcla agua-vapor. Como regla general en este estudio, se desea que la calidad del vapor en la última etapa de la turbina sea de 90% o superior.

Para el cálculo de la eficiencia de trabajo de las turbinas húmedas se considerará la hipótesis de Baumann que basado en pruebas de laboratorio concluyo que cuando el vapor que circula por un escalonamiento de turbina está húmedo, la eficiencia de la turbina disminuye 1% por cada 1% de humedad¹³.

Proceso de 3 a 4. Expansión adiabática. El vapor proveniente de la caldera hace girar los alabes de la turbina, para producir trabajo. El eje rotor gira acoplado a un generador para producir electricidad, ya sea por acople directo o con caja de transmisión, en el presente estudio no se considerará las pérdidas mecánicas de transmisión.

La figura a continuación representa gráficamente el proceso de 3 a 4.

¹³ (Baumann, 1912)

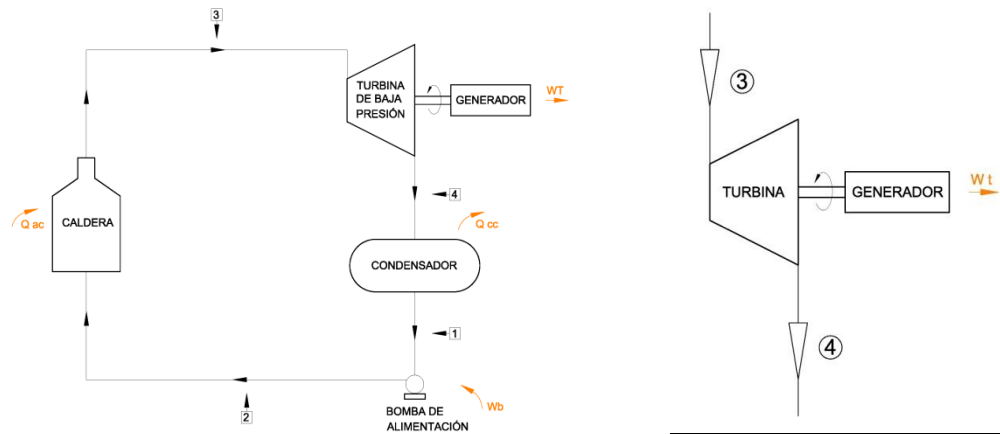


FIGURA 8: TURBINA¹⁴.

Siendo la entalpía la energía que puede utilizarse para producir trabajo. Al modelar el comportamiento real de la turbina es necesario conocer la entalpía real del fluido de trabajo. El estado termodinámico del vapor de agua a la entrada de la turbina se determinó en el estado termodinámico previo.

Estado termodinámico del vapor a la salida de la turbina:

A continuación se plantean dos hipótesis para poder determinar el estado termodinámico del vapor a la salida de la turbina. En el primer caso se plantea que el vapor realiza trabajo sin presencia de humedad en la turbina (hipótesis 1). En el segundo caso se considera que existe humedad en el vapor y el decremento de eficiencia provocado por el mismo en la turbina es considerado usando la regla de Baumman.

Hipótesis 1: Si entonces la calidad del vapor a la salida de la turbina es vapor sobrecalentado o al menos vapor saturado.

Datos conocidos:

- : Entalpía del vapor a la entrada de la turbina.
- : Entropía del vapor a la entrada de la turbina.
- : Eficiencia isentrópica de la turbina.

¹⁴ Elaboración propia.

Ecuaciones independientes:

Presión a la salida de la turbina :
(Ec. 13)

Temperatura a la salida de la turbina :
(Ec. 14)

Entropía a la salida de la turbina :
(Ec. 15)

Entalpía ideal a la salida de la turbina :
(Ec. 16)

Trabajo real realizado por la turbina :
(Ec. 17)

Entalpía real a la salida de la turbina :
(Ec. 18)

Entropía a la salida de la turbina :
(Ec. 19)

Algoritmo. La condición de fase a la salida de la turbina cuando se cumple la hipótesis 1, queda determinada por tres variables conocidas, y siete ecuaciones.

- 10 variables (
- 7 variables independientes ya que son variables conocidas.
- 7 variable desconocidas para el modelado de la turbina según hipótesis 1.

El estado termodinámico del vapor según hipótesis 1 queda determinado por 7 ecuaciones y 7 variables desconocidas lo cual lo hace matemáticamente consistente, como se muestra en la tabla a continuación.

Ecuaciones		Variables	
13			Presión a la salida de la turbina
14			Temperatura a la salida de la turbina
15			Entropía a la salida de la turbina
16			Entalpía ideal a la salida de la turbina
17			Trabajo real realizado en la turbina
18			Entalpía real a la salida de la turbina
19			Entropía a la salida de la turbina

TABLA 3. ECUACIONES DE VARIABLES DESCONOCIDAS MODELAR EL ESTADO TERMODINÁMICO A LA SALIDA DE LA TURBINA SEGÚN HIPÓTESIS 1.

Hipótesis 2: Si , entonces la calidad del vapor a la salida de la turbina está en fase de mezcla.

Datos conocidos:

- : Entalpía del vapor a la entrada de la turbina.
- : Entropía del vapor a la entrada de la turbina.
- : Eficiencia isentrópica de la turbina.

Ecuaciones independientes:

Presión a la salida de la turbina : La presión de salida de la turbina es la presión de condensación.

(Ec. 20)

Temperatura a la salida de la turbina :

(Ec. 21)

Entalpía ideal a la salida de la turbina :

(Ec. 22)

Entalpía del fluido de trabajo en fase líquida a presión de salida de la turbina :

(Ec. 23)

Entalpía del fluido de trabajo en fase vapor a presión de salida de la turbina :
(Ec. 24)

Entropía del fluido de trabajo en fase líquida a presión de salida de la turbina :
(Ec. 25)

Entropía del fluido de trabajo en fase vapor a presión de salida de la turbina :
(Ec. 26)

Calidad del vapor a la salida de la turbina :
_____ (Ec. 27)

Factor de Baumann :
(Ec.28)

Entalpía a la salida de la turbina considerando un decremento en la eficiencia por presencia de humedad en el vapor (Relación de Baumann):
_____ (Ec. 29)

Entropía a la salida de la turbina :
(Ec. 30)

Trabajo realizado en la turbina () :
(Ec. 31)

Algoritmo. La condición de fase a la salida de la turbina cuando se cumple la hipótesis 2, queda determinada por tres variables conocidas, y doce ecuaciones.

- 15 variables (
- 12 variables independientes ya que son variables conocidas.
- 12 variable desconocidas para el modelado de la turbina según hipótesis 2

Como se muestra en la tabla a continuación el estado termodinámico del vapor según hipótesis 2 queda determinado por 12 ecuaciones y 12 variables desconocidas lo cual lo hace matemáticamente consistente.

Ecuaciones		Variables	
20			Presión a la salida de la turbina
21			Temperatura a la salida de la turbina
22			Entalpía ideal a la salida de la turbina
23			Entalpía en fase líquida
24			Entalpía en fase vapor
25			Entropía en fase líquida
26			Entropía en fase vapor
27	_____		Calidad a la salida de la turbina
28			Factor de Baumann
29	_____		Entalpía a la salida de la turbina
30			Entropía a la salida de la turbina
31			Trabajo realizado por la turbina

TABLA 4. ECUACIONES DE VARIABLES DESCONOCIDAS MODELAR EL ESTADO TERMODINÁMICO A LA SALIDA DE LA TURBINA SEGÚN HIPÓTESIS 2.

2.2.4 Condensador

Proceso de 4 a 1. Rechazo isobárico de calor. El vapor expandido que sale de la turbina entra en el condensador donde intercambia calor con un fluido a baja temperatura por contacto directo o indirecto. Producto de este cambio de temperatura, el vapor cambia de fase. Y sale del condensador como líquido saturado, para comenzar un nuevo ciclo.

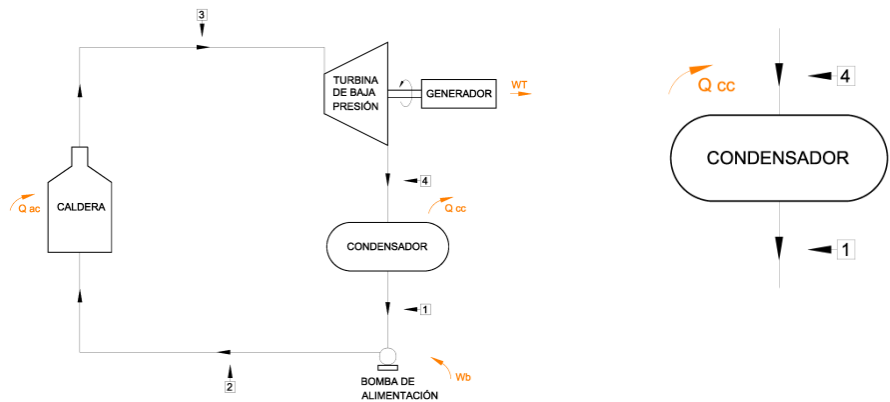


FIGURA 9. CONDENSADOR¹⁵

Datos conocidos:

- : Entalpía a la salida de la turbina.
- : Entalpía a la entrada de la bomba de alimentación.

Ecuaciones independientes:

Calor cedido por el condensador ():

Ec.32

Algoritmo.

- 3 variables (,).
- 1 ecuaciones independientes, dado que son variables conocidas.
- 1 variable desconocida .

Ecuaciones		Variables	
32			Calor cedido por el condensador

TABLA 5. ECUACIONES DE VARIABLES DESCONOCIDAS, CONDENSADOR.

El Ciclo de Potencia Rankine Simple queda definido por 32 ecuaciones y 3 variables conocidas (). Presión del vapor de agua a la entrada de la turbina, temperatura del vapor de agua a la entrada de la turbina y presión de condensación.

¹⁵ Elaboración propia

2.2.5 Algoritmo

A continuación se presenta el conjunto finito y ordenado de operaciones para resolver un CPRS.

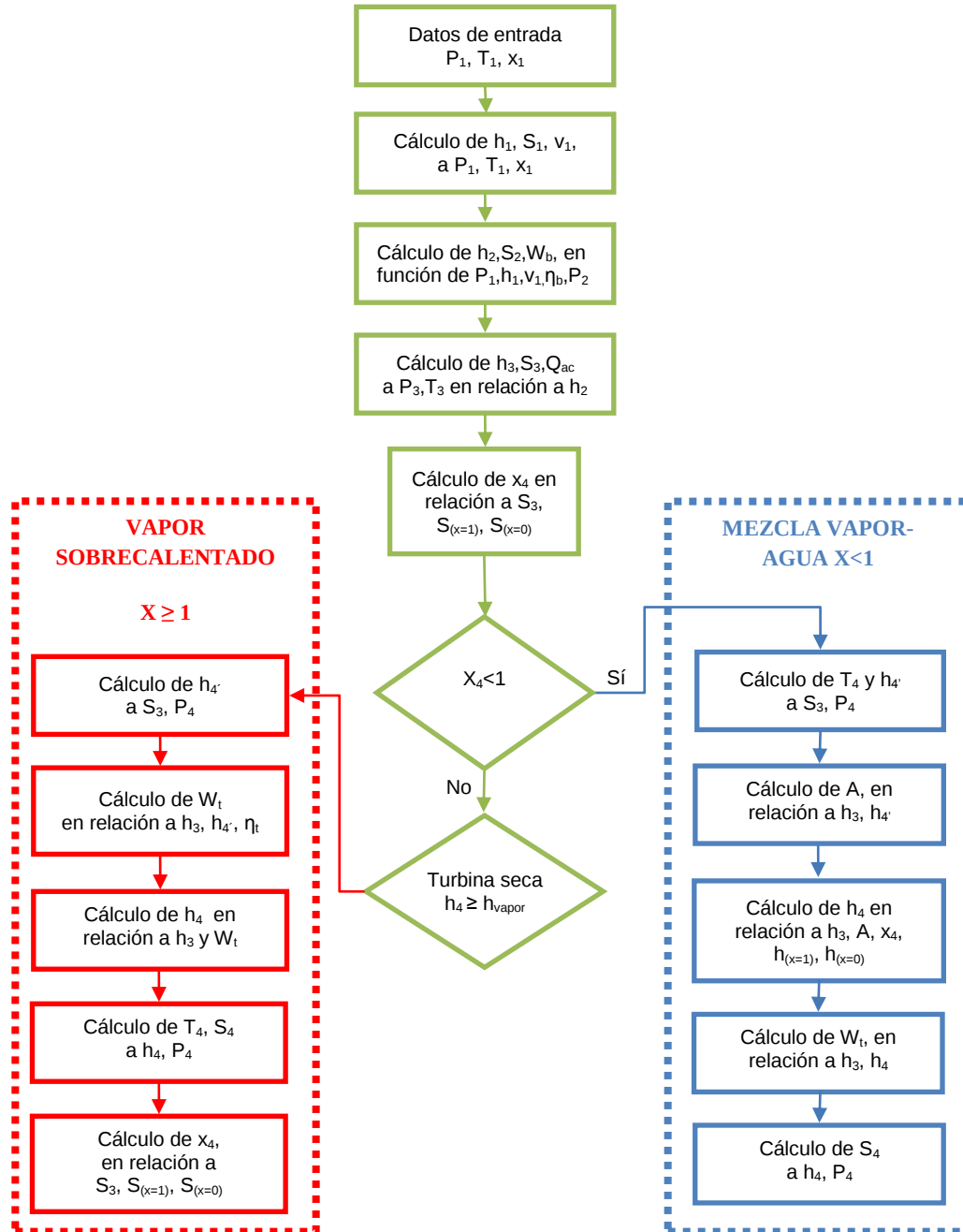


FIGURA 10. ALGORITMO CICLO RANKINE SIMPLE.

2.2.6 Análisis global del ciclo: Trabajo neto y eficiencia térmica neta.

Potencia desarrollada por la turbina.

Datos conocidos:

- : Entalpía de entrada a la turbina.
- : Entalpía a la salida de la turbina.
- : Temperatura en la turbina.
- : Presión en la turbina.
- : Flujo másico.

Ecuaciones independientes:

Potencia desarrollada por la turbina :

Ec.33

Algoritmo.

- 6 variables (, , , , ,).
- 1 ecuación independiente, dado que (, , ,) son variables conocidas.
- 1 variable desconocidas en el análisis global del ciclo (, , ,).

Ecuaciones		Variables	
33	_____		Potencia desarrollada por la turbina

TABLA 6. ECUACIONES, POTENCIA DESARROLLADA POR LA TURBINA

Trabajo neto. Un ciclo de potencia de vapor está constituido por un conjunto de elementos mecánicos que hacen que un fluido de trabajo recorra un proceso cíclico en el que se absorbe calor de una fuente externa a alta temperatura, se realiza trabajo, y se libera calor en el proceso de condensación.

Datos conocidos:

- : Calor añadido a la caldera.
- : Calor cedido por el condensador.
- : Trabajo realizado por la bomba de alimentación (Ec. 7).

Ecuaciones independientes:

Trabajo neto

Ec.34

Algoritmo.

- 4 variables ()
- 1 ecuaciones independientes, dado que son variables conocidas
- 1 variable desconocida en el análisis global del ciclo

Ecuaciones		Variables	
34			Trabajo neto del ciclo.

TABLA 7. ECUACIÓN DE TRABAJO NETO DEL CICLO RANKINE SIMPLE.

Eficiencia térmica neta. Se define como la razón entre el trabajo neto realizado y el calor absorbido durante un ciclo.

Datos conocidos:

- : Trabajo neto.
- : Calor añadido a la caldera.
- : Calor cedido por el condensador.

Ecuaciones independientes:

Eficiencia térmica del ciclo. Una máquina térmica con una eficiencia perfecta deberá convertir toda la energía calorífica absorbida en trabajo mecánico, el calor cedido por el sistema tendría que ser cero, lo cual es imposible según la segunda ley de la termodinámica. «Ningún proceso cíclico es tal que el sistema en el que ocurre y su entorno puedan volver a la vez al mismo estado del que partieron»

Ec.35

Algoritmo.

- 4 variables ()
- 3 ecuaciones independientes, son variables conocidas,
- 1 variable desconocida en el análisis global del ciclo

Ecuaciones		Variables	
35			Eficiencia térmica del ciclo

TABLA 8. ECUACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL CICLO RANKINE SIMPLE.

2.2.7 Restricciones del ciclo.

El fluido de trabajo usado para optimizar el ciclo Rankine es agua, cuya presión crítica es 220.6 bar.

El rango de trabajo de presión de la caldera se limita a presión sub-crítica. Incluyendo baja presión , media presión , y alta presión .

Para este análisis, el rango de temperatura del vapor a la salida de la caldera será:

El rango de presión definido para este análisis en el condensador, corresponde a:

Para el presente análisis el vapor no debe contener más del 10% de humedad en la última etapa de la turbina.

Para considerar pérdidas ocasionadas en la turbina durante el proceso de expansión (ruido, vibración, transferencia de calor, perdidas aerodinámicas fricción en los álabes de la turbina, etc.). Se selecciona una eficiencia isentrópica de turbina de 0.9 para este análisis.

Se adoptará la regla de Baumann para considerar la degradación del rendimiento de la turbina ante la existencia de humedad.

Se considera una eficiencia isentrópica de la bomba de alimentación de 0.8. No se consideran pérdidas asociadas al acarreo del fluido de trabajo a través de las tuberías, tampoco perdidas a causa del uso de accesorios que causan pérdidas distribuidas y locales de presión.

2.3 Ciclo de potencia Rankine con recalentamiento (CPRR).

Proceso de 4 a 5. El recalentamiento es el proceso que se introduce al CPRS para aumentar la eficiencia térmica. En los ciclos de potencia Rankine con recalentamiento (CPRR, en adelante), el vapor expandido que sale de la turbina de alta presión regresa a la caldera donde es recalentado a presión constante. El vapor recalentado se expande en una segunda turbina de baja presión para luego condensarse. El fluido de trabajo sale del condensador como líquido saturado, para comenzar un nuevo ciclo.

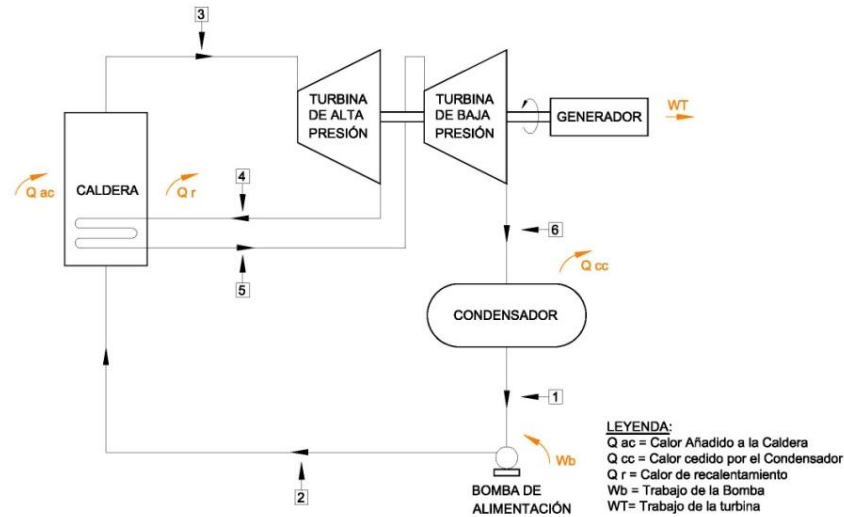


FIGURA 11. DIAGRAMA DE FLUJO DE UN CICLO DE POTENCIA RANKINE CON RECALENTAMIENTO.

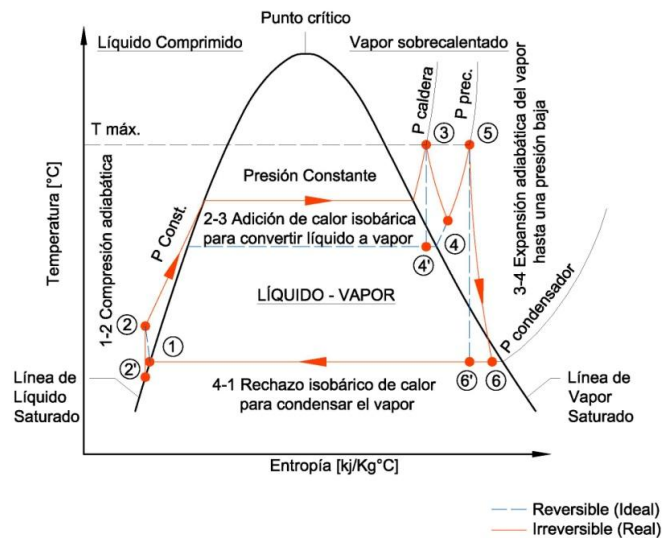


FIGURA 12. DIAGRAMA DE TEMPERATURA – ENTROPÍA DE CPRR.

Datos conocidos:

- : Presión a la entrada de la turbina de alta presión.
- : Presión a la salida de la turbina de alta presión.
- : Temperatura a la entrada de la turbina de alta presión.
- : Entalpía a la entrada de la caldera.
- : Entalpía a la salida de la caldera.
- : Entalpía a la salida de la turbina de alta presión.

Ecuaciones independientes:

Temperatura a la salida de la turbina de alta presión : Ec.36

Temperatura de recalentamiento a la entrada de la turbina de baja presión : Ec.37

Presión a la entrada de la turbina de baja presión: Ec.38

Entalpía del vapor recalentado a la entrada de la turbina de baja presión (): Ec.39

Calor añadido a la caldera: Ec.40

Calor de recalentamiento: Ec.41

Rendimiento térmico: Ec.42

Algoritmo.

- 13 variables ().
- 7 ecuaciones independientes, dado que son variables conocidas.
- 7 variables desconocidas en el modelo de la turbina .

Como se muestra en la tabla a continuación el proceso de 4 a 5 tiene cero grados de libertad (7 ecuaciones y 7 variables desconocidas), lo cual lo hace matemáticamente consistente.

Ecuaciones		Variables	
36			Temperatura a la salida de la TAP
37			Presión a la entrada de la TBP
38			Temperatura de recalentamiento
39			Entalpía a la entrada de la TBP
40			Calor añadido a la caldera
41			Calor de recalentamiento
42			Rendimiento térmico

TABLA 9. ECUACIONES DE VARIABLES DESCONOCIDAS PARA EL MODELADO DE LA TURBINA DE BAJA PRESIÓN.

2.4 Ciclo de potencia Rankine regenerativo (CPRRE).

La regeneración es un proceso usado en las centrales para mejorar los rendimientos térmicos del CPRS. Consiste en utilizar el calor de procesos residuales (extracciones parciales de vapor de turbinas o salidas de turbinas) para precalentar el fluido antes de entrar a la caldera.

Se analizan dos tipos de intercambiadores de calor. Calentadores abiertos y calentadores cerrados. Los calentadores abiertos son intercambiadores de calor por contacto directo. El vapor extraído de la turbina a altas temperaturas se mezcla con el condensado cuya temperatura es menor, para por contacto directo precalentar el agua de alimentación de la caldera.

Los calentadores cerrados son intercambiadores de calor en los cuales el fluido de alta temperatura y el fluido de baja temperatura nunca entran en contacto. El fluido a alta temperatura (vapor) transfiere calor al fluido a baja temperatura (condensado) sin mezclarse.

En los CPRRE el rendimiento térmico del ciclo aumenta ya que al precalentar el agua de alimentación de la caldera, la cantidad necesaria de calor añadido por la caldera disminuye.

2.4.1 Ciclo de potencia Rankine regenerativo con calentador abierto (CPRRECA).

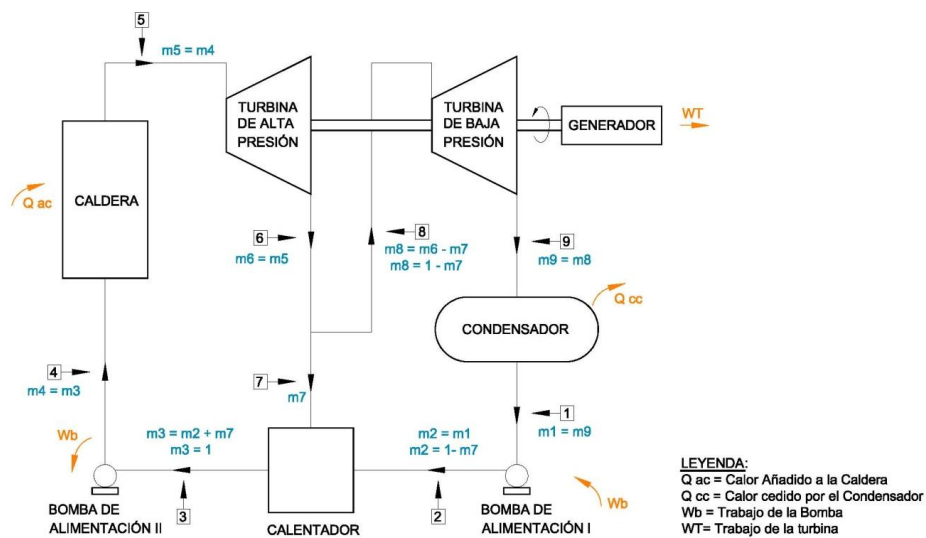


FIGURA 13. CICLO DE POTENCIA RANKINE REGENERATIVO CON CALENTADOR ABIERTO.

Para el modelado del calentador abierto cuando se realiza una extracción del fluido de trabajo en la turbina se parte de:

Datos conocidos:

Ecuaciones independientes:

Conservación de masa:

Ec.43

Balance de energía

Ec.44

Despejando de la ecuación anterior:

Ec.45

Trabajo total de las turbinas:

Ec.46

Trabajo de la bomba de alimentación:

Ec.47

Algoritmo.

- 12 variables ()
- 3 ecuaciones independientes, dado que son variables conocidas,
- 3 variables desconocidas en el modelo de la turbina

Como se muestra en la tabla a continuación el modelado del calentador abierto tiene cero grados de libertad (3 ecuaciones y 3 variables desconocidas), lo cual lo hace matemáticamente consistente.

Ecuaciones		Variables	
45	_____		Masa extraída
46			Trabajo de la TAP
47			Trabajo BA

TABLA 10. ECUACIONES PARA MODELADO DEL CICLO DE POTENCIA RANKINE REGENERATIVO CON CALENTADOR ABIERTO.

2.4.2 Ciclo de potencia Rankine regenerativo con calentador cerrado (CPRRECC).

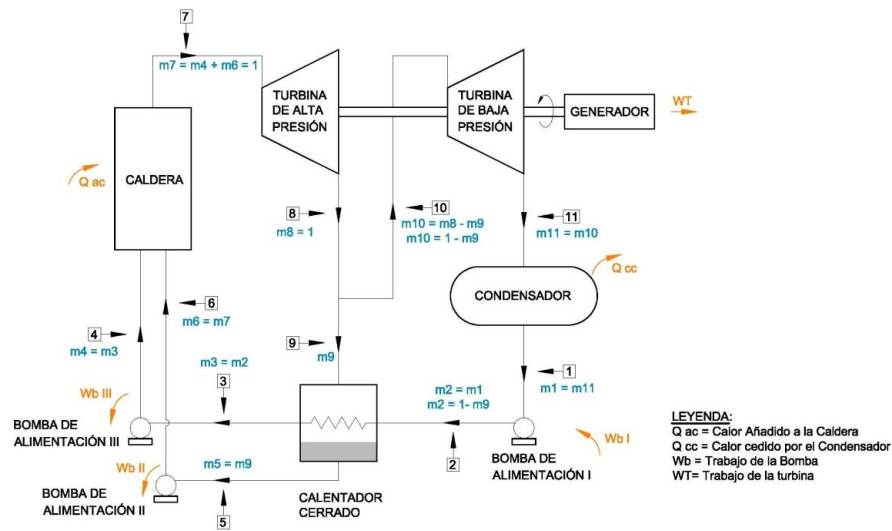


FIGURA 14. CICLO DE POTENCIA RANKINE REGENERATIVO CON CALENTADOR CERRADO. DRENES CON BOMBEO HACIA DELANTE.

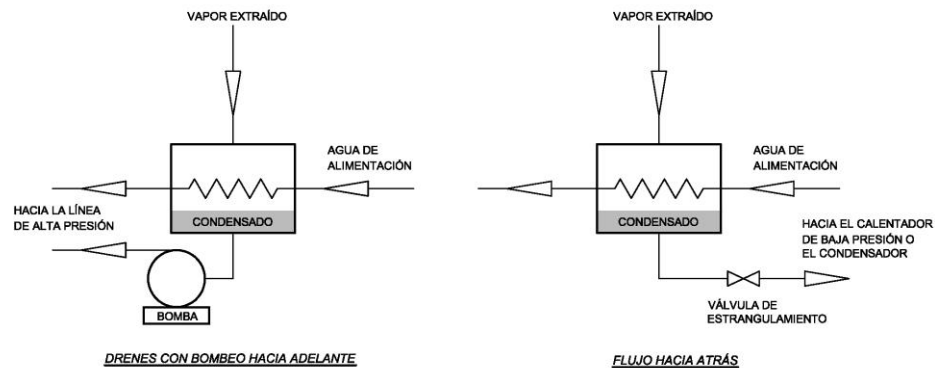


FIGURA 15. CALENTADORES CERRADOS.

Los intercambiadores de calor del tipo cerrados son utilizados para que dos fluidos intercambien calor sin entrar en contacto entre ellos. En este caso el vapor extraído de la caldera se condensa al entrar en contacto con el exterior de los tubos por los que circula el agua de alimentación. El vapor de agua condensado puede extraerse de dos maneras como se muestra en la figura 15.

Balance energético en régimen estacionario despreciando las variaciones de energía cinética, potencial, de calor y trabajo:

Ec.48

CAPÍTULO 3

3. MÉTODO CUANTITATIVO.

3.1 Método de optimización.

Se ha seleccionado como método de optimización para el presente análisis el Algoritmo Genético. EES es la plataforma computacional seleccionada para resolver los algoritmos usados de ejemplos, ya que está equipado con un módulo para optimizar usando algoritmo genético. EES un programa intuitivo, fácil de usar y equipado con todas las herramientas necesarias para resolver los algoritmos multivariables basados en el ciclo de potencia de Rankine usados de ejemplos.

El método de algoritmo genético implementado en EES se deriva del programa de dominio público de optimización Pikaia (versión 1.2, abril de 2002) escrito por Paul Charbonneau y Barry Knapp del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR).

3.2 Algoritmos genéticos (AG)

“Los algoritmos Genéticos son algoritmos de búsqueda basados en los mecanismos de selección natural y de la genética natural. Combinan la supervivencia del más apto entre estructuras de secuencias con un intercambio de información estructurado, aunque aleatorio, para constituir así un algoritmo de búsqueda con algunas de las capacidades de innovación de la búsqueda humana.”¹⁶

3.3 Componentes de un AG.

1. Población: Haciendo uso del sistema binario se crea una población inicial conformada por cadenas de bits. En la cual cada cromosoma representa a cada individuo de la población. Los genotipos se decodifican, para poder conocer el fenotipo y se evalúan en la función objetivo. Así como ocurre en la selección natural cuanto mayor sea la adaptación de un individuo a un problema, mayor será la probabilidad de que el mismo sea seleccionado para reproducirse, cruzando su material genético con otro individuo seleccionado de igual forma. Una vez conocida la probabilidad de ser seleccionados para reproducirse de cada uno de los miembros de la población; haciendo uso del método de la ruleta, se seleccionan los cromosomas a reproducirse los cuales conforman la población inicial. Valor asignado por Pikaia de intervalo de generaciones para explorar es [16,2048].

¹⁶ (Goldberg, 1989)

2. Reproducción. Los padres seleccionados se reproducen por medios de cruce y mutación, en una nueva generación.

Cruce: Este operador elige al azar un punto de cruce, y cambia las secuencias antes o después de esa posición entre dos cromosomas. Esto garantiza que la descendencia herede algunas características de los padres de lo contrario la evolución tendría que comenzar en cada nueva generación. Valor Pikaia 0.85, de probabilidad que ocurra recombinación genética.

Mutación: Este operador produce variaciones de modo aleatorio en un cromosoma. Garantiza la variabilidad de las nuevas generaciones. Individuos de diferentes aptitudes deben coexistir en la población, de lo contrario la selección natural no tiene nada que operar. Valor Pikaia por defecto 0.005, lo cual significa que cada cromosoma tiene una probabilidad del 0.005 de ser sometido a sustitución aleatoria.

El intervalo de mutación máxima Pikaia en EES puede ser seleccionado del siguiente intervalo [0.0875 ,0.7]. Al fijar el valor más pequeño 0.0875, el algoritmo buscará el óptimo en los sitios más próximo al óptimo actual. Al fijar el valor más alto 0.7, el algoritmo buscare el óptimo en sitios más distantes al óptimo actual.

3. Selección y reemplazo. Los genotipos de la nueva población se decodifican, se evalúan en la función objetivo. Los miembros menos aptos se descartan, los miembros más fuertes se conservan para luego copiarlos intactos en la nueva generación. Esto garantiza que el cruce o/y la mutación no destruyan la mejor solución de una determinada población además de ahorrar tiempo en la búsqueda del óptimo.

Si el diseño del AG está bien diseñado la población convergerá a una solución óptima.

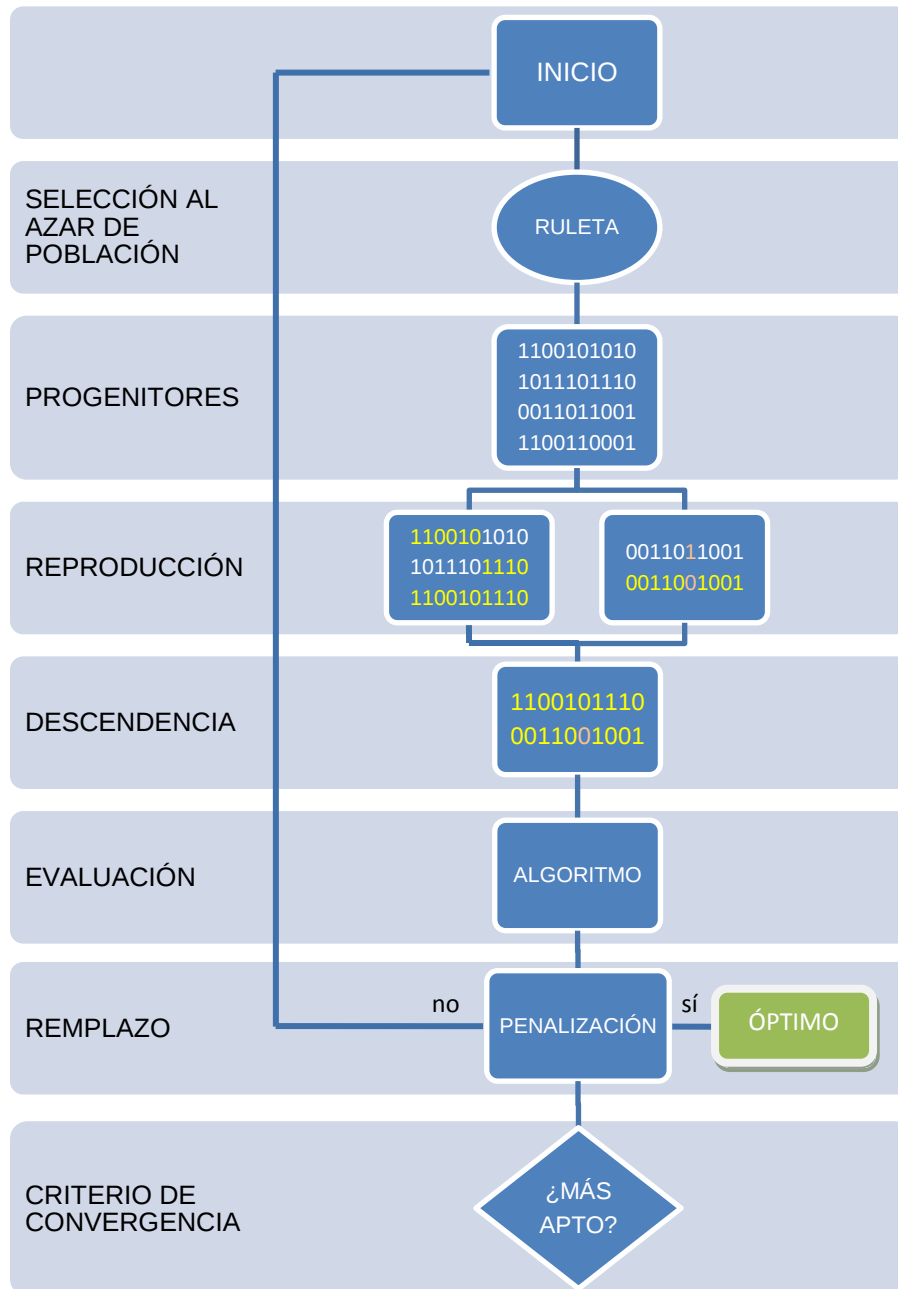


FIGURA 16. ALGORITMO GENÉTICO SIMPLIFICADO.

3.4 Criterio de convergencia.

- Máximo número de generaciones para explorar,
- El óptimo es encontrado,
- No hay mejoras en las nuevas generaciones.

3.5 Parámetros importantes de un algoritmo genético.

Los tres parámetros de convergencia usados en la arquitectura del programa responsables de identificar un punto óptimo son:

- El número máximo de individuos de una población [16 128],
- El número máximo de generaciones para explorar [162 048],
- El intervalo de mutación máxima [0.0875 ,0.7].

3.6 Comparación de los AG con las técnicas tradicionales de optimización.

- Trabajan con la codificación de parámetros no con los parámetros en sí.
- Buscan a partir de una población de puntos, no desde un punto determinado.
- Utiliza para evaluar la función objetivo, no derivadas o conocimientos auxiliares.

3.7 Características de los algoritmos basados en el Ciclo de Potencia Rankine.

En la optimización para plantas de potencia de vapor basadas en el ciclo termodinámico de Rankine. El proceso de maximización de la función objetivo es difícil ya que:

- El dominio de la función forma estructuras complejas.
- La evaluación de las funciones requiere un proceso de simulación.
- La función tiene máximos relativos que podrían conducir a un falso óptimo.

Para nuestro caso EES generará 264 322 simulaciones del problema, cambiando parámetros en forma progresiva, creando 2048 generaciones. Cada generación estará conformada por 128 individuos, de donde provendrá el mejor valor de la función objetivo, el óptimo.

3.8 Características para determinar si es posible usar un AG en el análisis actual.

- El espacio de búsqueda del AG está delimitado dentro de un rango.
- Se puede definir una función de aptitud que indique qué tan buena o mala es una cierta respuesta.

3.9 Estrategia de solución.

Variables independientes.

Ciclo de potencia Rankine simple: Presión de la caldera, temperatura de entrada a la turbina, presión del condensador.

Ciclo de potencia Rankine con recalentamiento: Presión de la caldera, temperatura de recalentamiento, presión del condensador, número de etapas de recalentamiento.

Ciclo de potencia Rankine regenerativo: Presión de la caldera, presión del condensador, temperatura de entrada a la turbina.

Simulando en el programa computacional EES el conjunto ordenado y finito de operaciones vistos en el capítulo anterior, según el tipo de ciclo de potencia. Es posible determinar todas las variables dependientes del ciclo analizado partiendo de las variables independientes.

Conociendo las funciones y el dominio, se selecciona una población de individuos dentro del conjunto de valores que toman las variables independientes entre dos límites dados y se procesa a la búsqueda del valor óptimo.

CAPÍTULO 4

4. APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En todos los ejemplos a optimizar los datos de entrada son los mismos. Presión en el condensador, presión de entrada a la caldera, temperatura de entrada a la turbina. Las restricciones al ciclo se presentaron en el inciso 2.2.7.

4.1 Ciclo de potencia Rankine simple. Ejemplo 1.

Planteamiento del problema:

Determinar la presión del condensador, presión de la caldera y la temperatura del vapor a la entrada de la turbina, correspondientes a la eficiencia térmica máxima del ciclo.

Datos de entrada:

Presión del condensador:

Presión de la caldera:

Temperatura a la entrada de la turbina:

De no indicarse lo contrario, en todos los ejemplos se considera que tanto la turbina como la bomba son adiabáticas, con eficiencias isentrópicas de 90% y 80% respectivamente. El grado de sub-enfriamiento en el condensador es de 5 °C.

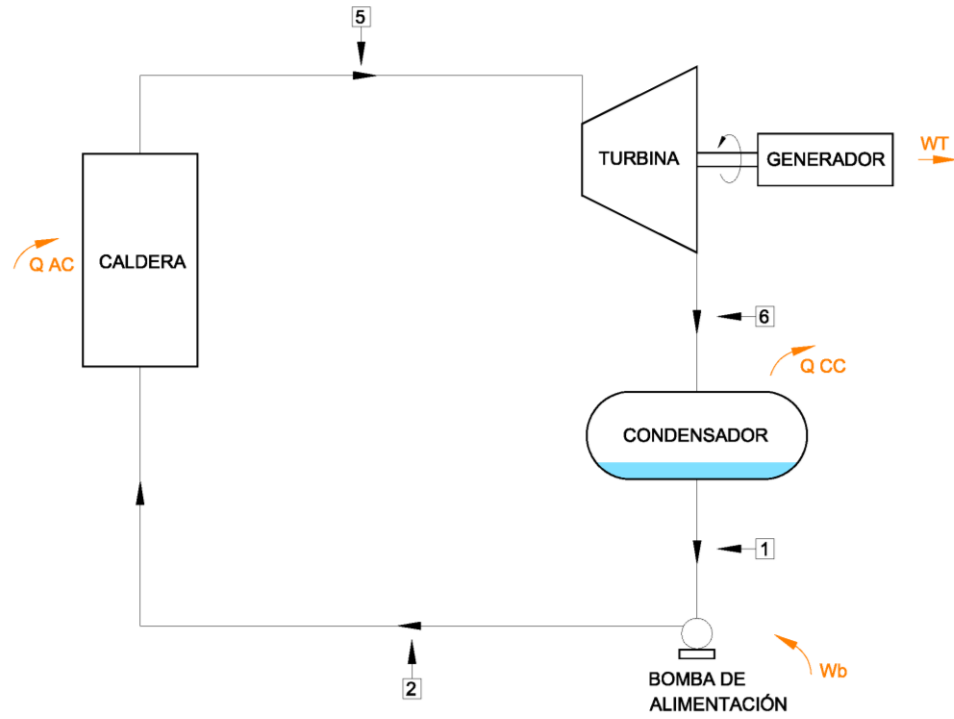


FIGURA 17. DIAGRAMA DE FLUJO, CICLO DE POTENCIA RANKINE SIMPLE, EJEMPLO 1.

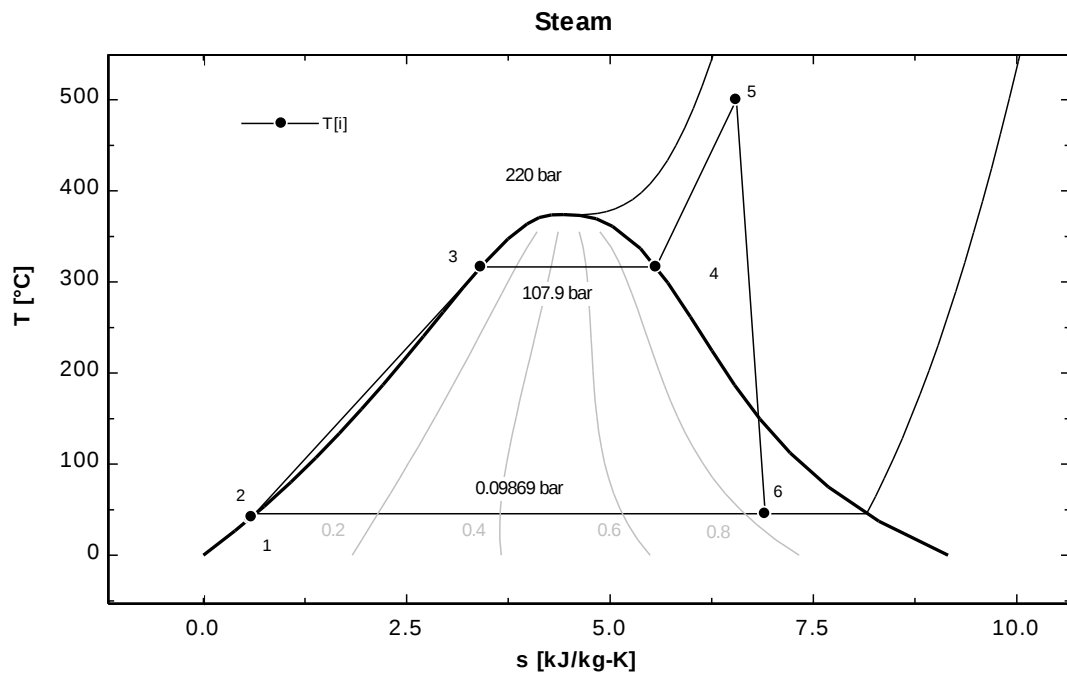


FIGURA 18. DIAGRAMA T-S, EJEMPLO 1.

Optimización.

Se realizaron 264 322 iteraciones con una población de 128 individuos obteniendo 2 048 generaciones para determinarlas la presión del condensador, la presión de la caldera y la temperatura del vapor a la entrada de la turbina, correspondientes a la eficiencia térmica máxima del ciclo.

La tabla a continuación muestra los resultados de la optimización del ciclo.

Variables	Unidades	Solución
Presión del condensador		0.09869
Presión de entrada a la turbina		107.9
Temperatura de entrada a la turbina		500
Trabajo de la bomba		15.53
Trabajo de la turbina		943.1
Trabajo neto		927.6
Calor añadido a la caldera		3179
Calor cedido por el condensador		2251
Calidad del vapor a la salida de la turbina		0.7868
Eficiencia térmica del ciclo		0.2918

TABLA 11. CUADRO DE SOLUCIÓN ÓPTIMA, EJEMPLO 1.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de todos los estados termodinámicos del ciclo.

	Pi [bar]	Ti []	Hi [kJ/kg]	si [kJ/kg K]
[1]	0.09869	40.56	169.8	0.5797
[2]	107.9	42.01	185.4	0.5946
[3]	107.9	316.7	1441	3.415
[4]	107.9	316.7	2709	5.565
[5]	107.9	500	3364	6.552
[6]	0.09869	45.56	2421	6.906

TABLA 12. SOLUCIÓN DE PUNTOS DE EVALUACIÓN, EJEMPLO 1.

Conclusión.

El valor óptimo de la presión del condensador P[1] es 0.09869 bar, corresponde al valor mínimo permisible que puede tomar esta variable. La presión de condensación es una limitante de las plantas de potencia. La presión de condensación está limitada por la temperatura ambiental. En la búsqueda del aumento de la eficiencia térmica, las condiciones de la etapa de condensación son más difíciles de manipular que las condiciones en la etapa donde se genera el vapor.

La temperatura de entrada a la turbina es el máximo valor que dicha variable puede tomar. No ocurre lo mismo con la presión de la caldera cuyo valor es 107.9 bar. La

combinación de presión y temperatura en el condensador así como la eficiencia de la turbina generaron una calidad de vapor de 0.7868.

Bajo estas condiciones de temperatura, la eficiencia de Carnot para una máquina ideal es:

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_H - T_C}{T_H}$$

La temperatura máxima del ciclo _____, corresponde a la máxima temperatura que el vapor alcanza en la caldera. La temperatura mínima del ciclo _____, corresponde a la mínima temperatura que el fluido de trabajo alcanza en este ejemplo en el proceso de condensación.

Tomando como el 100% la eficiencia de Carnot para una máquina ideal (0.5942) y relacionándola con la eficiencia obtenida en el ejemplo 1 (0.2918) se obtiene que la eficiencia del ciclo de potencia Rankine del ejemplo 1 corresponde al 49.11% de la eficiencia máxima teórica.

4.2 Ciclo de potencia Rankine simple con recalentamiento. Ejemplo 2.

Planteamiento del problema:

Determinar la presión del condensador, presión de la caldera y la temperatura del vapor a la entrada de la turbina, correspondientes a la eficiencia térmica máxima del ciclo.

Datos de entrada:

Presión del condensador:

Presión de la caldera:

Temperatura a la entrada de la turbina:

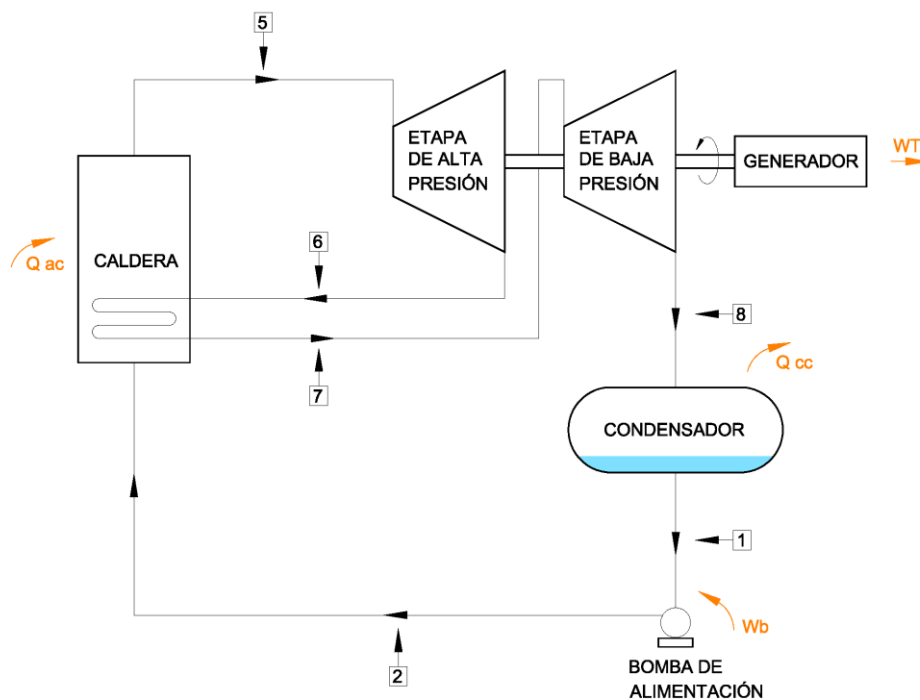


FIGURA 19. DIAGRAMA DE FLUJO, CICLO DE POTENCIA RANKINE CON RECALENTAMIENTO, EJEMPLO 2.

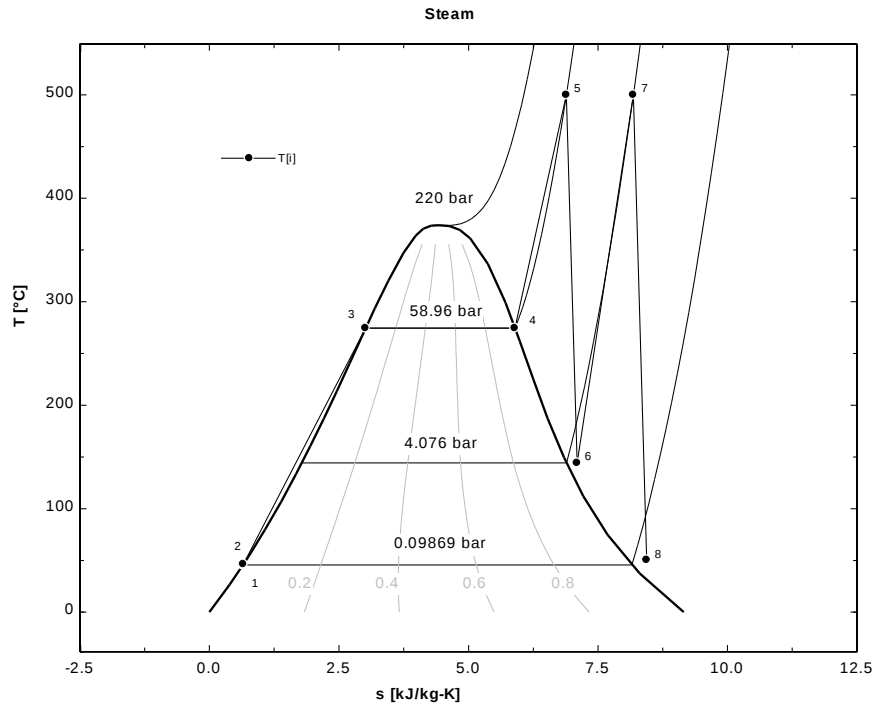


FIGURA 20. DIAGRAMA T-S, EJEMPLO 2.

Optimización:

Se realizaron 264 322 iteraciones con una población de 128 individuos obteniendo 2048 generaciones para determinar la presión del condensador, la presión de la caldera y la temperatura del vapor a la entrada de la turbina, correspondientes a la eficiencia térmica máxima del ciclo.

La tabla a continuación muestra los resultados de la optimización del ciclo.

Variables	Unidades	Solución
Presión del condensador		0.0987
Presión de entrada a la turbina		58.96
Temperatura de entrada a la turbina		500
Trabajo de la bomba		8.494
Trabajo de la turbina 1		593.8
Trabajo de la turbina 2		802.9
Trabajo de la turbina		1397
Trabajo neto		1388
Calor añadido a la caldera		3880
Calor cedido por el condensador		2491
Calidad del vapor a la salida de la turbina		1
Calidad del vapor a la salida de la turbina		1.041
Eficiencia térmica del ciclo		0.3578

TABLA 13. CUADRO DE SOLUCIÓN ÓPTIMA, EJEMPLO 2.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de todos los estados termodinámicos del ciclo. La entropía a la salida de la bomba de alimentación es mayor que la entropía a la entrada, lo mismo ocurre con las entropías a la entrada y salida de la turbina cumpliéndose así la Segunda Ley de la Termodinámica.

	Pi [bar]	Ti [°C]	hi [kJ/kg]	si [kJ/kg K]
[1]	0.0987	45.55	190.7	0.6457
[2]	58.96	46.36	199.2	0.6538
[3]	58.96	274.5	1207	3.016
[4]	58.96	274.5	2785	5.897
[5]	58.96	500	3424	6.89
[6]	4.077	144.3	2830	7.096
[7]	4.077	500	3485	8.182
[8]	0.0987	50.55	2682	8.44

TABLA 14. SOLUCIÓN DE PUNTOS DE EVALUACIÓN, EJEMPLO 2.

Conclusión:

El valor óptimo de la presión de condensación P[1] es 0.0987 Bar. Al igual que en el ejemplo anterior la presión de condensación, en la optimización de la eficiencia térmica, es el mínimo valor permisible que dicha variable puede tomar.

La presión de entrada a la turbina en este ejemplo no corresponde al máximo valor. Según el resultado de la presión óptima obtenido para P[5] (58.96 bar) la caldera en este ejemplo tendría que ser una caldera sub-crítica de media presión ($20 \leq p \leq 64$ bar).

La temperatura de entrada a la etapa de alta presión de la turbina corresponde al máximo valor permisible.

El trabajo requerido para comprimir líquido en la bomba de alimentación es casi despreciable comparado con el trabajo producido por la expansión del vapor en la turbina de dos etapas.

La eficiencia de Carnot para una máquina ideal es:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

La temperatura máxima del ciclo _____, corresponde a la máxima temperatura que el vapor alcanza en la caldera. La temperatura mínima del ciclo _____

, corresponde a la temperatura de rechazo en el proceso de condensación, la mínima temperatura que el fluido de trabajo alcanza en este ejemplo.

La eficiencia térmica del ejemplo 2, 35.78% corresponde al 60.88% de la máxima eficiencia teórica, una mejora significativa en relación al ejemplo 1.

En las figuras a continuación se grafica la presión del condensador, la presión de la caldera y la temperatura del vapor a la entrada de la turbina en relación a la optimización de la eficiencia térmica del ciclo. En las figuras puede verse como una población optimizada con AG converge en un valor óptimo.

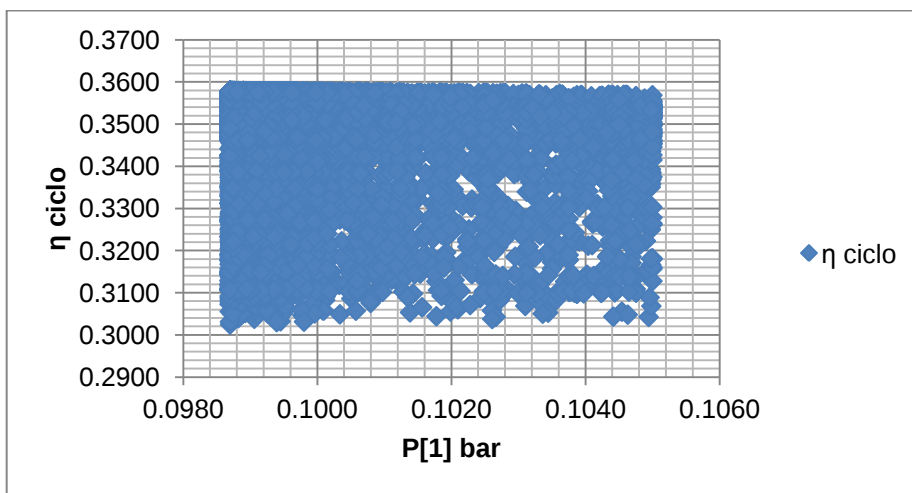


FIGURA 21. GRÁFICA DE OPTIMIZACIÓN DE PRESIÓN DEL CONDENSADOR VERSUS EFICIENCIA TÉRMICA. EJEMPLO 2.

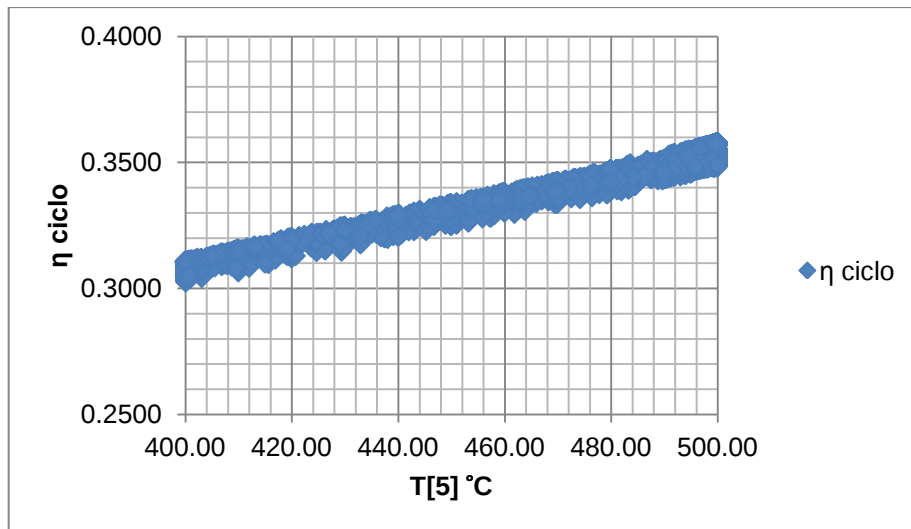


FIGURA 22. GRÁFICA DE OPTIMIZACIÓN DE TEMPERATURA DE ENTRADA A LA TURBINA VERSUS EFICIENCIA TÉRMICA. EJEMPLO 2.

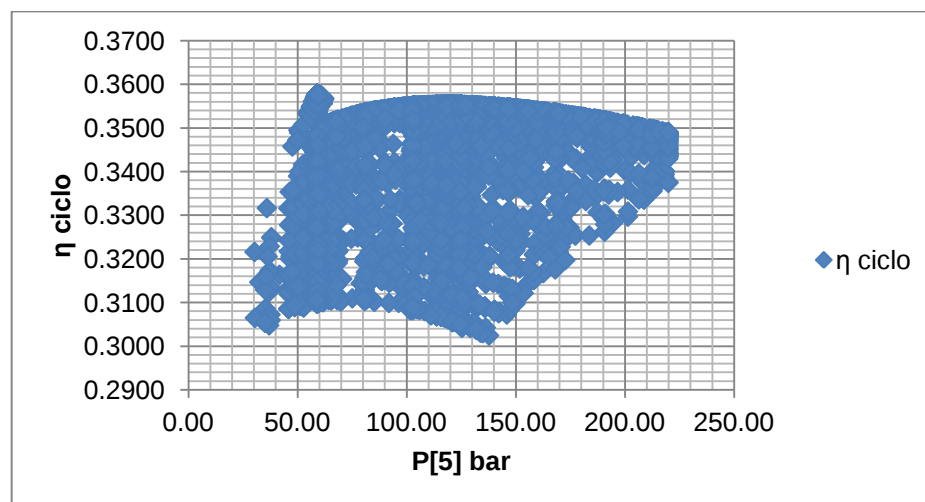


FIGURA 23. GRÁFICA DE OPTIMIZACIÓN DE PRESIÓN DE LA CALDERA VERSUS EFICIENCIA TÉRMICA. EJEMPLO 2.

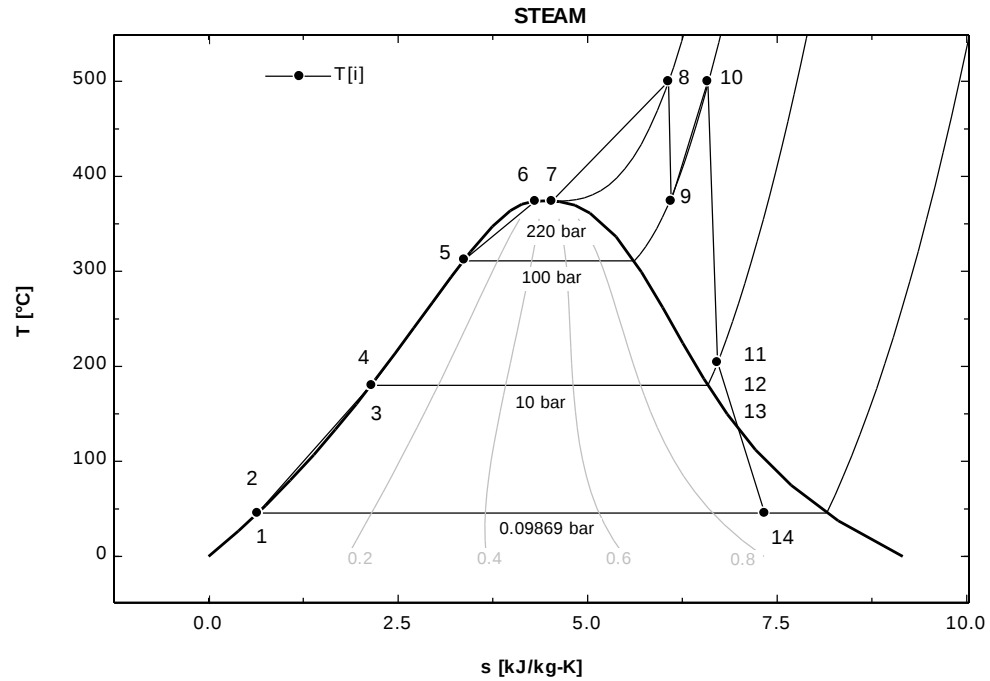


FIGURA 25. DIAGRAMA T-S, EJEMPLO 3.

Optimización:

Se realizaron 264 322 iteraciones con una población de 128 individuos obteniendo 2048 generaciones para determinar la presión del condensador, la presión de la caldera y la temperatura del vapor a la entrada de la turbina, correspondientes a la eficiencia térmica máxima del ciclo.

La tabla a continuación muestra los resultados de la optimización del ciclo.

Variables	Unidades	Solución
Presión del condensador		0.09869
Presión de entrada a la turbina		212.9
Temperatura de entrada a la turbina		500
Trabajo de la bomba 1		28.58
Trabajo de la bomba		28.58
Trabajo de la turbina 1		185.1
Trabajo de la turbina 2		540.1
Trabajo de la turbina 3		458.9
Trabajo de la turbina		1087
Trabajo neto		1058
Calor añadido a la caldera		2780
Calor cedido por el condensador		1682
Calidad del vapor a la salida de la turbina		0.81
Eficiencia térmica del ciclo		0.3807

TABLA 15. SOLUCIÓN ÓPTIMA, EJEMPLO 3.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de todos los estados termodinámicos del ciclo. La entropía a la salida de la bomba de alimentación es mayor que la entropía a la entrada, lo mismo ocurre con las entropías a la entrada y salida de las diferentes etapas de la turbina cumpliéndose así la Segunda Ley de la Termodinámica.

	Pi [bar]	Ti [°C]	hi [kJ/kg]	si [kJ/kg K]
[1]	0.09869	45.56	190.8	0.6459
[2]	9.462	45.56	191.7	0.6459
[3]	9.462	177.5	752.3	2.116
[4]	212.9	177.5	780.9	2.129
[5]	98.65	310	1401	3.349
[6]	212.9	371	1910	4.14
[7]	212.9	371	2315	4.768
[8]	212.9	500	3221	6.094
[9]	98.65	374	3035	6.125
[10]	98.65	500	3376	6.605
[11]	9.462	202.2	2836	6.735
[12]	9.462	202.2	2836	6.735
[13]	9.462	202.2	2836	6.735
[14]	0.09869	45.56	2326	7.345

TABLA 16. SOLUCIÓN DE PUNTOS DE EVALUACIÓN, EJEMPLO 3.

Conclusiones:

Bajo estas condiciones de temperatura, la eficiencia de Carnot para una máquina ideal es:

La temperatura máxima del ciclo _____, corresponde a la máxima temperatura que el vapor alcanza en la caldera. La temperatura mínima del ciclo _____, corresponde a la mínima temperatura que el fluido de trabajo alcanza en este ejemplo en el proceso de condensación.

4.4 Ciclo de potencia Rankine con recalentamiento y regeneración. Calentador abierto, calentador cerrado con drenes hacia adelante.

4.4.1 Ejemplo 4.

Planteamiento del problema:

Determinar la presión del condensador, presión de la caldera y la temperatura del vapor a la entrada de la turbina, correspondientes a la eficiencia térmica máxima del ciclo.

Datos de entrada:

Presión del condensador:

Presión de la caldera:

Temperatura a la entrada de la turbina:

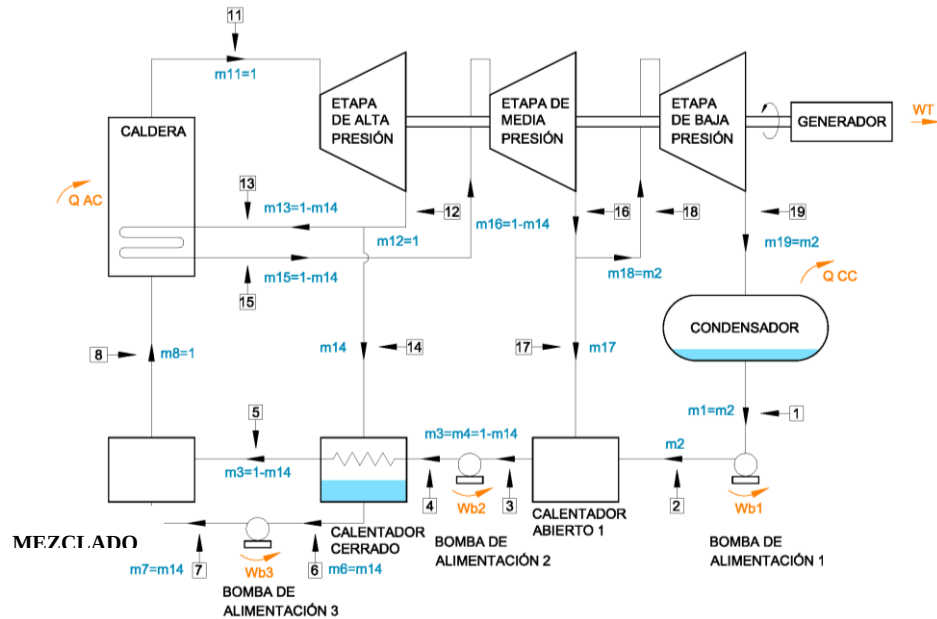


FIGURA 26. DIAGRAMA DE FLUJO, CICLO DE POTENCIA RANKINE CON RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN, EJEMPLO 4.

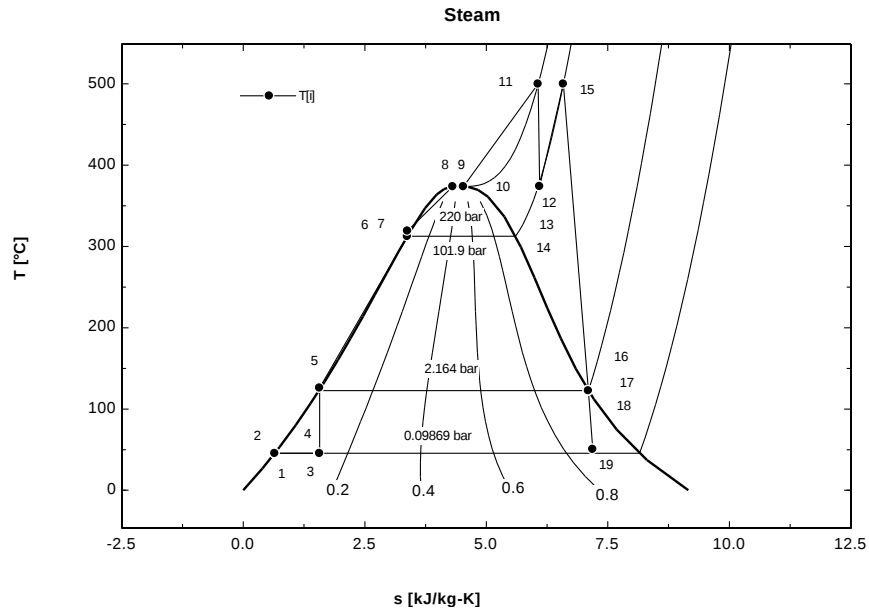


FIGURA 27. DIAGRAMA T-S, EJEMPLO 4.

Optimización:

Se realizaron 264 322 iteraciones con una población de 128 individuos obteniendo 2048 generaciones para determinar la presión del condensador, la presión de la caldera y la temperatura del vapor a la entrada de la turbina, correspondientes a la eficiencia térmica máxima del ciclo.

La tabla a continuación muestra los resultados de la optimización del ciclo.

Variables	Unidades	Solución
Presión del condensador		0.09869
Presión de entrada a la turbina		220
Temperatura de entrada a la turbina		500
Trabajo de la bomba 1		0.2608
Trabajo de la bomba 2		28.94
Trabajo de la bomba 3		21.54
Trabajo de la bomba		29.16
Trabajo de la turbina 1		183.5
Trabajo de la turbina 2		778.8
Trabajo de la turbina 3		315.9
Trabajo de la turbina		1236
Trabajo neto		1206
Calor añadido a la caldera		3011
Calor cedido por el condensador		1804
Calidad del vapor a la salida de la turbina		0.8204
Eficiencia térmica del ciclo		0.4007

TABLA 17. SOLUCIÓN ÓPTIMA, EJEMPLO 4.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de todos los estados termodinámicos del ciclo. La entropía a la salida de la bomba de alimentación es mayor que la entropía a la entrada, lo mismo ocurre con las entropías a la entrada y salida de las diferentes etapas de la turbina cumpliéndose así la Segunda Ley de la Termodinámica.

	Pi [bar]	Ti [°C]	hi [kJ/kg]	si [kJ/kg K]
[1]	0.09869	45.56	190.8	0.6459
[2]	2.164	45.56	191	0.646
[3]	2.164	45.58	515.5	1.557
[4]	220	45.58	544.4	1.572
[5]	220	126	544.4	1.572
[6]	101.9	312.4	1415	3.373
[7]	220	319.2	1437	3.38
[8]	220	373.8	544.4	4.308
[9]	220	373.8	2021	4.308
[10]	220	373.8	2164	4.53
[11]	220	500	3210	6.068
[12]	101.9	374	3026	6.099
[13]	101.9	374	3026	6.099
[14]	101.9	374	3026	6.099
[15]	101.9	500	3372	6.586
[16]	2.164	122.8	2593	7.101
[17]	2.164	122.8	2593	7.101
[18]	2.164	122.8	2593	7.101
[19]	0.09869	50.56	2277	7.192

TABLA 18. SOLUCIÓN DE PUNTOS DE EVALUACIÓN, EJEMPLO 4.

Conclusiones:

Este ejemplo cuenta con una etapa de recalentamiento y una etapa regenerativa. En la optimización de este ejemplo no se restringió la calidad del vapor a la salida de la etapa de baja presión de la turbina y se obtuvo una calidad de vapor con un alto porcentaje de humedad.

Usando los valores óptimos de operación obtenidos y restringiendo la calidad del vapor a la salida de la turbina se obtiene los siguientes resultados:

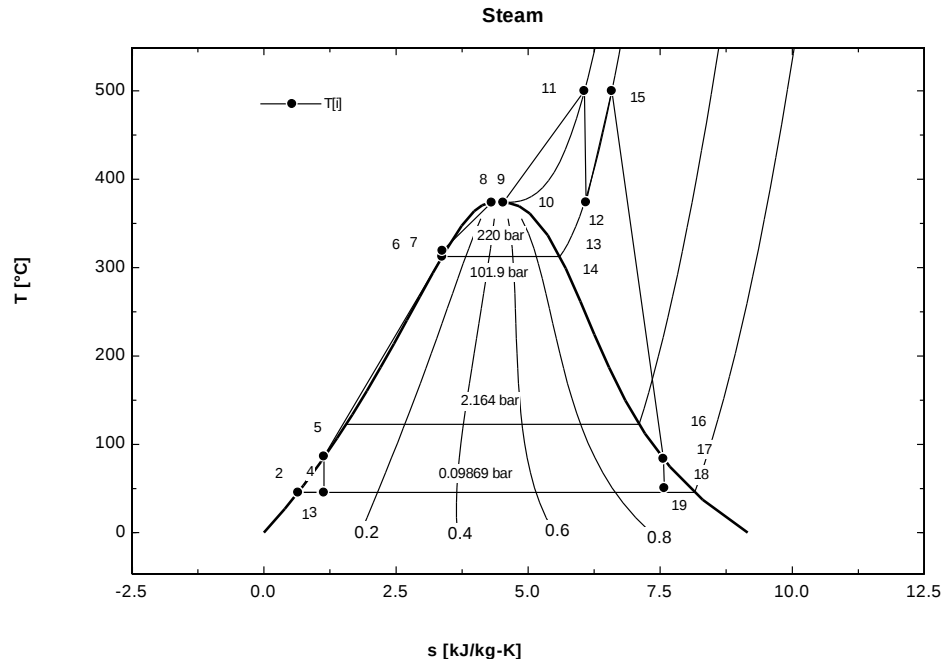


FIGURA 28. DIAGRAMA T-S, EJEMPLO 4A.

Variables		Unidades	Solución 1	Solución 2
	Presión del condensador		0.09869	0.09869
	Presión de entrada a la turbina		220	220
	Temperatura de entrada a la turbina		500	500
	Trabajo de la bomba 1		0.2608	0.05701
	Trabajo de la bomba 2		28.94	28.3
	Trabajo de la bomba 3		21.54	21.54
	Trabajo de la bomba		29.16	28.35
	Trabajo de la turbina 1		183.5	183.5
	Trabajo de la turbina 2		778.8	963
	Trabajo de la turbina 3		315.9	192.8
	Trabajo de la turbina		1236	1325
	Trabajo neto		1206	1297
	Calor añadido a la caldera		3011	3176
	Calor cedido por el condensador		1804	2050
	Calidad del vapor a la salida de la turbina		0.8204	0.9
	Eficiencia térmica del ciclo		0.4007	0.4084

TABLA 19. SOLUCIÓN, EJEMPLO 4A.

	Pi [bar]	Ti [°C]	hi [kJ/kg]	si [kJ/kg K]
[1]	0.09869	45.56	190.8	0.6459
[2]	0.5502	45.56	190.8	0.6459
[3]	0.5502	45.56	350.6	1.12
[4]	220	45.56	378.9	1.136
[5]	220	86.39	378.9	1.136
[6]	101.9	312.4	1415	3.373
[7]	220	319.2	1437	3.38
[8]	220	373.8	378.9	4.308
[9]	220	373.8	2021	4.308
[10]	220	373.8	2164	4.53
[11]	220	500	3210	6.068
[12]	101.9	374	3026	6.099
[13]	101.9	374	3026	6.099
[14]	101.9	374	3026	6.099
[15]	101.9	500	3372	6.586
[16]	0.5502	83.74	2409	7.56
[17]	0.5502	83.74	2409	7.56
[18]	0.5502	83.74	2593	7.56
[19]	0.09869	50.56	2400	7.578

TABLE 20. SOLUCIÓN DE PUNTOS DE EVALUACIÓN, EJEMPLO 4A.

El trabajo realizado por la bomba de alimentación 1 es despreciable en ambos casos.

Aumentando el calor añadido a la caldera se logra una calidad aceptable del vapor a la salida de la turbina. Esto a su vez aumenta el calor cedido en el condensador.

Como puede verse en la tabla anterior, la presión del condensador , presión de entrada a la turbina , y temperatura de entrada a la turbina son iguales en ambos casos.

4.5 Ciclo de potencia Rankine con recalentamiento y regeneración. Calentador abierto y calentador cerrado con drenes hacia atrás.

4.5.1 Ejemplo 5.

Planteamiento del problema:

Determinar la presión del condensador, presión de la caldera y la temperatura del vapor a la entrada de la turbina, correspondientes a la eficiencia térmica máxima del ciclo.

Datos de entrada:

Presión del condensador:

Presión de la caldera:

Temperatura a la entrada de la turbina:

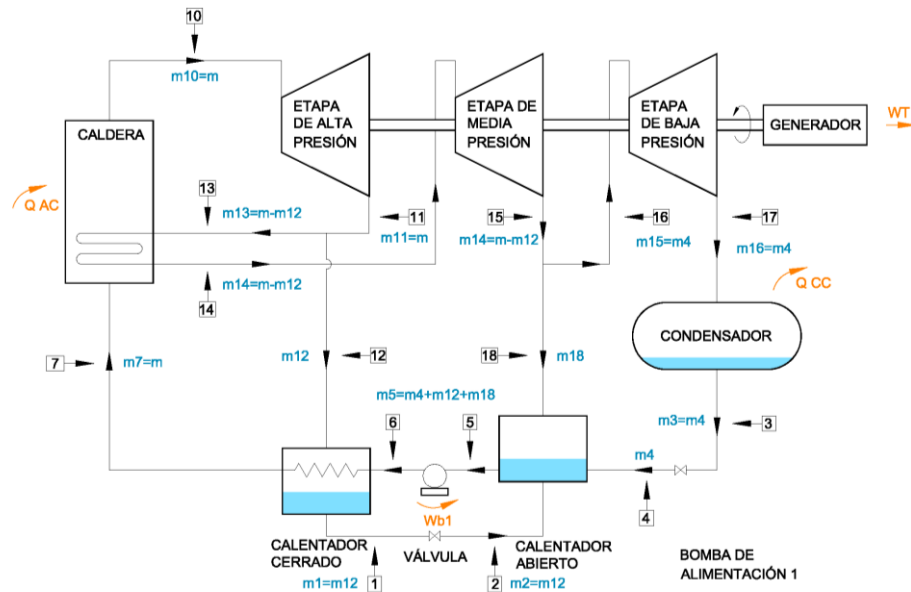


FIGURA 29. DIAGRAMA DE FLUJO, CICLO DE POTENCIA RANKINE CON RECALENTAMIENTO Y REGENERACIÓN, EJEMPLO 5.

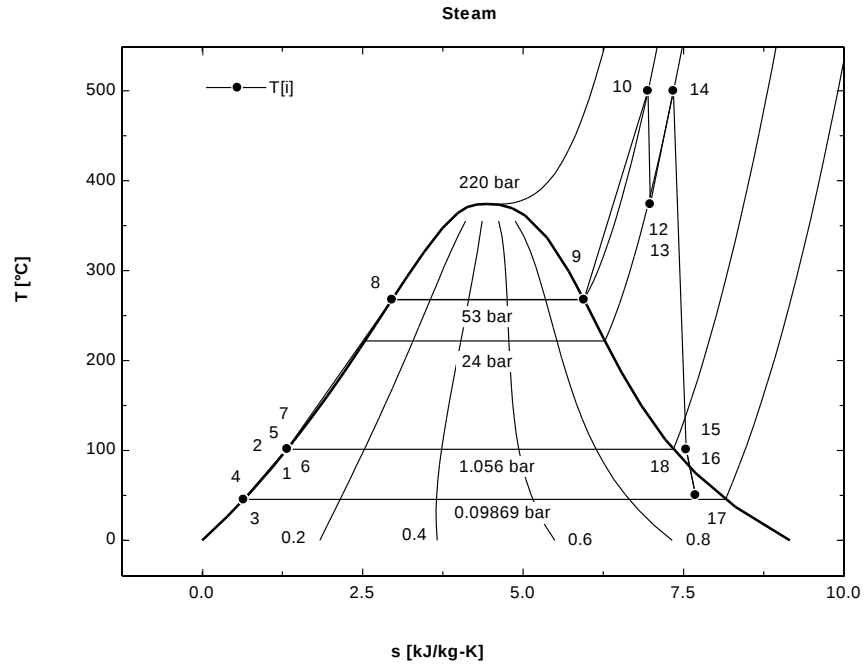


FIGURA 30. DIAGRAMA T-S, EJEMPLO 5.

Optimización:

Se realizaron 264 322 iteraciones con una población de 128 individuos obteniendo 2048 generaciones para determinar la presión del condensador, la presión de la caldera y la temperatura del vapor a la entrada de la turbina, correspondientes a la eficiencia térmica máxima del ciclo.

La tabla a continuación muestra los resultados de la optimización del ciclo.

Variables	Unidades	Solución
Presión del condensador		0.09869
Presión de entrada a la turbina		53.19
Temperatura de entrada a la turbina		500
Trabajo de la bomba 1		6.805
Trabajo de la bomba		6.187
Trabajo de la turbina 1		223.3
Trabajo de la turbina 2		707
Trabajo de la turbina 3		321.8
Trabajo de la turbina		1223
Trabajo neto		1217
Calor añadido a la caldera		3256
Calor cedido por el condensador		2040
Calidad del vapor a la salida de la turbina		0.9
Eficiencia térmica del ciclo		0.3737

TABLA 21. SOLUCIÓN ÓPTIMA, EJEMPLO 5.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de todos los estados termodinámicos del ciclo. La entropía a la salida de la bomba de alimentación es mayor que la entropía a la entrada, lo mismo ocurre con las entropías a la entrada y salida de las diferentes etapas de la turbina cumpliéndose así la Segunda Ley de la Termodinámica.

	Pi [bar]	Ti [°C]	hi [kJ/kg]	si [kJ/kg K]
[1]	24.13	101.2	424	1.314
[2]	1.056	101.2	424	1.32
[3]	0.09869	45.56	190.8	0.6459
[4]	1.056	45.56	190.8	0.6458
[5]	1.056	101.8	424	1.32
[6]	53.19	101.8	430.8	1.324
[7]	53.19	101.8	430.8	1.324
[8]	53.19	267.9	1174	2.956
[9]	53.19	267.9	2791	5.945
[10]	53.19	500	3430	6.944
[11]	24.13	374	3207	6.982
[12]	24.13	374	3207	6.982
[13]	24.13	374	3207	6.982
[14]	24.13	500	3463	7.341
[15]	1.056	101.2	2756	7.54
[16]	1.056	101.2	2756	7.54
[17]	0.09869	50.56	2434	7.685
[18]	1.056	101.2	2756	7.54

TABLA 22. SOLUCIÓN DE PUNTOS DE EVALUACIÓN, EJEMPLO 5.

Conclusiones:

La presión óptima de operación de las caldera de este ejemplo es sub-crítica de media presión ($20 \leq p \leq 64$ bar).

Bajo estas condiciones de temperatura, la eficiencia de Carnot para una máquina ideal es:

La temperatura máxima del ciclo _____, corresponde a la máxima temperatura que el vapor alcanza en la caldera. La temperatura mínima del ciclo _____, corresponde a la mínima temperatura que el fluido de trabajo alcanza en este ejemplo en el proceso de condensación.

La eficiencia térmica de este ejemplo (37.37%) corresponde al 63.58% de la eficiencia ideal.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones.

Variables			1	2	3	4	5
	Presión caldera		107.9	58.96	212.9	220	53.19
	Trabajo neto		927.6	1388	1058	1297	1217
	Calor añadido a la caldera		3179	3880	2780	3176	3256
	Eficiencia térmica del ciclo		0.2918	0.3578	0.3807	0.4084	0.3737

TABLA 23. CUADRO RESUMEN.

Se diseñaron 5 algoritmos para optimizar la eficiencia térmica de 5 diferentes configuraciones del ciclo de potencia Rankine. El ciclo de potencia Rankine simple; ejemplo 1. El ciclo de potencia Rankine simple con recalentamiento; ejemplo 2. El ciclo de potencia Rankine con recalentamiento y regeneración, calentador abierto; ejemplo 3. El ciclo de potencia Rankine con recalentamiento y regeneración. Calentador abierto, calentador cerrado con drenes hacia adelante; ejemplo 4. El ciclo de potencia Rankine con recalentamiento y regeneración. Calentador abierto y calentador cerrado con drenes hacia atrás; ejemplo 5.

Los puntos de operación óptimos como resultado de la optimización de la eficiencia térmica de los ejemplos vistos en este trabajo se obtuvieron cuando se optimizó el área bajo la curva de la gráfica T-s. La condensación del fluido de trabajo es un limitante así como la temperatura de evaporación en la caldera.

Tanto el recalentamiento como la regeneración del vapor en los ciclos de potencia Rankine mejoran la eficiencia térmica del ciclo.

Comparando los resultados del ejemplo 1, con los resultados obtenidos en el ejemplo 4 se comprueba como la regeneración, el recalentamiento del vapor y el aumento de la presión de operación en la caldera, mejora considerablemente el trabajo neto realizado por el ciclo, así como la eficiencia térmica sin necesidad de aumentar el calor añadido a la caldera para el caso del ejemplo 4.

La optimización de las diferentes configuraciones del ciclo de potencia Rankine nos permiten comprender la interrelación entre los componentes del ciclo. A través de la optimización de un algoritmo podemos conocer las condiciones de operación del ciclo para los cuales una variable es óptima. Saber cómo el cambio del valor de una variable afecta la calidad del vapor, o el consumo de combustible, o el trabajo generado por la turbina. Entre más conocimiento se tiene del funcionamiento de un ciclo de vapor mejores serán las decisiones a implementar, ya sea que se busque reducir costos de

producción, mejorar la calidad del vapor, generar más potencia en la turbina. Por lo tanto una metodología de optimización de plantas de potencia de vapor usando algoritmos genéticos ayuda a obtener criterios adicionales para mejorar diseños de planta, ahorrar combustible, en general, realizar mejoras en la rentabilidad y costos.

5.2 Recomendaciones.

Haciendo uso de los algoritmos genéticos, se podría optimizar ciclos de potencia de Rankine usando otro tipo de fluido de trabajo en sustitución del agua, como por ejemplo los ciclos binarios en las plantas geotérmicas.

Incluir en el diseño del algoritmo una penalización basada en la optimización del diseño de las áreas de transferencia de calor para optimizar el tamaño de los equipos y el número de equipos necesarios (cantidad óptima de extracciones).

Optimizar plantas de potencia de vapor usando algoritmos genéticos modificando las restricciones al ciclo propuestos en esta investigación.

GLOSARIO

Definiciones

Algoritmo: Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema.((RAE), 23.^a edición (2014)).

Alelo: Valor de un gen.

Binario: Sistema de numeración de base dos. El sistema binario utiliza como cifras exclusivamente el 0 y el 1.

Bit: Unidad de medida de cantidad de información, equivalente a la selección entre dos posibilidades igualmente probables.((RAE), 23.^a edición (2014)).

Cualidad: Elemento o carácter distintivo de la naturaleza de alguien o algo.((RAE), 23.^a edición (2014)).

Cruce: Acción y efecto de cruzar dos cromosomas para heredar cualidades a la siguiente generación.

Cromosoma: Cadena de bits que representa a cada individuo de la población. También llamado **Genotipo**.

Estocástico:

1. *adj.* Perteneciente o relativo al azar.
2. *F.Mat*, Teoría estadística de los procesos cuya evolución en el tiempo es aleatoria como la secuencia de las tiradas de un dado.((RAE), 23.^a edición (2014)).

Evolución biológica: Proceso de transformación de las especies a través de cambios producidos en sucesivas generaciones.((RAE), 23.^a edición (2014)).

Fenotipo: Resultado de la decodificación del genotipo.

Generador: En las máquinas, dispositivo que produce la fuerza o energía.

Gen: Posición en la cadena.

Herencia:

Conjunto de caracteres que los seres vivos reciben de sus progenitores.((RAE), 23.^a edición (2014)).

Heurístico, ca: Técnica de la indagación y el descubrimiento.((RAE), 23.^a edición (2014))

Mutación: Alteración en la secuencia de un cromosoma.

Planta: Sinónimo de central eléctrica.

Selección natural: Sistema establecido por el naturalista inglés Charles Darwin, que pretende explicar, por acción continuada del tiempo y el medio, la desaparición más o menos completa de determinadas especies animales o vegetales, y su sustitución por otras de condiciones superiores.((RAE), 23.^a edición (2014)).

Variable estocástica: Función real definida sobre una población finita o una muestra, que toma los valores de cada una de las modalidades de un atributo, y a las que asocia una distribución de frecuencias.((RAE), 23.^a edición (2014)).

BIBLIOGRAFÍA

(RAE), R. A. (23.^a edición (2014)). *Diccionario de la lengua española*. España, Madrid.

AG, S. (s.f.). *Research & Development at the BENSON Test Rig*.

Baumann, K. (1912). *Recent developments in steam turbine practice*.

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2006). *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2006). *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.

CNE. (2014). *Informe Mensual del Mercado Eléctrico*. San Salvador: Dirección del Mercado Eléctrico.

CNE. (2014). *Informe Mensual del Mercado Eléctrico*. San Salvador: Dirección de Mercado Eléctrico.

El Banco Mundial. (s.f.). *Poblacion total, 2013*. Obtenido de The World Bank:
<http://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL/countries>

F-Chart Software. (s.f.). <http://www.fchart.com/ees/program-details.php>. Obtenido de
<http://www.fchart.com/ees/>

Gerencia de Electricidad. (2015). *Boletín de Estadísticas Eléctricas No.16*. El Salvador, C.A: Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones.

Gestal, M. (s.f.). *Introduccion a los Algoritmos Geneticos*. Obtenido de
<http://sabia.tic.udc.es/mgestal/cv/AAGGtutorial/aagg.html>.

Gestal, M. (s.f.). *Introducción a los Algoritmos Genéticos*. Obtenido de
<http://sabia.tic.udc.es/mgestal/cv/AAGGtutorial/aagg.html>.

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms, in Search, Optimization & Machine Learning*. Addison -Wesley.

Kimura, H., Sato, T., Bergins, C., Imano, S., & Saito, E. (s.f.). *Development of Technologies for Improving Efficiency of Large Coal-fired Thermal Power Plants*.

Rolle , K. C. (2006). . Na

Rolle, K. C., & Pozo, V. G. (2006). *Termodinámica*. Naucalpan de Juarez, Edo. de México.: Pearson, Educación.

Sampieri, R. H., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. México.

Software, F.-C. (s.f.). <http://www.fchart.com/ees/program-details.php>. Obtenido de <http://www.fchart.com/ees/>

Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones. (Mayo, 2015). *Boletín de Estadísticas Eléctricas No.16*. San Salvador.

tsp-data-portal.org. (s.f.). Obtenido de <http://www.tsp-data-portal.org/Breakdown-of-Electricity-Generation-by-Energy-Source>.

U.S. Energy Information Administration (EIA). (s.f.). *INTERNATIONAL ENERGY STATISTICS*. Obtenido de <http://www.eia.gov/>:
<http://www.eia.gov/beta/international/rankings/#?product=2-12&cy=2013>