

DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE COMPUTADOR
PARA LA SIMULACIÓN DE PLANTAS TÉRMICAS.

JORGE MARIO ESPITIA MENDOZA.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.
ESCUELA DE INGENIERÍA.
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.
BUCARAMANGA.

2011.

DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE COMPUTADOR
PARA LA SIMULACIÓN DE PLANTAS TÉRMICAS.

JORGE MARIO ESPITIA MENDOZA.

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero
Mecánico.

Director:

EDWIN JESÚS CÓRDOBA TUTA.

Ingeniero Mecánico.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.

ESCUELA DE INGENIERÍA.

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.

BUCARAMANGA.

2011.

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Firma del presidente del jurado.

Firma del jurado.

Firma del jurado.

Bucaramanga 7 de junio de 2011.

“A mi madre por su amor y esfuerzo.”

Jorge Mario Espitia Mendoza

AGRADECIMIENTOS

El realizador de este proyecto expresa sus agradecimientos:

A todas las maravillosas mujeres que hacen parte de mi vida, que han contribuido a lo largo de mi existencia en mi formación con tanto cariño y que han hecho posible la consecución de mis logros.

A mis padres por todo su apoyo durante el desarrollo de mis estudios.

A la Universidad Pontificia Bolivariana y la facultad de Ingeniería Mecánica por ser la institución en donde se me guió a lo largo de mi formación académica.

A todos los docentes de la Facultad de Ingeniería Mecánica, de otras facultades y de los diferentes departamentos de la universidad por su dirección en el proceso de aprendizaje en cada una de las asignaturas que cursé.

Al ingeniero Edwin Jesús Córdoba Tuta por su cordial acompañamiento en la realización de todo el proyecto.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
1. JUSTIFICACIÓN.	2
2. OBJETIVOS.	3
2.1. Objetivo General.	3
2.2. Objetivos Específicos.	3
3. MARCO TEÓRICO.	5
3.1. El ciclo Rankine.	5
3.1.1. Ciclo Rankine simple.	5
3.1.2. Ciclo Rankine ideal con recalentamiento.	6
3.1.3. Ciclo Rankine ideal regenerativo.	8
3.1.4. Análisis Energético Del Ciclo Rankine Ideal.[3]	12
3.1.5. Desviación de los ciclos de potencia de vapor reales respecto de los idealizados.[3]	13
3.1.6. Incremento de la eficiencia del ciclo Rankine.[3]	15
3.1.7. Asociación internacional para las propiedades de agua y vapor IAPWS-IF97.	17
3.2. Entorno de desarrollo integrado IDE.[4]	22
3.2.1. Visual Studio 2010	23
3.3. Estado del Arte.	23
3.3.1. Desarrollo de un paquete computacional para la simulación de plantas térmicas.	23
3.3.2. Simulador de una planta térmica con ciclo de vapor convencional.	23
3.3.3. Cyclepad.	24
3.3.4. Programa didáctico sobre el Ciclo de Rankine sencillo RANKINE V1.0	24
3.3.5. Programa de simulación de ciclos termodinámicos de plantas de vapor.	25
3.3.6. Sistema de autoaprendizaje de ciclos termodinámicos en ingeniería: CICLOWIN. [6]	25

4. METODOLOGÍA.	26
4.1. Revisión Bibliográfica.	26
4.2. Desarrollo matemático de los modelos de la simulación.	26
4.3. Diagramas de Flujo.	26
4.4. Diseño de la interfaz gráfica.	29
4.5. Creación de imágenes e iconos del programa.	29
4.6. Programación y depuración de las estrategias.	31
4.7. Pruebas de funcionamiento del programa.	32
4.8. Elaboración del manual del usuario.	32
4.9. Documentación.	32
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	32
5.1. Propiedades del Agua según la Formulación Internacional IF97:	33
5.1.1. Verificación de la Región 1.	33
5.1.2. Verificación de la Región 2.	33
5.1.3. Verificación de la Región 3	34
5.1.4. Verificación de la Región 5	35
5.2. Ciclo Rankine Simple:	35
5.3. Ciclo Rankine con Recalentamiento:	38
5.4. Ciclo Rankine Regenerativo:	41
5.5. Código Fuente del programa.	48
5.5.1. Módulo para el cálculo de propiedades del agua.	48
5.5.2. Módulo para el cálculo termodinámico de los equipos.	49
5.5.3. Módulo para el cálculo de la planta termodinámica.	49
5.5.4. Módulo para la interfaz gráfica.	49
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	50
7. BIBLIOGRAFÍA.	52

Índice de figuras

1.	Diagrama Temperatura-entropía del ciclo Rankine ideal [Espitia]	5
2.	Esquema del ciclo Rankine ideal simple [Espitia].	6
3.	Diagrama Temperatura-entropía del ciclo Rankine ideal con recalentamiento [Espitia].	7
4.	Esquema del ciclo Rankine ideal con recalentamiento [Espitia].	8
5.	Diagrama Temperatura-entropía del ciclo Rankine ideal regenerativo con un calentador abierto de agua de alimentación [Espitia].	9
6.	Esquema del ciclo Rankine ideal regenerativo con un calentador abierto de agua de alimentación [Espitia].	10
7.	Diagrama Temperatura-entropía del ciclo Rankine ideal regenerativo con un calentador cerrado de agua de alimentación [Espitia].	11
8.	Esquema del ciclo Rankine ideal regenerativo con un calentador cerrado de agua de alimentación [Espitia].	12
9.	Desviación del ciclo de potencia de vapor real respecto del ideal y efecto de las irreversibilidades de la bomba y la turbina [Espitia].	14
10.	Efecto que causa reducir la presión del condensador [Espitia].. . . .	15
11.	Efecto del sobrecalentamiento de vapor a altas temperaturas [Espitia]..	16
12.	Efecto del incremento de la presión de la caldera [Espitia].	17
13.	Regiones y ecuaciones del IAPWS-IF97 [Espitia]..	18
14.	Subregiones para las ecuaciones secundarias [Espitia]..	19
15.	Diagrama de flujo de las estrategias principales del programa [Espitia]..	27
16.	Diagrama de flujo para el calculo de as propiedades del agua implementando la IF97 [Espitia].	28
17.	Captura de pantalla de Google docs [Espitia].	29
18.	Icono del programa [Espitia].	29
19.	Icono Ciclo Simple [Espitia].	30
20.	Icono del ciclo con recalentamiento [Espitia].	30
21.	Icono del ciclo Regenerativo cerrado [Espitia].	30
22.	Icono del ciclo Regenerativo abierto [Espitia].	30
23.	Icono propiedades del agua [Espitia].	31
24.	Captura de pantalla proyecto Win32 [Espitia].	31
25.	Captura de pantalla proyecto MFC [Espitia].	32
26.	Gráfica T-s Simple [Espitia].	36

27.	Captura de pantalla Interfaz Rankine Simple[Espitia]	37
28.	Captura de pantalla visualización de resultados [Espitia]	37
29.	Gráfica T-s Recalentamiento [Espitia].	39
30.	Captura de pantalla Interfaz Rankine con Recalentamiento[Espitia]	40
31.	Captura de pantalla visualización de resultados [Espitia]	40
32.	Gráfica T-s Rankine Regenerativo [Espitia].	42
33.	Captura de pantalla Interfaz Rankine Regenerativo Abierto[Espitia]	43
34.	Captura de pantalla visualización de resultados [Espitia]	44
35.	Gráfica T-s Recalentamiento [Espitia].	45
36.	Captura de pantalla Interfaz Rankine Regenerativo Cerrado [Espitia]	46
37.	Captura de pantalla visualización de resultados [Espitia]	47
38.	Diagrama de relación de la clase IF97 [Espitia].	48
39.	Diagrama de relación de la clase Equipos [Espitia].	49
40.	Diagrama de relación de la clase Equipos [Espitia].	49

Índice de tablas

1.	Valores calculados de propiedades termodinámicas Región 1 [IF97] . . .	33
2.	Resultados propiedades termodinámicas Región 1 [Espitia]	33
3.	Valores calculados de propiedades termodinámicas Región 2 [IF97]. . .	33
4.	Resultados propiedades termodinámicas Región 1 [Espitia]	34
5.	Resultados propiedades termodinámicas Región 1 [Espitia]	34
6.	Resultados propiedades termodinámicas Región 1 [Espitia]	34
7.	Resultados propiedades termodinámicas Región 1 [Espitia]	35
8.	Resultados propiedades termodinámicas Región 1 [Espitia]	35
9.	Resultados Rankine Simple [Espitia]	38
10.	Resultados Rankine con Recalentamiento [Espitia]	41
11.	Resultados Rankine Rankine Regenerativo Abierto [Espitia]	44
12.	Resultados Rankine Rankine Regenerativo Abierto [Espitia]	47

LISTA DE ANEXOS

1. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (The revision only relates to the extension of region 5 to 50 MPa)
2. Manual del usuario del programa de computador para la simulación de plantas térmicas.
3. Diseño de las clases del programa de computador para la simulación de plantas térmicas.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO.

TÍTULO: DESARROLLO DE UN PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA LA SIMULACIÓN DE PLANTAS TÉRMICAS.

AUTOR: JORGE MARIO ESPITIA MENDOZA.

FACULTAD: FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.

DIRECTOR: EDWIN JESÚS CÓRDOBA TUTA.

RESUMEN

El trabajo realizado se enfocó en el desarrollo de un paquete computacional de simulación del ciclo Rankine simple, con recalentamiento y regenerativo, de plantas térmicas de vapor de agua en estado estacionario. Durante el desarrollo del proyecto se consultó, investigó y recopiló la información de mayor interés para seguidamente llevar a cabo el diseño, programación y puesta a punto del software. El proceso inició con la revisión bibliográfica y del estado del arte de los temas concernientes; a partir de esto, se empezó el desarrollo matemático de los modelos de la simulación, diagramas de flujos, diseño de la interfaz gráfica y creación de imágenes e íconos necesarios; posteriormente, la programación y depuración de las estrategias; finalmente se hicieron pruebas de funcionamiento del programa y se elaboró el manual del usuario.

PALABRAS CLAVES: PLANTAS TÉRMICAS, CICLO RANKINE, PAQUETE COMPUTACIONAL, SIMULACIÓN.

GENERAL ABSTRACT.

TITLE: DEVELOPMENT OF A COMPUTER PROGRAM TO POWER PLANTS SIMULATION.

AUTHOR: JORGE MARIO ESPITIA MENDOZA.

FACULTY: FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.

DIRECTOR: EDWIN JESÚS CÓRDOBA TUTA.

ABSTRACT.

The investigation was focused on the development of a simulation software package of simple, reheat and regenerative Rankine cycle, to steam power plant in steady state. During the development of the project it was consulted, researched and compiled the information of most interest to then carry out the design, programming and tuning software. The process began with the literature review and the state of the art of the concerning issues, from this, it began developing mathematical simulation models, flow diagrams, graphical interface design and creation of images and icons needed; subsequently, programming and debugging strategies, and finally became operational tests of the program and developed the manual.

KEYWORDS: POWER PLANT, RANKINE CYCLE, COMPUTER SOFTWARE, SIMULATION.

INTRODUCCIÓN.

El presente documento sobre el desarrollo de un programa de computador para la simulación de plantas térmicas pretende: informar acerca del trabajo realizado durante la ejecución del proyecto, y dar a conocer el programa computacional para la simulación del ciclo Rankine y sus características.

El proyecto abarca los temas relacionados con el modelamiento y simulación del ciclo Rankine teniendo en cuenta, específicamente, lo concerniente a plantas térmicas de vapor de agua en ciclo Rankine en estado estacionario; obteniendo el diagrama de flujo del programa, una sub aplicación para el cálculo de las propiedades termodinámicas del agua, el programa informático y el manual del usuario.

El Ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico de potencia, comúnmente usado en plantas generadoras que operan con vapor, en el que se relaciona el consumo de calor con la producción de trabajo. Ciclo de amplio estudio en cursos de la carrera de Ingeniería Mecánica por lo que resulta atractivo y práctico el desarrollo de una herramienta que permita agilizar cálculos repetitivos y consultas de tablas que requieren procesos iterativos.

Ya existe una gran variedad de programas de simulación de este ciclo, unos con fines prácticos y otros acercándose más a la parte académica; de cualquier forma esta propuesta pretende satisfacer necesidades específicas sin dejar de lado la aplicabilidad que el usuario pueda darle a la herramienta.

El libro refleja la búsqueda de información y estado de arte referente al modelamiento de Plantas térmicas; el desarrollo matemático de los modelos de la simulación; la realización de los diagramas de flujos del programa; el diseño de la interfaz gráfica; la creación de imágenes e íconos del programa; el desarrollo de código fuente, compilación y depuración del programa hasta obtener los resultados esperados junto con la validación del software con base de datos de resultados conocidos; y finalmente elaboración del manual del usuario. Lo anterior sumado a análisis de resultados y conclusiones de los aspectos significativos en la realización del proyecto.

1. JUSTIFICACIÓN.

El proyecto consiste en el desarrollo de un software que permite apoyar el proceso de enseñanza y aprendizaje; agilizar el estudio y asimilación de conceptos de las asignaturas relacionadas con el tema planteado; y mejorar hábitos de estudio y trabajo, aprovechando las ventajas que ofrecen las tecnologías de la información.

El desarrollo de este trabajo de grado satisface el alcance de las competencias del egresado de Ingeniería Mecánica, teniendo en cuenta que la Ingeniería Mecánica es una disciplina que involucra la aplicación de los principios físicos para el análisis de procesos, y que se abordan dos componentes de profundización del programa académico: El modelamiento y los termofluidos. Adicionalmente existe una mayor integración con la informática posibilitando el desarrollo de habilidades, para trabajar en conjunto con ingenieros de esa disciplina y de otras afines.

Aunque existe software especializado con mayor cubrimiento de contenidos, éste está encaminado a cobijar los requerimientos a temas tratados en las asignaturas que competen a los estudiantes de pregrado, brindando una alternativa para que la Universidad ponga a disposición de los alumnos una herramienta que sirva de ayuda a los procesos de enseñanza y aprendizaje de las materias, considerando que el empleo de este programa de computador será establecido bajo criterios de la misma.

2. OBJETIVOS.

2.1. Objetivo General.

- Realizar un software de simulación del ciclo Rankine simple, con recalentamiento y regenerativo de plantas térmicas de vapor de agua en estado estacionario, para el sistema operativo Windows® con el fin de apoyar el estudio de plantas térmicas y mejorar la didáctica de esta disciplina.

2.2. Objetivos Específicos.

- Generar los algoritmos de programación para la simulación de las plantas térmicas de vapor de agua en estado estacionario con base al ciclo Rankine simple, con recalentamiento y regenerativo.
 - **Resultado:** Diagrama de flujo de las estrategias principales del programa.
 - **Indicador de calidad:** Diagrama de Flujo de las estrategias principales del programa según el estándar de simbología ISO 5807.
- Implementar los algoritmos para el cálculo de las propiedades termodinámicas del agua con base a la formulación internacional IF97.
 - **Resultado:** Biblioteca para el cálculo de las propiedades termodinámicas del agua.
 - **Indicador de calidad:** Programa que calcula las propiedades del agua según la formulación internacional IF97 “Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam”. Para un rango de 273.15 K a 1073.15 K con una presión máxima de 100 MPa y 1073.15 K a 2273.15 K para una presión máxima de 50 MPa.
- Desarrollar un programa informático para la simulación del ciclo Rankine simple, con recalentamiento y regenerativo de plantas térmicas de vapor de agua en estado estacionario usando el kit de desarrollo de software Visual Studio®.
 - **Resultado:** Programa informático para la simulación del ciclo Rankine.
 - **Indicador de calidad:** El programa debe realizar la simulación ciclo Rankine simple, con recalentamiento y regenerativo de plantas térmicas de vapor de agua para diferentes configuraciones.

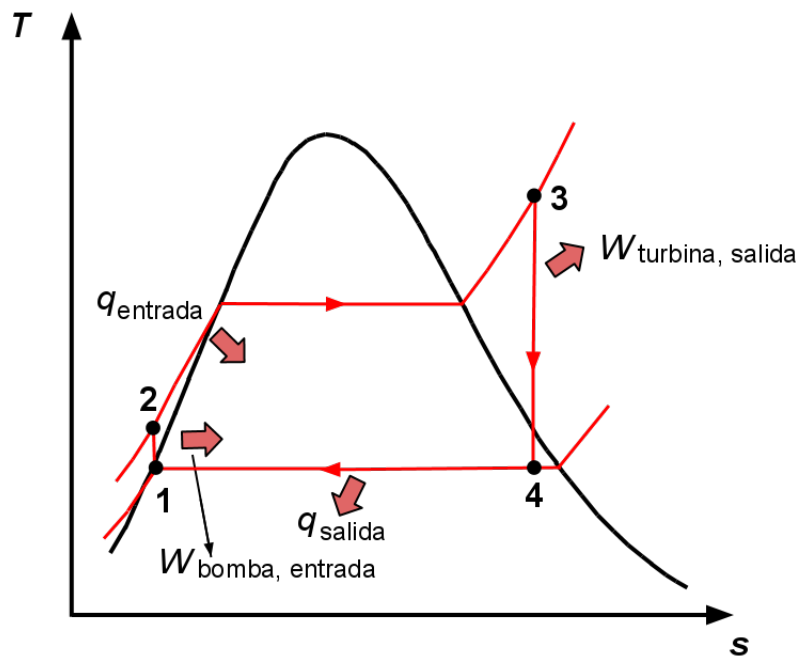
- Elaborar el manual del usuario del paquete informático indicando todos los procedimientos y funciones para el uso adecuado del programa.
 - **Resultado:** Manual del Usuario.
 - **Indicador de calidad:** Manual del usuario que describe todas las funciones y menús del programa informático.

3. MARCO TEÓRICO.

3.1. El ciclo Rankine.

El Ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico de potencia, comúnmente usado en plantas generadoras, que opera con vapor en el que se relaciona el consumo de calor con la producción de trabajo.[7]

Figura 1: Diagrama Temperatura-entropía del ciclo Rankine ideal [Espitia]

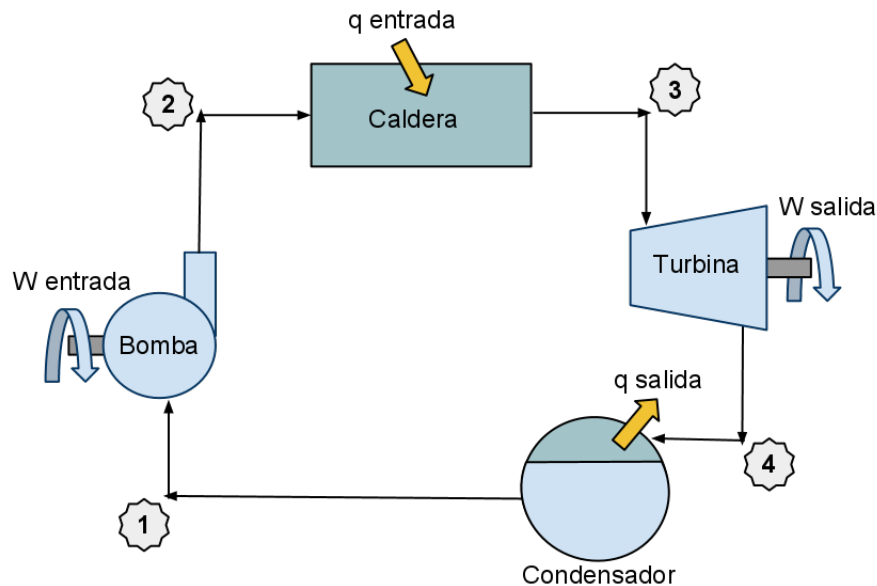


3.1.1. Ciclo Rankine simple.

En un ciclo de Rankine simple e idealizado la transferencia de calor en la caldera tiene lugar hacia el fluido de trabajo, en un proceso a presión constante. El líquido entra a la caldera desde la bomba, a una temperatura relativamente baja y se calienta hasta saturación. El líquido experimenta un ligero aumento de volumen debido a la expansión térmica. Como la caldera opera a presión constante, una transferencia de calor posterior tiene lugar a temperatura constante y la energía agregada al fluido de trabajo se transforma en calor de vaporización, produciendo un vapor que llega a tener una calidad del 100%. Entonces el vapor se expande (en un proceso que se considera isoentrópico para

el ciclo simple) produciendo trabajo en la turbina. La expansión está limitada en el ciclo práctico por la aparición de condensación del vapor en la turbina y por la presión de saturación disponible a la temperatura del medio de enfriamiento empleado en el condensador. Al final del proceso de expansión, el vapor a baja temperatura, pero con calidad bastante alta, sale de la turbina y es condensado hasta líquido al ponerlo en contacto con las superficies del condensador, que están frías. Puesto que el condensador opera casi a la temperatura del agua de enfriamiento, el proceso de condensación tiene lugar a una temperatura de ebullición por abajo de la normal (atmosférica) para muchos fluidos de trabajo. La presión del condensador en el lado del fluido de trabajo con frecuencia es subatmosférica. Después de la condensación, el líquido entra a la bomba y el fluido de trabajo regresa a la alta presión necesaria para la adición de energía a la temperatura elevada de la caldera, repitiéndose el ciclo.[3]

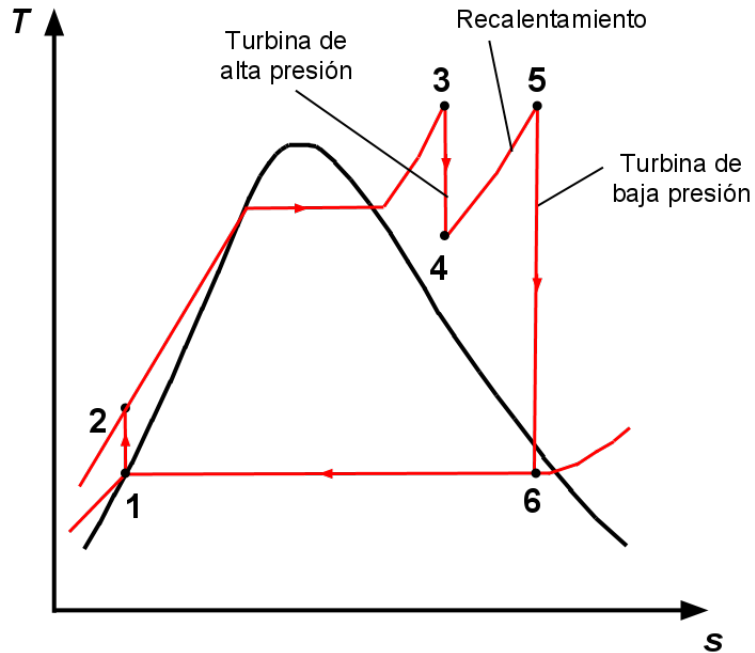
Figura 2: Esquema del ciclo Rankine ideal simple [Espitia].



3.1.2. Ciclo Rankine ideal con recalentamiento.

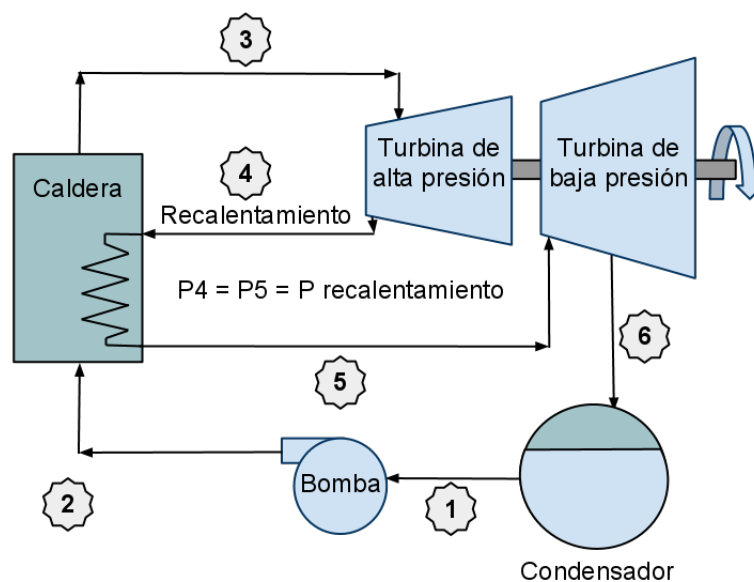
Se trata de una modificación del ciclo Rankine ideal simple, con un proceso en donde se expande el vapor en la turbina en dos etapas recalentándolo entre estas, con el propósito de reducir el contenido de humedad del vapor en las etapas finales del proceso de expansión.

Figura 3: Diagrama Temperatura-entropía del ciclo Rankine ideal con recalentamiento [Espitia].



En la primera etapa en la turbina de alta presión, el vapor se expande isoentrópicamente hasta una presión intermedia y regresa a la caldera donde se recalienta a presión constante. En la segunda etapa en la turbina de baja presión el vapor se expande isoentrópicamente hasta la presión del condensador. Dando como resultado la adición de los calores primario y de recalentamiento, y la suma del trabajo de salida total de las turbinas, que se traduce en un incremento en la eficiencia del ciclo de cuatro a cinco por ciento.[3]

Figura 4: Esquema del ciclo Rankine ideal con recalentamiento [Espitia].

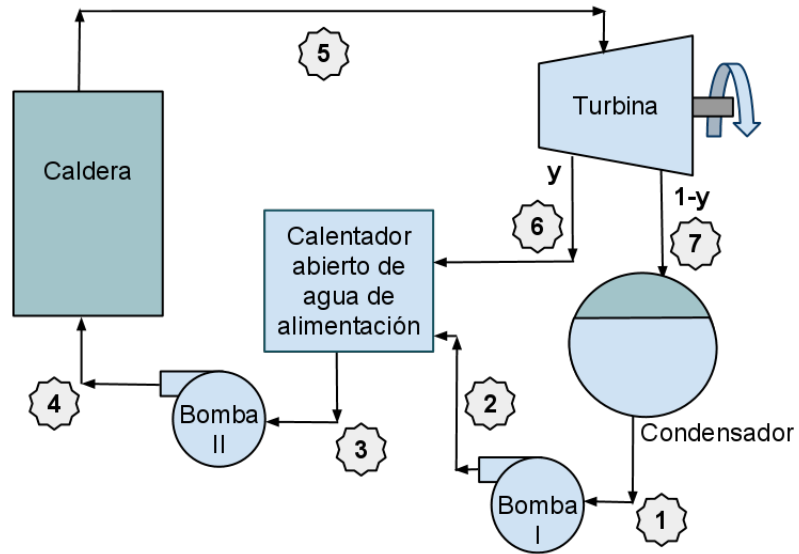


3.1.3. Ciclo Rankine ideal regenerativo.

La transferencia de calor al flujo de trabajo ocurre a una temperatura relativamente baja lo que reduce la eficiencia del ciclo, para remediar esto se eleva la temperatura del líquido que sale de la bomba antes de que entre a la caldera. Esto extrayendo vapor de la turbina en diversos puntos para calentar el agua de alimentación en un dispositivo denominado regenerador o calentador de agua de alimentación, que es un intercambiador de calor en el que se mezclan o no, ambos flujos de fluido. La regeneración también proporciona un medio conveniente para des airear el agua de alimentación, eliminando el aire que se filtra al condensador, para evitar la corrosión en la caldera [3].

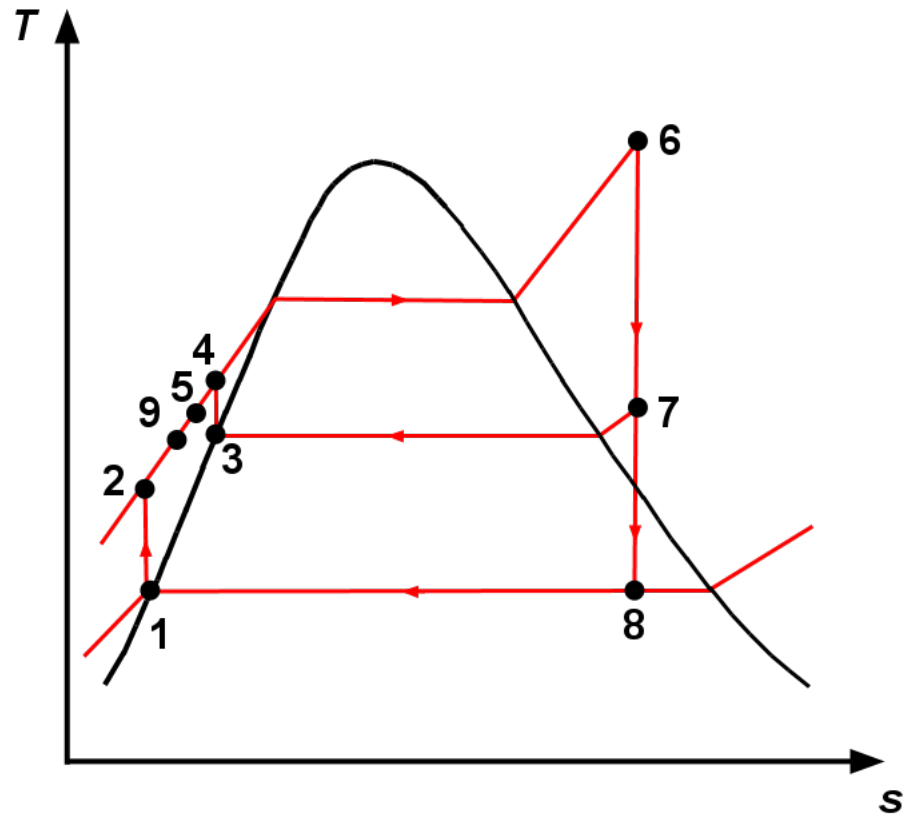
- Ciclo ideal regenerativo con un calentador abierto de agua de alimentación.

Figura 6: Esquema del ciclo Rankine ideal regenerativo con un calentador abierto de agua de alimentación [Espitia].



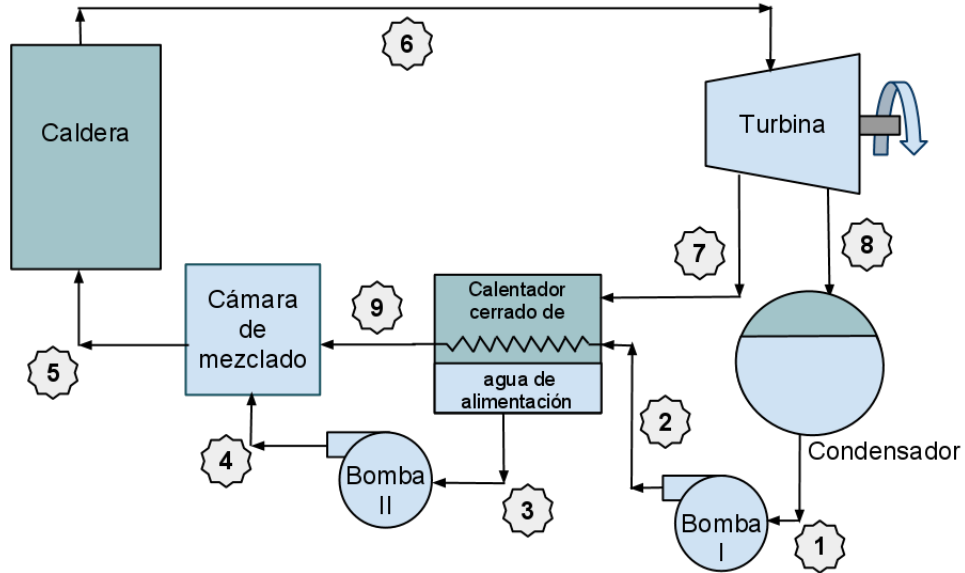
- Ciclo ideal regenerativo con un calentador cerrado de agua de alimentación.

Figura 7: Diagrama Temperatura-entropía del ciclo Rankine ideal regenerativo con un calentador cerrado de agua de alimentación [Espitia].



En este calentador el calor se transfiere del vapor extraído hacia el agua de alimentación sin que suceda alguna mezcla. Por lo que los dos flujos pueden estar a presiones diferentes. El agua de alimentación se calienta hasta la temperatura de salida del vapor extraído, que idealmente sale del calentador como líquido saturado a la presión de extracción. Después, el vapor condensado se bombea a la línea del agua de alimentación se envía a otro calentador o al condensador mediante un dispositivo llamado “trampa”, el cual permite que el líquido sea estrangulado hasta una región de presión inferior, pero atrapa el vapor. La entalpía del vapor permanece constante durante este proceso de estrangulación.[3]

Figura 8: Esquema del ciclo Rankine ideal regenerativo con un calentador cerrado de agua de alimentación [Espitia].



3.1.4. Análisis Energético Del Ciclo Rankine Ideal.[3]

Se analizan los cuatro procesos del ciclo Rankine en flujo estable, ya que se desprecian los cambios en la energía cinética del vapor, que son pequeños.

$$(q_{entrada} - q_{salida}) + (w_{entrada} - w_{salida}) = h_e - h_i \text{ (kJ/kg)} \quad (1)$$

En la turbina y el condensador el trabajo es cero, y la bomba y la turbina isoentrópicas.

$$\text{Bomba } (q = 0): w_{bomba, entrada} = h_2 - h_1 \quad (2)$$

o

$$w_{bomba, entrada} = v(P_2 - P_1) \text{ Donde } h_1 = h_{f@p_1} \text{ y } v \equiv v_1 = v_{f@p_1} \quad (3)$$

$$\text{Caldera}(w = 0): q_{\text{entrada}} = h_3 - h_2 \quad (4)$$

$$\text{Turbina}(q = 0): W_{\text{turbina, salida}} = h_3 - h_4 \quad (5)$$

$$\text{Condensador}(w = 0): q_{\text{salida}} = h_4 - h_1 \quad (6)$$

La eficiencia térmica del ciclo Rankine se determina a través de:

$$\eta_{\text{té}} = \frac{w_{\text{neto}}}{q_{\text{entrada}}} = 1 - \frac{q_{\text{salida}}}{q_{\text{entrada}}} \quad (7)$$

$$w_{\text{neto}} = q_{\text{entrada}} - q_{\text{salida}} = w_{\text{turbina, salida}} - w_{\text{bomba, entrada}} \quad (8)$$

La relación entre la tasa térmica y la eficiencia térmica puede expresarse como:

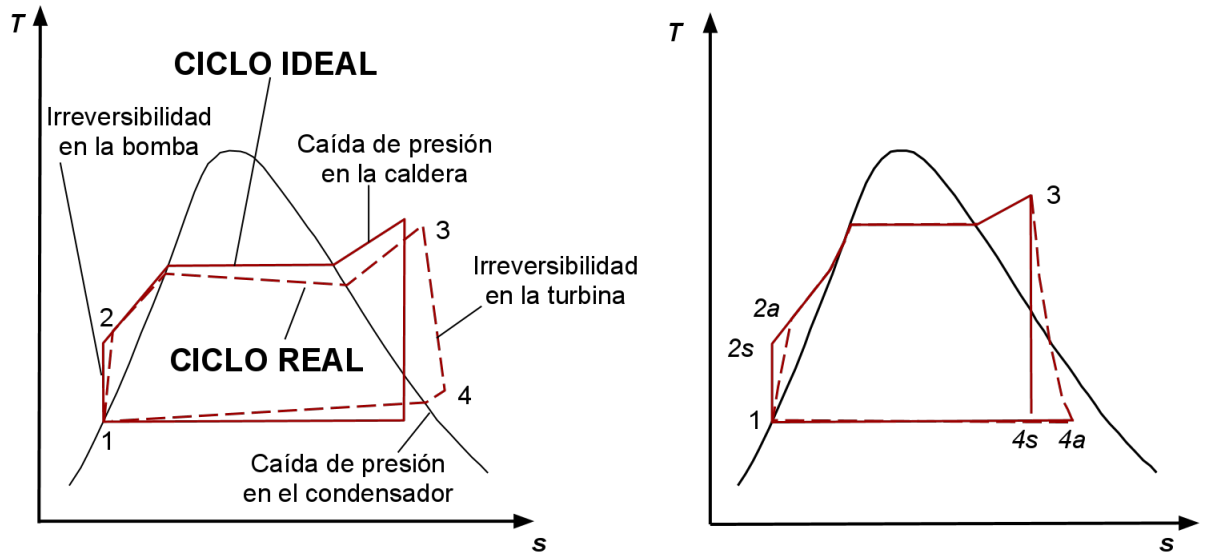
$$\eta_{\text{té}} = \frac{3412(\text{Btu}/\text{kWh})}{T_{\text{asatérmica}}(\text{Btu}/\text{kWh})} \quad (9)$$

3.1.5. Desviación de los ciclos de potencia de vapor reales respecto de los idealizados.[3]

Como resultado de las diversas irreversibilidades, fricción del fluido y las pérdidas de calor, el ciclo real difiere del ideal. Las pérdidas de calor en los alrededores disminuyen la eficiencia del ciclo. La fricción del fluido ocasiona:

- Caídas de presión en la caldera, el condensador y las tuberías.
- Reducción de la presión a la salida de la caldera.
- Presión en la entrada de la turbina más baja que a la salida de la caldera.
- Para compensar las caídas de presión se requiere una bomba más grande, con aumento del trabajo de entrada.

Figura 9: Desviación del ciclo de potencia de vapor real respecto del ideal y efecto de las irreversibilidades de la bomba y la turbina [Espitia].



La desviación existente entre bombas y turbinas reales respecto de las ideales, isoentrópicas, se puede tomar utilizando eficiencias isoentrópicas:

$$\eta_p = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_s - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (10)$$

$$\eta_T = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (11)$$

Otros factores que se consideran:

- En los condensadores reales el líquido suele subenfriarse para evitar cavitación.
- Perdidas por fricción, en los cojinetes de la turbina.
- Fugas de vapor e ingreso de aire al condensador.
- Potencia consumida por equipos auxiliares.

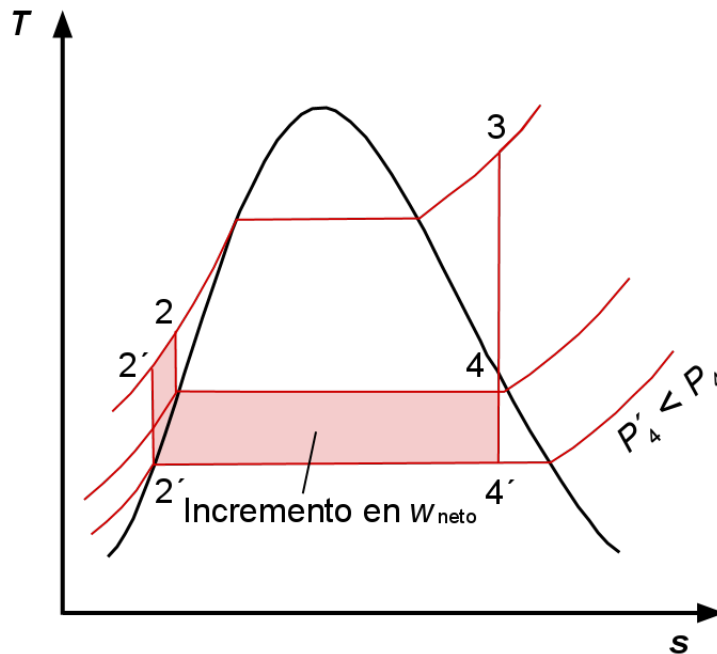
3.1.6. Incremento de la eficiencia del ciclo Rankine.[3]

Todo incremento en la eficiencia térmica significa ahorro en combustible, por lo que cualquier medida para mejorar la eficiencia del ciclo es válida. La idea básica es: “incrementar la temperatura promedio a la que el calor se transfiere al fluido de trabajo en la caldera, o disminuir la temperatura promedio a la que el calor se rechaza del fluido de trabajo en el condensador.”

- Reducción de la presión del condensador (reducción de $T_{baja,prom}$)

El agua existe como un vapor húmedo en el condensador a la temperatura de saturación correspondiente a la presión dentro del condensador. La reducción de la presión de operación del condensador reduce la temperatura del vapor y la temperatura a la cual el calor es rechazado.

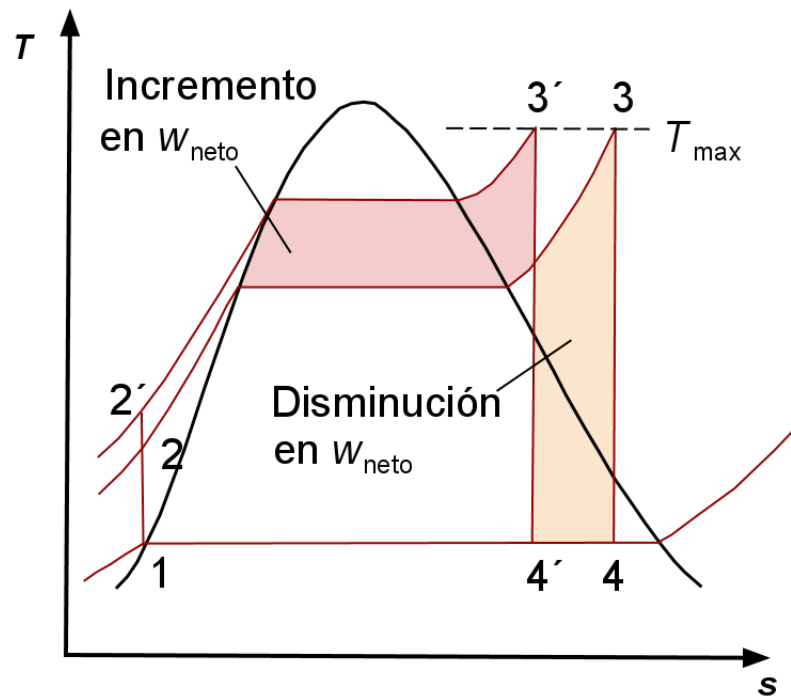
Figura 10: Efecto que causa reducir la presión del condensador [Espitia]..



Los condensadores operan por debajo de la presión atmosférica teniendo como límite la presión de saturación correspondiente a la temperatura del medio de enfriamiento.

- Sobrecalentamiento de vapor a altas temperaturas (incremento de $T_{alta,prom}$)

Figura 12: Efecto del incremento de la presión de la caldera [Espitia].



3.1.7. Asociación internacional para las propiedades de agua y vapor IAPWS-IF97.

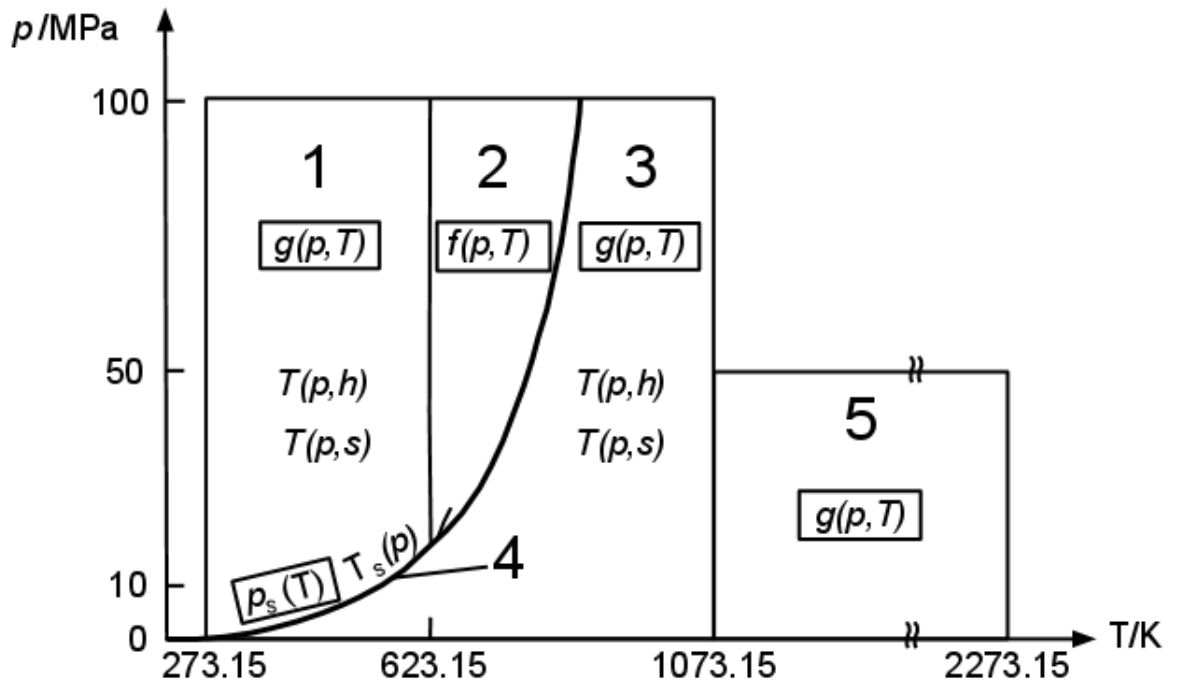
En el documento “Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (The revision only relates to the extension of region 5 to 50 MPa)” se encuentra detallado y documentado el proceso total de formulación.[5]

La formulación industrial de la IAPWS de 1997 consiste en un conjunto de ecuaciones para las propiedades de agua y vapor, para diferentes regiones que cubren un rango de validez.

$$273.15 \text{ K} \leq T \leq 1073.15 \text{ K} \quad p \leq 100 \text{ MPa.}$$

$$1073.15 \text{ K} < T \leq 2273.15 \text{ K} \quad p \leq 50 \text{ MPa.}$$

Figura 13: Regiones y ecuaciones del IAPWS-IF97 [Espitia]..



Ecuaciones para la región 1:

La ecuación básica se expresa en forma adimensional $\gamma = g/(RT)$,

$$\frac{g(p, T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \sum_{i=1}^{34} n_i (7,1 - \pi)^{I_i} (\tau - 1,22) j^i \quad (12)$$

Esta ecuación está definida para un rango de temperatura y presión:

$$273.15 \text{ K} \leq T \leq 623.15 \text{ K} \quad p_s(T) \leq p \leq 100 \text{ MPa.}$$

- Ecuaciones secundarias: Ecuación $T(p,h)$ adimensional:

$$\frac{T(p, h)}{T_*} = \theta(\pi, \eta) = \sum_{i=1}^{20} n_i \pi^{I_i} (\eta + 1)^{j_i} \quad (13)$$

- Ecuación $T(p,s)$ adimensional:

$$\frac{T(p, s)}{T_*} = \theta(\pi, \sigma) = \sum_{i=1}^{20} n_i \pi^{I_i} (\sigma + 2)^{j_i} \quad (14)$$

Ecuaciones para la región 2:

La ecuación básica se expresa en forma adimensional $\gamma = g/(RT)$

$$\frac{g(p, T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \gamma^o(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau) \quad (15)$$

Esta ecuación está definida para un rango de temperatura y presión:

$$273.15 \text{ K} \leq T \leq 623.15 \text{ K} \quad 0 < p \leq p_s(T)$$

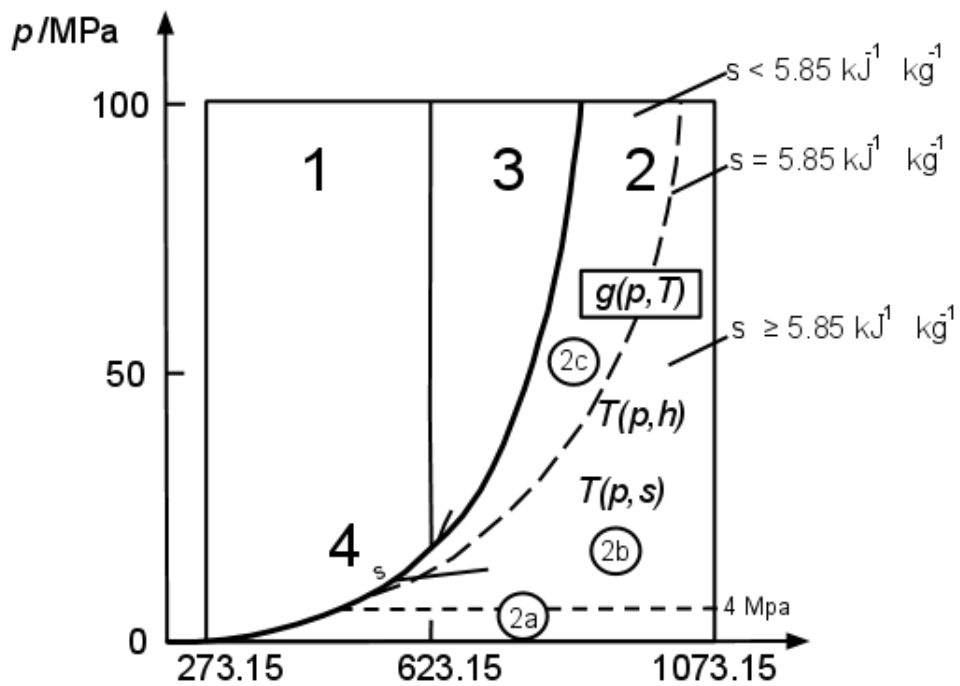
$$623.15 \text{ K} < T \leq 863.15 \text{ K} \quad 0 < p \leq p(T)$$

$$863.15 \text{ K} < T \leq 1073.15 \text{ K} \quad 0 < p \leq 100 \text{ MPa.}$$

Ecuaciones secundarias:

Calculo de las propiedades en función de p, h o de p, s sin iteraciones

Figura 14: Subregiones para las ecuaciones secundarias [Espitia]..



Ecuación cuadrática de la relación presión-entalpía

$$\pi = n_1 + n_2\eta + n_3\eta^2 \quad (16)$$

Ecuación $T(p, h)$ para las subregiones 2a

$$\frac{T_{2a}(p, h)}{T^*} = \theta_{2a}(\pi, \eta) = \sum_{i=1}^{34} n_i \pi^{I_i} (\eta - 2, 1)^{J_i} \quad (17)$$

Ecuación T(p,h) para las subregiones 2b

$$\frac{T_{2b}(p, h)}{T^*} = \theta_{2b}(\pi, \eta) = \sum_{i=1}^{38} n_i (\pi - 2)^{I_i} (\eta - 2, 6)^{J_i} \quad (18)$$

Ecuación T(p,h) para las subregiones 2c

$$\frac{T_{2c}(p, h)}{T^*} = \theta_{2c}(\pi, \eta) = \sum_{i=1}^{23} n_i (\pi + 25)^{I_i} (\eta - 1, 8)^{J_i} \quad (19)$$

Ecuación T(p,s) para las subregiones 2a

$$\frac{T_{2a}(p, s)}{T^*} = \theta_{2a}(\pi, \sigma) = \sum_{i=1}^{46} n_i \pi^{I_i} (\sigma - 2)^{J_i} \quad (20)$$

Ecuación T(p,s) para las subregiones 2b

$$\frac{T_{2b}(p, s)}{T^*} = \theta_{2b}(\pi, \sigma) = \sum_{i=1}^{44} n_i \pi^{I_i} (10 - \sigma)^{J_i} \quad (21)$$

Ecuación T(p,s) para las subregiones 2c

$$\frac{T_{2c}(p, s)}{T^*} = \theta_{2c}(\pi, \sigma) = \sum_{i=1}^{30} n_i \pi^{I_i} (2 - \sigma)^{J_i} \quad (22)$$

Ecuaciones para la región 3:

La ecuación básica se expresa en forma adimensional $\phi = f/(RT)$

$$\frac{f(p, T)}{RT} = \phi(\delta, \tau) = n_1 \ln \delta \sum_{i=2}^{40} n_i \delta^{I_i} \tau^{J_i} \quad (23)$$

Esta ecuación cubre un rango de temperatura y presión para:

$623.15 \text{ K} \leq T \leq T(p)$ y $p(T) \leq p \leq 100 \text{ MPa}$.

Ecuaciones para la región 4:

Ecuación cuadrática implícita

$$\beta^2 \theta^2 + n_1 \beta^2 \theta + n_2 \beta^2 + n_3 \beta \theta^2 + n_4 \beta \theta + n_5 \beta + n_6 \theta^2 + n_7 \theta + n_8 = 0 \quad (24)$$

Donde:

$$\beta = \left(\frac{p_s}{p^*} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (25)$$

y

$$\theta = \frac{T_s}{T^*} = \frac{n_9}{\left(\frac{T_s}{T^*} \right) - n_{10}} \quad (26)$$

Ecuación básica presión de saturación

$$\frac{p_s}{p^*} = \left[\frac{2c}{-B + (B^2 - 4AC)^{\frac{1}{2}}} \right]^4 \quad (27)$$

donde $p^* = 1Mpa$ y

$$A = v^2 + n_1v + n_2 \quad (28)$$

$$B = n_3v^2 + n_4v + n_5 \quad (29)$$

$$C = n_6v^2 + n_7v + n_8 \quad (30)$$

Esta ecuación cubre el rango de temperatura

$$273.15 \text{ K} \leq T \leq 647.096 \text{ K} .$$

Ecuación de temperatura de saturación

$$\frac{T_s}{T^*} = \frac{n_{10} + D - [(n_{10} + D)^2 - 4(n_9 + n_{10}D)]^{\frac{1}{2}}}{2} \quad (31)$$

Donde $T^* = 1K$ y

$$D = \frac{2G}{-F - (F^2 - 4EG)^{\frac{1}{2}}} \quad (32)$$

con

$$E = \beta^2 + n_3\beta + n_6 \quad (33)$$

$$F = n_1\beta^2 + n_4\beta + n_7 \quad (34)$$

$$G = n_2\beta^2 + n_5v\beta + n_8 \quad (35)$$

Esta ecuación cubre el rango de presión:

$$611.213 \text{ Pa} \leq p \leq 22.064 \text{ MPa}.$$

Ecuaciones para la región 5:

Ecuación expresada de forma adimensional $\gamma = g/(RT)$ separada en dos partes, como gas ideal γ^o y parte residual γ^r

$$\frac{g(p, T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \gamma^o(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau) \quad (36)$$

Ecuación para gas ideal γ^o

$$\gamma^o = \ln \pi \sum_{i=1}^6 n_i^o \tau^{J_i^o} \quad (37)$$

Ecuación para la parte residual γ^r

$$\gamma^r = \sum_{i=1}^6 n_i \pi^{I_i} \tau^{J_i} \quad (38)$$

Rango de temperatura y presión que cubre:

$$1073.15 \text{ K} \leq T \leq 2273.15 \text{ K} \quad 0 < p \leq 50 \text{ MPa}$$

3.2. Entorno de desarrollo integrado IDE.[4]

Un entorno de desarrollo integrado, Integrated Development Environment es un paquete informático compuesto por un conjunto de herramientas de programación. Puede dedicarse únicamente a un sólo lenguaje de programación o bien, poder utilizarse para varios.

Un IDE es un entorno de programación que ha sido empaquetado como un programa de aplicación, es decir, consiste en un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica (GUI). Los IDEs pueden ser aplicaciones por sí solas o pueden ser parte de aplicaciones existentes.

El lenguaje Visual Basic, por ejemplo, puede ser usado dentro de las aplicaciones de Microsoft Office, lo que hace posible escribir sentencias Visual Basic en forma de macros para Microsoft Word. Los IDE proveen un marco de trabajo amigable para la mayoría de los lenguajes de programación tales como C++, Python, Java, C#, Delphi, Visual Basic, entre otros.

En algunos lenguajes, un IDE puede funcionar como un sistema en tiempo de ejecución, en donde se permite utilizar el lenguaje de programación en forma interactiva, sin necesidad de trabajo orientado a archivos de texto, como es el caso de Smalltalk u Objective-C. Es posible que un mismo IDE pueda funcionar con varios lenguajes de

programación. Este es el caso de Eclipse, al que mediante plugins se le puede añadir soporte de lenguajes adicionales.

3.2.1. Visual Studio 2010

Visual Studio 2010 es la versión más reciente de esta herramienta, acompañada por .NET Framework 4.0, que es la licencia de software con que cuenta la Universidad actualmente.

Visual estudio 2010 cuenta con gran variedad de tipos de proyectos que pueden ser aplicados en los lenguajes de programación Visual C++, Visual Basic, Visual C# y visual F#.

La versión 2010 de Visual Studio incluye las herramientas para desarrollo de aplicaciones para Windows 7, tales como herramientas para el desarrollo de las características de Windows 7 (System.Windows.Shell) y la Ribbon Preview para WPF.

Entre sus características más destacables se encuentran la capacidad para utilizar múltiples monitores, así como la posibilidad de desacoplar las ventanas de su sitio original y acoplarlas en otros sitios de la interfaz de trabajo. Además de esto, aparece una edición que compila las características de todas las ediciones comunes de Visual Studio.

3.3. Estado del Arte.

3.3.1. Desarrollo de un paquete computacional para la simulación de plantas térmicas.

Rafael Beltrán Ingeniero Mecánico, Uniandes. MS, University of Delaware, USA. Director del Departamento de Ingeniería Mecánica, Uniandes. Área de Especialización: Ciencias Térmicas. En su trabajo presenta algunos adelantos en el desarrollo de herramientas de simulación y modelaje de plantas térmicas. Muestra un esquema de las plantas así como algunas consideraciones de tipo termodinámico y computacional que ocurren en la construcción de modelos de esta naturaleza; las relaciones fundamentales que rigen el comportamiento de cada uno de los componentes de las plantas. Se hace una discusión acerca del comportamiento del fluido de trabajo, así como ejemplos de los resultados obtenidos en comparación con cálculos exactos realizados por medio de tablas de propiedades.[1]

3.3.2. Simulador de una planta térmica con ciclo de vapor convencional.

El “Simulador de una planta térmica con ciclo de vapor convencional,” proyecto de E. JIMENEZ y L. MORENO de la Universidad Industrial de Santander tiene la intención

de brindar una herramienta amigable en el proceso de asimilación y visualización de los conceptos y cálculos termodinámicos. Es una herramienta para cálculos de procesos involucrados en la generación de energía, así como un medio de comprobación de estados operativos que permite el análisis cuando hay alteraciones en los parámetros. En el proyecto están consignadas las definiciones básicas de cada uno de los equipos que se modelan en el simulador los cálculos que se realizan en la simulación, el tipo y la forma como se realiza esta.[8]

3.3.3. Cyclepad.

Cyclepad, Software Educacional de Ciclos Termodinámicos es el primer laboratorio virtual articulado que el grupo de Razonamiento Cualitativo ha implementado. Permite a estudiantes construir y analizar una amplia variedad de ciclos termodinámicos. Facilidad de explicación por hipertexto proporciona al estudiante el acceso a la cadena de razonamiento subyaciendo la derivación de cada valor. Actualmente está siendo probado en ambiente universitario en clases de la Northwest University, la Escuela Naval Estadounidense, y la Universidad de Oxford.[10]

3.3.4. Programa didáctico sobre el Ciclo de Rankine sencillo RANKINE V1.0

Manuel C. Juárez Castelló , Manuel M^a Ruiz de Adana Santiago, del Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de La Rioja desarrollaron el programa que está compuesto de dos partes netamente diferenciadas: Una parte teórica, en la que se presentan los conceptos básicos sobre el Ciclo de Rankine, y una parte práctica, en la que se resuelven problemas concretos introduciendo los datos de la instalación. Además de la introducción teórica, el programa dispone de una ayuda que profundiza más en los diferentes conceptos. Programa didáctico para el estudio del Ciclo isobárico iosentrópico en la zona de vapor húmedo (Ciclo de Rankine). El fluido de trabajo del Ciclo de Rankine es vapor de agua y las opciones que se ofrecen son dos: la primera sin sobrecalentamiento (Ciclo de Rankine sencillo) y la segunda con sobrecalentamiento. La programación se ha realizado en Visual Basic (1) y el programa, en su versión ejecutable, puede rodarse en cualquier compatible PC 486 o superior. El programa se ha desarrollado de forma que se pueda trabajar con él utilizando tan sólo el ratón, prestando así mayor atención a la información que se recibe y se aporta al programa.[2]

3.3.5. Programa de simulación de ciclos termodinámicos de plantas de vapor.

En el trabajo de Mogollón, César; Ruiz, Juan; Bracho*, María y Villamar, Carlos del Departamento de Ciencias Térmicas, escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes en Mérida-Venezuela. Se desarrolló un programa que permite analizar los principales índices de funcionamiento de las plantas de vapor, tales como potencias, calores y eficiencias, así como las propiedades termodinámicas en las entradas y salidas de cada dispositivo que conforma el ciclo bajo estudio. Para ello se empleó una base de datos de las propiedades termodinámicas del agua y las ecuaciones de: Primera Ley de la Termodinámica, continuidad, eficiencia térmica, eficiencia isentrópica y eficiencia de la planta. Adicionalmente el programa permite realizar estudios paramétricos con el fin de visualizar cómo se ven afectados los principales índices de operación al modificar el valor de una variable. Los resultados obtenidos con el programa concuerdan satisfactoriamente con los arrojados por programas comerciales y con los cálculos manuales, obteniendo discrepancias menores a 0.47 %, lo que le confiere un alto grado de confiabilidad. El programa diseñado tiene la ventaja de que no requiere la programación de las ecuaciones del ciclo a estudiar, condición indispensable en los paquetes comerciales empleados como medios de validación.[9]

3.3.6. Sistema de autoaprendizaje de ciclos termodinámicos en ingeniería: CICLOWIN. [6]

F. HERRERO, C. GONZÁLEZ, R. NIETO, J. M. LACALLE Y J. L. RAPÚN del Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad Politécnica de Madrid desarrollaron el programa de simulación de ciclos termodinámicos CicloWin es una aplicación que se ejecuta en un ordenador personal sobre entorno Windows. Tanto sus componentes gráficas y de interacción con el usuario como sus módulos matemáticos e implementación de las ecuaciones de estado han sido desarrollados en C++ Builder. El primero de los módulos de que consta es un entorno gráfico que permite crear el esquema de un ciclo termodinámico mediante los tradicionales botones de selección de cualquier aplicación sobre Windows y el uso del ratón.

El siguiente módulo del programa contiene el motor de cálculo que resuelve y representa gráficamente (si dispone de la información suficiente) el ciclo diseñado en el módulo anterior. Este módulo se compone de diferentes partes. Por un lado las ecuaciones de estado del agua y un grupo de subrutinas matemáticas para su manejo. Por otro lado el conjunto de ecuaciones que definen termodinámicamente a cada uno de los componentes

que pueden utilizarse en el diseño del ciclo. La correcta manipulación de estos dos bloques permite que el programa calcule el estado termodinámico de todos los puntos del ciclo (las entradas y salidas a los diferentes componentes del ciclo). Adicionalmente este módulo incluye una serie de subprogramas que, junto con las ecuaciones que caracterizan al fluido más las que caracterizan a cada uno de los componentes, permiten representar la evolución del ciclo sobre un diagrama termodinámico.

Finalmente el programa incluye la programación de un módulo que suministra la información más relevante del ciclo térmico. Su cometido es el cálculo de las potencias de turbinas, bombas y calderas y destrucciones exergéticas para, finalmente, obtener los valores globales de rendimientos del ciclo y potencia total suministrada.

4. METODOLOGÍA.

Para realizar la investigación se siguió el siguiente procedimiento:

4.1. Revisión Bibliográfica.

Búsqueda de información y estado de arte referente al modelamiento de Plantas térmicas. El material se consultó de acuerdo a los requerimientos y alcance del proyecto, se hizo revisión tanto en medios físicos como electrónicos que incluyeron bases de datos, e Internet. A medida que se desarrolló el proyecto y en base a las necesidades que se presentaron se realizó complemento a la documentación. Aunado a lo anterior, por las características del proyecto, se preguntó a programadores que colaboraron en la resolución de dudas y dificultades que se presentaron.

4.2. Desarrollo matemático de los modelos de la simulación.

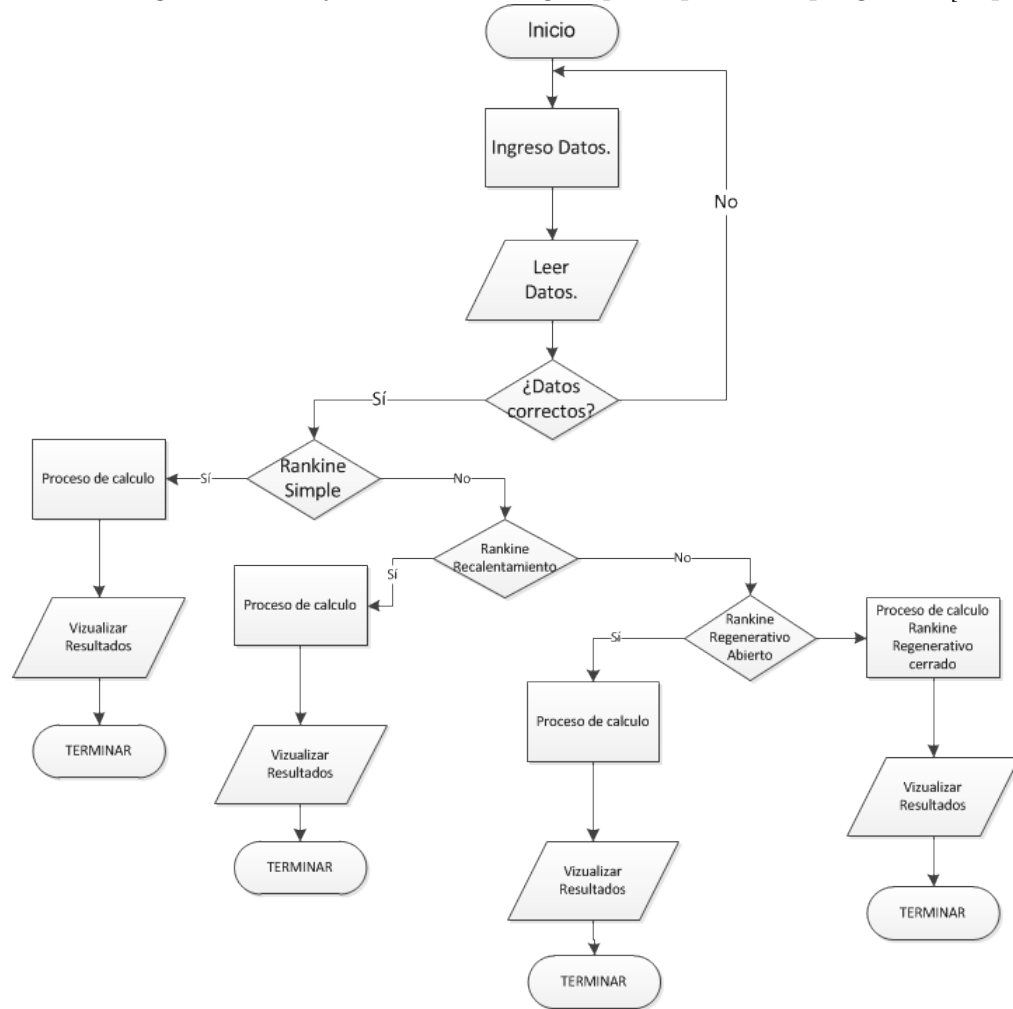
Deducción e implementación de las ecuaciones que rigen el comportamiento de un ciclo Rankine así como la implementación de la formulación internacional IF97 “Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam”. En esta etapa se seleccionaron las expresiones matemáticas pertinentes para cálculos de plantas térmicas de ciclo Rankine y del IF97.

4.3. Diagramas de Flujo.

A continuación se muestra el diagrama de flujo de las estrategias principales del programa según el estándar de simbología ISO 5807. Algoritmos de programación para la simulación de las plantas térmicas de vapor de agua en estado estacionario con base al ciclo Rankine simple, con recalentamiento y regenerativo.

La construcción de los diagramas de flujo de los algoritmos de programación se realizó en el programa Microsoft Visio 2010.

Figura 15: Diagrama de flujo de las estrategias principales del programa [Espitia]..



Adicionalmente el diagrama de flujo de las estrategias principales del programa al implementar los algoritmos para el cálculo de las propiedades termodinámicas del agua según la formulación internacional IF97 “Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam”.

4.4. Diseño de la interfaz gráfica.

Bosquejo y desarrollo de la interfaz gráfica del programa. En este punto se decidió el aspecto del programa, los iconos que lo conforman, los menús que se incluyeron, la presentación en la pantalla principal, la manera como se muestra las gráficas y la distribución de cada uno.

4.5. Creación de imágenes e iconos del programa.

Generación de imágenes e iconos implementados en el programa de acuerdo al diseño que se planteó. Estos gráficos se realizaron con la herramienta de Google “Google Docs” en la plantilla “Dibujos” obteniendo las siguientes figuras. Con esta herramienta también se elaboraron las imágenes correspondientes a esquemas de los ciclos y sus respectivas gráficas T-s

Figura 17: Captura de pantalla de Google docs [Espitia].

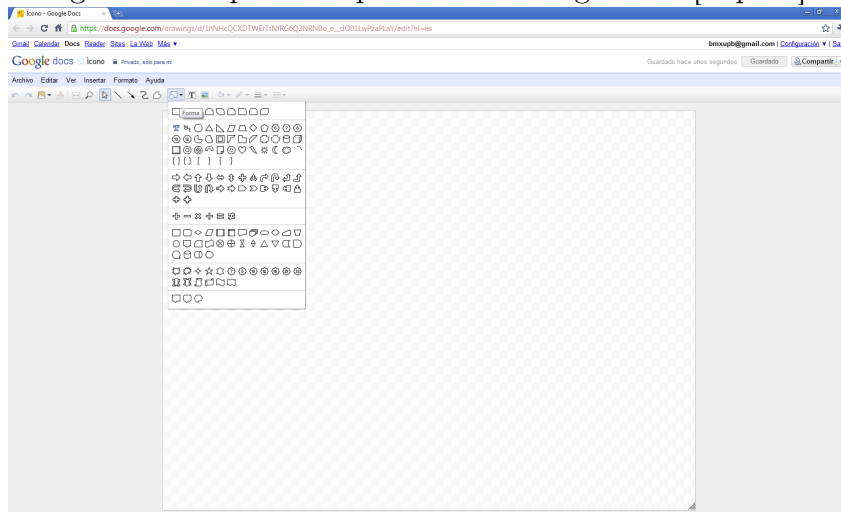


Figura 18: Icono del programa [Espitia].

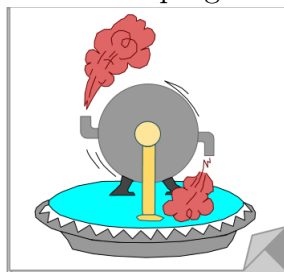


Figura 19: Icono Ciclo Simple [Espitia].

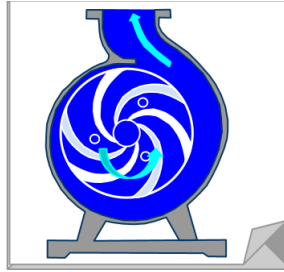


Figura 20: Icono del ciclo con recalentamiento [Espitia].

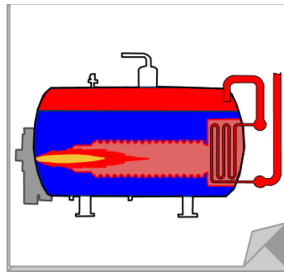


Figura 21: Icono del ciclo Regenerativo cerrado [Espitia].

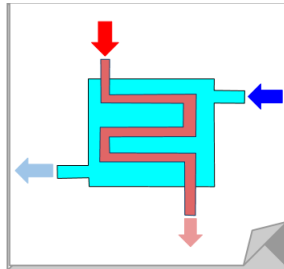


Figura 22: Icono del ciclo Regenerativo abierto [Espitia].

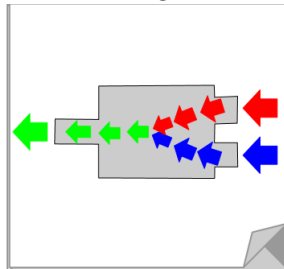
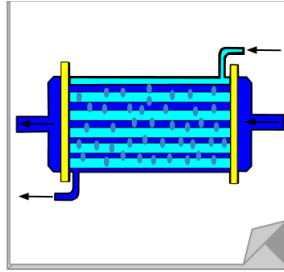


Figura 23: Icono propiedades del agua [Espitia].



4.6. Programación y depuración de las estrategias.

Desarrollo de código fuente, compilación y depuración del programa hasta que se obtuvo los resultados esperados. Para la programación se usó el lenguaje C++ en la plantilla Win32 como “aplicación de consola Win32”, y el entorno gráfico mediante la herramienta MFC en “aplicación MFC”, esto en el programa Microsoft Visual Studio 2010.

Figura 24: Captura de pantalla proyecto Win32 [Espitia].

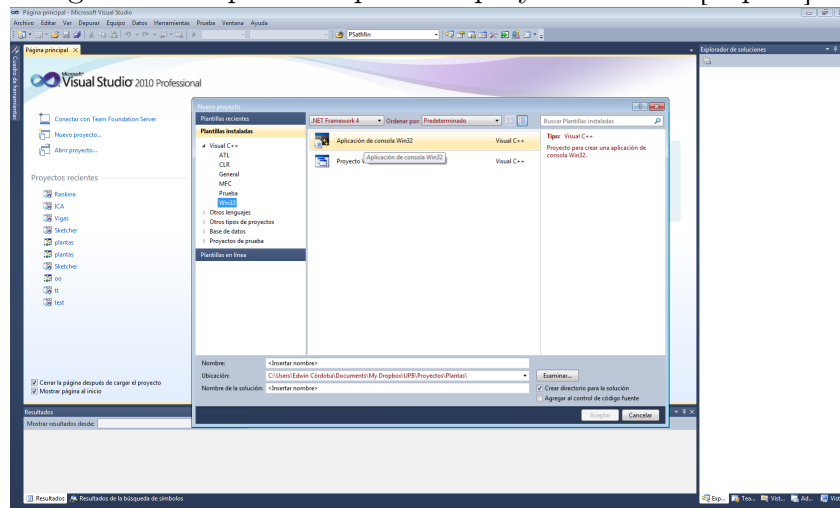
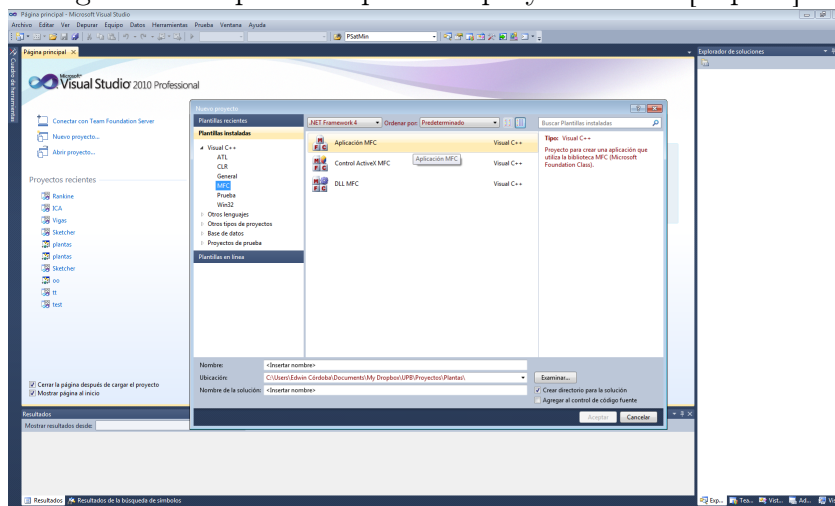


Figura 25: Captura de pantalla proyecto MFC [Espitia].



4.7. Pruebas de funcionamiento del programa.

Continuamente durante el desarrollo del software se hicieron pruebas de funcionamiento hasta la conformidad con el trabajo realizado; finalmente se corroboraron resultados del programa con ejemplos de libros de Termodinámica para la validación del software con base a datos conocidos. Ver el aparte “Resultados y discusión”

4.8. Elaboración del manual del usuario.

Se realizó el Manual del Usuario del paquete informático indicando todos los procedimientos y funciones para el uso adecuado del programa.

4.9. Documentación.

Recopilación de toda la información generada en el transcurso del proyecto.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Resultados del trabajo y confrontación de estos con los cálculos de otros autores para la validación del software. A continuación se presentan ejemplos de ejercicios propuestos en el libro de Termodinámica Cengel Quinta edición contrastados con los resultados de los cálculos del programa con lo que se validaron la correcta formulación y funcionamiento del programa. También se muestran los cálculos de propiedades del agua verificados con tablas de la formulación internacional IF97.

5.1. Propiedades del Agua según la Formulación Internacional IF97:

5.1.1. Verificación de la Región 1.

Tabla 1: Valores calculados de propiedades termodinámicas Región 1 [IF97]

	$T = 300K$	$T = 300K$	$T = 500K$
	$p = 3MPa$	$p = 80MPa$	$p = 3MPa$
$v/(m^3kg^{-1})$	$0,100215168 \times 10^{-2}$	$0,971180894 \times 10^{-3}$	$0,120241800 \times 10^{-2}$
$h/(kJkg^{-1})$	$0,115331273 \times 10^3$	$0,184142828 \times 10^3$	$0,975542239 \times 10^3$
$u/(kJkg^{-1})$	$0,112324818 \times 10^3$	$0,106448356 \times 10^3$	$0,971934985 \times 10^3$
$s/(kJkg^{-1}K^{-1})$	0,392294792	0,368563852	$0,258041912 \times 10^1$
$cp/(kJkg^{-1}K^{-1})$	$0,417301218 \times 10^1$	$0,401008987 \times 10^1$	$0,465580682 \times 10^1$
$w/(ms^{-1})$	$0,150773921 \times 10^4$	$0,163469054 \times 10^4$	$0,124071337 \times 10^4$

Tabla 2: Resultados propiedades termodinámicas Región 1 [Espitia]

	$T = 300K$	$T = 300K$	$T = 500K$
	$p = 3MPa$	$p = 80MPa$	$p = 3MPa$
Volumen específico $[m^3/kg]$	0.001002	0.000971	0.001202
Entalpía $[kJ/kg]$	115.331273	184.142828	975.542239
Energía Interna $[kJ/kg]$	112.324818	106.448356	971.934985
Entropía $[kJ/kg \cdot K]$	0.392295	0.368564	2.580419

5.1.2. Verificación de la Región 2.

Tabla 3: Valores calculados de propiedades termodinámicas Región 2 [IF97].

	$T = 300K$	$T = 700K$	$T = 700K$
	$p = 0,0035MPa$	$p = 0,0035MPa$	$p = 30MPa$
$v/(m^3kg^{-1})$	$0,394913866 \times 10^2$	$0,923015898 \times 10^2$	$0,542946619 \times 10^{-2}$
$h/(kJkg^{-1})$	$0,254991145 \times 10^4$	$0,333568375 \times 10^4$	$0,263149474 \times 10^4$
$u/(kJkg^{-1})$	$0,241169160 \times 10^4$	$0,301262819 \times 10^4$	$0,246861076 \times 10^4$
$s/(kJkg^{-1}K^{-1})$	$0,852238967 \times 10^1$	$0,101749996 \times 10^2$	$0,517540298 \times 10^1$
$cp/(kJkg^{-1}K^{-1})$	$0,191300162 \times 10^1$	$0,208141274 \times 10^1$	$0,103505092 \times 10^2$
$w/(ms^{-1})$	$0,427920172 \times 10^3$	$0,644289068 \times 10^3$	$0,480386523 \times 10^3$

Tabla 4: Resultados propiedades termodinámicas Región 1 [Espitia]

	$T = 300K$	$T = 700K$	$T = 700K$
	$p = 0,0035MPa$	$p = 0,0035MPa$	$p = 30MPa$
Volumen específico $[m^3/kg]$	39.491387	92.301590	0.005429
Entalpía $[kJ/kg]$	2549.911451	3335.683754	2631.494745
Energía Interna $[kJ/kg]$	2411.691598	3012.628189	2468.610759
Entropía $[kJ/kg \cdot K]$	2549.911451	10.175000	5.175403

5.1.3. Verificación de la Región 3

Tabla 5: Resultados propiedades termodinámicas Región 1 [Espitia]

	$T = 650K$	$T = 650K$	$T = 750K$
	$\rho = 0,002kg/m^3$	$\rho = 0,005kg/m^3$	$\rho = 0,002kg/m^3$
$v/(m^3kg^{-1})$	$0,255837018 \times 10^2$	$0,222930643 \times 10^2$	$0,783095639 \times 10^2$
$h/(kJkg^{-1})$	$0,186343019 \times 10^4$	$0,237512401 \times 10^4$	$0,225868845 \times 10^4$
$u/(kJkg^{-1})$	$0,181226279 \times 10^4$	$0,226365868 \times 10^4$	$0,210206932 \times 10^4$
$s/(kJkg^{-1}K^{-1})$	$0,405427273 \times 10^1$	$0,485438792 \times 10^1$	$0,446971906 \times 10^1$
$cp/(kJkg^{-1}K^{-1})$	$0,138935717 \times 10^2$	$0,446579342 \times 10^2$	$0,634165359 \times 10^1$
$w/(ms^{-1})$	$0,502005554 \times 10^3$	$0,383444594 \times 10^3$	$0,760696041 \times 10^3$

Tabla 6: Resultados propiedades termodinámicas Región 1 [Espitia]

	$T = 650K$	$T = 650K$	$T = 750K$
	$\rho = 0,002kg/m^3$	$\rho = 0,005kg/m^3$	$\rho = 0,002kg/m^3$
Presión $[Mpa]$	25.583702	22.293064	78.309564
Entalpía $[kJ/kg]$	1863.430190	2375.124005	2258.688445
Energía Interna $[kJ/kg]$	1812.262786	2263.658684	2102.069318
Entropía $[kJ/kg \cdot K]$	4.054273	4.854388	4.469719

5.1.4. Verificación de la Región 5

Tabla 7: Resultados propiedades termodinámicas Región 1 [Espitia]

	$T = 1500K$	$T = 1500K$	$T = 2000K$
	$p = 0,5MPa$	$p = 30MPa$	$p = 30MPa$
$v/(m^3kg^{-1})$	$0,138455090 \times 10^1$	$0,230761299 \times 10^{-1}$	$0,311385219 \times 10^{-1}$
$h/(kJkg^{-1})$	$0,521976855 \times 10^4$	$0,516723514 \times 10^4$	$0,657122604 \times 10^4$
$u/(kJkg^{-1})$	$0,452749310 \times 10^4$	$0,516723514 \times 10^4$	$0,563707038 \times 10^4$
$s/(kJkg^{-1}K^{-1})$	$0,965408875 \times 10^1$	$0,772970133 \times 10^1$	$0,853640523 \times 10^1$
$cp/(kJkg^{-1}K^{-1})$	$0,261609445 \times 10^1$	$0,272724317 \times 10^1$	$0,288569882 \times 10^1$
$w/(ms^{-1})$	$0,917068690 \times 10^3$	$0,928548002 \times 10^3$	$0,106736948 \times 10^4$

Tabla 8: Resultados propiedades termodinámicas Región 1 [Espitia]

	$T = 1500K$	$T = 1500K$	$T = 2000K$
	$p = 0,5MPa$	$p = 30MPa$	$p = 30MPa$
Volumen específico $[m^3/kg]$	1.384551	0.023076	0.031139
Entalpía $[kJ/kg]$	5219.768551	5167.235140	6571.226039
Energía Interna $[kJ/kg]$	4527.493102	4474.951242	5637.070383
Entropía $[kJ/kg \cdot K]$	9.654089	7.729701	8.536405

5.2. Ciclo Rankine Simple:

- Ejercicio 10-16

Considere una central eléctrica de vapor de 210 MW que opera en un ciclo Rankine ideal simple. El vapor entra a la turbina a 10 MPa y 500°C y se enfría en el condensador a una presión de 10kPa. Muestre el ciclo en un diagrama T-s respecto de las líneas de saturación y determine a) la calidad del vapor a la salida de la turbina, b) la eficiencia térmica del ciclo y c) el flujo másico del vapor.

a) De las tablas de vapor (Tablas A-4, A-5, y A-6),

$$h_1 = h_{f@10kPa} = 191,81kJ/kg$$

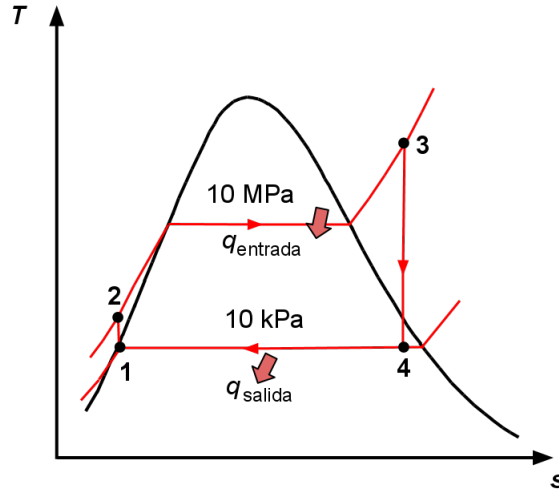
$$v_1 = v_{f@10kPa} = 0,00101m^3/kg$$

$$w_{p,in} = v_1 (P_2 - P_1)$$

$$= (0,00101m^3/kg) (10,000 - 10kPa) \left(\frac{1kJ}{1kPa \cdot m^3} \right)$$

$$= 10,09KJ/Kg$$

Figura 26: Gráfica T-s Simple [Espitia].



$$h_2 = h_1 + w_{p,in} = 191,81 + 10,09 = 201,9 \text{ kJ/kg}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_3 = 10 \text{ MPa} \\ T_3 = 500^\circ \text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_3 = 3375,1 \text{ kJ/kg} \\ s_3 = 6,5995 \text{ kJ/kg.K} \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_4 = 10 \text{ MPa} \\ s_4 = s_3 \end{array} \right\} x_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6,5995 - 0,6492}{7,4996} = 0,7934$$

$$h_4 = h_f + x_4 h_{fg} = 191,81 + (0,7934)(2392,1) = 2089,7 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{b) } q_{in} = h_3 - h_2 = 3375,1 - 201,90 = 3173,2 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{out} = h_4 - h_1 = 2089,7 - 191,81 = 1897,9 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{neto} = q_{in} - q_{out} = 3173,2 - 1897,9 = 1275,4 \text{ kJ/kg}$$

y

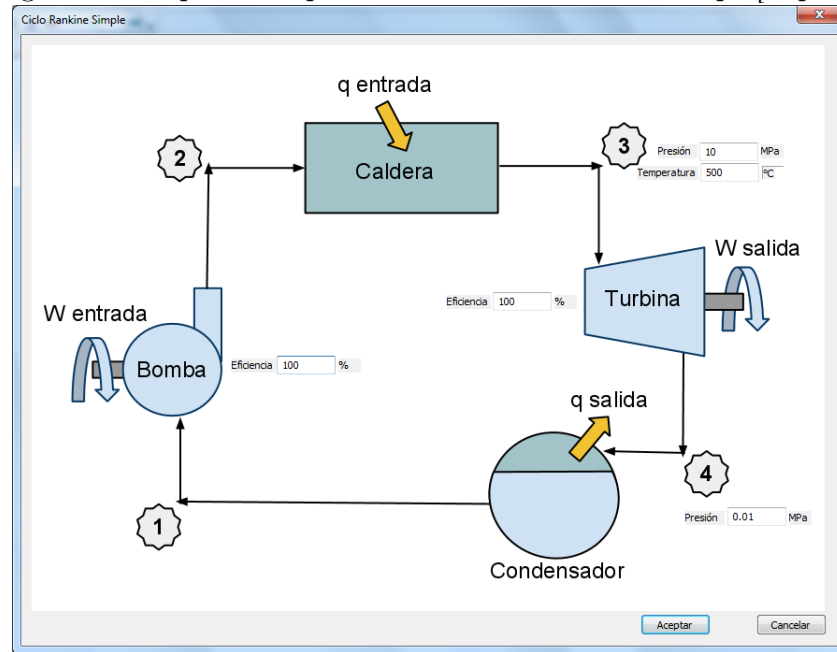
$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{1275,4 \text{ kJ/kg}}{3173,2 \text{ kJ/kg}} = 40,2 \%$$

$$\text{c) } m = \frac{W_{net}}{w_{net}} = \frac{210,000 \text{ kJ/s}}{1275,4 \text{ kJ/kg}} = 164,7 \text{ kg/s}$$

- Solución del ejercicio 10-16 con el programa.

En la siguiente figura se muestra la interfaz del programa para la introducción de los datos por parte del usuario:

Figura 27: Captura de pantalla Interfaz Rankine Simple[Espitia]



Luego de introducir los datos y hacer clic en el botón “Aceptar” se debe picar en el icono de cálculo, tras lo cual el programa mostrara una pantalla con los resultados.

Figura 28: Captura de pantalla visualización de resultados [Espitia]

Resultados Ciclo Simple

Tipo de Equipo = Bomba
Entrada:
Presión = 0.010000
Temperatura = 318.957548
Entalpía = 191.812295
Energía Interna = 191.802193
Volumen específico = 0.001010
Entropía = 0.649218
Estado = Saturación(x=0.000000)

Salida:
Presión = 10.000000
Temperatura = 319.288682
Entalpía = 201.883539
Energía Interna = 191.823281
Volumen específico = 0.001006
Entropía = 0.649218
Estado = Liquido Comprimido

Tipo de Equipo = Turbina

Tabla 9: Resultados Rankine Simple [Espitia]

Propiedad:	Bomba:		Turbina:	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Presión [Mpa]	0.010000	10.000000	10.000000	0.010000
Temperatura[K]	318.957548	319.288682	773.150000	318.957548
Entalpía[kJ/kg]	191.812295	201.883539	3375.058442	2089.640347
Energía Interna[kJ/kg]	191.802193	191.823281	3046.929812	1973.244746
Volumen específico[m ³ /kg]	0.001010	0.001006	0.032813	11.639560
Entropía[kJ/kg · K]	0.649218	0.649218	6.599323	6.599323
Estado.	Saturación (x=0.000000)	Líquido Comprimido	Líquido Comprimido	Saturación (x=0.793382)
Trabajo[kJ/kg]				
Calor[kJ/kg]				
	Caldera:		Condensador:	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Presión [Mpa]	10.000000	10.000000	0.010000	0.010000
Temperatura[K]	319.288682	773.150000	318.957548	318.957548
Entalpía[kJ/kg]	201.883539	3375.058442	2089.640347	191.812295
Energía Interna[kJ/kg]	191.823281	3046.929812	1973.244746	191.802193
Volumen específico[m ³ /kg]	0.001006	0.032813	11.639560	0.001010
Entropía[kJ/kg · K]	0.649218	6.599323	6.599323	0.649218
Estado.	Líquido Comprimido	Líquido Comprimido	Saturación (x=0.793382)	Saturación (x=0.000000)
Trabajo[kJ/kg]				
Calor[kJ/kg]				
EFICIENCIA [%]:	40.1915			

5.3. Ciclo Rankine con Recalentamiento:

- Ejercicio 10-34

Considere una central eléctrica de vapor que opera en un ciclo Rankine con recalentamiento y que tiene una salida neta de potencia de 80 MW. El vapor entra a la turbina de alta presión a 10 MPa y 500°C, mientras que en la turbina de baja presión lo hace a 1 MPa y 500°C. El vapor sale del condensador como líquido saturado a una presión de 10 kPa. La eficiencia isoentrópica de la turbina es de 80% y de la bomba de 95%. Muestre el ciclo en un diagrama T-s respecto de las líneas de saturación y determine a) la calidad (o temperatura, si hay sobrecalentamiento) del vapor a la salida de la turbina, b) la eficiencia térmica del ciclo y c) el flujo másico de vapor.

a) De las tablas de vapor (Tablas A-4, A-5, y A-6),

$$h_1 = h_{f@10kPa} = 191,81 \text{ kJ/kg}$$

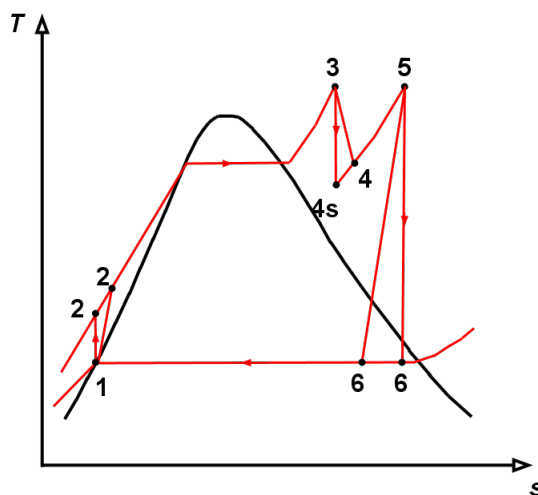
$$v_1 = v_{f@10kPa} = 0,00101 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$w_{p,in} = v_1 (P_2 - P_1) / \eta_p$$

$$= (0,00101 \text{ m}^3/\text{kg}) (10,000 - 10 \text{ kPa}) \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) / (0,95)$$

$$= 10,62 \text{ kJ/Kg}$$

Figura 29: Gráfica T-s Recalentamiento [Espitia].



$$h_2 = h_1 + w_{p,in} = 191,81 + 10,62 = 202,43 \text{ kJ/kg}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_3 = 10 \text{ MPa} \\ T_3 = 500^\circ \text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_3 = 3375,1 \text{ kJ/kg} \\ s_3 = 6,5995 \text{ kJ/kg.K} \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{4s} = 1 \text{ MPa} \\ s_{4s} = s_3 \end{array} \right\} h_{4s} = 2783,8 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_T = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \rightarrow h_4 = h_3 - \eta_T(h_3 - h_{4s})$$

$$= 3375,1 - (0,8)(3375,1 - 2783,7) = 2902,0 \text{ kJ/kg}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_5 = 1 \text{ MPa} \\ T_5 = 500^\circ \text{C} \end{array} \right\} \begin{array}{l} h_5 = 3479,1 \text{ kJ/kg} \\ s_5 = 7,7642 \text{ kJ/kg.K} \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{6s} = 1 \text{ MPa} \\ s_{6s} = s_5 \end{array} \right\} \begin{array}{l} x_{6s} = \frac{s_{6s} - s_f}{s_{fg}} = \frac{7,7642 - 0,6492}{7,4996} = 0,9487 \quad (\text{a la salida de la turbina}) \\ h_{6s} = h_f + x_{6s}h_{fg} = 191,81 + (0,9748)(2392,1) = 2461,2 \text{ kJ/kg} \end{array}$$

De las tablas de vapor a 10 kPa $T_6 = 88,1^\circ \text{C}$

$$\text{b) } w_{T,out} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) = 3375,1 - 2902,0 + 3479,1 - 2664,8 = 1287,4 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{in} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) = 3375,1 - 202,43 + 3479,1 - 2902,0 = 3749,8 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{neto} = w_{T,out} - w_{p,in} = 1284,4 - 10,62 = 1276,8 \text{ kJ/kg}$$

Así, la eficiencia térmica es

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{1276,8 \text{ kJ/kg}}{3749,8 \text{ kJ/kg}} = 34,1 \%$$

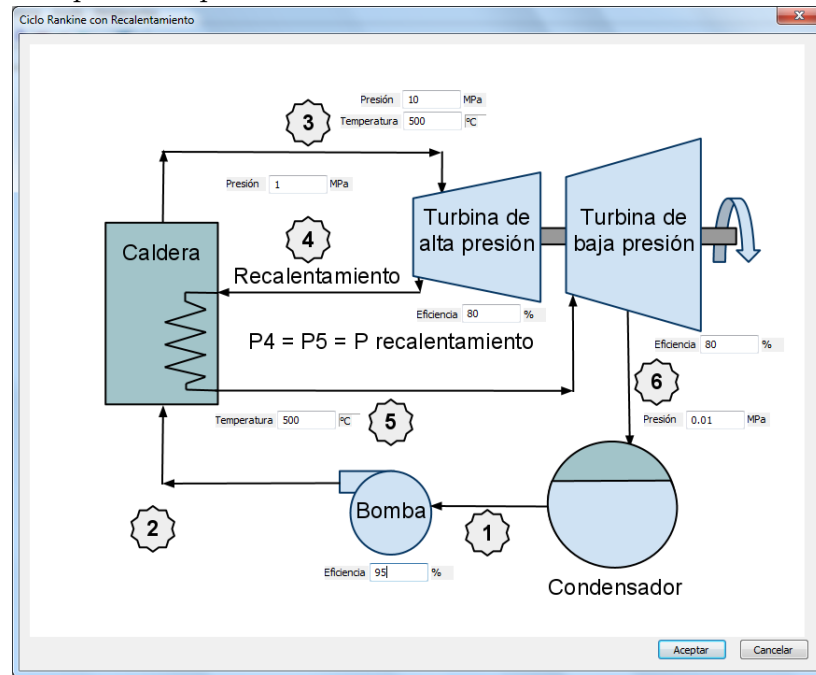
c) Flujo másico de vapor

$$m = \frac{W_{net}}{w_{net}} = \frac{80,000 \text{ kJ/s}}{1276,9 \text{ kJ/kg}} = 62,7 \text{ kg/s}$$

- Solución del ejercicio 10-16 con el programa.

En la siguiente figura se muestra la interfaz del programa para la introducción de los datos por parte del usuario:

Figura 30: Captura de pantalla Interfaz Rankine con Recalentamiento [Espitia]



Luego de introducir los datos y hacer clic en el botón “Aceptar” se debe picar en el icono de cálculo, tras lo cual el programa mostrara una pantalla con los resultados.

Figura 31: Captura de pantalla visualización de resultados [Espitia]



Tabla 10: Resultados Rankine con Recalentamiento [Espitia]

Propiedad:	Bomba:		Recalentador:	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Presión [Mpa]	0.010000	10.000000	1.000000	1.000000
Temperatura[K]	318.957548	319.416218	504.682036	773.150000
Entalpía[kJ/kg]	191.812295	202.413605	2901.919687	3479.003675
Energía Interna[kJ/kg]	191.802193	192.352793	2678.813030	3124.893409
Volumen específico[m ³ /kg]	0.001010	0.001006	0.223107	0.354110
Entropía[kJ/kg · K]	0.649218	0.650878	6.846240	7.763965
Estado.	Saturación (x=0.000000)	Líquido Comprimido	Vapor Sobrecalentado	Vapor Sobrecalentado
Trabajo[kJ/kg]	-10.601309		0.000000	
Calor[kJ/kg]	0.000000		577.083988	
	Turbina de Alta:		Turbina de Baja:	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Presión [Mpa]	10.000000	1.000000	1.000000	0.010000
Temperatura[K]	773.150000	504.682036	773.150000	361.213048
Entalpía[kJ/kg]	3375.058442	2901.919687	3479.003675	2664.689808
Energía Interna[kJ/kg]	3046.929812	2678.813030	3124.893409	2498.266549
Volumen específico[m ³ /kg]	0.032813	0.223107	0.354110	16.642326
Entropía[kJ/kg · K]	6.599323	6.846240	7.763965	8.386832
Estado.	Vapor Sobrecalentado	Vapor Sobrecalentado	Vapor Sobrecalentado	Vapor Sobrecalentado
Trabajo[kJ/kg]	473.138755		814.313867	
Calor[kJ/kg]	0.000000		0.000000	
	Caldera:		Condensador:	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Presión [Mpa]	10.000000	10.000000	0.010000	0.010000
Temperatura[K]	319.416218	773.150000	361.213048	318.957548
Entalpía[kJ/kg]	202.413605	3375.058442	2664.689808	191.812295
Energía Interna[kJ/kg]	192.352793	3046.929812	2498.266549	191.802193
Volumen específico[m ³ /kg]	0.001006	0.032813	16.642326	0.001010
Entropía[kJ/kg · K]	0.650878	6.599323	8.386832	0.649218
Estado.	Líquido Comprimido	Vapor Sobrecalentado	Vapor Sobrecalentado	Saturación (x=0.000000)
Trabajo[kJ/kg]	0.000000		0.000000	
Calor[kJ/kg]	3172.644837		-2472.877513	
EFICIENCIA [%]:			34.0518	

5.4. Ciclo Rankine Regenerativo:

- Ejercicio 10-44

Una central eléctrica de vapor opera en un ciclo Rankine ideal regenerativo. El vapor entra en la turbina a 6 MPa y 450°C y se condensa en el condensador a 20 kPa. El vapor se extrae de a turbina a 0.4 MPa para calentar el agua de alimentación en un calentador abierto, además el agua sale del calentador como líquido saturado. Muestre el ciclo en un diagrama T-s y determine a) la salida neta de trabajo por kilogramo de vapor que fluye a través de la caldera y b) la eficiencia térmica del ciclo.

a) De las tablas de vapor (Tablas A-4, A-5, y A-6),

$$h_1 = h_{f@20kPa} = 251,42kJ/kg$$

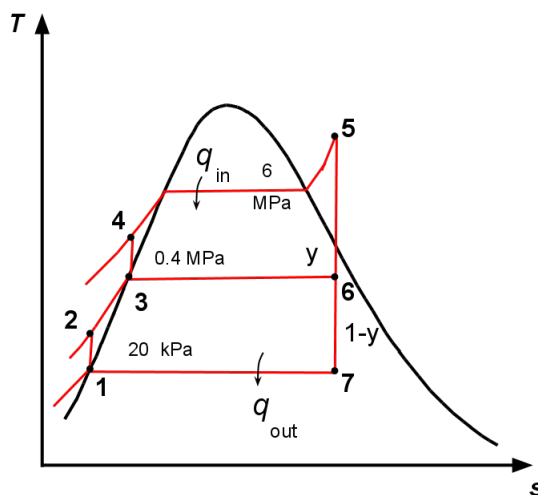
$$v_1 = v_{f@20kPa} = 0,001017m^3/kg$$

$$w_{p,in} = v_1 (P_2 - P_1)$$

$$= (0,001017m^3/kg) (400 - 20kPa) \left(\frac{1KJ}{1kPa \cdot m^3} \right)$$

$$= 0,39KJ/Kg$$

Figura 32: Gráfica T-s Rankine Regenerativo [Espitia].



$$h_2 = h_1 + w_{p,in} = 251,42 + 0,39 = 251,81 \text{ kJ/kg}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_3 = 0,4 \text{ MPa} \\ \text{Líquido Saturado} \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} h_3 = h_{f@0,4 \text{ MPa}} = 604,66 \text{ kJ/kg} \\ v_3 = v_{f@0,4 \text{ MPa}} = 0,001084 \text{ m}^3/\text{kg} \end{array} \right.$$

$$w_{pII,in} = v_3(P_4 - P_3) = (0,001084 \text{ m}^3/\text{kg})(6000 - 400 \text{ kPa}) \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = 6,07 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = h_3 + w_{pII,in} = 604,66 + 6,07 = 610,73 \text{ kJ/kg}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_5 = 6 \text{ MPa} \\ T_5 = 450^\circ \text{C} \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} h_5 = 3302,9 \text{ kJ/kg} \\ s_5 = 6,7219 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{6s} = 0,4 \text{ MPa} \\ s_6 = s_5 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} x_6 = \frac{s_6 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6,7219 - 0,6492}{7,4996} = 0,9661 \\ h_6 = h_f + x_6 h_{fg} = 604,66 + (0,9661)(2133,4) = 2665,7 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_7 = 0,4 \text{ MPa} \\ s_7 = s_5 \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} x_7 = \frac{s_7 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6,7219 - 0,8320}{7,0752} = 0,8325 \\ h_7 = h_f + x_7 h_{fg} = 251,42 + (0,8325)(2357,5) = 2214,0 \text{ kJ/kg} \end{array} \right.$$

La fracción de vapor extraído se determina de la ecuación de balance de energía en estado estable aplicada a la regeneración. Señalando que $\dot{Q} \approx \dot{W} \approx \Delta ke \approx \Delta pe \approx 0$,

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \Delta \dot{E}_{sistema} \overset{\circledast 0(\text{estado})}{=} 0$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e \rightarrow \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 \rightarrow (1 - y) h_2 = 1(h_3)$$

donde y es la fracción de vapor extraída de la turbina ($= m_6/m_3$) resolviendo para y ,

$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} = \frac{604,66 - 251,81}{2665,7 - 251,81} = 0,1462$$

entonces

$$q_{in} = h_5 - h_4 = 3302,9 - 610,73 = 2692,2 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{out} = (1 - y)(h_7 - h_1) = (1 - 0,1463)(2214,0 - 251,42) = 1675,4 \text{ kJ/kg}$$

y

$$W_{neto} = q_{in} - q_{out} = 2692,2 - 1675,4 = 1016,8 \text{ kJ/kg}$$

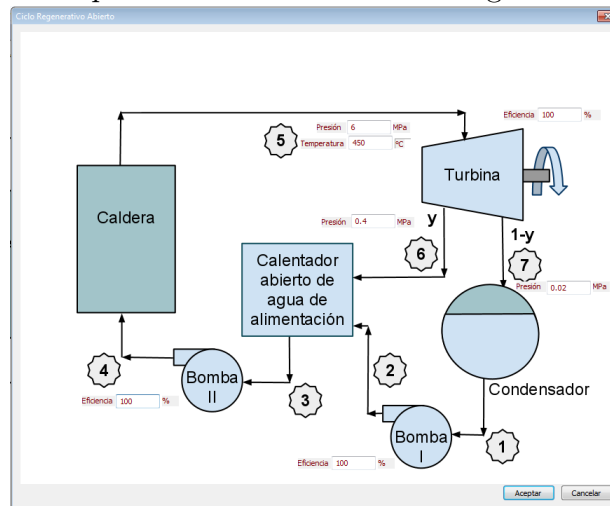
(b) La eficiencia térmica se determina de

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{1675,4 \text{ kJ/kg}}{2692,2 \text{ kJ/kg}} = 37,8 \%$$

- Solución del ejercicio 10-44 con el programa.

En la siguiente figura se muestra la interfaz del programa para la introducción de los datos por parte del usuario:

Figura 33: Captura de pantalla Interfaz Rankine Regenerativo Abierto[Espitia]



Luego de introducir los datos y hacer clic en el botón “Aceptar” se debe picar en el icono de cálculo, tras lo cual el programa mostrara una pantalla con los resultados.

Figura 34: Captura de pantalla visualización de resultados [Espitia]

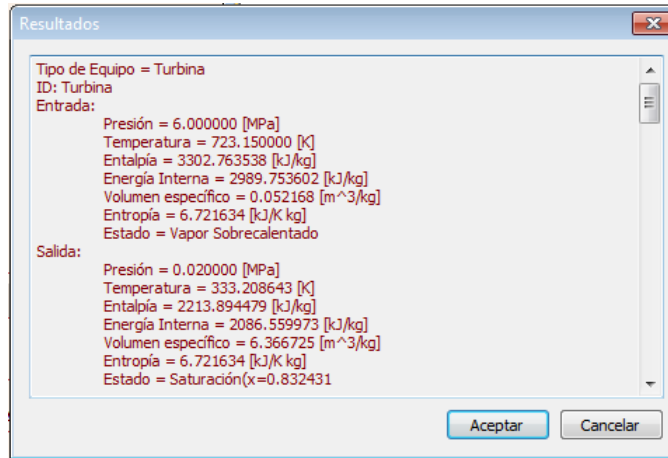


Tabla 11: Resultados Rankine Rankine Regenerativo Abierto [Espitia]

Propiedad:	Turbina:		Bomba 1:		
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
Presión [Mpa]	6.000000	0.020000	0.020000	0.400000	
Temperatura[K]	723.150000	333.208643	333.208643	333.224761	
Entalpía[kJ/kg]	3302.763538	2213.894479	251.399738	251.786222	
Energía Interna[kJ/kg]	2989.753602	2086.559973	251.379396	251.379430	
Volumen específico[m ³ /kg]	0.052168	6.366725	0.001017	0.001017	
Entropía[kJ/kg · K]	6.721634	6.721634	0.831952	0.831952	
Estado.	Vapor Sobrecalentado	Saturación (x=0.832431)	Saturación(x=0.000000)	Líquido Comprimido	
Trabajo[kJ/kg]		1022.819100		-0.329975	
Calor[kJ/kg]		0.000000		0.000000	
		Bomba 2:		Caldera:	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida
Presión [Mpa]		0.400000	6.000000	6.000000	6.000000
Temperatura[K]		416.762533	417.341101	417.341101	723.150000
Entalpía[kJ/kg]		604.723474	610.783058	610.783058	3302.763538
Energía Interna[kJ/kg]		604.290051	604.299519	604.299519	2989.753602
Volumen específico[m ³ /kg]		0.001084	0.001081	0.001081	0.052168
Entropía[kJ/kg · K]		1.776598	1.776598	1.776598	6.721634
Estado.		Saturación(x=0.000000)	Líquido Comprimido	Líquido Comprimido	Vapor Sobrecalentado
Trabajo[kJ/kg]			-6.059584		0.000000
Calor[kJ/kg]			0.000000		2691.980480
		Condensador:			
		Entrada	Salida		
Presión [Mpa]		0.020000	0.020000		
Temperatura[K]		333.208643	333.208643		
Entalpía[kJ/kg]		2213.894479	251.399738		
Energía Interna[kJ/kg]		2086.559973	251.379396		
Volumen específico[m ³ /kg]		6.366725	0.001017		
Entropía[kJ/kg · K]		6.721634	0.831952		
Estado.		Saturación (x=0.832431)	Saturación(x=0.000000)		
Trabajo[kJ/kg]			0.000000		
Calor[kJ/kg]			-1675.550938		
Fracción y			0.146214		
EFICIENCIA [%]:			37.7577		

■ Ejercicio 10-45

Repita el problema 10.44, pero reemplace el calentador de agua de alimentación sale del calentador a la temperatura de condensación del vapor extraído y que éste sale

del calentador como líquido saturado y se bombea a la línea que conduce el agua de alimentación.

a) De las tablas de vapor (Tablas A-4, A-5, y A-6),

$$h_1 = h_{f@20kPa} = 251,42 kJ/kg$$

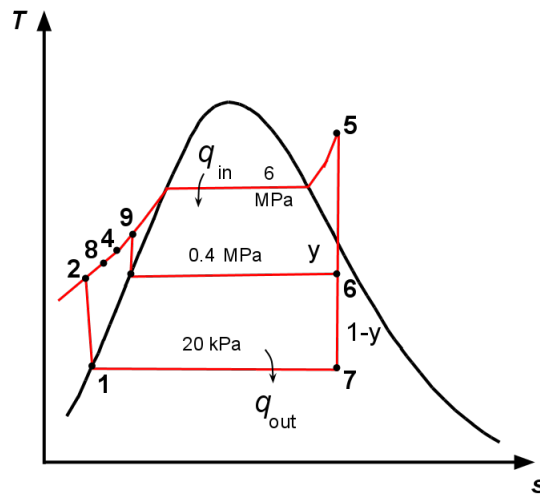
$$v_1 = v_{f@20kPa} = 0,001017 m^3/kg$$

$$w_{p,in} = v_1 (P_2 - P_1)$$

$$= (0,001017 m^3/kg) (6000 - 20 kPa) \left(\frac{1 kJ}{1 kPa \cdot m^3} \right)$$

$$= 6,08 kJ/Kg$$

Figura 35: Gráfica T-s Recalentamiento [Espitia].



$$h_2 = h_1 + w_{pI,in} = 251,42 + 6,08 = 257,5 kJ/kg$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_3 = 0,4 MPa \\ \text{Líquido Saturado} \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} h_3 = h_{f@0,4 MPa} = 604,66 kJ/kg \\ v_3 = v_{f@0,4 MPa} = 0,001084 m^3/kg \end{array} \right.$$

$$w_{pII,in} = v_3 (P_9 - P_3) = (0,001084 m^3/kg) (6000 - 400 kPa) \left(\frac{1 kJ}{1 kPa \cdot m^3} \right) = 6,07 kJ/Kg$$

$$h_9 = h_3 + w_{pII,in} = 604,66 + 6,07 = 610,73 kJ/kg$$

$$h_8 = h_3 + v_3 (P_8 - P_3) = h_9 = 610,73 kJ/kg$$

también, $h_4 = h_9 = h_8 = 610,73 kJ/kg$ desde que los dos flujos se mezclan tienen la misma entalpía

$$\left\{ \begin{array}{l} P_5 = 6 MPa \\ T_5 = 450^\circ C \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} h_5 = 3302,9 kJ/kg \\ s_5 = 6,7219 kJ/kg \cdot K \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_6 = 0,4 MPa \\ s_6 = s_5 \end{array} \right\} \quad x_6 = \frac{s_6 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6,7219 - 1,7765}{5,1191} = 0,9661$$

$$h_6 = h_f + x_6 h_{fg} = 604,66 + (0,9661)(2133,4) = 2665,7 kJ/kg$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_7 = 0,4MPa \\ s_7 = s_5 \end{array} \right\} \quad x_7 = \frac{s_7 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6,7219 - 0,8320}{7,0752} = 0,8325$$

$$h_7 = h_f + x_7 h_{fg} = 251,42 + (0,8325)(2357,5) = 2214,0 kJ/kg$$

La fracción de vapor extraído se determina de la ecuación de balance de energía en estado estable aplicada a la regeneración. Señalando que $\dot{Q} \cong \dot{W} \cong \Delta ke \cong \Delta pe \cong 0$,

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \Delta \dot{E}_{sistema} \stackrel{\circ 0(\text{estado})}{=} 0$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e \rightarrow \dot{m}_2 (h_8 - h_2) = \dot{m}_6 (h_6 - h_3) \rightarrow (1 - y)h_8 - h_2 = y(h_6 - h_3)$$

donde y es la fracción de vapor extraída de la turbina ($= \dot{m}_6 / \dot{m}_5$) resolviendo para y ,

$$y = \frac{h_8 - h_2}{(h_6 - h_3) + (h_8 - h_2)} = \frac{610,73 - 257,50}{2665 - 60466 + 610,73 - 257,50} = 0,1463$$

$$q_{in} = h_5 - h_4 = 3302,9 - 610,73 = 2692,2 kJ/kg$$

entonces

$$q_{out} = (1 - y)(h_7 - h_1) = (1 - 0,1463)(2214,0 - 251,42) = 1675,4 kJ/kg$$

y

$$W_{neto} = q_{in} - q_{out} = 2692,2 - 1675,4 = 1016,8 kJ/kg$$

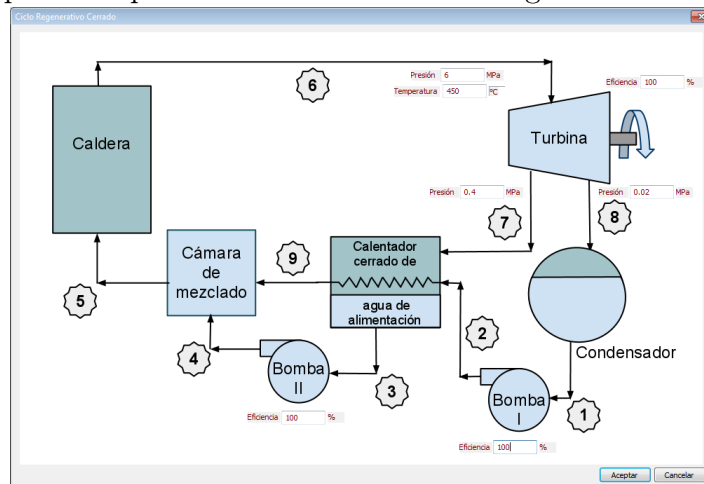
(b) La eficiencia térmica se determina de

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{1675,4 kJ/kg}{2692,2 kJ/kg} = 37,8 \%$$

- Solución del ejercicio 10-45 con el programa.

En la siguiente figura se muestra la interfaz del programa para la introducción de los datos por parte del usuario:

Figura 36: Captura de pantalla Interfaz Rankine Regenerativo Cerrado [Espitia]



Luego de introducir los datos y hacer clic en el botón “Aceptar” se debe picar en el icono de cálculo, tras lo cual el programa mostrara una pantalla con los resultados.

Figura 37: Captura de pantalla visualización de resultados [Espitia]

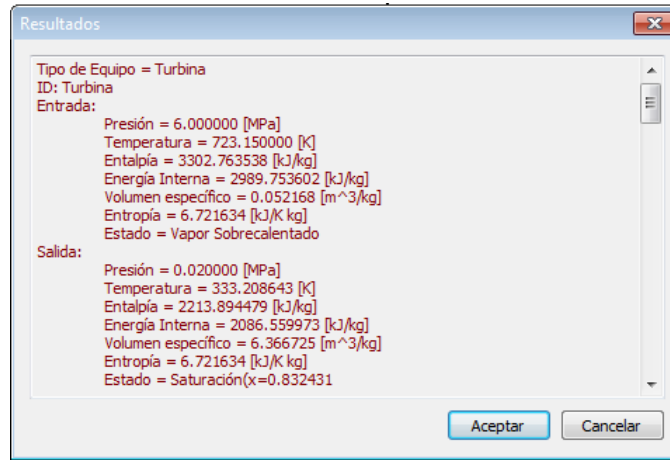


Tabla 12: Resultados Rankine Rankine Regenerativo Abierto [Espitia]

Propiedad:	Turbina:		Bomba 1:	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Presión [Mpa]	6.000000	0.020000	0.020000	6.000000
Temperatura [K]	723.150000	333.208643	333.208643	333.462151
Entalpía [kJ/kg]	3302.763538	2213.894479	251.399738	257.474644
Energía Interna [kJ/kg]	2989.753602	2086.559973	251.379396	251.387016
Volumen específico [m ³ /kg]	0.052168	6.366725	0.001017	0.001015
Entropía [kJ/kg · K]	6.721634	6.721634	0.831952	0.831952
Estado.	Vapor Sobrecalentado	Saturación (x=0.832431)	Saturación (x=0.000000)	Líquido Comprimido
Trabajo [kJ/kg]	1023.155593		-5.191195	
Calor [kJ/kg]	0.000000		0.000000	
	Bomba 2:		Condensador:	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Presión [Mpa]	0.400000	6.000000	0.020000	0.020000
Temperatura [K]	416.762533	417.341101	333.208643	333.208643
Entalpía [kJ/kg]	604.723474	610.783058	2213.894479	251.399738
Energía Interna [kJ/kg]	604.290051	604.299519	2086.559973	251.379396
Volumen específico [m ³ /kg]	0.001084	0.001081	6.366725	0.001017
Entropía [kJ/kg · K]	1.776598	1.776598	6.721634	0.831952
Estado.	Saturación (x=0.000000)	Líquido Comprimido	Saturación (x=0.832431)	Saturación (x=0.000000)
Trabajo [kJ/kg]	-0.881481		0.000000	
Calor [kJ/kg]	0.000000		-1677.012779	
	Caldera.			
	Entrada	Salida		
Presión [Mpa]	6.000000	6.000000		
Temperatura [K]	416.846708	723.150000		
Entalpía [kJ/kg]	608.667843	3302.763538		
Energía Interna [kJ/kg]	602.187420	2989.753602		
Volumen específico [m ³ /kg]	0.001080	0.052168		
Entropía [kJ/kg · K]	1.771527	6.721634		
Estado.	Líquido Comprimido	Vapor Sobrecalentado		
Trabajo [kJ/kg]	0.000000			
Calor [kJ/kg]	2694.095695			
Fracción y			0.145469	
EFICIENCIA [%]:			37.7577	

5.5. Código Fuente del programa.

El desarrollo de este proyecto está basado en la Programación Orientada a Objetos, usando como lenguaje de programación C++, y como paquete de desarrollo Visual Studio 2010. Información detallada de las clases programadas puede observarse en los anexos.

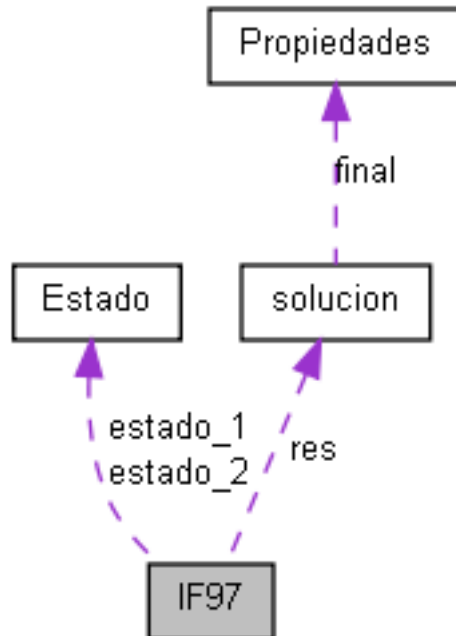
El desarrollo de las clases diseñadas, pueden dividirse en los siguientes módulos:

5.5.1. Módulo para el cálculo de propiedades del agua.

En la figura 38 se observa el uso de la clase IF97, la cuál está diseñada para calcular las propiedades del vapor de agua, según la formulación internacional IF97.

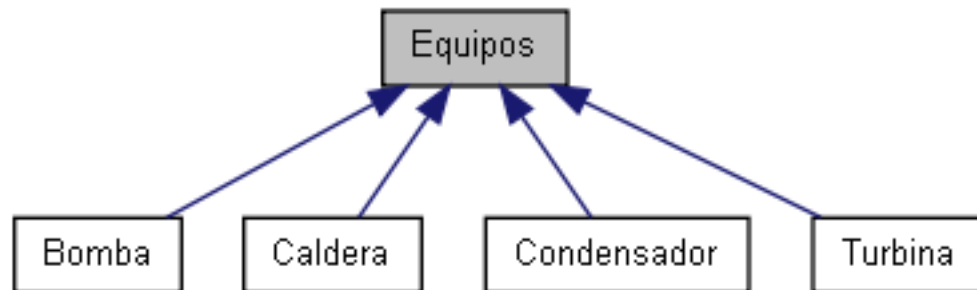
La clase IF97 para el cálculo de propiedades depende de dos propiedades termodinámicas independientes. Para el cálculo de propiedades, se usa métodos numéricos para el calculo de propiedades en algunos casos, es por esto que se calcula una solución intermedia y posteriormente el resultado es entregado como una estructura definida Propiedades.

Figura 38: Diagrama de relación de la clase IF97 [Espitia].



5.5.2. Módulo para el cálculo termodinámico de los equipos.

Figura 39: Diagrama de relación de la clase Equipos [Espitia].



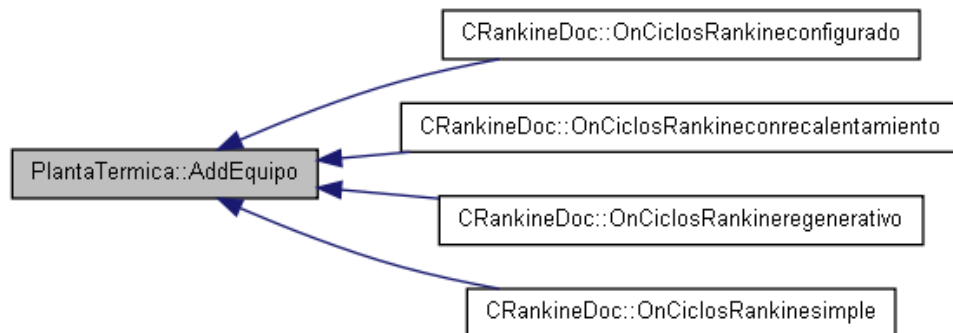
Para esto se desarrolló una clase base llamada *Equipos* y las clases derivadas *Bomba*, *Caldera*, *Condensador* y *Turbina*, tal como se muestra en la figura 39

5.5.3. Módulo para el cálculo de la planta termodinámica.

El manejo de la Planta se realiza mediante la clase llamada *PlantaTermica*, la cual contiene como miembro una lista de objetos *Equipos*, en donde se archivarán los equipos propios de la planta.

5.5.4. Módulo para la interfaz gráfica.

Figura 40: Diagrama de relación de la clase Equipos [Espitia].



En la parte gráfica del programa, se hizo uso de la biblioteca MFC (Microsoft Foundation Class) y un ejemplo de relación de estas clases con la clase de Planta Térmica es mostrada en la Figura 40.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Se obtuvo los resultados propuestos en los objetivos: El programa Rankine posee el módulo para el cálculo de las propiedades del agua según la IF97 y soluciona los ciclos de plantas térmicas; con el manual el usuario cuenta con una herramienta de guía para el uso del software; además se documentó el desarrollo del programa en donde se incluyen los diagramas de flujo. De manera que se cuenta con un paquete para la simulación de plantas térmicas.
- Tras las pruebas de funcionamiento y depuración del software se contrastaron los resultados obtenidos con datos conocidos veraces que validaron la autenticidad y confiabilidad del programa.
- El programa facilita el cálculo de propiedades y lo relacionado con el ciclo Rankine, para que luego del aprendizaje de la manera y métodos de solución de estos, se pueda enfocar el estudio y análisis hacia la toma de decisiones con criterios de ingeniería a partir de información de la que ya se dispone.
- El programa ofrece la posibilidad de variar las condiciones de operación de una planta según la configuración deseada, para observar y analizar los efectos que estos cambios producen, como la influencia sobre la eficiencia.
- El desarrollo de este proyecto demuestra cómo pueden evolucionar los modelos y métodos de aprendizaje; cómo pueden ser aprovechadas las tecnologías de la información que se traducen en ventajas y sirven para evitar tareas repetitivas; y cómo obtener resultados de forma más rápida y con capacidad de ajuste a los parámetros.
- La importancia de este trabajo se centra en la aplicabilidad que tiene el software a nivel académico y práctico, ya que en los cursos de ingeniería mecánica el ciclo Rankine es un tema de amplio estudio. El proyecto constituye una nueva herramienta que permite ayudar a la asimilación de ideas y conocimientos mediante nuevos métodos de estudio, en un ambiente intermedio entre las clases teóricas y las experiencias en laboratorios.
- Se recomienda la implementación del software como complemento en asignaturas donde se encuentre conveniente su uso o en prácticas de laboratorio, puesto que

servirá de apoyo adicional o de tema central de estudio. Así esta herramienta se aprovechará y se probará en ambiente académico.

- Todo software permanece dinámico en cuanto a su desarrollo. Aun cuando se logra el alcance planteado para el proyecto de grado, se puede continuar mejorando; como agregar nuevas funciones, actualizaciones que surjan para el código o para la presentación y para la interfaz gráfica; en pro de mantener la herramienta vigente y moderna.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] R Beltrán. Desarrollo de un paquete computacional para la simulación de plantas térmicas. *ISSN: 0121-4993*, 1(1):9–19, 1992.
- [2] M. C Juárez Castelló and M. M Ruiz de Adana Santiago. Programa didáctico sobre el ciclo de rankine sencillo RANKINE v1. 0. *Informativa Educativa Comunicaciones*, 1(1-10), 1998.
- [3] Yunus Cengel. *Termodinámica*. McGraw-Hill Interamericana, February 2007.
- [4] ©2010 Microsoft Corporation. Microsoft visual studio 2010 - el sitio oficial de visual studio 2010. <http://www.microsoft.com/spain/visualstudio>.
- [5] The International Association for the Properties of Water and Steam. Revised release on the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam (The revision only relates to the extension of region 5 to 50 MPa). <http://www.iapws.org/>, August 2007.
- [6] F. HERRERO, C. GONZÁLEZ, R. NIETO, and J. M.L.Y.J.L RAPÚN. SISTEMA DE AUTOAPRENDIZAJE DE CICLOS TERMODINÁMICOS EN INGENIERÍA: CICLOWIN.
- [7] John R. Howell and Richard O. Buckius. *Principios de termodinámica para ingenieros*. McGrawHill, 1 edition, 1990.
- [8] EDWING JIMENEZ and LUIS MORENO. *Simulador de una planta térmica con ciclo de vapor convencional*. PhD thesis, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2000.
- [9] C. Mogollón, J. Ruiz, M. Bracho, and C. G.V Linares. Programa de simulación de ciclos termodinámicos de plantas de vapor. *Ciencia e Ingeniería*, 28(3):175–182, 2010.
- [10] Qualitative Reasoning Group Northwestern University. CyclePad. <http://www.qrg.northwestern.edu/projects/NSF/cyclepad/cyclepad.htm>.