



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA CENTRALES TÉRMICAS DE CICLO RANKINE CON PRECALENTADORES ABIERTOS, CERRADOS Y RECALENTAMIENTO

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGISTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA

GUILLERMO DIEGO MENDEZ CABELL
guillermo.mendezm@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. MIGUEL DARÍO ORTEGA LÓPEZ, M.Sc.
miguel.lopez@epn.edu.ec

Quito, agosto, 2017

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor **Guillermo Diego Méndez Cambell**, bajo mi supervisión.

Ing. Miguel Ortega, M. Sc

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Guillermo Diego Méndez Cambell**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Guillermo D. Méndez C.

ÍNDICE

Certificación	i
Declaración.....	ii
Resumen	vii
Abstract.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	1
Objetivos específicos.....	2
Alcance	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Propiedades termodinámicas del agua	3
1.1.1. Propiedades termodinámicas en la región de Saturación	5
1.1.2. Propiedades termodinámicas en región vapor sobrecalentado y subenfriada.....	7
1.2. Elementos constitutivos del ciclo de vapor Rankine.....	8
1.2.1. Balance de energía y masa.....	14
1.2.2. Caldera	15
1.2.3. Turbina	16
1.2.4. Condensador.....	17
1.2.5. Bomba	18
1.2.6. Precalentador agua de alimentación cerrado.....	18
1.2.7. Precalentador agua de alimentación abierto	19
1.2.8. Trampa de vapor	19
1.2.9. Rendimiento térmico	20
2. SINTESIS DE SOLUCION GENERALIZADA.....	20
2.1. Determinación de las ecuaciones de los elementos constitutivos del ciclo de vapor Rankine.....	21
2.2. Síntesis de solución de las ecuaciones de gobierno.....	23
2.3. Desarrollo del software.....	27
2.4. Obtención de las propiedades termodinámicas del agua según la formulación IAPWS-f97	28
2.5. Implementación de algoritmo y estructuración.....	29
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
3.1. Validación de resultados de las propiedades termodinámicas del agua mediante la formulación IAPWS.....	32
3.2. Simulación y validación del circuito termodinámico ideal Rankine.....	33
3.2.1. Ejemplo 01: Ciclo Rankine ideal simple	33

3.2.2. Ejemplo 02: Ciclo Rankine ideal con recalentamiento	37
3.2.3. Ejemplo 03: Ciclo Rankine Ideal con regeneración usando dos precalentadores abiertos	39
3.2.4. Ejemplo 04: Ciclo Rankine ideal con recalentamiento y recalentador cerrado.	42
3.2.5. Ejemplo 05: ciclo Rankine ideal con regeneración usando un precalentador cerrado y uno abierto.	44
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
4.1. Conclusiones	47
4.2. Recomendaciones	48
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
ANEXOS	52
Anexo 1: Guía general del uso del software	52
Anexo 2: Valores numéricos para los parámetros adimensionales de la energía libre de Helmholtz	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Regiones y funciones IAPWS-f97	3
Figura 1. 2. Cuadrado de Borh-Koening	4
Figura 1. 3. Ciclo Rankine ideal.....	10
Figura 1. 4. a) Desviación ciclo real respecto ciclo Rankine ideal. b) Efecto de irreversibilidades de la bomba y la turbina de vapor en el ciclo Rankine ideal.....	11
Figura 1. 5. a) Efecto sobrecalentar vapor b) Efecto de vacío en el condensador c) Efecto incremento de la presión de la caldera en ciclo Rankine ideal.....	12
Figura 1. 6. Diagrama T-s, con recalentamiento	13
Figura 1. 7. Esquema Caldero con doble etapas de recalentamiento.....	15
Figura 1. 8. Esquema Turbina de vapor de tres etapas.	16
Figura 1. 9. Esquema Condensador.....	17
Figura 1. 10. Esquema bomba.	18
Figura 1. 11. Esquema precalentador agua de alimentación cerrado.	18
Figura 1. 12. Esquema precalentador agua de alimentación abierto.	19
Figura 1. 13. Esquema trampa de vapor.	20
Figura 2. 1. Diagrama de flujo del ciclo Rankine para diversas configuraciones.	21
Figura 2. 2. Algoritmo para el cálculo de propiedades termodinámicas en cada nodo.	24
Figura 2. 3. Esquemático de nodos de extracción de la turbina.....	25
Figura 2. 4. Esquemático de nodos en el precalentador.	26
Figura 2. 5. Arreglo en cascada de dos precalentadores cerrados y dos abiertos.....	27
Figura 2. 6. Regiones de interés del diagrama P-T del agua según IAPWS-f97.....	29
Figura 2. 7. Diagrama de flujo del ciclo Rankine en estado estacionario con regeneración y recalentamiento.	30
Figura 2. 8. Interface del esquemático de circuitos termodinámicos en ciclo Rankine.....	31
Figura 2. 9. Ventana de dialogo para la turbina de vapor.....	31
Figura 3. 1. Esquema del circuito termodinámico del ejemplo 01.	34
Figura 3. 2. Diagrama T-s con expansión isentrópica del ejemplo 01.....	34
Figura 3. 3. Diagrama T-s con expansión real del ejemplo 01.	36
Figura 3. 4. Esquema del circuito termodinámico del ejemplo 02.	37
Figura 3. 5. Diagrama T-s del ejemplo 02.	38
Figura 3. 6. Esquema del circuito termodinámico del ejemplo 02.	40
Figura 3. 7. Diagrama T-s del ejemplo 03.	40
Figura 3. 8. Esquema del circuito termodinámico del ejemplo 04.	42
Figura 3. 9. Diagrama T-s del ejemplo 04.	43
Figura 3. 10. Esquema del circuito termodinámico del ejemplo 05.	45
Figura 3. 11. Diagrama T-s del ejemplo 05.	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1. Coeficientes adimensionales para la región de saturación.	5
Tabla 1. 2. Relaciones adimensionales de la energía libre de Gibbs.	7
Tabla 1. 3. Parámetros adimensionales y sus derivadas.	7
Tabla 1. 4. Relaciones adimensionales de la energía libre de Helmholtz.	8
Tabla 1. 5. Parámetros adimensionales y sus derivadas.	8
Tabla 2. 1. Relaciones de potencia y energía en diferentes dominios.	22
Tabla 3. 1. Error de redondeo en la determinación de las propiedades termodinámicas para valores puntuales usando IAPWS-f97.	32
Tabla 3. 2. Resultado de propiedades termodinámicas en circuito del ejemplo 01.	35
Tabla 3. 3. Resultado de propiedades termodinámicas del circuito considerando turbina real en el ejemplo 01.	36
Tabla 3. 4. Resultado de propiedades termodinámicas del circuito en el ejemplo 02.	38
Tabla 3. 5. Resultado de propiedades termodinámicas del circuito en el ejemplo 03.	40
Tabla 3.6. Resultado de propiedades termodinámicas del circuito en el ejemplo 04.	43
Tabla 3.7. Resultado de propiedades termodinámicas del circuito en el ejemplo 05.	46

RESUMEN

El presente estudio expone el desarrollo e implementación de una aplicación informática para la simulación de circuitos termodinámicos de ciclo Rankine en diferentes configuraciones. Las líneas de programación fueron desarrolladas en Visual Studio. Se inicia con un estudio bibliográfico relacionado con los ciclos termodinámicos de vapor en diferentes configuraciones y de las propiedades termodinámicas del agua usando la formulación recomendada por la Asociación Internacional IAPWS (The International Association for the Properties of Water and Steam). Se identifican las ecuaciones de gobierno, las variables y los parámetros de funcionamiento en una determinada configuración del circuito termodinámico; esto permite de modo particular la obtención de arreglos matemáticos de los parámetros que participan y de los requerimientos de información para resolver dicho arreglo. Adicionalmente se obtiene un reporte con los valores de las propiedades termodinámicas de estado y la eficiencia térmica del ciclo. Esta aplicación desarrollada se puede utilizar como una herramienta versátil y muy útil para la resolución de problemas de ciclos de potencia Rankine. En la simulación de circuitos termodinámicos y comparando los resultados obtenidos guardan concordancia con sus similares desde otra metodología, lo que demuestra la versatilidad de la aplicación desarrollada.

Palabras clave: Ciclo Rankine ideal, diagrama T-s, IAPWS, Recalentamiento, Regeneración.

ABSTRACT

In this master thesis, it is exposed the development and implementation of a software application for simulation of different Rankine cycle configurations. The source code was developed in Visual Studio. It starts with a bibliographic study related to steam thermodynamic cycles in different configurations and the thermodynamic properties of water using the formulations recommended by The International Association for the Properties of Water and Steam IAPWS. The governing equations, the variables and operation parameters in a certain configuration of the thermodynamic circuits are identified. This particularly allows the development of both, the mathematical arrangements with parameters that participate, and also, the information requirements to solve those arrangements. Additionally, a report is obtained with the property values of the thermodynamic states and the system thermal efficiency. The developed application can be used as a versatile and useful tool for the resolution of Rankine Cycle problems. The results obtained by using the developed thermodynamic circuit simulator are compared with their counterparts from other methodologies showing consistency. These all demonstrate the application versatility.

Keywords: Rankine cycle, Regeneration, Reheat, IAPWS, T-s chart

DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA CENTRALES TÉRMICAS DE CICLO RANKINE CON PRECALENTADORES ABIERTOS, CERRADOS Y RECALENTAMIENTO

INTRODUCCIÓN

Los ciclos termodinámicos es la base de la utilización de la energía para la obtención de trabajo útil, al interactuar entre dos focos energéticos que están a diferente temperatura. Dentro de los ciclos de potencia, es de interés los ciclos básicos de vapor, se realiza un análisis de los ciclos de potencia de vapor ideales tanto simples, con recalentamiento y regenerativos, análisis energético basado en los principios de conservación de la masa y de la energía en los elementos constitutivos de un circuito termodinámico ideal Rankine.

Se realiza un estudio de las propiedades termodinámicas del agua como fluido de trabajo y su cambio de estados en cada proceso hasta completar el ciclo, para ello se utiliza la formulación recomendada por la Asociación Internacional IPAWS (The International Associations for the Properties of Water and Steam), que proporciona formulaciones de propiedades en una gama amplia de estados basada en parámetros adimensionales que dependen de la región en la que se halle agua.

Se hace una síntesis generalizada de las configuraciones posibles que se pueden armar en un circuito Rankine con los elementos de caldera, recalentador, turbina de vapor, condensador, precalentadores cerrados y abiertos, bombas, trampas de vapor, algunos de ellos participan más de uno, esto permite validar las conexiones correctas entre elementos y con ello elaborar el algoritmo lógico para la esquematización del circuito, también la elaboración del algoritmo para la determinación de las propiedades termodinámicas según su estado termodinámico, finalmente la elaboración del algoritmo para la determinación de los parámetros generales del circuito. La validación de los resultados obtenidos para determinación de las propiedades termodinámicas del agua en sus diferentes estados, así como también de los resultados generados por el simulador se hace tomando como línea base otra metodología para resolver el problema. Esto permite valorar la desviación relativa de los resultados otorgados por el simulador con respecto a la línea base.

Objetivo general

Desarrollar un software para centrales térmicas de ciclo Rankine con precalentadores abiertos, cerrados y recalentamiento.

Objetivos específicos

- Desarrollar las funciones requeridas e implementarlas en el software de tal manera que permita resolver problemas de un ciclo de vapor con un máximo de dos extracciones y cuatro precalentadores (dos precalentadores abiertos y dos precalentadores cerrados).
- Validar el software desarrollado con varios problemas tipos en diferentes configuraciones resueltos manualmente, es decir utilizando una metodología distinta a la metodología generalizada propuesta para el software.
- Determinar los procedimientos requeridos para el uso adecuado del software e incluir esta información en el manual de usuario correspondiente, el cual deberá incluir una guía con ejemplos resueltos.

Alcance

El desarrollo de la aplicación informática para la simulación de centrales térmicas con regeneración y recalentamiento en diferentes configuraciones, se basará en el análisis de los ciclos de potencia de valor, una lógica de conexión y métodos de solución adecuados, que resuelvan las entalpías, flujos másicos, rendimiento térmico y la presentación de pantallas de interfaces gráficas adecuadas para la presentación de datos y resultados. Será en si un software de gran utilidad para docentes y estudiantes de termodinámica.

El desarrollo, implementación y programación de los algoritmos con las configuraciones posibles que se pueden armar en un circuito termodinámico Rankine se hace en base a la lógica de conexión entre elementos, considerando que entre ellos se deben mantener la misma presión, permitiendo esquematizar en una interfaz gráfica el circuito termodinámico dado y la posterior representación de las propiedades termodinámicas determinadas en el diagrama temperatura-entropía. La generación de módulos con los elementos constitutivos de un ciclo de vapor Rankine, facilita la interacción lógica y sistémica entre los mismos, facilitando de esta manera el balance tanto energético como másico.

Las propiedades termodinámicas serán determinadas mediante las formulaciones dadas por la IAPWS formulación f97.

Esta aplicación será capaz de solucionar problemas de un ciclo de vapor Rankine con dos precalentadores abiertos, dos precalentadores cerrados, dos recalentadores, generando más de un centenar de formas de combinarlas

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Propiedades termodinámicas del agua

EL fluido de trabajo es el agua en la que alternadamente es convertida de líquido a vapor, el agua es considerada como sustancia pura, sustancia que tiene propiedades termodinámicas uniformes e invariable composición química y puede existir en más de una fase.

La formulación IAPWS-f97, permite determinar las propiedades termodinámicas del agua en diversas regiones y usando la expansión de las series de Taylor(TTSE) tomando la entalpia y la presión como variables independientes y está basada en las funciones de Gibbs cuyas variables independientes son la temperatura y la presión.

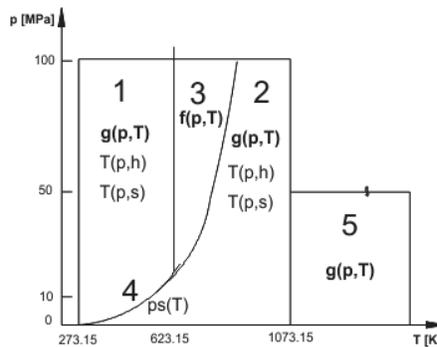


Figura 1.1. Regiones y funciones IAPWS-f97
(Fuente: Méndez,2017)

Región 1: Describe las propiedades del agua comprimida, e incluye las propiedades de la fase del líquido saturado en el límite con la línea de saturación (región 4). No cubre las propiedades del agua comprimida a temperaturas cercanas a la temperatura crítica. El margen de temperaturas y presiones es el siguiente:

$$273.15K \leq T \leq 623.15K \quad (1.1)$$

$$p_s(T) \leq p \leq 100.00[MPa]$$

Región 2: Describe las propiedades del vapor sobrecalentado, incluye las propiedades de la fase del vapor saturado en el límite con la línea de saturación. No cubre las propiedades del vapor sobrecalentado a temperaturas próximas a la temperatura crítica y presiones cercanas y por encima de la presión crítica. El margen de temperaturas y presiones válidas para la región 2 se expone en la ecuación 1.2.

$$\begin{aligned}
273.15\text{K} \leq T \leq 623.15\text{K}, & \quad 0 \leq p \leq p_s(T) \\
623.15\text{K} \leq T \leq 863.15\text{K}, & \quad 0 \leq p \leq p(T) \\
863.15\text{K} \leq T \leq 1073.15\text{K}, & \quad 0 \leq p \leq 100.00[\text{MPa}]
\end{aligned}
\tag{1.2}$$

Región 3: En esta región, para temperaturas cercanas a la crítica y presiones próximas y por encima de la presión crítica, cubre parte del agua sub enfriada, del vapor sobrecalentado y de la región de saturación. El intervalo de validez es:

$$623.15\text{K} \leq T \leq T(p), \quad p(T) \leq p \leq 100.00[\text{MPa}] \tag{1.3}$$

Región 4: Representa la línea de saturación, donde fase líquido y vapor, pueden coexistir, siendo codependientes la presión y la temperatura. Su rango de definición es:

$$273.15\text{K} \leq T \leq 647.09\text{K}, \quad 611.21[\text{Pa}] \leq p \leq 22.06[\text{MPa}] \tag{1.4}$$

Región 5: Representa las propiedades del vapor sobrecalentado a muy altas temperaturas. Su margen de validez es:

$$1073.15\text{K} \leq T \leq 2273.15\text{K}, \quad 0.00[\text{Pa}] \leq p \leq 10.00[\text{MPa}] \tag{1.5}$$

Es objeto de interés en el presente proyecto únicamente chequear las regiones dos y cuatro mayormente y en menor grado la región uno.

La parte termodinámica se basa fundamentalmente en el estudio de las propiedades intensivas que se asocian al fluido de trabajo considerado como sustancia pura. De las propiedades termodinámicas mensurables: $p[M \cdot L \cdot T^{-2}]$, $T[\theta]$, $v[L^3/M] = 1/\rho$, $c_p[L^2 \cdot T^{-2} \cdot \theta^{-1}]$, $c_v[L^2 \cdot T^{-2} \cdot \theta^{-1}]$, de las propiedades termodinámicas conceptuales: $u[M \cdot L^2 \cdot T^{-2}/M]$ y $s[M \cdot L^2 \cdot T^{-2}/M \cdot \theta]$ y de las propiedades termodinámicas derivadas: $h[M \cdot L^2 \cdot T^{-2}/M]$, $g[M \cdot L^2 \cdot T^{-2}]$ y $f[M \cdot L^2 \cdot T^{-2}]$

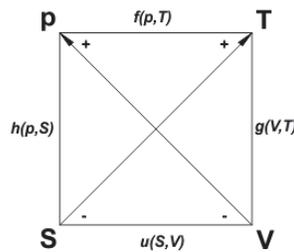


Figura 1.2. Cuadrado de Borh-Koenig
(Fuente: Méndez,2017)

De la figura 1.2, se desprende que los potenciales termodinámicos en función de variables naturales del potencial a saber: $u = u(s, v)$; $h = h(p, s)$; $f = f(v, T)$ y $g = g(p, T)$.

Representan arreglos fundamentales de las mismas, se requiere hacer transformaciones para cambiar de plano.

1.1.1. Propiedades termodinámicas en la región de Saturación

La región de saturación tomando como referencia la formulación IAPWS-f97, es la región cuatro, entonces los modelos matemáticos para la presión (p_{sat}), la temperatura (T_{sat}), volumen específico (v' , v'')¹, energía interna específico (u' , u''), entalpía específica (h' , h''), entropía específica (s' , s'')

Para la determinación de la presión de saturación, y las densidades específicas en la zona de saturación, la formulación matemática para valores de temperatura desde $Tt = 273.15[K]$ hasta $Tc = 647.096[K]$ es:

$$\ln\left(\frac{p_{sat}}{p_c}\right) = \frac{T_c}{T} (a_1\vartheta + a_2\vartheta^{1.5} + a_3\vartheta^{3.0} + a_4\vartheta^{3.5} + a_5\vartheta^{4.0} + a_6\vartheta^{7.5}) \quad (1.6)$$

$$\frac{\rho'}{\rho_c} = 1 + b_1\vartheta^{1/3} + b_2\vartheta^{2/3} + b_3\vartheta^{5/3} + b_4\vartheta^{16/3} + b_5\vartheta^{43/3} + b_6\vartheta^{110/3} \quad (1.7)$$

$$\ln\left(\frac{\rho''}{\rho_c}\right) = c_1\vartheta^{2/6} + c_2\vartheta^{4/6} + c_3\vartheta^{8/6} + c_4\vartheta^{18/6} + c_5\vartheta^{37/6} + c_6\vartheta^{71/6} \quad (1.8)$$

Donde $p_c = 22.064[MPa]$, $T_c = 647.096[K]$ y $\vartheta = \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)$ y los valores de los coeficientes se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Coeficientes adimensionales para la región de saturación.

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
1	-7.85951783	1.99274064	-2.03150240	-5.6513499E - 8
2	1.84418259	1.09965342	-2.68302940	2690.666
3	-11.7866497	-0.510839303	-5.38626492	127.2873
4	22.6807411	-1.75493479	-17.291605	-135.003439
5	-15.9618719	-45.5170352	-44.7586581	0.981825814
6	1.80122502	-6.7469445E - 5	-63.9201063	-
ψ	-	-	-	2319.524
α	-	-	-	-1135.90562772

(Fuente: <http://www.iapws.org/relguide/Supp-PHS12-2014.pdf>)

Los valores de entalpía específica y la energía interna en la región de dos fases no son mensurables en forma directa, tanto que de datos experimentales realizados por Wagner

¹ Superíndice “'” denota fase líquida y superíndice “''” denota fase gaseosa

& Pruss, (1993) y Wagner & Saul (1987), determinaron expresiones matemáticas para la determinación de las energías internas, entalpías y entropías en la región bifásica, siendo éstas:

$$\frac{dP_{sat}}{dT} = -\frac{P_{sat}}{T} \left[\ln\left(\frac{P_{sat}}{P_c}\right) + a_1 + 1.5a_2\vartheta^{0.5} + 3a_3\vartheta^2 + 3.5a_4\vartheta^{2.5} + 4a_5\vartheta^3 + 7.5a_6\vartheta^{6.5} \right] \quad (1.9)$$

Y las ecuaciones de correlación:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = d_\alpha + d_1\theta^{-19} + d_2\theta + d_3\theta^{4.5} + d_4\theta^5 + d_5\theta^{54.5} \quad (1.10)$$

$$\frac{\psi}{\psi_0} = d_\psi + \frac{19}{20}d_1\theta^{-20} + d_2\ln(\theta) + \frac{9}{7}d_3\theta^{3.5} + \frac{5}{4}d_4\theta^4 + \frac{109}{107}d_5\theta^{53.5} \quad (1.11)$$

Donde $\alpha_0 = 1.00[kJkg^{-1}]$, $\psi_0 = \frac{\alpha_0}{T_c}$, $\theta = \frac{T}{T_c}$, teniendo finalmente las expresiones matemáticas para cada propiedad intensiva.

Para las entalpías específicas:

$$h'[kJ - kg^{-1}] = \frac{\alpha}{\alpha_0} + 1000 \frac{T[K]}{\rho'[kg - m^{-3}]} \left(\frac{dP_{sat}}{dT} [MPa - K^{-1}] \right) \quad (1.12)$$

$$h''[kJ - kg^{-1}] = \frac{\alpha}{\alpha_0} + 1000 \frac{T[K]}{\rho''[kg - m^{-3}]} \left(\frac{dP_{sat}}{dT} [MPa - K^{-1}] \right) \quad (1.13)$$

Para las energías internas específicas:

$$u'[kJ - kg^{-1}] = \frac{\alpha}{\alpha_0} + 1000 \frac{T[K] \left(\frac{dP_{sat}}{dT} [MPa - K^{-1}] \right) - P_{sat}[MPa]}{\rho'[kg - m^{-3}]} \quad (1.14)$$

$$u''[kJ - kg^{-1}] = \frac{\alpha}{\alpha_0} + 1000 \frac{T[K] \left(\frac{dP_{sat}}{dT} [MPa - K^{-1}] \right) - P_{sat}[MPa]}{\rho''[kg - m^{-3}]} \quad (1.15)$$

Para las entropías específicas:

$$s'[kJ - kg^{-1} - K^{-1}] = \psi[kJ - kg^{-1} - K^{-1}] + 1000 \frac{\left(\frac{dP_{sat}}{dT} [MPa - K^{-1}] \right)}{\rho'[kg - m^{-3}]} \quad (1.16)$$

$$s''[kJ - kg^{-1} - K^{-1}] = \psi[kJ - kg^{-1} - K^{-1}] + 1000 \frac{\left(\frac{dP_{sat}}{dT} [MPa - K^{-1}]\right)}{\rho''[kg - m^{-3}]} \quad (1.17)$$

1.1.2. Propiedades termodinámicas en región vapor sobrecalentado y subenfriado

La ecuación básica para la región 2, es la ecuación fundamental adimensional de la energía específica libre de Gibbs, expresada por:

$$\frac{g(p,T)}{RT} = \gamma\left(\pi = \frac{p}{p^*}, \tau = \frac{T^*}{T}\right) = \gamma^0(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau) \quad (1.18)$$

Para las regiones 2 se trabaja con la formulación de parámetros adimensionales de la energía libre de Gibbs se detalla en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Relaciones adimensionales de la energía libre de Gibbs.

Función termodinámica y relación con la energía libre de Gibbs $g = g(p, T)$	Estructuración IAPWS-f97
Volumen específico $v = \left(\frac{\partial g}{\partial p}\right)_T$	$v(\pi, \tau) \frac{p}{RT} = \pi(\gamma_\pi^0 + \gamma_\pi^r)$
Entropía específica $s = -\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p$	$\frac{s(\pi, \tau)}{R} = \tau(\gamma_\tau^0 + \gamma_\tau^r) - (\gamma^0 + \gamma^r)$
Energía interna específica $u = g - T\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p - p\left(\frac{\partial g}{\partial p}\right)_T$	$\frac{u(\pi, \tau)}{RT} = \tau(\gamma_\tau^0 + \gamma_\tau^r) - \pi(\gamma_\pi^0 + \gamma_\pi^r)$
Entalpia específica $h = g - T\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p$	$\frac{h(\pi, \tau)}{RT} = \tau(\gamma_\tau^0 + \gamma_\tau^r)$
Calor específico isobárico $c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$	$\frac{c_p(\pi, \tau)}{R} = -\tau^2(\gamma_{\tau\tau}^0 + \gamma_{\tau\tau}^r)$
Calor específico isocórico $c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$	$\frac{c_v(\pi, \tau)}{R} = -\tau^2(\gamma_{\tau\tau}^0 + \gamma_{\tau\tau}^r) - \frac{(1 + \pi\gamma_\delta^r - \pi\gamma_{\delta\tau}^r)^2}{1 - \pi^2\gamma_{\delta\delta}^r}$

(Fuente: <http://www.iapws.org/relguide/Supp-PHS12-2014.pdf>)

Los parámetros adimensionales de la energía libre de Gibbs con sus respectivas derivadas tanto para la parte ideal como para la parte residual se muestran en la tabla 1.3, y los valores numéricos de los coeficientes para cada uno de ellos se encuentran adjunto en el anexo B.

Tabla 1.3. Parámetros adimensionales y sus derivadas.

Parámetros adimensionales de la energía libre de Helmholtz y sus derivadas	
Parte de residual(γ^r)	$\gamma_\pi^r = \left(\frac{\partial \gamma^r}{\partial \pi}\right)_\tau$; $\phi_{\pi\pi}^r = \left(\frac{\partial^2 \gamma^r}{\partial \pi^2}\right)_\tau$; $\phi_\tau^r = \left(\frac{\partial \gamma^r}{\partial \tau}\right)_\pi$; $\phi_{\tau\tau}^r = \left(\frac{\partial^2 \gamma^r}{\partial \tau^2}\right)_\pi$; $\phi_{\pi\tau}^r = \left(\frac{\partial^2 \gamma^r}{\partial \pi \partial \tau}\right)$
Parte ideal(ϕ^0)	$\gamma_\pi^0 = \left(\frac{\partial \gamma^0}{\partial \pi}\right)_\tau$; $\gamma_{\pi\pi}^0 = \left(\frac{\partial^2 \gamma^0}{\partial \pi^2}\right)_\tau$; $\gamma_\tau^0 = \left(\frac{\partial \gamma^0}{\partial \tau}\right)_\pi$; $\gamma_{\tau\tau}^0 = \left(\frac{\partial^2 \gamma^0}{\partial \tau^2}\right)_\pi$; $\gamma_{\tau\pi}^0 = \left(\frac{\partial^2 \gamma^0}{\partial \pi \partial \tau}\right)$

(Fuente: <http://www.iapws.org/relguide/Supp-PHS12-2014.pdf>)

La ecuación básica para la región 3, es la ecuación fundamental adimensional de la energía específica libre de Helmholtz (f). Esta expresada por:

$$\frac{f(\rho, T)}{RT} = \phi \left(\delta = \frac{\rho}{\rho^*}, \tau = \frac{T^*}{T} \right) = n_1 \ln \delta + \sum_{i=2}^{40} n_i \delta^{I_i} \delta \tau^{J_i} \quad (1.19)$$

Para la región 3, usando la formulación de parámetros adimensionales de la energía libre de Helmholtz se detalla en la tabla 1.4.

Los parámetros adimensionales de la energía libre de Helmholtz con sus respectivas derivadas tanto para la parte ideal como para la parte residual se muestran en la tabla 1.5, y los valores numéricos de los coeficientes para cada uno de ellos se encuentran adjunto en el anexo B.

Tabla 1.4. Relaciones adimensionales de la energía libre de Helmholtz.

Función termodinámica y relación con la energía libre de Gibbs $f = \phi(\rho, T)$	Estructuración IAPWS-f97
Presión $p = \rho^2 \left(\frac{\partial f}{\partial \rho} \right)_T$	$\frac{p(\delta, \tau)}{\rho RT} = \delta \phi_\delta$
Entropía específica $s = - \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_\rho$	$\frac{s(\delta, \tau)}{R} = \tau \phi_\tau - \phi$
Energía interna específica $u = f - T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_\rho$	$\frac{u(\delta, \tau)}{RT} = \tau \phi_\tau$
Entalpía específica $h = f - T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_\rho + \rho \left(\frac{\partial f}{\partial \rho} \right)_T$	$\frac{h(\delta, \tau)}{RT} = \tau \phi_\tau + \delta \phi_\delta$
Calor específico isocórico $c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_\rho$	$\frac{c_v(\delta, \tau)}{R} = -\tau^2 \phi_{\tau\tau}$
Calor específico isobárico $c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$	$\frac{c_p(\delta, \tau)}{R} = -\tau^2 \phi_{\tau\tau} + \frac{(\delta \phi_\delta - \delta \tau \phi_{\delta\tau})^2}{\tau^2 \phi_{\tau\tau}}$

(Fuente: <http://www.iapws.org/relguide/Supp-PHS12-2014.pdf>)

Tabla 1.5. Parámetros adimensionales y sus derivadas.

Parámetros adimensionales de la energía libre de Helmholtz y sus derivadas**
$\phi_\delta = \left(\frac{\partial \phi}{\partial \delta} \right)_\tau$; $\phi_{\delta\delta} = \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \delta^2} \right)_\tau$; $\phi_\tau = \left(\frac{\partial \phi}{\partial \tau} \right)_\delta$; $\phi_{\tau\tau} = \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \tau^2} \right)_\delta$; $\phi_{\delta\tau} = \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \delta \partial \tau} \right)$

(Fuente: <http://www.iapws.org/relguide/Supp-PHS12-2014.pdf>)

1.2. Elementos constitutivos del ciclo de vapor Rankine

Los ciclos termodinámicos de potencia, es la base para la utilización de la energía y la obtención de trabajo útil, se aprovecha el intercambio energético entre focos energéticos que están a diferente temperatura al intercarse entre ellos una máquina térmica, cuya interacción genera trabajo útil, la relación entre la energía extraída del foco más energético

y el trabajo útil dan una ratio adimensional(eficiencia), valor que se busca que sea el mayor posible. Se cuenta con ciclos termodinámicos de potencia de vapor ciclos ideales(Carnot), y reales(Rankine), cuya diferencia radica que los ciclos reales trabajan con cambios de fase a fin de evitar problemas en la bomba al trabajar con vapor y la turbina al trabajar con vapor saturado.

Los ciclos termodinámicos de potencia son ciclos destinados a la obtención de trabajo mecánico mediante la sucesión de procesos termodinámicos completando un ciclo en la que el fluido de trabajo sufre cambios, se evapora y condensa alternadamente. El fluido de trabajo más usual es el agua, por las interesantes características que presentan, a saber: alta entalpía de vaporización, disponibilidad y bajo costo

En los ciclos ideales, se considera completamente reversible y no se considera caídas de presiones provocado por fricción, la variación de la energía mecánica de los equipos es nula, los procesos termodinámicos son adiabáticos en las etapas de expansión y compresión, no se considera pérdidas de energía con los alrededores. Lo contrario a los ciclos reales.

El ciclo Rankine ideal, no se considera irreversibilidades internas, está compuesto cuatro dispositivos de flujo estacionario: generador de vapor (caldera), un intercambiador de energía por expansión (turbina), un intercambiador de energía por compresión (bomba), un intercambiador de energía sin caídas de presión (condensador), como se muestra en la figura 04, ciclo descrito completamente con dos isobáras y dos isentrópicas. Se requiere mejorar el comportamiento de la bomba, no trabaja adecuadamente con vapor y la expansión en la turbina de vapor genera agua en fase líquida si ésta trabaja en la región de vapor saturado. Una solución a éstos inconvenientes es enfriar el agua hasta la región de líquido saturado para el caso de la bomba y recalentar el vapor saturado llevándolo a la región de sobrecalentamiento para el caso de la turbina de vapor.

En el estado termodinámico (1), el agua entra en la bomba como líquido saturado y se condensa isentrópicamente hasta la presión de operación de la caldera, aumentando ligeramente la temperatura debido a una ligera disminución del volumen específico del agua. El agua entra en la caldera como líquido comprimido en el estado (2) y sale como vapor saturado, mediante sobrecalentamiento se lleva al estado (3). El vapor sobrecalentado entra en la turbina, expandiéndose isentrópicamente, esto produce trabajo al hacer girar su eje; éste produce que la temperatura y la presión disminuyan hasta los valores en el estado (4), donde el fluido de trabajo entra al condensador, condensándose

a presión constante, saliendo del condensador como líquido saturado, y entra en la bomba completando el ciclo.

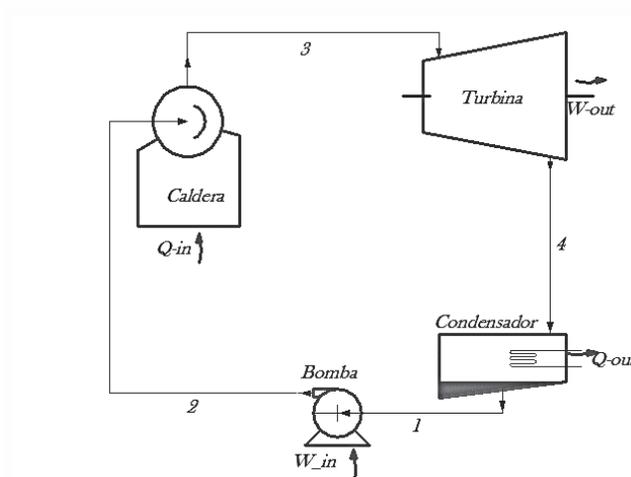


Figura 1.3. Ciclo Rankine ideal.
(Fuente: Méndez,2017)

Las componentes asociadas al ciclo Rankine, son dispositivos de flujo estacionario, por lo que sus procesos asociados a ellos son procesos de flujo estacionario. La ecuación de la energía para flujos estacionarios, trabajando por unidad de masa del vapor se reduce a:

$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = (h_{out} - h_{in}) \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (1.20)$$

Tanto la caldera como el condensador no incluyen ningún trabajo, además se supone que la bomba y la turbina son isentrópicas, entonces la relación de conservación de la energía para cada dispositivo queda expresada como:

Bomba ($q = 0$)

$$w_{bomba,in} = h_2 - h_1 = v(p_2 - p_1) \quad (1.21)$$

Caldera ($w = 0$)

$$q_{in} = h_3 - h_2 \quad (1.22)$$

Turbina de vapor ($q = 0$)

$$w_{turbina,out} = h_3 - h_4 \quad (1.23)$$

Condensador ($w = 0$)

$$q_{out} = h_4 - h_1 \quad (1.24)$$

La eficiencia térmica del ciclo Rankine se determina a partir de

$$\eta = \frac{W_{neto}}{q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}} = \frac{W_{turbina} - W_{bomba}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} \quad (1.25)$$

La representación del ciclo Rankine más usual es el plano termodinámico isentrópico (diagrama T-s), en la figura 1.4., se muestra las desviaciones que sufre el ciclo real con respecto al ideal a causa de las irreversibilidades.

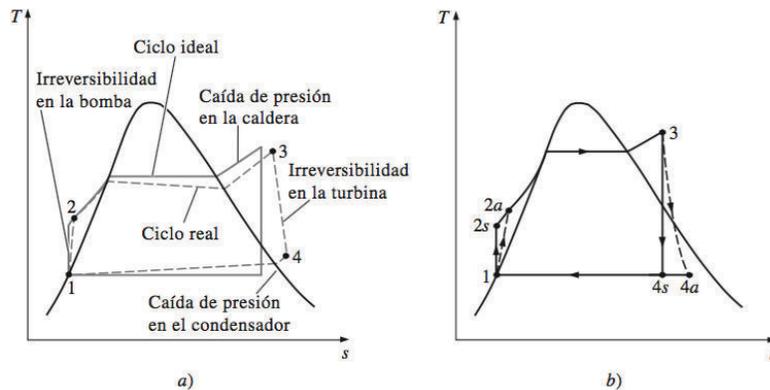


Figura 1.4. a) Desviación ciclo real respecto ciclo Rankine ideal. b) Efecto de irreversibilidades de la bomba y la turbina de vapor en el ciclo Rankine ideal
(Fuente: Cengel & Boles, 2012, pag. 566)

Las irreversibilidades que suceden dentro de la bomba y dentro de la turbina son de especial interés. “Una bomba requiere una entrada de trabajo mayor y una turbina produce una salida de trabajo más pequeña como consecuencia de las irreversibilidades. Bajo condiciones ideales, el flujo a través de estos dispositivos es isentrópico.

La desviación existente entre bombas y turbinas reales respecto de las isentrópicas puede ser tomada en cuenta utilizando eficiencias isentrópicas, definidas en la ecuación 1.26. y 1.27 respectivamente. (Cengel & Boles,2012)

$$\eta_{bomba} = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (1.26)$$

$$\eta_{turbina} = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \quad (1.27)$$

Donde los estados 2a y 4a son los estados reales de salida de la bomba y de la turbina, respectivamente, mientras que 2s y 4s son los estados correspondientes para el caso isentrópico.

Con el fin de aumentar la eficiencia del ciclo, se han hecho modificaciones, entre ellos recalentamiento y regeneración. La idea básica para realizar estas modificaciones es la de mejorar la razón entre el trabajo útil y la energía extraída del fluido de trabajo al expandirse en la turbina.

El incremento de la eficiencia térmica de un ciclo de vapor, tiene por objeto el incremento de la temperatura promedio a la que se transfiere energía térmica al fluido de trabajo en la caldera, como también la disminución de la temperatura promedio a la que se rechaza energía térmica del fluido de trabajo en el condensador.

En la etapa en la que se añade calor al fluido de trabajo, puede ser incrementada a la misma presión mediante sobrecalentamiento del fluido de trabajo, incrementando con ello el valor del trabajo neto, disminuye también la humedad a la salida de la turbina. El incremento de la temperatura se limitaría únicamente por factores metalúrgicos. En la figura 1.5, se muestra las modificaciones que mejoran la eficiencia del ciclo.

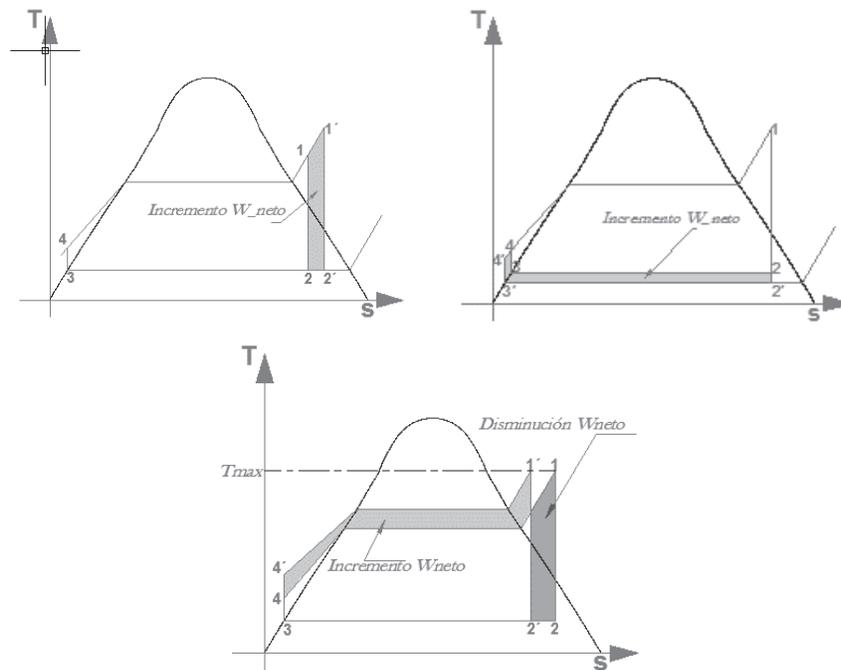


Figura 1.5. a) Efecto sobrecalentar vapor b) Efecto de vacío en el condensador c) Efecto incremento de la presión de la caldera en ciclo Rankine ideal.
(Fuente: Cengel & Boles, 2012, pag. 568)

Para el incremento de la temperatura promedio a la que se añade calor, es muy usual expandir el vapor en la turbina por etapas, recalentándolo entre ellas, mejora la eficiencia del ciclo y reduce la humedad excesiva en la turbina. A mayor número de etapas de

expansión y recalentamiento, el proceso tiende a ser isotérmico a la temperatura máxima, pero no es práctico tener más de dos etapas de expansión-recalentamiento puesto que el mejoramiento teórico de la eficiencia de la segunda etapa es casi menor a la mitad del mejoramiento teórico de una sola etapa, y una tercera etapa de expansión y recalentamiento, el mejoramiento teórico de la eficiencia es la mitad del mejoramiento teórico de la segunda, para fines prácticos no es recomendable. Esto se puede observar en la figura 1.6.

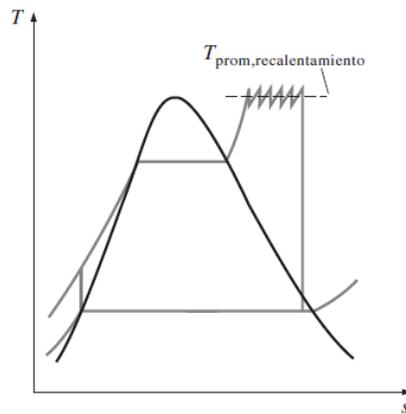


Figura 1.6. Diagrama T-s, con recalentamiento
(Fuente: Cengel & Boles, 2012, pag. 569)

Las presiones óptimas para el recalentamiento se dan a un tercio de las presiones máximas del sistema, mientras que las temperaturas de recalentamiento son muy próximas al valor de la temperatura a la entrada de la turbina. El recalentamiento cumple con su objetivo primordial de disminuir la cantidad de la humedad en la turbina de vapor.

Para el mejoramiento de la temperatura promedio a la que se añade calor al fluido de trabajo, se busca aumentar la temperatura del agua antes de la entrada a la caldera, para ello se utiliza un intercambiador de calor a contraflujo integrado a la turbina de vapor, a este proceso se lo llama regeneración. Los dispositivos usados para este propósito son regeneradores o precalentadores del agua de alimentación pueden ser cerrados (PAAC) o precalentadores del agua de alimentación abiertos (PAAA).

Los precalentadores del agua de alimentación abierto PAAA, son cámaras de mezclado en la que el vapor que se extrae de una etapa de la turbina se mezcla con el agua de alimentación que sale de la bomba, dando líquido saturado a la presión del precalentador.

El otro tipo de precalentador de agua de alimentación PAAC, en el cual el intercambio de calor entre el vapor de la línea de extracción de la turbina y el agua de alimentación sin mezclarse y a diferentes presiones. El agua de alimentación alcanza la temperatura del

vapor extraído de la turbina. Además, el vapor condensado se puede enviar a otro dispositivo que está a menor presión mediante el uso de trampa de vapor, éste permite que el líquido sea estrangulado a una menor presión atrapando el vapor.

Para el análisis teórico, se aplica las ecuaciones de conservación de la masa y la conservación de la energía en un volumen de control cerrado, definido por el calentador.

Puede existir cualquier combinación de calentadores abiertos y cerrados en una planta.

1.2.1. Balance de energía y masa

El primer paso en el análisis termodinámico del sistema, aplicando las ecuaciones de balance de energías y balance de masas por unidad de masa y en régimen estacionario a cada dispositivo del ciclo de potencia.

El balance de energía puede ser expresado como:

$$\Delta E_p + \Delta E_c + \Delta U = E_{entrada} - E_{salida} = Q - W \quad (1.28)$$

Expresado en forma diferencial y tomando en cuenta que dE , es una propiedad, mientras que δQ y δW no son propiedades:

$$dE = \delta Q - \delta W \quad (1.29)$$

Expresado en forma de flujo de energía aplicado a un volumen de control:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum \dot{m}_{in} \left(h_{in} + \frac{V_{in}^2}{2} + gz_{in} \right) \\ - \sum \dot{m}_{out} \left(h_{out} + \frac{V_{out}^2}{2} + gz_{out} \right) \end{aligned} \quad (1.30)$$

El balance de masas para un volumen de control:

$$\frac{d(m_{VC})}{dt} = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} \quad (1.31)$$

El balance de energías en el estado estable:

$$0 = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum \dot{m}_{in} \left(h_{in} + \frac{V_{in}^2}{2} + gz_{in} \right) - \sum \dot{m}_{out} \left(h_{out} + \frac{V_{out}^2}{2} + gz_{out} \right) \quad (1.32)$$

Y el balance de flujos másicos en el estado estable para un volumen de control:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1.33)$$

1.2.2. Caldera

El dispositivo utilizado en la generación de vapor, es decir la transformación del fluido de trabajo en otra fase es el caldero, mismo que consta de dos líneas para recalentamiento.

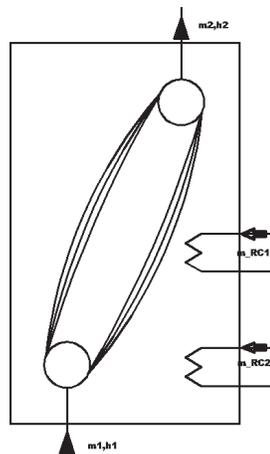


Figura 1. 7. Esquema Caldera con doble etapas de recalentamiento.
(Fuente: Méndez, 2017)

El balance de flujos másicos en el estado estable en la caldera:

$$\dot{m}_{Caldera_in} = \dot{m}_{Caldera_out} \quad (1.34)$$

En los recalentadores se tiene:

$$\dot{m}_{RC1\,in,1} = \dot{m}_{RC1\,out,1} \quad (1.35)$$

$$\dot{m}_{RC2\,in,1} = \dot{m}_{RC2\,out,1} \quad (1.36)$$

El balance de energías en el estado estable en la caldera:

$$m_{Caldera_{in_1}} * h_{Caldera_{in_1}} = m_{Caldera_{out_1}} * h_{Caldera_{out_1}} \quad (1.37)$$

1.2.3. Turbina

En dispositivo donde ocurre la transferencia de energía del fluido de trabajo para convertirlo en energía mecánica. Se considera una turbina con tres etapas.

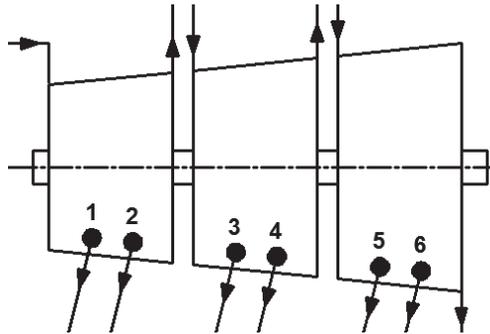


Figura 1.8. Esquema Turbina de vapor de tres etapas.
(Fuente: Méndez, 2017)

El balance de masas en la turbina, está sujeta al tipo de conexión de las extracciones con otros dispositivos a saber:

Si el circuito termodinámico tiene 1 etapa de recalentamiento, las expresiones del balance de masa son:

$$\begin{aligned} m &= m_{C_{in_1}} = m_{C_{out_2}} = m_{C_{in_3}} \\ m_{C_4} &= m - m_{C_{in_3}} \\ m_{C_5} &= m - m_{C_{in_3}} - m_{C_{in_4}} \end{aligned} \quad (1.38)$$

En cambio, si se dispone de dos etapas de recalentamiento, se tiene:

$$\begin{aligned} m &= m_{C_{in_1}} = m_{C_{out_2}} = m_{C_{in_3}} = m_{C_{in_4}} \\ m_{C_5} &= m - m_{C_{in_4}} \end{aligned} \quad (1.39)$$

Si el circuito termodinámico cuenta únicamente con precalentadores de agua de alimentación, el balance de masas quedaría de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
m &= m_{C_{in_1}} \\
m_{C_2} &= m - m_{C_1} \\
m_{C_3} &= m - m_{C_1} - m_{C_2} \\
m_{C_4} &= m - m_{C_1} - m_{C_2} - m_{C_3} \\
m_{C_5} &= m - m_{C_1} - m_{C_2} - m_{C_3} - m_{C_4}
\end{aligned}
\tag{1.40}$$

También se lo puede expresar como fracción del flujo másico de entrada,

De manera análoga para el balance de energías, para una, dos etapas de recalentamiento y precalentamiento respectivamente:

$$\begin{aligned}
m_{C_4} * h_{C_4} &= m * h - m_{C_{in_3}} * h_{C_3} \\
m_{C_5} * h_{C_5} &= m * h - m_{C_{in_4}} * h_{C_4} \\
m_{C_5} * h_{C_5} &= m * h - m_{C_1} * h_{C_1} - m_{C_2} * h_{C_2} - m_{C_3} * h_{C_3} - m_{C_4} * h_{C_4}
\end{aligned}
\tag{1.41}$$

1.2.4. Condensador

Es un intercambiador de calor, donde el fluido de trabajo cambia a fase líquido intercambiando calor con el medio externo.

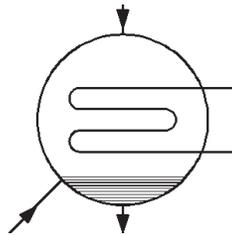


Figura 1. 9. Esquema Condensador.
(Fuente: Méndez, 2017)

El balance de masas en el estado estable en el condensador:

$$m_{C_{in_1}} + m_{C_{in_2}} = m_{C-out_3} \tag{1.42}$$

El balance de energías en el estado estable en el condensador:

$$m_{C_{in_1}} * h_{C_1} + m_{C_{in_2}} * h_{C_2} = m_{C-out_3} * h_{C_3} \tag{1.43}$$

La entalpía del fluido de trabajo que sigue la secuencia del circuito termodinámico queda de la siguiente forma:

$$h_{C_3} = \frac{m_{C_{in_1}} * h_{C_1} + m_{C_{in_2}} * h_{C_2}}{m_{C-out_3}} = \frac{m_{C_{in_1}} * h_{C_1} + m_{C_{in_2}} * h_{C_2}}{m_{C_{in_1}} + m_{C_{in_2}}} \quad (1.44)$$

1.2.5. Bomba

La bomba mecánica, es el dispositivo que permite conectar hacia una línea de un circuito termodinámico de alta presión.

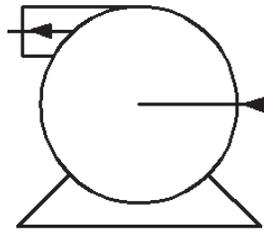


Figura 1. 10. Esquema bomba.
(Fuente: Méndez, 2017)

El balance de masas en el estado estable en el condensador:

$$m_{bomba_{in_1}} = m_{bomba-out_2} \quad (1.45)$$

El balance de energías en el estado estable en la bomba:

$$m_{bomba_{in_1}} * h_{bomba_1} = m_{bomba-out_2} * h_{bomba_2} \quad (1.46)$$

1.2.6. Precalentador agua de alimentación cerrado

El dispositivo utilizado para precalentar el agua de alimentación utilizando vapor de una extracción de la turbina, sin que ocurra mezclado de flujos.

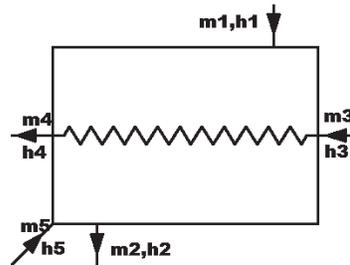


Figura 1. 11. Esquema precalentador agua de alimentación cerrado.
(Fuente: Méndez, 2017)

El precalentador de agua de alimentación cerrado, considerado como un sistema cerrado, da como balance energético y másico los siguientes arreglos. El balance de energías en el estado estable en el precalentador PAAC está dada por la ecuación 1-47.

$$m_1 * h_1 + m_3 * h_3 + m_5 * h_5 = m_4 * h_4 + m_2 * h_2 \quad (1.47)$$

El balance de masas en el precalentador de agua de alimentación cerrado en la línea de extracción de la turbina:

$$\begin{aligned} m_1 + m_5 &= m_2 \\ m_3 &= m_4 \end{aligned} \quad (1.48)$$

La conexión de la salida del vapor, es hacia algún dispositivo que lo antecede por medio de una trampa de vapor o por medio de una bomba hacia un dispositivo que le precede.

1.2.7. Precalentador agua de alimentación abierto

El dispositivo utilizado para precalentar el agua de alimentación utilizando vapor de una extracción de la turbina, en la que ocurre mezclado de flujos.

El precalentador de agua de alimentación abierto, considerado como un volumen de control, da como balance energético y másico los arreglos de las ecuaciones 1.49 y 1.50.

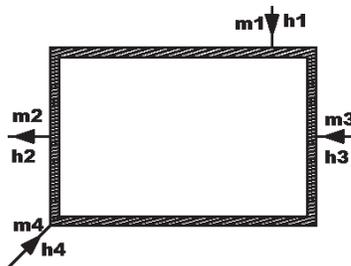


Figura 1. 12. Esquema precalentador agua de alimentación abierto.
(Fuente: Méndez, 2017)

El balance de energías en el estado estable en el precalentador PAAC:

$$m_1 * h_1 + m_3 * h_3 + m_4 * h_4 = m_2 * h_2 \quad (1.49)$$

El balance de masas en el precalentador de agua de alimentación cerrado en la línea de extracción de la turbina:

$$m_1 + m_3 + m_4 = m_2 \quad (1.50)$$

1.2.8. Trampa de vapor

El dispositivo utilizado para filtrar condensado sin dejar pasar vapor.

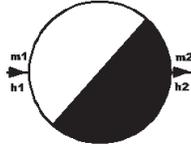


Figura 1. 13. Esquema trampa de vapor.
(Fuente: Méndez, 2017)

El balance de masas en el estado estable en la trampa de vapor:

$$m_{TV_{in,1}} = m_{TV_{out,2}} \quad (1.51)$$

El balance de energías en el estado estable en el condensador:

$$m_{TV_{in,1}} * h_{TV_{in,1}} = m_{TV_{out,1}} * h_{TV_{out,1}} \quad (1.52)$$

1.2.9. Rendimiento térmico

El rendimiento energético del ciclo ideal, está dado por la siguiente expresión

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{W_{neto}}{Q_{caldera}} = \frac{Q_{caldera} - Q_{condensador}}{Q_{caldera}} = 1 - \frac{Q_{condensador}}{Q_{caldera}} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} \\ &= 1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} = 1 - \frac{\bar{T}_{condensador}}{\bar{T}_{caldera}} \end{aligned} \quad (1.53)$$

Donde $\tan \alpha$ es la pendiente de la isóbara en el condensador (diagrama Mollier) y $\tan \beta$ es la pendiente de la isobara en la caldera, representando la temperatura promedio en la que el intercambio de energía se da de modo reversible.

De esto se puede concluir que, para aumentar el valor del rendimiento, sin hacer modificaciones al ciclo, es mediante el aumento del ángulo β : aumento de la presión en la caldera o sobrecalentando el fluido de trabajo. Otra forma es disminuyendo el ángulo α , es decir reduciendo la presión en el condensador.

2. SINTESIS DE SOLUCION GENERALIZADA

La simulación del ciclo Rankine en régimen estacionario y bajo diversas configuraciones, depende como se relaciones los elementos detallados en el apartado 1.6, a decir, de la caldera hacia la turbina de vapor, se conecta en forma directa de la primera hacia la segunda respectivamente y en forma contraria por medio de los recalentadores. La turbina se conecta en forma directa con el condensador y con los precalentadores cerrados y/o con los precalentadores abiertos.

El condensador, los precalentadores cerrados y los precalentadores abiertos se conectan básicamente por medio de bombas, cuando cada uno de ellos está a diferente presión, es decir al conectar con un dispositivo que se halla a mayor presión, es necesario uso de una bomba. Además, se puede conectar entre ellos por medio de una trampa de vapor cuando al dispositivo al que se va a conectar está a una menor presión. Esto se muestra en el diagrama de flujos adjunto.

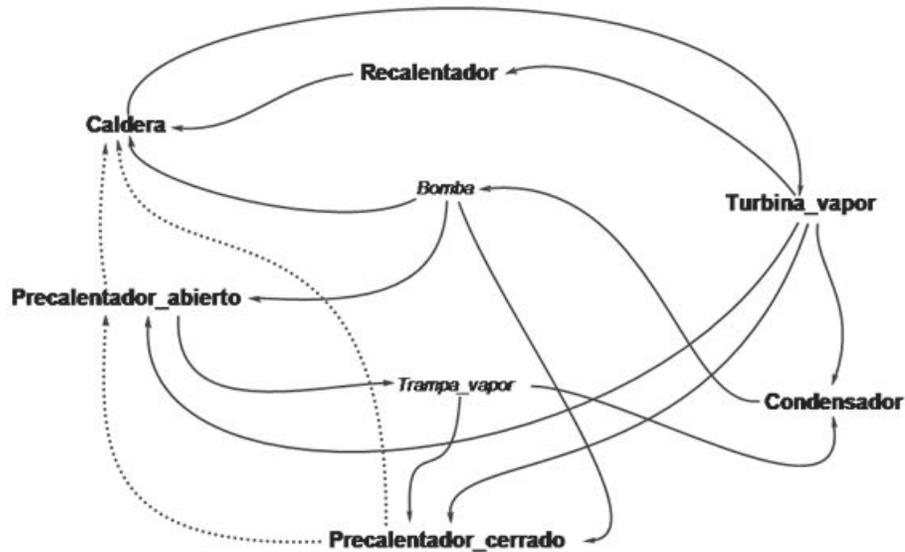


Figura 2. 1. Diagrama de flujo del ciclo Rankine para diversas configuraciones.
(Fuente: Méndez, 2017)

En la figura 2.1, se indica el diagrama de flujo con el algoritmo y las estrategias principales del programa para la simulación del ciclo Rankine ideal en estado estacionario, con recalentamiento y regenerativo. Cabe indicar que el proceso de cálculo y validación de los resultados de salida serán tanto analítico como gráfico, en particular los resultados de los estados termodinámicos del ciclo se mostrarán en el plano T-s.

2.1. Determinación de las ecuaciones de los elementos constitutivos del ciclo de vapor Rankine

La deducción e implementación del modelo matemático que rigen el comportamiento del ciclo Rankine ideal, se establecen mediante el uso de módulos con los elementos constitutivos detallados en el apartado 1.1.2.

La energía absorbida o transmitida por el fluido de trabajo, cuyo flujo dentro del circuito termodinámico se da desde un punto de mayor contenido energético hacia uno de menor

contenido de energía. En base a ello, se plantea el manejo de tres conceptos, el primero el potencial térmico, segundo el flujo de energía, y el tercero el esfuerzo

Las simulaciones de sistemas dinámicos se los pueden realizar en base a variables de potencia o en base a variables de energía. La variable de potencia en sistema termodinámico es la temperatura absoluta, y el flujo es la entropía. Un sistema termodinámico tiene elementos que generan, almacenan o disipan la energía.

Tabla 2. 1. Relaciones de potencia y energía en diferentes dominios.

Variables:	Potencia	Energía		
Dominio energético	Esfuerzo {e}	Flujo {f}	Momentum	Desplazamiento
Mecánica traslacional	F[N]	V[m/s]	p[N-s]	x [m]
Eléctrico	U[V]	I[A]	λ[V-s]	q[A-s]
Térmico	T[K]	$\dot{S}[\frac{J}{K-s}]$	--	S[J/K]

(Fuente: Mendez,2017)

El flujo de entropía y con ella la potencia térmica puede ser transmitida por tres formas diferentes, por conducción térmica en materia estanca, por convección debido al movimiento de fluidos en tuberías, y por radiación térmica.

$$\text{Potencia térmica: } \dot{Q} = T * \dot{S} \left[\frac{J}{s} \right] \xrightarrow[\text{f} = \dot{S} \left[\frac{J}{K-s} \right]]{e = T[K]}$$

La acumulación de la energía interna en sistema está dada por $\frac{dU}{dt} = T * \dot{S}$, esto significa que la acumulación de potencial térmico es igual a la razón de flujo de entropía que ocurre a la temperatura T.

El esfuerzo en un sistema térmico se lo puede poner en térmicos de presión y el flujo en términos de flujo volumétrico.



Donde SF, es un recurso flujo y C es un conector. Para la determinación de las ecuaciones del circuito termodinámico, la unión entre los diferentes elementos es considerando que tienen el mismo esfuerzo, es decir la conexión entre elementos se dan a la misma presión, mientras que el flujo será el flujo volumétrico, considerando además condiciones de isotropía, se trabaja con flujo másico.

2.2. Síntesis de solución de las ecuaciones de gobierno

Los elementos constitutivos del ciclo Rankine, para su simulación están codificados sus entradas y salidas, permitiendo con ello el armado del circuito lógico mediante un conector entre elementos. Como se mencionó anteriormente, las conexiones entre elementos se dan a la misma presión, se considera a la turbina como elemento principal del circuito donde se condiciona los valores de presión en cada una de las ramificaciones y también se considera que la eficiencia de la turbina es constante independientemente del número de extracciones. Se considera además en un circuito termodinámico dado, que la caída de presión entre elementos es despreciable, además se consideran despreciables las transferencias de calor por radiación, convección y conducción del circuito y el fluido de trabajo que sale del condensador y/o precalentadores es líquida a la presión de salida respectiva.

A partir de los funcionales adimensionales de Gibbs mostrados en el apartado 1.1.1 y 1.1.2, se determina las propiedades termodinámicas requeridas para la determinación de parámetros del sistema como también para representar en el diagrama entrópico, en la figura 2.2, se indica el algoritmo para el cálculo de las propiedades

Para la determinación de los parámetros sistémicos, sigue otro tratado. La determinación del flujo másico en cada nodo de la turbina sugiere la introducción de un parámetro adimensional beta que representa al nodo de extracción y cumple:

$$\beta_i = \begin{cases} 1, (\nexists \text{ extracción}) \\ 0 < \beta_i < 1 (\exists \text{ extracción}) \end{cases}, i = 1,2,3,4 \quad (2.1)$$

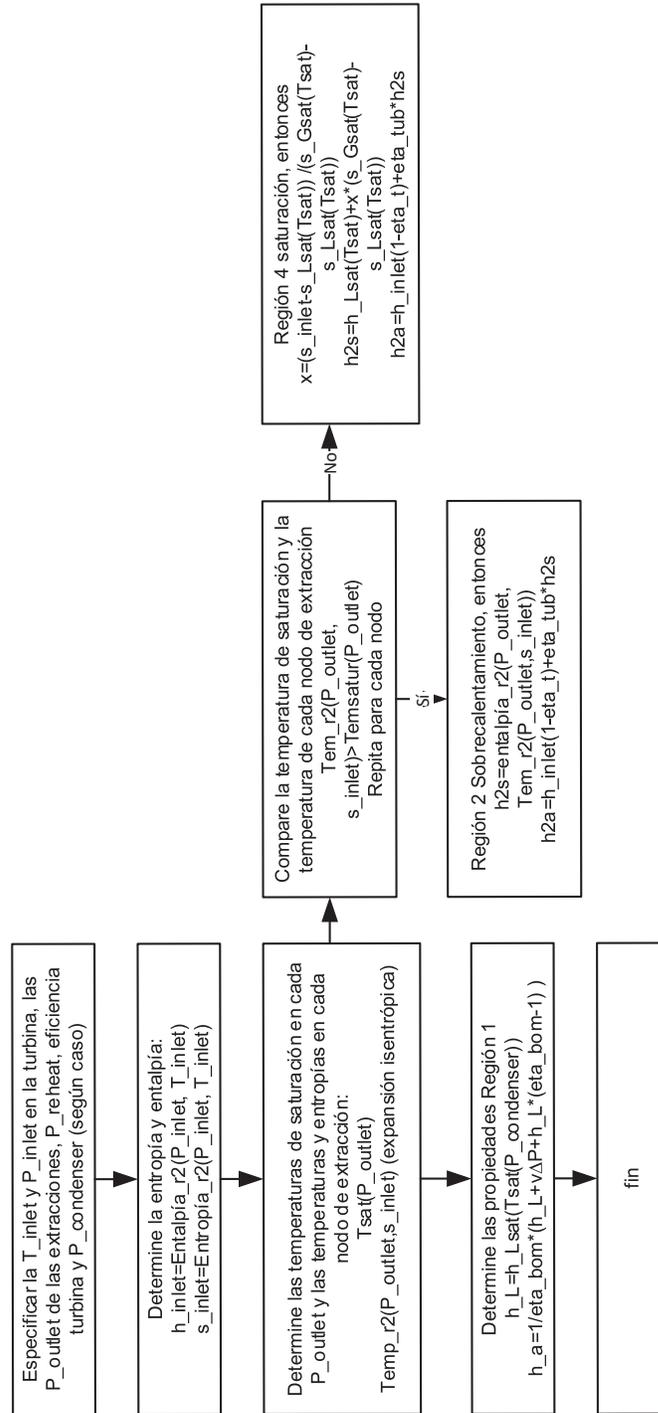


Figura 2. Algoritmo para el cálculo de propiedades termodinámicas en cada nodo.
(Fuente: Méndez, 2017)

Donde β_i , es el nodo de extracción en la turbina, cuatro posibles extracciones dependiendo de la configuración que tenga el circuito termodinámico Rankine.

El parámetro β que pertenece al nodo i , primeramente, se estima su valor que oscila entre cero y uno excluidos y mediante un balance de energías en los precalentadores se

determina su valor calculado, cuyo proceso se repite hasta que la diferencia entre el valor estimado y el valor calculado sea menor al error estipulado. Esto se puede visualizar en la figura 2.3. donde:

$$\beta_1 = \frac{1-\alpha_1}{1}; \beta_2 = \frac{1-\alpha_1-\alpha_2}{1-\alpha_1}; \beta_3 = \frac{1-\alpha_1-\alpha_2-\alpha_3}{1-\alpha_1-\alpha_2}; \beta_4 = \frac{1-\alpha_1-\alpha_2-\alpha_3-\alpha_4}{1-\alpha_1-\alpha_2-\alpha_3} \quad (2.2)$$

La esquematización de los nodos en la turbina se muestra en la figura 2.3.

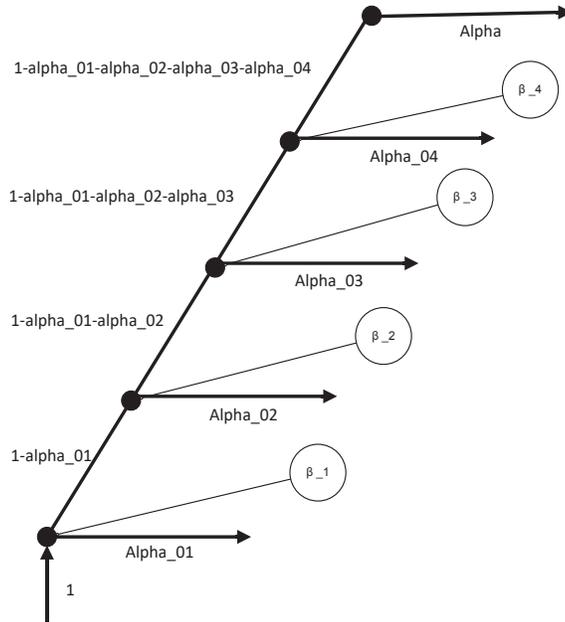


Figura 2. 3. Esquematizado de nodos de extracción de la turbina.
(Fuente: Méndez, 2017)

Expresando en función de las fracciones másicas de vapor extraído en cada una de las extracciones intermedias y la que va directa al condensador, queda expresada en la notación mostrada en la ecuación 2.3.

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= (1 - \beta_1); \\ \alpha_2 &= (1 - \beta_2)\beta_1; \\ \alpha_3 &= (1 - \beta_3)\beta_1\beta_2; \\ \alpha_4 &= (1 - \beta_4)\beta_1\beta_2\beta_3; \\ \alpha &= \beta_1\beta_2\beta_3\beta_4 \end{aligned} \quad (2.3)$$

A partir del condensador, el arreglo de los precalentadores combinados en abiertos o cerrados es en cascada, donde de modo particular el precalentador cerrado cuya línea de vapor extraído de la turbina se lo puede conectar al condensador u otro precalentador

mediante el uso de una trampa de vapor o una bomba, ello depende de la configuración deseada. Un esquema nodal del precalentador se muestra en la figura 2.4.

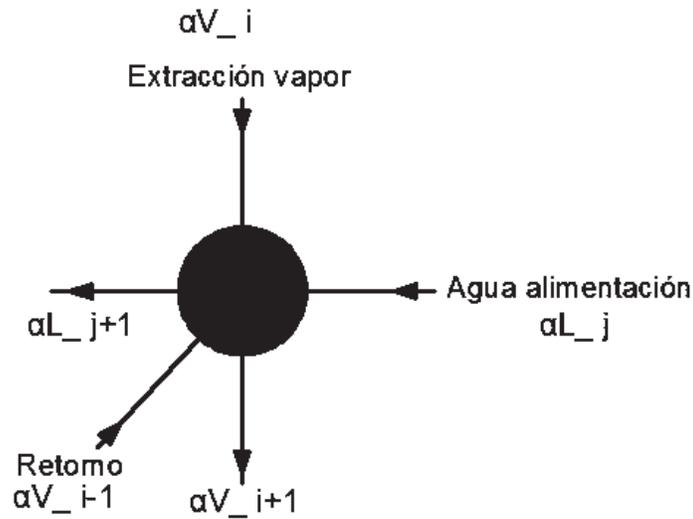


Figura 2. 4. Esquemático de nodos en el precalentador.
(Fuente: Méndez, 2017)

Del balance de energías en los precalentadores, se tiene el siguiente arreglo para la determinación de la fracción de masa extraída de la turbina:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_{Lj+1}(h_{j+1} - h_j) - \alpha_{i-1}(h_{R1} - h_j)}{(h_{\alpha i} - h_{Vi+1})} \quad (2.5)$$

Donde:

α_{Lj+1} , es la fracción del agua de alimentación que sale del precalentador i ,

α_{i+1} , es la fracción de vapor de la extracción i de la turbina de vapor,

α_{i-1} , es la fracción de vapor que llega mediante bomba o trampa de vapor desde un precalentador cerrado,

h_{j+1} , h_j , son las entalpías de, agua de alimentación a la salida y entrada respectivamente,

h_{Ri} , es la entalpía de la línea de retorno que viene desde un precalentador cerrado mediante bomba u trampa,

$h_{\alpha i}$, es la entalpía de vapor de la extracción i de la turbina,

$h_{V i+1}$, es la entalpía de vapor de la extracción i a la salida del precalentador.

Se sabe que el arreglo de los precalentadores como se indico es en cascada, se toma como punto de partida al precalentador cuya línea de vapor está conectada a la primera extracción de la turbina, en la que se sabe que el $\alpha_{L j+1} = 1$, y se va retrocediendo hasta llegar al condensador. Determinándose el valor de las fracciones de extracción en el orden de las presiones de extracción. En los precalentadores cerrados el valor de $h_{V i+1}$ toma el valor de h_{j+1}

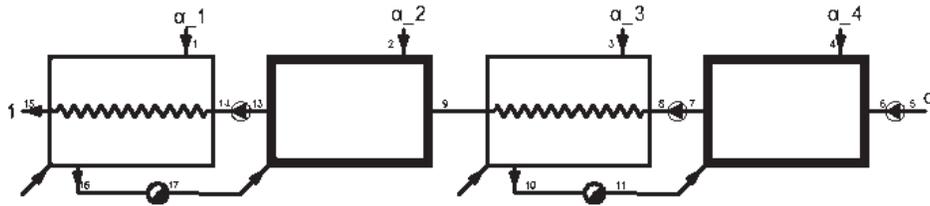


Figura 2. 5. Arreglo en cascada de dos precalentadores cerrados y dos abiertos.
(Fuente: Méndez, 2017)

En el arreglo en cascada mostrada en la figura 2.5, por ejemplo, las fracciones de masa de cada una de las extracciones de la turbina y de acuerdo al arreglo (de izquierda a derecha) quedarían determinadas con las formulaciones descritas en la ecuación 2.6.

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{(h_{15} - h_{14})}{(h_1 - h_{16})} \\ \alpha_2 &= \frac{(h_{13} - h_9) - (\alpha_1)(h_{17} - h_9)}{(h_2 - h_9)} \\ \alpha_3 &= \frac{(h_9 - h_8)}{(h_3 - h_{10})} \\ \alpha_4 &= \frac{(h_7 - h_6) - (\alpha_3)(h_{11} - h_6)}{(h_4 - h_6)} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Determinándose de esta manera las fracciones másicas en cada una de las extracciones de la turbina de una manera sencilla.

2.3. Desarrollo del software

El desarrollo de una interfaz gráfica (GUI) y de un entorno de desarrollo integrado para la simulación del ciclo Rankine en estado estacionario y en diversas configuraciones (IDE), que empaquetado como un programa de aplicación: editor de código, compilador, depurador, se constituya en un marco de trabajo amigable para el usuario. El lenguaje de

programación usada es Microsoft Visual Studio por su versatilidad en la construcción de aplicaciones orientada a objetos.

El presente capítulo centra su atención en el uso de herramientas matemáticas y estrategias de programación para la obtención del esquematizado, donde se configura un circuito termodinámico de ciclo Rankine, con los parámetros tanto de entrada como de salida. Además, la obtención de las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo de los diagramas termodinámicos a partir de la formulación IAPWS f97.

Con ello se pretende contar con un software didáctico para que el usuario conozca las propiedades termodinámicas del agua a diversos estados termodinámicos, por otro lado, el manejo de circuitos termodinámicos de potencia Rankine, permitiendo hacer esquemas en diversas configuraciones y simular su comportamiento. Favoreciendo de esta manera un aprendizaje significativo de este tópico.

El desarrollo las propiedades termodinámicas del agua basado en la formulación IAPWS-f97, y mediante el uso de algoritmos apropiados, derivan en la obtención de los diagramas termodinámicos, siendo el de interés el diagrama temperatura-entropía. Para ello se codifican cada una las propiedades termodinámicas, permitiendo de esta manera analizar el comportamiento del ciclo Rankine en alguna configuración dada.

2.4. Obtención de las propiedades termodinámicas del agua según la formulación IAPWS-f97

Para las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo (agua en diferentes fases) se toma la formulación IAPWS-F97, que permite predecir las propiedades a partir de la presión y la temperatura, el rango de temperatura y presión va desde los 273.15[K] y 611.657[Pa] hasta 1073.15[K] y 100.00[MPa] respectivamente, a partir de las cuales se pueden derivar otras propiedades termodinámicas intensivas (Entalpia, Entropía, Energía interna, volumen específico).

La formulación IAPWS-F97 del fluido agua está en términos dimensionales de la energía libre de Gibbs $\gamma(\pi, \tau) = g(p, T)/RT$, y es separado en dos partes, una parte como gas ideal $\gamma^0(\delta, \tau)$ y una parte residual $\phi\gamma^r(\delta, \tau)$, denotándose como: $\frac{g(p, T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \gamma^0(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau)$. Donde g es la energía específica de Gibbs, p es la presión, T denota la temperatura, π y τ son parámetros reducidos que son definidos como $\pi = \frac{p}{p^*}$ y $\tau = \frac{T}{T^*}$, siendo la densidad crítica $\rho_c = 322.00[\text{Kgm}^{-3}]$, $T_c = 647.0960[\text{K}]$ y la constante específica del

gas $R = 0.46151805[Kg - 1K - 1]$. Los valores para la región 1 de $p^* = 16.53[MPa]$ y $T^* = 1386.00[K]$, para la región 2, $p^* = 1.00[MPa]$ y $T^* = 540.00[K]$.

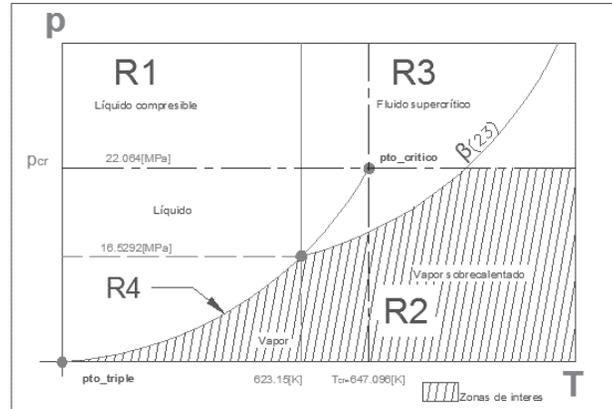


Figura 2. 6. Regiones de interés del diagrama P-T del agua según IAPWS-f97.
(Fuente: Méndez, 2017)

Mediante una combinación adecuada de los términos dimensionales tanto parte ideal como residual, es factible determinar las propiedades termodinámicas del agua a diferente temperatura y densidad.

2.5. Implementación de algoritmo y estructuración

Uno de los problemas para comprender el alcance de la termodinámica dentro de los ciclos de potencia, es el ciclo Rankine, considerando diversas configuraciones de los elementos constitutivos descritos en el apartado 1.2. Al considerar precalentadores abiertos o cerrado, el número de posibles configuraciones crece exponencialmente, tornándose la solución extensa y particular.

El algoritmo para solucionar problemas de ciclos de potencia Rankine en las diversas configuraciones se muestra en la figura 2.7.

Es necesario, primeramente, la elaboración de una interfaz gráfica interactiva para la esquematización de un circuito termodinámico de ciclo Rankine en alguna configuración (ventana de dibujo), misma que consta de una zona para dibujar el circuito, una paleta de íconos con los elementos constitutivos del ciclo Rankine tanto ideal, regenerativo y con recalentamiento. En la figura 2.8., se muestra la ventana para la esquematización.

Utilizando la propiedad de, “arrastrar y soltar”, de la paleta de iconos, se arrastra los elementos necesarios para armar el circuito termodinámico, cada elemento consta de puntos de conexión, mismos que a través del elemento conector enlaza entre elementos

siguiendo una lógica de conexión. Al conectar un elemento con otro y cuyo enlace este validado (circuito lógico), los puntos de enlace se tornarán de color verde, como indicativo de conexión permitida.

Al validar el circuito termodinámico en alguna configuración, el esquema adquiere la condición de imagen estática, guardándose dicha imagen con formato PNG. Además, para el análisis numérico, requiere el ingreso de datos, el programa considera como recurso flujo (presión, volumen, temperatura, entropía).

El elemento central del circuito termodinámico es la turbina de vapor, misma que consta de tres etapas de expansión, con dos extracciones por etapa y además de conectores para dos etapas de recalentamiento. Al agregar éste elemento, se dispone de una ventana de diálogo, donde se ingresa los valores de presión y temperatura en la entrada principal de la turbina, la presión de la salida principal, las presiones de cada una de las extracciones a considerar en el circuito, así como también las presiones en la que ocurre el recalentamiento del fluido de trabajo. Además, se debe asignar el rendimiento isentrópico de la turbina, como se muestra en la figura 2.9.

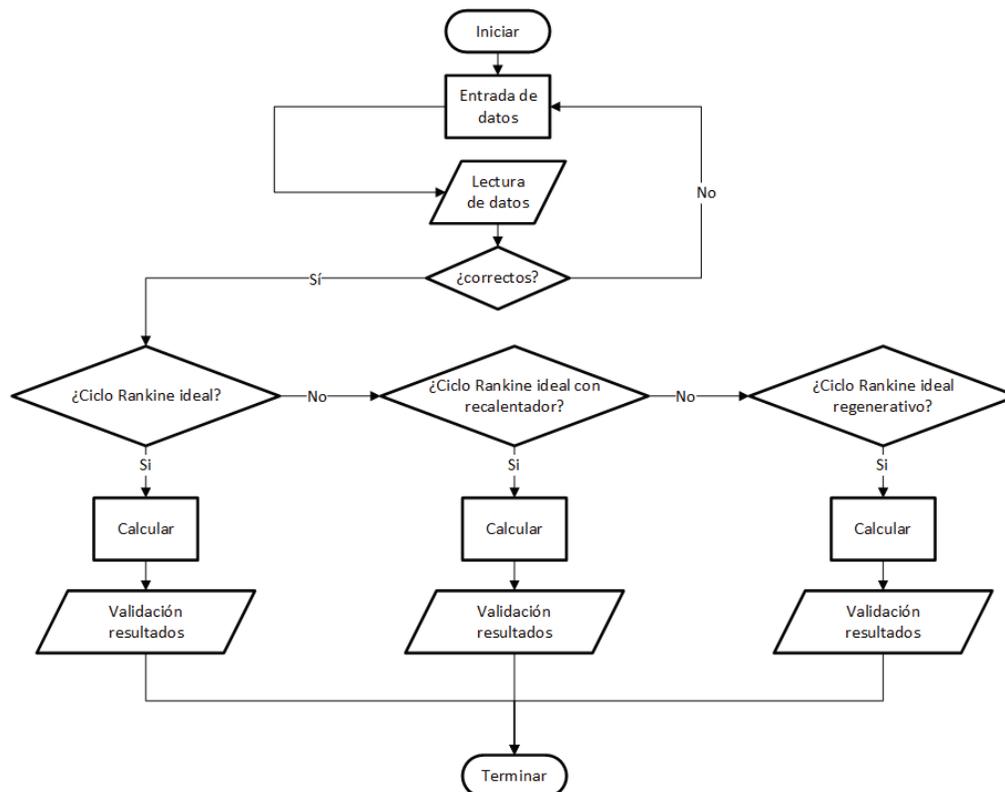


Figura 2. 7. Diagrama de flujo del ciclo Rankine en estado estacionario con regeneración y recalentamiento.

(Fuente: Méndez, 2017)

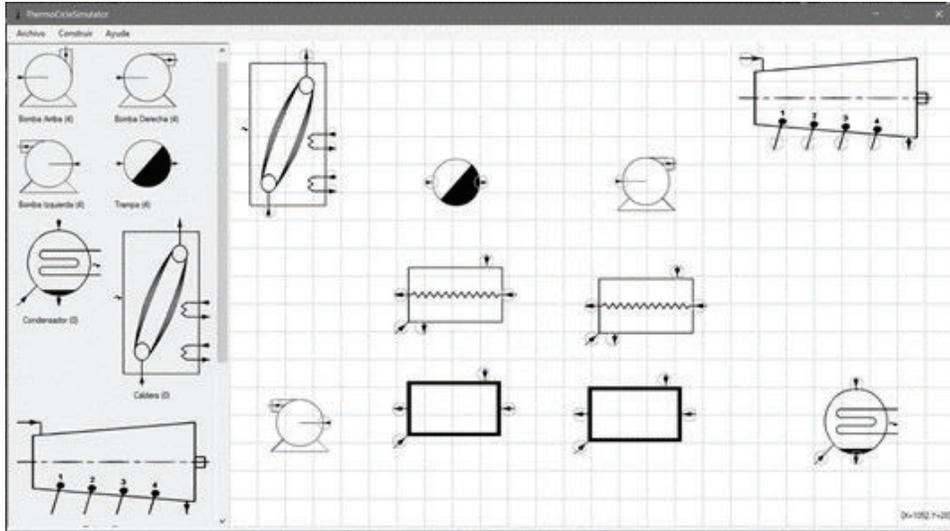


Figura 2. 8. Interface del esquematizador de circuitos termodinámicos en ciclo Rankine.
(Fuente: Méndez, 2017)

El elemento central del circuito termodinámico es la turbina de vapor, misma que consta de tres etapas de expansión, con dos extracciones por etapa y además de conectores para dos etapas de recalentamiento. Al agregar éste elemento, se dispone de una ventana de diálogo, donde se ingresa los valores de presión y temperatura en la entrada principal de la turbina, la presión de la salida principal, las presiones de cada una de las extracciones a considerar en el circuito, así como también las presiones en la que ocurre el recalentamiento del fluido de trabajo. Además, se debe asignar el rendimiento isentrópico de la turbina.



Figura 2. 9. Ventana de diálogo para la turbina de vapor.
(Fuente: Méndez, 2017)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En base a los objetivos planteados y el uso de dos metodologías diferentes para resolver problemas de circuitos termodinámicos de ciclo Rankine, se procede a la validación de resultados obtenidos. La primera metodología utilizada es la resolución del problema en usando formulas y tablas de las propiedades del agua ya formuladas. En la segunda metodología, se utiliza la aplicación desarrollada tanto en la calculadora de las propiedades termodinámicas usando la formulación recomendada por IAPWS, la esquematización del circuito termodinámico y la diagramación del mismo en el plano isentrópico.

La línea base utilizada para la comparación es la generada por la primera metodología que es la más usual en la resolución de problemas de ciclos de potencia en el estudio de éste tópic.

3.1. Validación de resultados de las propiedades termodinámicas del agua mediante la formulación IAPWS

Las propiedades termodinámicas del agua usando formulación IAPWS determinadas como funcionales adimensionales tanto de la energía libre de Gibbs (función de presión y temperatura) y de la energía libre del Helmholtz (función de temperatura y volumen) y las formulaciones de retroceso, permiten determinar las propiedades termodinámicas del agua en diferentes regiones, siendo de interés las regiones 2 (sobrecalentamiento), región 1 (líquido saturado) y región 4 (saturación).

En la verificación de la exactitud de los valores de las propiedades termodinámicas usando la aplicación desarrollada y tomando como referencia ciertos valores, arrojan un error por relativo muy bajo en un rango del 0.05% al 0.3% que considera la norma como porcentaje de incertidumbre aceptable.

Tabla 3. 1. Error de redondeo en la determinación de las propiedades termodinámicas para valores puntuales usando IAPWS-f97.

	<i>IAPWS R7-97 (2012)¹</i>	<i>ThermoCycleRankine²</i>	<i>Error relativo</i>
Región 1			
h(3.00[MPa],300[K])	115.331273	115.331273	1.73E-10
S(3.00[MPa],300[K])	0.392294792	0.392294792	0.00E+00
v(3.00[MPa],300[K])	0.001002152	0.001002152	0.00E+00
T(3.00[MPa],2500[kJ/kg])	391.798509	391.7985088	5.10E-10
T(3.00[MPa],0.50[kJ/kgK])	307.842258	307.8422576	1.30E-09
Región 2			
h(0.0035[MPa],300[K])	2549.91145	2549.911451	3.92E-10

Tabla 3.1. Continuación...

S(0.0035[MPa],300[K])	8.52238967	8.522389667	3.52E-10
v(0.0035[MPa],300[K])	39.4913866	39.49138664	1.01E-09
T(2.50[MPa],8.00[kJ/kgK])	1039.84917	1039.849173	2.89E-09
T(3.00[MPa],3000[kJ/kg])	801.299102	801.2991019	1.25E-10
Región 4			
Psat @ T=300[K]	0.003536589	0.003536718	3.62E-05
h_Lsat @ T=300[K]	111.8313357	111.8238236	6.72E-05
s_Lsat @ T=300[K]	0.390655852	0.390617934	9.71E-05
v_Lsat @ T=300[K]	0.001003449	0.001003437	1.25E-05

Notas: Los valores de testeo usados son los sugeridos por la formulación IAPWS-F97 para la verificación del programa de computación.

¹ Resultados presentados por la IAPWS-F97 versión 2012 con los valores de testeo sugeridos

² Resultados obtenidos por la aplicación desarrollada

(Fuente: Méndez, 2017)

El error relativo es muy bajo, y se aprecia su valor no nulo al trabajar con mayor número de dígitos decimales, el error hallado es de redondeo por el proceso de computación.

3.2. Simulación y validación del circuito termodinámico ideal

Rankine

En la simulación de circuitos termodinámicos Rankine en una configuración determinada, se toma como línea de base la resolución del problema usando la metodología tradicional de fórmulas establecidas y tablas termodinámicas con las propiedades del agua, cuyos resultados son comparados con los obtenidos usando la aplicación desarrollada.

3.2.1. Ejemplo 01: Ciclo Rankine ideal simple

“En una central termoeléctrica, el vapor opera en ciclo Rankine ideal simple. El vapor de agua ingresa a la turbina a 3.00[MPa] y 350.00[°C](623.00[K]) y es condensado en el condensador a una presión de 0.075[MPa]. Determinar la eficiencia térmica de éste ciclo”(Cengel & Boles, 2012).

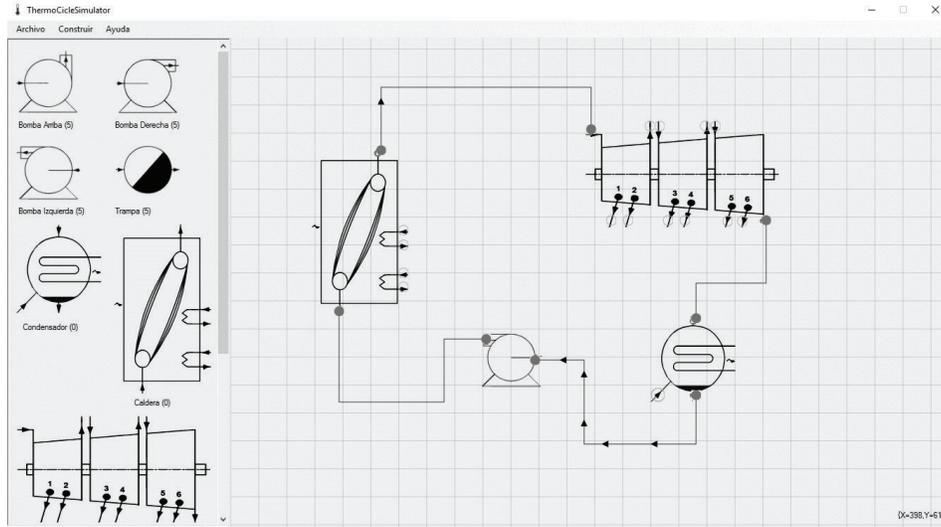


Figura 3. 1. Esquema del circuito termodinámico del ejemplo 01.
(Fuente: Méndez, 2017)

La información puntual de las propiedades termodinámicas y las de sistema del ejercicio se ha determinado usando dos metodologías diferentes como se muestran en la tabla 09, indicándose el error porcentual entre las dos metodologías, la primera es la resolución manual del problema usando las tablas termodinámicas, mientras que el segundo método es utilizando las propiedades termodinámicas IAPWS f97 y el simulador desarrollado. Además, se muestra el circuito termodinámico del éste problema en un diagrama temperatura-entropía en la figura 3.2.

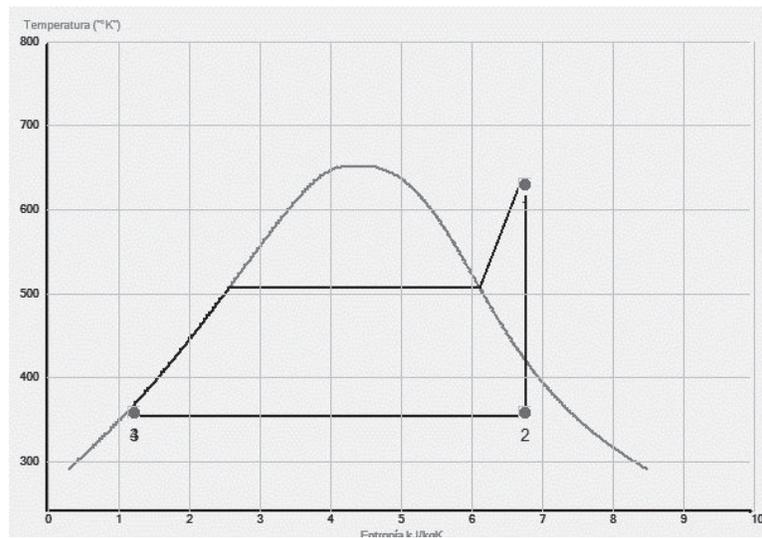


Figura 3. 2. Diagrama T-s con expansión isentrópica del ejemplo 01.
(Fuente: Méndez, 2017)

Para la resolución de éste problema se basó en dos metodologías diferentes, la primera mediante la resolución manual usando tablas termodinámicas y la segunda usando el

software de simulación desarrollado. Para ello, se considera el comportamiento isentrópico tanto de la turbina como de la bomba y luego condiciones reales.

Tabla 3. 2. Resultado de propiedades termodinámicas en circuito del ejemplo 01.

#tubería	Unidad	Método A ¹	Método B ²	Error relativo
1	h[kJ/kg]	3116.1	3115.709	1.25E-04
	s[kJ/kgK]	6.745	6.7443	1.04E-02
	P[MPa]	3.00	3.00	0.00E+00
	T[K]	623.15	623.15	0.00E+00
	x	NaN	NaN	-
2	h[kJ/kg]	2403	2402.8081	8.00E-03
	s[kJ/kgK]	6.745	6.745	0.00E+00
	P[MPa]	0.075	0.075	0.00E+00
	T[K]	364.76	364.9077	4.05E-02
	x	0.8861	0.8858	3.39E-02
3	h[kJ/kg]	384.44	384.4347	1.40E-03
	s[kJ/kgK]	1.2132	1.2131	8.20E-03
	P[MPa]	0.075	0.075	0.00E+00
	T[K]	364.9077	364.9077	0.00E+00
	v	0.001037	0.0010372	1.93E-02
	x	0.00	0.00	-
4	h[kJ/kg]	387.4732	387.6241	3.89E-02
	s[kJ/kgK]	1.2131	1.2131	0.00E+00
	P[MPa]	3.00	3.00	0.00E+00
	T[K]	365.1124	365.1124	0.00E+00
	x	NaN	NaN	-
Sistema	eta_thermal	0.260228618	0.260150081	3.02E-02
	W_turbina	713.10000	712.9009	2.79E-02
	W_bomba	3.033225	3.03381	1.93E-02
	W_netto	710.0668	709.8671	2.81E-02

Notas:

¹ Resolución del problema utilizando fórmulas y tablas termodinámicas de Cengel ed. 2012

² Resolución automática utilizando simulador ThermoCycleSimulator©

(Fuente: Méndez, 2017)

Comparando las dos metodologías para resolver éste ejemplo, se nota que el margen de error relativo es muy pequeño en cada uno de los cálculos realizados, se puede concluir que la simulación arroja valores con baja dispersión, dando una precisión alta y confiable.

Considerando que la turbina tiene un rendimiento del 0.95 y la bomba tiene un rendimiento del 0.85.

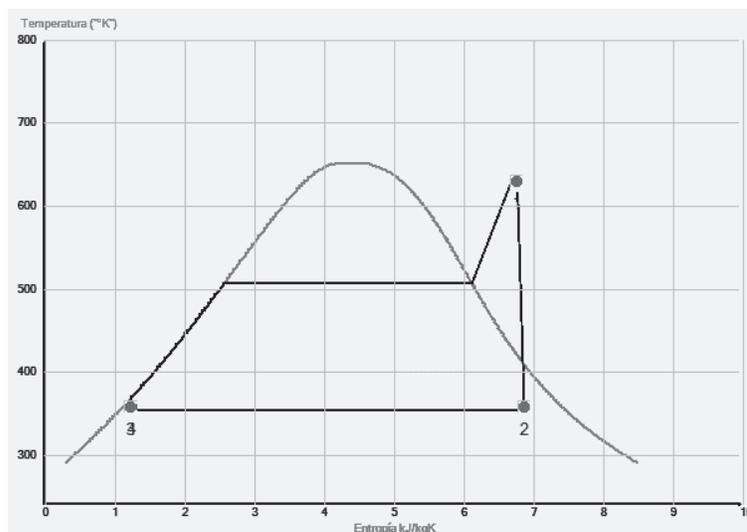


Figura 3. 3. Diagrama T-s con expansión real del ejemplo 01.
(Fuente: Méndez, 2017)

Los resultados para el circuito termodinámico en mención y considerando las condiciones reales se muestran en la tabla 10, donde también se aprecian la desviación al comparar entre métodos usados para la solución.

Tabla 3. 3. Resultado de propiedades termodinámicas del circuito considerando turbina real en el ejemplo 01.

#tubería	Unidad	Método A ¹	Método B ²	Error relativo
1	h[kJ/kg]	3116.1	3115.709	1.25E-04
	s[kJ/kgK]	6.745	6.7443	1.04E-04
	P[MPa]	3.00	3.00	0.00E+00
	T[K]	623.15	623.15	0.00E+00
	x	NaN	NaN	-
2	h[kJ/kg]	2438.3786	2438.6022	9.17E-05
	s[kJ/kgK]	6.8315	6.842	1.54E-03
	P[MPa]	0.075	0.075	0.00E+00
	T[K]	364.91	364.9077	6.30E-06
	x	0.9016	0.9015	1.11E-04
3	h[kJ/kg]	384.44	384.554	2.97E-04
	s[kJ/kgK]	1.2132	1.2131	8.24E-05
	P[MPa]	0.075	0.075	0.00E+00
	T[K]	364.91	364.9077	6.30E-06
	v	0.001037	0.0010372	1.93E-04
x	0.00	0.00	-	
4	h[kJ/kg]	388.0085	387.7434	6.83E-04
	s[kJ/kgK]	1.2135	1.2135	0.00E+00
	P[MPa]	3.00	3.00	0.00E+00
	T[K]	365.2629	365.2629	0.00E+00
	x	NaN	NaN	-

Tabla 3.3. Continuación...

Sistema	Eta_thermal	0.247115209	0.247040288	3.03E-04
	W_turbina	677.7214	677.1068	9.07E-04
	W_bomba	3.033225	3.03381	1.93E-04
	W_neto	674.6882	674.073	9.12E-04

Notas:

¹ Resolución del problema utilizando fórmulas y tablas termodinámicas de Cengel ed. 2012

² Resolución automática utilizando simulador ThermoCycleSimulator©

(Fuente: Méndez, 2017)

3.2.2. Ejemplo 02: Ciclo Rankine ideal con recalentamiento

“Una planta termoeléctrica que usa el vapor de agua, opera en el ciclo Rankine con recalentamiento. El vapor entra a la turbina de alta presión a 8.00[MPa] y 773.115[K] y sale a 3.00[MPa]. El vapor se recalienta luego a presión constante a 773.00[K] antes de expandirse a 20.00[kPa] en la turbina de baja presión. Determine la producción de trabajo en la turbina y la eficiencia térmica del ciclo. También muestre del diagrama T-s con respecto a las líneas de saturación.”(Çengel & Boles, 2012, p. 603)

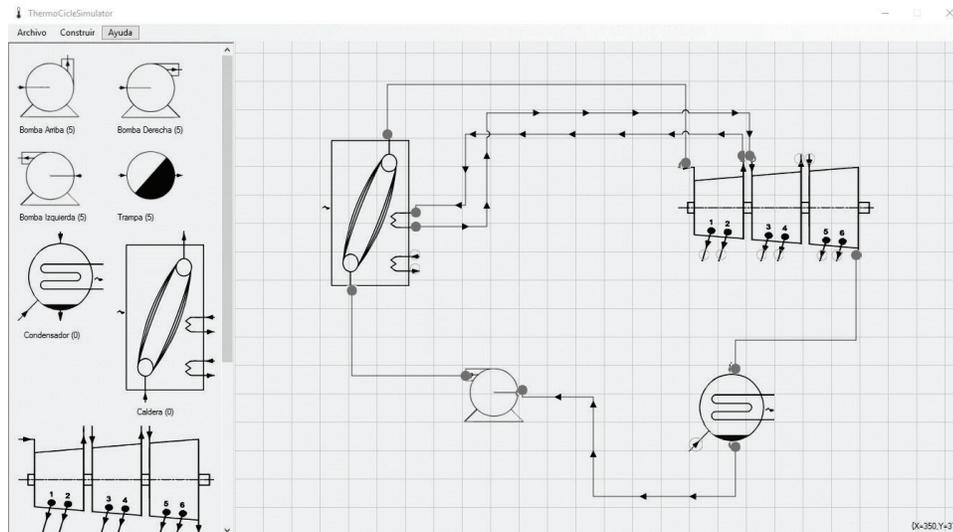


Figura 3. 4. Esquema del circuito termodinámico del ejemplo 02.
(Fuente: Méndez, 2017)

El diagrama termodinámico temperatura-entropía se muestran en la figura 3.4.

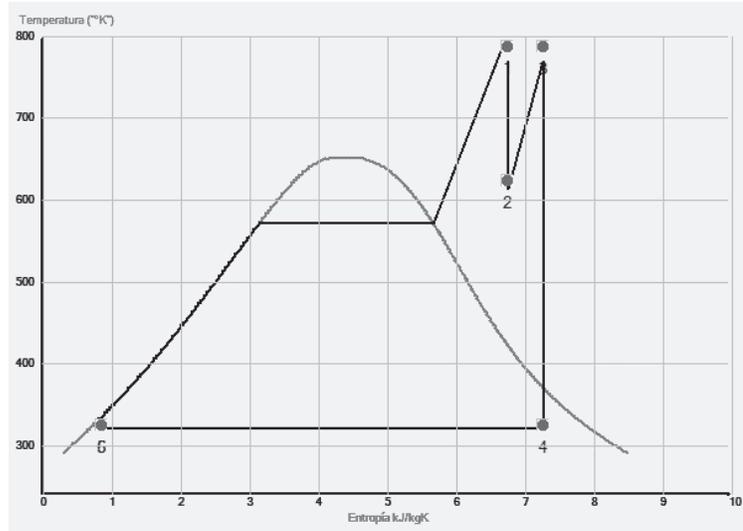


Figura 3. 5. Diagrama T-s del ejemplo 02.
(Fuente: Méndez, 2017)

Los resultados obtenidos mediante las dos metodologías para resolver están detallados en la tabla 3.4, al pie de cada tabla se indican las observaciones a las mismas.

Tabla 3. 4. Resultado de propiedades termodinámicas del circuito en el ejemplo 02.

#tubería	Unidad	Método A	Método B	Error relativo
1	h[kJ/kg]	3399.50	3399.00	1.47E-04
	s[kJ/kgK]	6.73	6.73	1.04E-04
	P[MPa]	8.00	8.00	0.00E+00
	T[K]	773.15	773.15	0.00E+00
	x	NaN	NaN	-
2	h[kJ/kg]	3103.92	3104.25	1.08E-04
	s[kJ/kgK]	6.73	6.73	1.04E-04
	P[MPa]	3.00	3.00	0.00E+00
	T[K]	618.15	618.15	0.00E+00
	x	NaN	NaN	-
3	h[kJ/kg]	3457.20	3456.70	1.44E-04
	s[kJ/kgK]	7.24	7.24	9.67E-05
	P[MPa]	3.00	3.00	0.00E+00
	T[K]	773.00	773.00	0.00E+00
	v	-	-	-
	x	NaN	NaN	-
4	h[kJ/kg]	2384.96	2385.18	9.20E-05
	s[kJ/kgK]	7.24	7.24	0.00E+00
	P[MPa]	0.02	0.02	0.00E+00
	T[K]	333.21	333.24	7.71E-05
	v	-	-	-
	x	0.91	0.90	1.10E-04
5	h[kJ/kg]	251.42	251.54	4.82E-04

Tabla 3.4. Continuación...

	s[kJ/kgK]	0.83	0.83	4.81E-04
	P[MPa]	0.02	0.02	0.00E+00
	T[K]	333.21	333.24	7.71E-05
	v	0.00	0.00	9.83E-05
	x	0.00	0.00	-
6	h[kJ/kg]	259.54	261.09	5.99E-03
	s[kJ/kgK]	0.83	0.83	4.81E-04
	P[MPa]	8.00	8.00	0.00E+00
	T[K]	333.92	333.92	0.00E+00
	v	-	-	-
	x	-	-	-
Sistema	eta_thermal	0.39	0.39	3.08E-03
	W_turbina	1367.82	1366.27	1.13E-03
	W_bomba	8.12	8.12	9.86E-05
	W_neto	1359.71	1358.16	1.14E-03
	q_in	3493.24	3490.36	8.26E-04

Notas:

¹ Resolución del problema utilizando fórmulas y tablas termodinámicas de Cengel ed. 2012

² Resolución automática utilizando simulador ThermoCycleSimulator©

(Fuente: Méndez, 2017)

3.2.3. Ejemplo 03: Ciclo Rankine Ideal con regeneración usando dos precalentadores abiertos

Una planta de vapor que opera en un ciclo ideal regenerativo de Rankine con dos precalentadores de agua de alimentación abiertos. Determine la eficiencia de la planta y la fracción de vapor en cada extracción de la turbina. La presión de entrada a la turbina es de 10.00[MPa] y la temperatura a la que ingresa el vapor en la turbina es de 873.00[K], las presiones a las que se extrae vapor de la turbina es 0.60[MPa] y 0.20[MPa] respectivamente. La presión en el condensador es de 5.00[kPa].

En la figura 3.5, se muestra el circuito termodinámico del éste ejemplo. Mientras que el diagrama temperatura-entropía se muestra en la figura 3.6. Los resultados de la solución usando las dos metodologías, así como la desviación relativa entre ellas se muestran en la tabla 3.5.

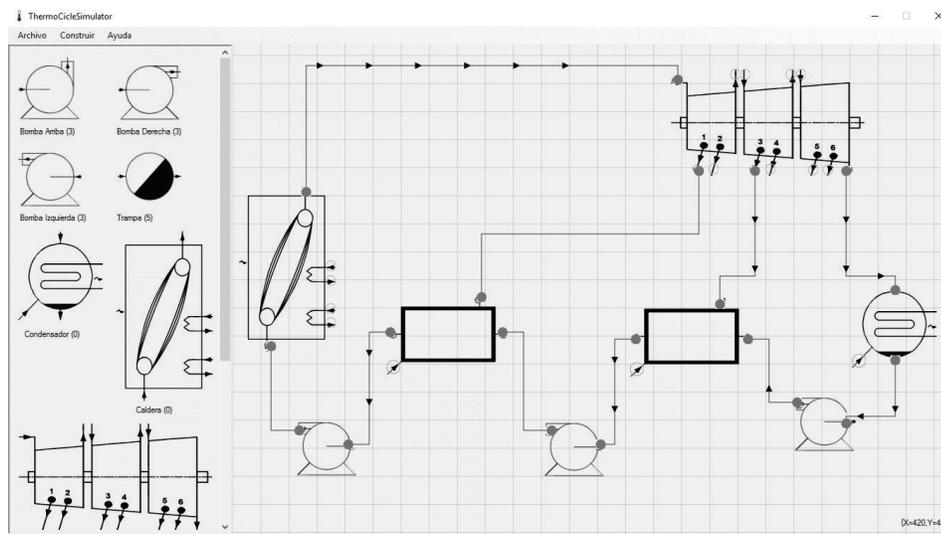


Figura 3. 6. Esquema del circuito termodinámico del ejemplo 02.
(Fuente: Méndez, 2017)

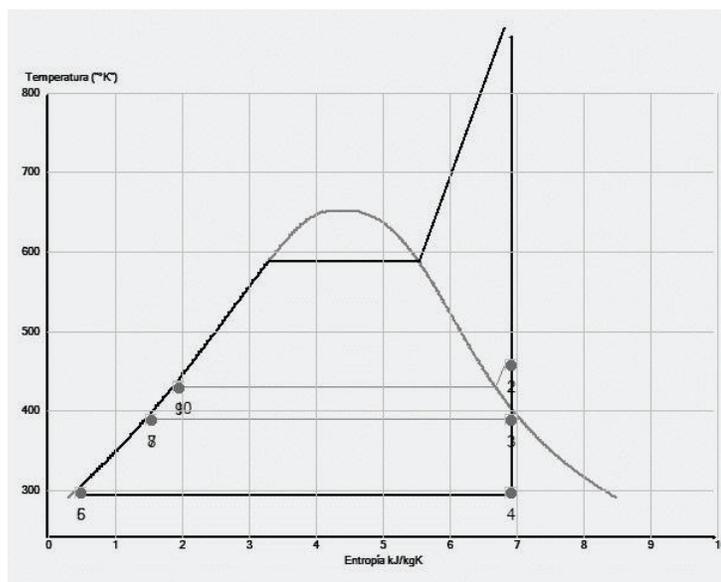


Figura 3. 7. Diagrama T-s del ejemplo 03.
(Fuente: Méndez, 2017)

Tabla 3. 5. Resultado de propiedades termodinámicas del circuito en el ejemplo 03.

#tubería	Unidad	Método A	Método B	Error relativo
1	h[kJ/kg]	3625.80	3625.48	8.95E-05
	s[kJ/kgK]	6.90	6.90	5.79E-05
	P[MPa]	10.00	10.00	0.00E+00
	T[K]	873.00	873.00	0.00E+00
	x	NaN	NaN	-
2	h[kJ/kg]	2821.80	2820.70	3.89E-04
	s[kJ/kgK]	6.90	6.90	5.79E-05
	P[MPa]	0.60	0.60	0.00E+00
	T[K]	458.44	459.64	2.62E-03

Tabla 3.5. Continuación...

	x	NaN	NaN	-
3	h[kJ/kg]	2618.70	2618.82	4.72E-05
	s[kJ/kgK]	6.90	6.90	5.79E-05
	P[MPa]	0.20	0.20	0.00E+00
	T[K]	393.36	393.40	1.02E-04
	x	0.96	0.96	2.08E-04
4	h[kJ/kg]	2105.00	2104.96	1.68E-05
	s[kJ/kgK]	6.90	6.90	5.79E-05
	P[MPa]	0.01	0.01	0.00E+00
	T[K]	306.02	306.04	7.09E-05
	x	0.81	0.81	2.46E-04
5	h[kJ/kg]	137.75	137.82	5.21E-04
	s[kJ/kgK]	0.48	0.48	4.20E-04
	P[MPa]	0.01	0.01	0.00E+00
	T[K]	306.02	306.04	7.09E-05
	x	0.00	0.00	-
6	h[kJ/kg]	137.95	138.02	4.91E-04
	s[kJ/kgK]	0.48	0.48	4.20E-04
	P[MPa]	0.20	0.20	0.00E+00
	T[K]	306.06	306.06	1.14E-05
	x	NaN	NaN	-
7	h[kJ/kg]	504.71	504.87	3.11E-04
	s[kJ/kgK]	1.53	1.53	2.61E-04
	P[MPa]	0.20	0.60	2.00E+00
	T[K]	393.40	393.40	1.78E-06
	x	0.00	0.00	-
8	h[kJ/kg]	504.71	505.29	1.15E-03
	s[kJ/kgK]	1.53	1.53	2.61E-04
	P[MPa]	0.20	0.60	2.00E+00
	T[K]	393.45	393.45	4.32E-06
	x	NaN	NaN	-
9	h[kJ/kg]	670.38	670.41	4.85E-05
	s[kJ/kgK]	1.93	1.93	5.18E-05
	P[MPa]	0.60	0.60	0.00E+00
	T[K]	431.98	431.99	3.31E-05
	x	0.00	0.00	-
10	h[kJ/kg]	680.73	680.76	4.13E-05
	s[kJ/kgK]	1.93	1.93	1.55E-04
	P[MPa]	10.00	10.00	0.00E+00
	T[K]	433.10	433.09	3.39E-05
	x	NaN	NaN	-
Sistema	eta_thermal	0.47	0.47	4.24E-04
	W_turbina	1520.80	1520.51	1.90E-04
	W_bomba	10.97	10.97	4.01E-04

Tabla 3.5. Continuación...

W_net	1556.55	1556.80	1.62E-04
q_in	2945.07	2944.72	1.20E-04
alpha_01	0.07	0.07	2.80E-03
alpha_02	0.14	0.14	0.00E+00
alpha	0.79	0.79	2.53E-04

Notas:

¹ Resolución del problema utilizando fórmulas y tablas termodinámicas de Cengel ed. 2012

² Resolución automática utilizando simulador ThermoCycleSimulator©

(Fuente: Méndez, 2017)

La simulación para este ejemplo arroja valores muy similares a los desarrollados manualmente.

3.2.4. Ejemplo 04: Ciclo Rankine ideal con recalentamiento y recalentador cerrado.

Un ciclo Rankine ideal con regeneración y recalentamiento opera con un precalentador abierto. La presión a la entrada de la turbina de vapor es de 10.00[MPa] y la temperatura de 773.00[K], la presión de recalentamiento es de 1.00[MPa], la presión de extracción de vapor ocurre a 0.60[MPa], la presión en el condensador es de 15.00[kPa]. Determine la fracción de vapor extraído por regeneración y la eficiencia de la planta.

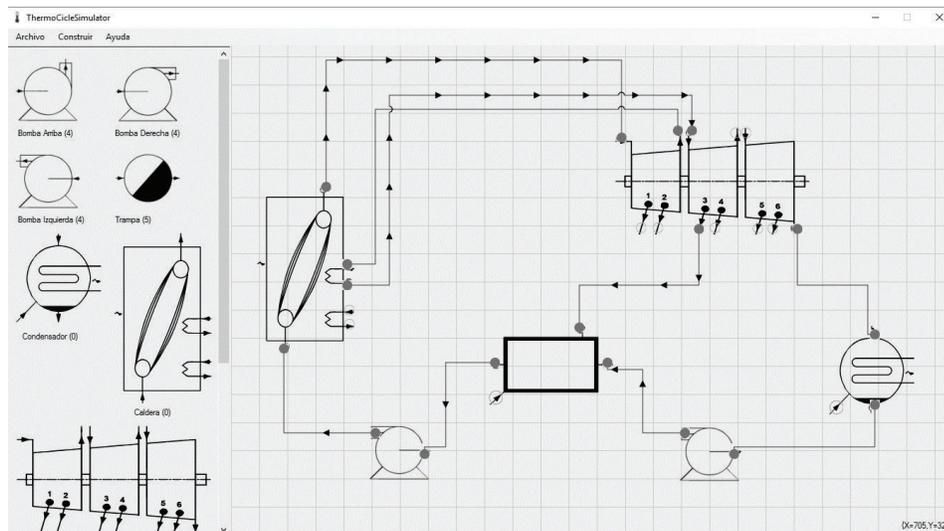


Figura 3. 8. Esquema del circuito termodinámico del ejemplo 04.

(Fuente: Méndez, 2017)

La diagramación en el plano isentrópico está dado por la figura 3.8.

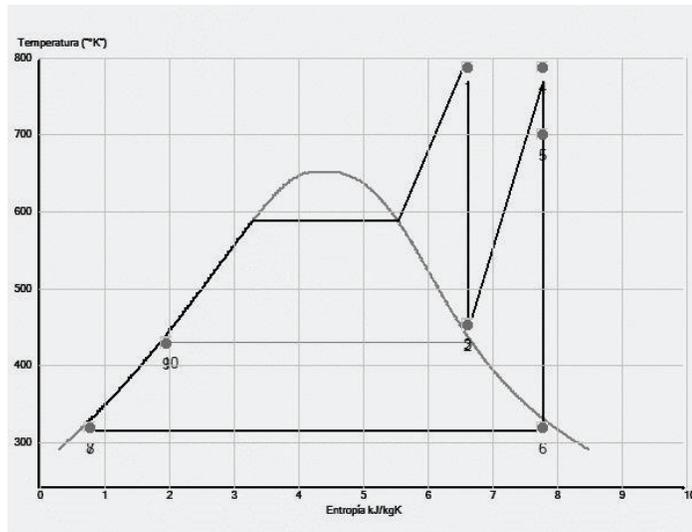


Figura 3. 9. Diagrama T-s del ejemplo 04.
(Fuente: Méndez, 2017)

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Resultado de propiedades termodinámicas del circuito en el ejemplo 04.

#tubería	Unidad	Método A	Método B	Error relativo
1	h[kJ/kg]	3373.70	3374.67	2.88E-04
	s[kJ/kgK]	6.60	6.60	3.34E-04
	P[MPa]	10.00	10.00	0.00E+00
	T[K]	773.00	773.00	0.00E+00
	x	NaN	NaN	-
2	h[kJ/kg]	2782.78	2784.11	4.77E-04
	s[kJ/kgK]	6.60	6.60	7.88E-04
	P[MPa]	1.00	1.00	0.00E+00
	T[K]	437.56	455.90	4.19E-02
	x	NaN	NaN	-
3	h[kJ/kg]	3478.50	3478.68	5.13E-05
	s[kJ/kgK]	7.76	7.76	1.67E-04
	P[MPa]	1.00	1.00	0.00E+00
	T[K]	773.00	773.00	0.00E+00
	x	NaN	NaN	-
4	h[kJ/kg]	3309.52	3307.56	5.93E-04
	s[kJ/kgK]	7.76	7.76	1.67E-04
	P[MPa]	0.60	0.60	0.00E+00
	T[K]	662.66	690.64	4.22E-02
	x	NaN	NaN	-
5	h[kJ/kg]	2518.46	2518.92	1.83E-04
	s[kJ/kgK]	7.76	7.76	1.67E-04
	P[MPa]	0.02	0.02	0.00E+00
	T[K]	327.12	327.16	1.22E-04

Tabla 3.6 Continuación...

	x	0.97	0.97	3.11E-04
6	h[kJ/kg]	225.94	226.13	8.41E-04
	s[kJ/kgK]	0.75	0.76	6.62E-04
	P[MPa]	0.02	0.02	0.00E+00
	T[K]	327.12	327.16	1.22E-04
	x	0.00	0.00	-
7	h[kJ/kg]	226.53	226.72	8.53E-04
	s[kJ/kgK]	0.75	0.76	7.95E-04
	P[MPa]	0.60	0.60	0.00E+00
	T[K]	327.12	327.20	2.45E-04
	x	NaN	NaN	-
8	h[kJ/kg]	670.56	670.41	2.20E-04
	s[kJ/kgK]	1.93	1.93	5.18E-05
	P[MPa]	0.60	0.60	0.00E+00
	T[K]	431.98	431.99	2.31E-05
	x	0.00	0.00	-
9	h[kJ/kg]	680.91	680.76	2.23E-04
	s[kJ/kgK]	1.93	1.93	1.55E-04
	P[MPa]	10.00	10.00	0.00E+00
	T[K]	431.98	433.09	2.57E-03
	x	NaN	NaN	-
Sistema	eta_thermal	0.42	0.42	2.38E-04
	W_turbina	1437.05	1436.76	2.04E-04
	W_bomba	10.94	10.94	3.11E-04
	W_netto	1426.11	1425.82	2.03E-04
	q_in	3388.51	3388.48	7.76E-06
	Alpha_03	0.14	0.14	0.00E+00

Notas:

¹ Resolución del problema utilizando fórmulas y tablas termodinámicas de Cengel ed. 2012

² Resolución automática utilizando simulador ThermoCycleSimulator©

(Fuente: Méndez, 2017)

3.2.5. Ejemplo 05: ciclo Rankine ideal con regeneración usando un precalentador cerrado y uno abierto.

El vapor sobrecalentado entra en la turbina a 12.50[MPa] y 823.00[K], luego de una expansión se extrae a una presión de 0.80[MPa] hacia un precalentador cerrado, el vapor remanente se expande hasta la presión de 0.30[MPa] hacia un precalentador abierto, el resto de vapor se expande finalmente a 10.00[kPa]. Considerando la turbina y las bombas un comportamiento isentrópico, determine la eficiencia de la planta y las fracciones en cada extracción de la turbina.

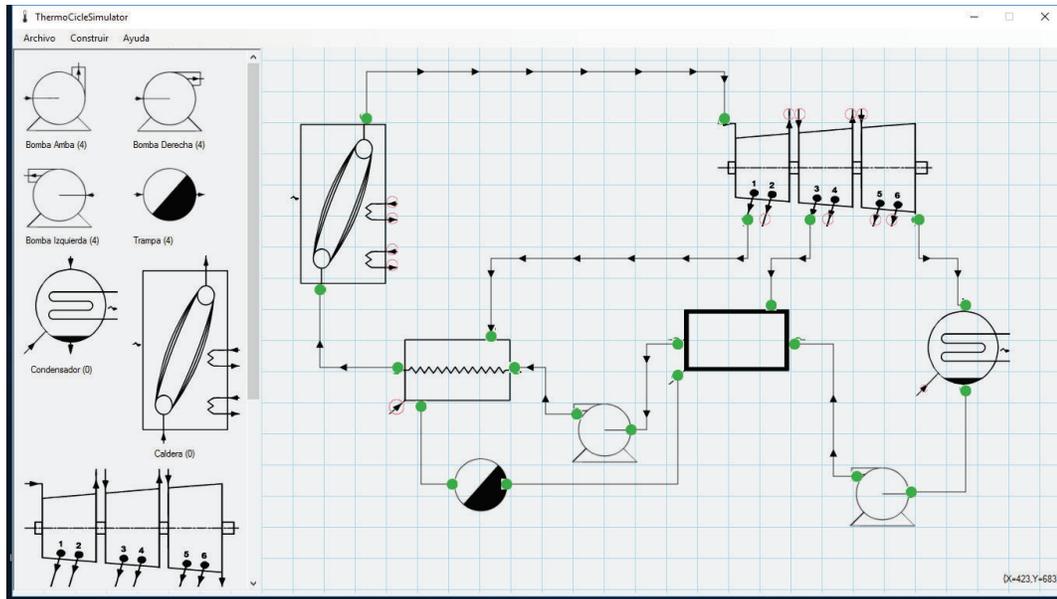


Figura 3. 10. Esquema del circuito termodinámico del ejemplo 05.
(Fuente: Méndez, 2017)

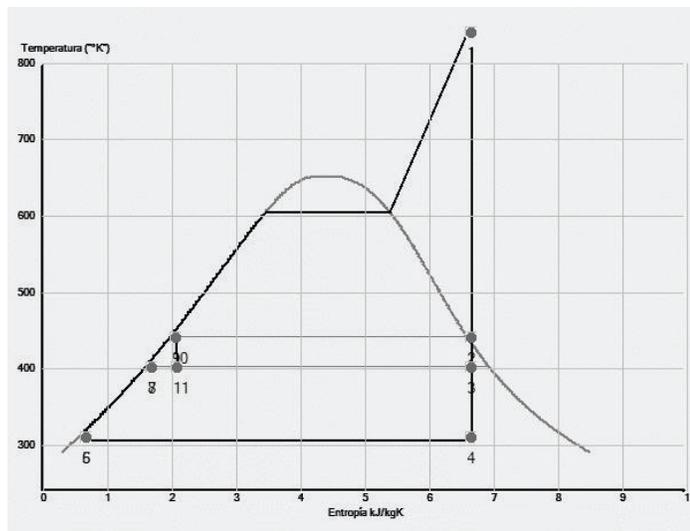


Figura 3. 11. Diagrama T-s del ejemplo 05.
(Fuente: Méndez, 2017)

La información puntual de las propiedades termodinámicas y las de sistema de éste ejercicio cuya resolución por dos metodologías diferentes se muestran en la tabla 14, indicándose el error porcentual entre las dos metodologías, la primera es la resolución manual del problema usando las tablas termodinámicas de Cengel, mientras que el segundo método es utilizando las propiedades termodinámicas IAPWS f97 y el simulador desarrollado.

Tabla 3.7. Resultado de propiedades termodinámicas del circuito en el ejemplo 05.

#tubería	Unidad	Método A	Método B	Error relativo
1	h[kJ/kg]	3476.20	3476.16	1.17E-05
	s[kJ/kgK]	6.63	6.63	7.54E-05
	P[MPa]	12.50	12.50	0.00E+00
	T[K]	823.00	823.00	0.00E+00
	x	NaN	NaN	-
2	h[kJ/kg]	2755.00	2754.96	1.37E-05
	s[kJ/kgK]	6.63	6.63	7.54E-05
	P[MPa]	0.80	0.80	0.00E+00
	T[K]	443.41	443.59	4.06E-04
	x	1.00	0.99	3.21E-03
3	h[kJ/kg]	2578.50	2578.46	1.48E-05
	s[kJ/kgK]	6.63	6.63	7.54E-05
	P[MPa]	0.30	0.30	0.00E+00
	T[K]	406.67	406.70	7.38E-05
	x	0.93	0.93	3.22E-04
4	h[kJ/kg]	2100.00	2100.07	3.26E-05
	s[kJ/kgK]	6.63	6.63	7.54E-05
	P[MPa]	0.01	0.01	0.00E+00
	T[K]	406.67	319.00	2.16E-01
	x	0.80	0.80	2.51E-04
5	h[kJ/kg]	191.81	191.99	9.60E-04
	s[kJ/kgK]	0.65	0.65	9.24E-04
	P[MPa]	0.01	0.01	0.00E+00
	T[K]	318.96	319.00	1.25E-04
	x	0.00	0.00	-
6	h[kJ/kg]	192.10	192.29	9.74E-04
	s[kJ/kgK]	0.65	0.65	9.24E-04
	P[MPa]	0.30	0.30	0.00E+00
	T[K]	319.02	319.02	0.00E+00
	x	NaN	NaN	-
7	h[kJ/kg]	561.43	561.54	1.96E-04
	s[kJ/kgK]	1.67	1.67	1.79E-04
	P[MPa]	0.30	0.30	0.00E+00
	T[K]	406.67	406.70	7.38E-05
	x	0.00	0.00	-
8	h[kJ/kg]	561.97	562.08	1.90E-04
	s[kJ/kgK]	1.67	1.67	2.39E-04
	P[MPa]	0.80	0.80	0.00E+00
	T[K]	406.67	406.76	2.21E-04
	x	NaN	NaN	-
9	h[kJ/kg]	720.87	720.95	1.07E-04
	s[kJ/kgK]	2.05	2.05	4.89E-05
	P[MPa]	0.80	0.80	0.00E+00

Tabla 3.7. Continuación...

	T[K]	443.56	443.59	6.76E-05
	x	0.00	0.00	-
10	h[kJ/kg]	720.87	720.95	1.07E-04
	s[kJ/kgK]	2.05	2.05	4.89E-05
	P[MPa]	0.80	0.80	0.00E+00
	T[K]	443.56	443.59	6.76E-05
	x	0.00	0.00	-
11	h[kJ/kg]	720.87	720.95	1.07E-04
	s[kJ/kgK]	2.05	2.06	8.90E-03
	P[MPa]	0.30	0.30	0.00E+00
	T[K]	406.76	406.70	1.48E-04
	x	0.07	0.07	0.00E+00
Sistema	eta_thermal	0.46	0.46	1.09E-03
	W_turbina	2904.90	2906.70	6.20E-04
	W_bomba	0.83	0.83	2.41E-04
	W_netto	1495.61	1496.87	8.46E-04
	q_in	2755.33	2755.21	4.28E-05
	alpha_01	0.08	0.08	1.66E-04
	alpha_02	0.14	0.14	5.07E-03
	alpha	0.78	0.78	8.93E-04

Notas:

¹ Resolución del problema utilizando fórmulas y tablas termodinámicas de Cengel ed. 2012

² Resolución automática utilizando simulador ThermoCycleSimulator©

(Fuente: Méndez, 2017)

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

El desarrollo de la aplicación ThermoCycleSimulator cumple con el objetivo planteado, satisface la simulación de circuitos termodinámicos Rankine en una variedad de configuraciones.

ThermoCycleSimulator, se muestra para el usuario como una aplicación amigable y muy intuitiva para simular circuitos termodinámicos de Ciclo Rankine en una gama amplia de configuraciones que fácilmente superan el centenar, pues depende del número de elementos a usar en el circuito termodinámico. La aplicación consta de dos interfaces una para la esquematización y otra para la diagramación en el plano temperatura entropía, además permite generar un reporte con la información del estado termodinámico de cada conexión basadas en las formulaciones recomendadas por la IAPWS, así como también información del sistema como tal incluido el rendimiento térmico del ciclo.

Entendiéndose como perturbación el cambio de las variables por parte del usuario de la aplicación. Las configuraciones del ciclo Rankine para armar un circuito termodinámico, la perturbación de las propiedades termodinámicas de entrada en régimen estable y la perturbación del comportamiento tanto isentrópico como real de la turbina y de la(s) bomba(s) se ven enormemente facilitados, permitiendo chequear y determinar valores de salida en forma de reporte de manera amigable para el usuario. Además, al retornar a la ventana de esquematización, se puede cambiar las propiedades termodinámicas de entrada como también la configuración del circuito termodinámico Rankine.

La determinación de las propiedades termodinámicas del agua en sus diversos estados usando la formulación IAPWS-f97, mediante un algoritmo informático que es parte de la aplicación desarrollada, es otra de las ventajas presentadas en la aplicación ThermoCycleSimulator, pues no es necesario el uso de las tradicionales tablas con las propiedades termodinámicas del agua para los cálculos, por las limitaciones que ellas representan, como por ejemplo la interpolación cuando el valor no se obtiene de manera directa.

En la parte visual, el armado del circuito termodinámico en algún arreglo es muy versátil, usando las bondades que tiene el ratón de la computadora, mediante la acción de arrastrar-soltar, se dispone de los elementos en el tablero de dibujo; el enlace es mediante un conector, mismo que permite solamente nodos validados por el circuito lógico que dispone el conector. En la parte visual, el mover con el ratón uno de los elementos, borra las conexiones asociadas a él. También es importante indicar que en las conexiones lícitas los nodos se tornan de color verde.

Al hacer click con el botón derecho del ratón en construir, el esquema dinámico se convierte en estático, determinándose el valor de cada uno de las propiedades termodinámicas y almacenándose en una lista, además, graficándolo en el diagrama isentrópico a partir de ellas. Además, se puede regresar a la ventana de dibujo y cambiar tanto propiedades como configuración fácilmente. Los resultados obtenidos son muy consistentes a los obtenidos si se usa otro método de solución, la desviación relativa es muy bajo.

4.2. Recomendaciones

El desarrollo del presente proyecto se ha enfocado en la simulación del ciclo ideal Rankine con elementos que permiten armar circuitos termodinámicos en diversas configuraciones, analizado desde el punto de vista termodinámico, se puede implementar como complemento a ésta aplicación, considerar las caídas de presión en las tuberías, el

intercambio de energía con el entorno, establecer rango de presiones en las que puede operar cada etapa de la turbina asemejando a una turbina real.

Mediante el uso de la formulación IAPWS-f97 expresadas en parámetros adimensionales es posible abarcar otros proyectos complementarios al desarrollado en esta tesis, uno que se puede citar y tendría mucha importancia es el contar con una aplicación que permita la determinación de las propiedades del agua en cualquiera de las cinco regiones ingresando dos parámetros como por ejemplo la presión y la calidad, que mediante las transformaciones adecuadas se determine el resto de propiedades.

La representación gráfica en diagramas termodinámicos es muy importante, se recomienda como futura implementación, agregar los diagramas termodinámicos de presión-volumen, entalpía-entropía como complementos al diagrama temperatura-entropía, la información importante que de ellas se puede extraer y compartir en el estudio de los ciclos de potencia de vapor es útil. Ello deriva en un proceso de enseñanza- aprendizaje de mayor valor agregado.

Una limitación que presenta esta aplicación al contar con un circuito termodinámico de ciclo Rankine en la que se intercale un recalentador anterior a un precalentador cerrado, despliega resultados no consistentes en lo referente a la fracción másica.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Affonso, R. R. W., da Silva, E. B., de Lourdes Moreira, M., & Heimlich, A. (s.f.). Computer codes for the calculation of thermodynamic properties of water.

Álvarez, M., & Barbato S. (2006). Calculation of the Thermodynamic Properties of Water Using The IAPWS Model. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 51, 891-900.

Balmer, R. T. (2011). Chapter 12 - Mixtures of Gases and Vapors. En *Modern Engineering Thermodynamics* (pp. 405-446). Boston: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374996-3.00012-9>

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica*. México, D.F.: McGraw-Hill.

Chapra, Steven C. & Canale Raymond P.(1988). *Métodos Numéricos para Ingenieros*, México, D.F.: McGraw-Hill.

Christoph Müller, W. (1994). Fast and accurate water and steam properties programs for two-phase flow calculations. *Nuclear Engineering and Design*, 149(1), 449-458. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(94\)90310-7](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)90310-7)

International Association for the Properties of Water and Steam, 1997, IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamics Properties of Water and Steam, IAPWS Release, IAPWS Secretariat.

Massoud, M. (2005). *Engineering thermofluids*. Springer.

Srinivas, T., & Gupta, A. (2007). Thermodynamic Analysis of Rankine Cycle with Generalisation of Feed Water Heaters. *Journal of the Institution of Engineers(India)*, Part MC, Mechanical Engineering Division, 87, 56-63.

The International Association for the Properties of Water and Steam (2014). *The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam*: <http://www.iapws.org/relguide/Supp-PHS12-2014.pdf>

Wagner, W., & Pruss, A. (1993). International equations for the saturation properties of ordinary water substance. Revised according to the international temperature scale of 1990. Addendum to J. Phys. Chem. Ref. Data 16, 893 (1987). *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 22(3), 783-787.

Wagner, W., Saul, A., & Pruss, A. (1994). International equations for the pressure along the melting and along the sublimation curve of ordinary water substance. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 23(3), 515-527.

ANEXOS

Anexo 1: Guía general del uso del software

El software de simulación del Ciclo Rankine ideal para diferentes configuraciones, ha sido creado con el fin de servir como herramienta que acompañe al usuario de termodinámica en el proceso de enseñanza-aprendizaje de los ciclos de potencia de vapor.

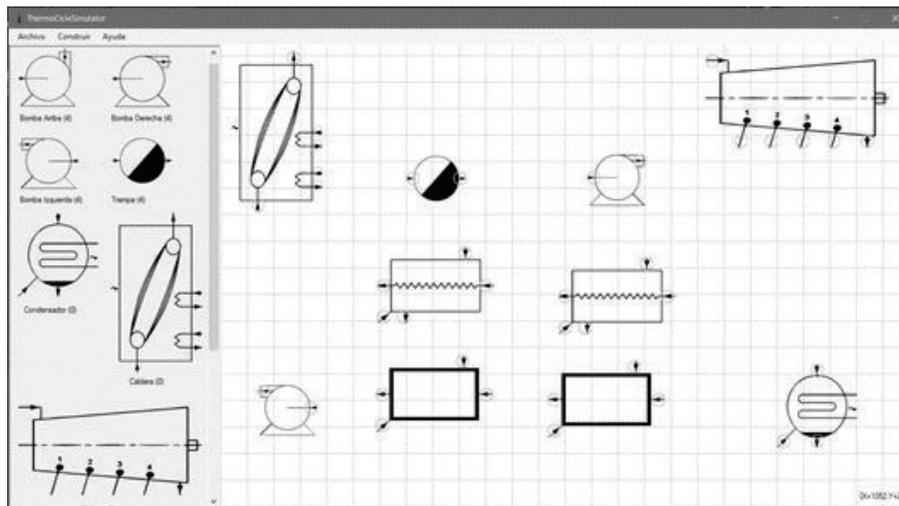
El software como tal es amigable tanto en la parte de esquematización como en la parte de diagramación, así como en la generación del reporte del problema a simular.

El software empleado para el desarrollo de esta aplicación es Visual Studio.net, utilizado por su versatilidad en el manejo de entidades y atributos usados en esta aplicación. Esta aplicación está orientada básicamente a usuarios universitarios sean docentes o alumnos que en su malla académica tengan la asignatura de termodinámica aplicada.

Esta aplicación requiere de un ordenador en ambiente Windows con una velocidad del procesador de 2.40 GHz y 3 MB en RAM y una disponibilidad de espacio en el disco de 800 MB.

La instalación de la aplicación es sencilla, mientras que el uso de la aplicación, es sencilla e intuitiva y consta de tres etapas, la primera la esquematización del circuito termodinámico, la segunda la diagramación en el plato T-s y la tercera la generación del reporte en formato portable pdf.

1. Esquematización:



Al abrir la aplicación, se dispone de una ventana como la mostrada en la figura anterior. Para realizar un circuito termodinámico en alguna configuración se siguen los siguientes pasos:

1.1. Arrastrar el ícono que corresponde a cada uno de los elementos requeridos para armar el circuito termodinámico, ubicándolo en la posición del lienzo de dibujo que desee. Para eliminar el ícono, se lo puede hacer mediante clickeo del botón derecho del ratón y seleccionar “*eliminar elemento*”, como también “*arrastrar*” hacia la derecha del lienzo.

1.2. El ícono *turbina de vapor*, contiene una ventana de diálogo en la que se valida información de entrada a saber: Presión y temperatura a la entrada de la turbina y las presiones a las que van a trabajar cada uno de los elementos enlazados a la turbina, por ejemplo, la presión del condensador, la presión de recalentamiento, la presión del precalentador cerrado, etc. Además de seleccionar las condiciones sean reales o isentrópicas a la que va a trabajar la turbina de vapor.

Presiones_turbina

Presión_in: [MPa] Temperatura_in: [K]

Presión_01: [MPa] Presión_02: [MPa]

Presión_recalentamiento_01: [MPa]

Presión_03: [MPa] Presión_04: [MPa]

Presión_recalentamiento_02: [MPa]

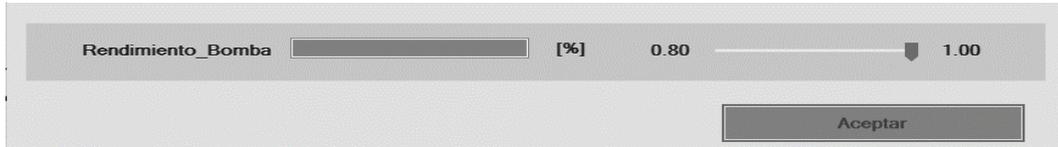
Presión_05: [MPa] Presión_06: [MPa]

Presión_out: [MPa]

Rendimiento_Turbina [%] 0.80 1.00

Aceptar

El ícono *bomba*, contiene una ventana de diálogo en la que se valida información de las condiciones isentrópicas y reales a la que opera dicho dispositivo.

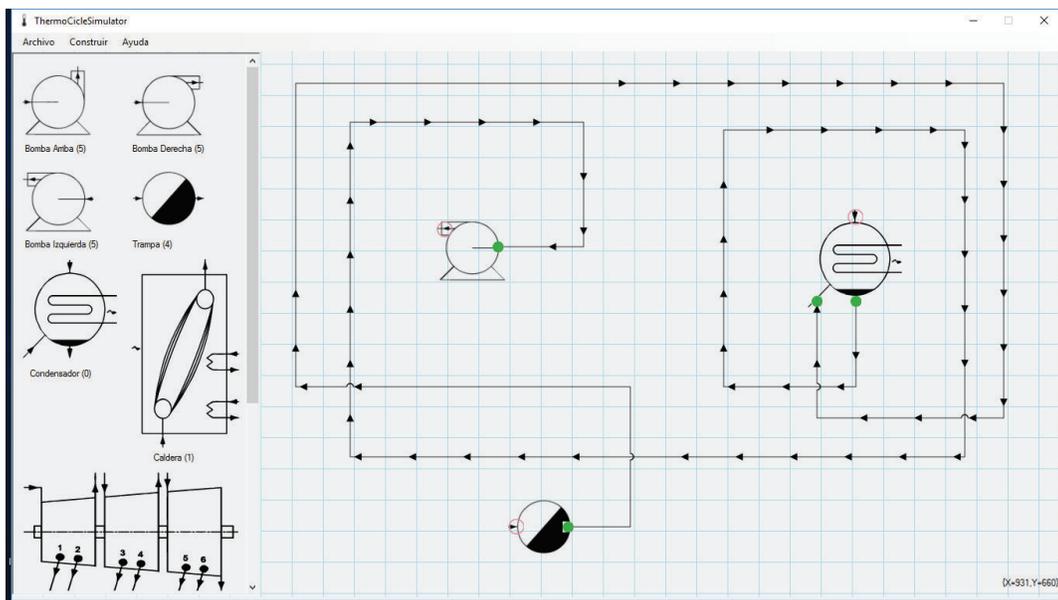


1.3. Para enlazar entre *íconos*, clicar entre el nodo de salida del ícono y el nodo de llegada del otro ícono, en las conexiones lícitas, se activa “*punto verde*”, señal de que conexión válida, en caso contrario no permite enlace.

De acuerdo a la densidad de los íconos en el lienzo de dibujo, los enlaces permitidos entre íconos muestran a los conectores que cruzan, pero no se enlazan; además de una “intermitencia” con la dirección del flujo.

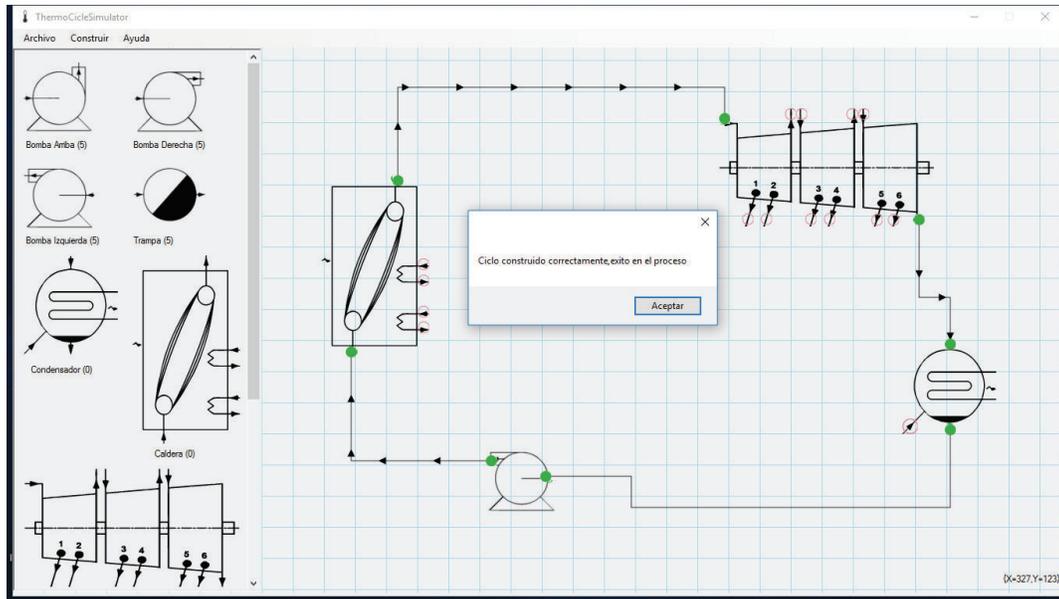
Para eliminar un conector, es necesario clicar el botón derecho del ratón y escoger la opción eliminar.

En conector además permite al usuario dar el “camino” a seguir desde el nodo de salida hasta el nodo de llegada, clicando en lienzo el punto donde cambia de dirección el conector como se muestra en la figura siguiente.



1.4. Para confirmar y validar la construcción correcta del circuito termodinámico, en la barra de archivos, clicar en “*construir*”, luego clicar en “construir”, se mostrará un mensaje de texto “*Circuito construido correctamente, éxito en el proceso*”.

Posteriormente en la barra de archivos, clicar en “construir”, luego clicar en “*mostrar*”, se desplegará una ventana emergente en la que se visualiza dos secciones, la sección de la izquierda muestra el circuito termodinámico validado y en la sección de la derecha muestra el diagrama isentrópico.

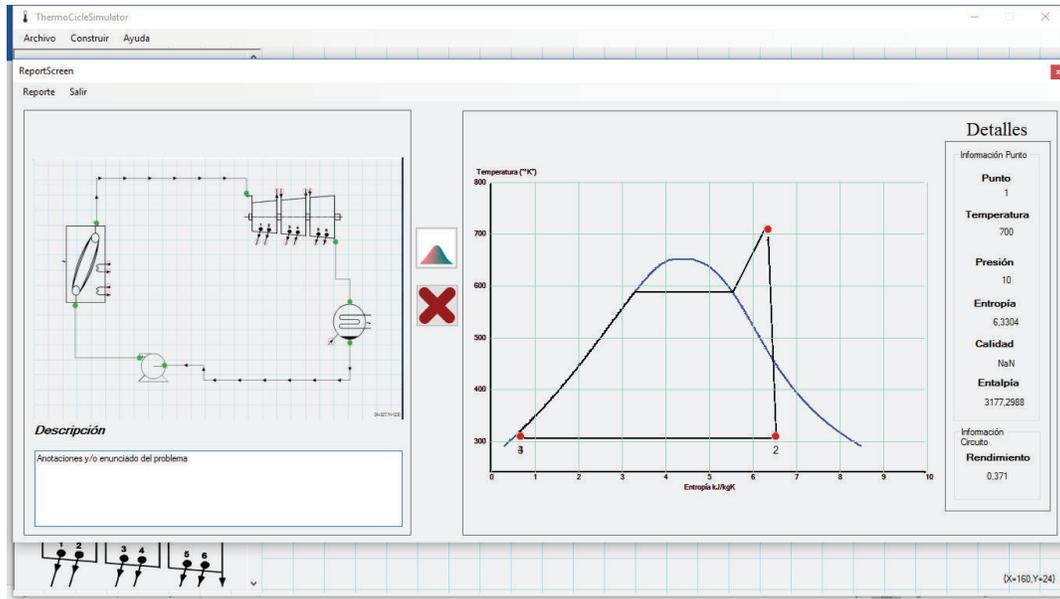


Al ubicar el cursor del ratón en cada punto geométrico “*punto rojo*”, a la derecha del diagrama se despliega los valores de las propiedades termodinámicas del fluido en dicho punto, dependiendo de la región en la que se halle dentro del diagrama T-s.

En la parte inferior del esquema del circuito termodinámico, se puede ingresar el enunciado y/o anotaciones importantes del mismo.

En la parte central de la ventana, se tiene la opción de “mostrar” la campana de saturación en el diagrama T-s, activada por defecto u ocultar al clicar en el ícono dado.

Al cerrar esta ventana emergente, se regresa a la anterior para realizar una modificación de los parámetros de funcionamiento o realizar otro circuito termodinámico.



Al clicar en Reporte, se puede almacenar en formato pdf el reporte del circuito termodinámico realizado, el mismo que consta de fecha de realización de la simulación, imagen del circuito termodinámico, imagen del diagrama temperatura-entropía, cuadro de valores con las propiedades termodinámicas de cada conector entre puertos que están a la misma presión, así como también la zona de comentarios y/o anotaciones. Un modelo de reporte se muestra en la página siguiente.

EJERCICIO 30/5/2017 12:24:53

REPORTE DE SIMULACIÓN DE TERMODINAMICA

CIRCUITO TERMODINÁMICO

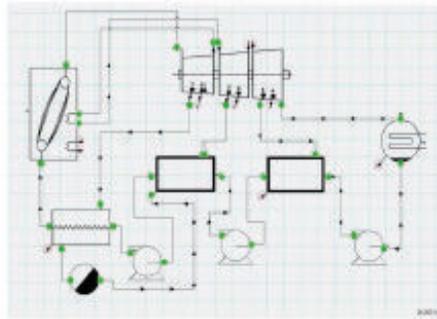


DIAGRAMA T-S

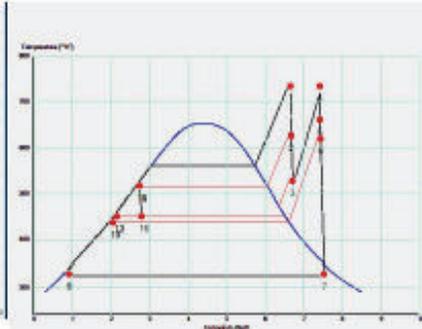


TABLA DE DATOS RELACIONADOS AL CIRCUITO TERMODINÁMICO

# Tuberia	Temp. [K]	Pres. [MPa]	s [kJ/kg-K]	h [kJ/kg]	Calidad	Flujo
1	723	7	6,6346	3287,7935	NaN	1
2	620,7402	3,5	6,6507	3098,9944	NaN	0,1386
3	526,7693	1,6	6,6919	2928,6064	NaN	0,8614
4	723	1,6	7,3943	3363,0103	NaN	0,8614
5	654,0489	1	7,4056	3223,7759	NaN	
6	614,5342	0,75	7,4123	3145,0646	NaN	0,131
7	338,1377	0,025	7,5112	2509,7579	0,9539	0,731
8	338,1377	0,025	0,8935	272,0663	0	
9	338,2013	0,75	0,8938	272,8878	NaN	
10	440,9264	0,75	2,0196	709,3036	0	
11	440,9488	1	2,0199	709,6123	NaN	
12	453,0748	1	2,1384	762,652	0	
13	453,4714	3,5	2,1392	765,7832	NaN	
14	515,7516	3,5	2,7255	1049,8604	0	

15	515,7516	3,5	2,7255	1049,8604	0	
16	453,0748	1	2,7723	1049,8604	0,1425	

$\eta_t = 0,3738$

Comentarios

Las presiones de de la turbina son 7.00[MPa], 3.50[MPa], 1.60[MPa], 1.00[MPa] , 0.75[MPa] y 0.025[MPa], opera una turbina(95%) , con un FWH-C y dos FWH-O y un condensador respectivamente, las bombas operan al 85%.

Anexo 2: Valores numéricos para los parámetros adimensionales de la energía libre de Helmholtz

Los valores numéricos de los coeficientes y exponenciales de parámetros adimensionales de la región 1:

Región 1			
i	l1	J1	n1
1	0	-2	1.4632971213167000E-01
2	0	-1	-8.4548187169114000E-01
3	0	0	-3.7563603672040000E+00
4	0	1	3.3855169168385000E+00
5	0	2	-9.5791963387872000E-01
6	0	3	1.5772038513228000E-01
7	0	4	-1.6616417199501000E-02
8	0	5	8.1214629983568000E-04
9	1	-9	2.8319080123801000E-04
10	1	-7	-6.0706301565874000E-04
11	1	-1	-1.8990068218419000E-02
12	1	0	-3.2529748770505000E-02
13	1	1	-2.1841717175414000E-02
14	1	3	-5.2838357969930000E-05
15	2	-3	-4.7184321073267000E-04
16	2	0	-3.0001780793026000E-04
17	2	1	4.7661393906987000E-05
18	2	3	-4.4141845330846000E-06
19	2	17	-7.2694996297594000E-16
20	3	-4	-3.1679644845054000E-05
21	3	0	-2.8270797985312000E-06
22	3	6	-8.5205128120103000E-10
23	4	-5	-2.2425281908000000E-06
24	4	-2	-6.5171222895601000E-07
25	4	10	-1.4341729937924000E-13
26	5	-8	-4.0516996860117000E-07
27	8	-11	-1.2734301741641000E-09
28	8	-6	-1.7424871230634000E-10
29	21	-29	-6.8762131295531000E-19
30	23	-31	1.4478307828521000E-20
31	29	-38	2.6335781662795000E-23
32	30	-39	-1.1947622640071000E-23
33	31	-40	1.8228094581404000E-24
34	32	-41	-9.3537087292458000E-26

Los valores numéricos de los coeficientes y exponenciales de parámetros adimensionales de la región 2:

(Parte residual)				(Parte ideal)		
<i>i</i>	<i>lr</i>	<i>Jr</i>	<i>nr</i>	<i>i</i>	<i>Jo</i>	<i>n0</i>
1	1	0	-1.7731742473213000E-03	1	0	-9.6927686500217000E+00
2	1	1	-1.7834862292358000E-02	2	1	1.0086655968018000E+01
3	1	2	-4.5996013696365000E-02	3	-5	-5.6087911283020000E-03
4	1	3	-5.7581259083432000E-02	4	-4	7.1452738081455000E-02
5	1	6	-5.0325278727930000E-02	5	-3	-4.0710498223928000E-01
6	2	1	-3.3032641670203000E-05	6	-2	1.4240819171444000E+00
7	2	2	-1.8948987516315000E-04	7	-1	-4.3839511319450000E+00
8	2	4	-3.9392777243355000E-03	8	2	-2.8408632460772000E-01
9	2	7	-4.3797295650573000E-02	9	3	2.1268463753307000E-02
10	2	36	-2.6674547914087000E-05			
11	3	0	2.0481737692309000E-08			
12	3	1	4.3870667284435000E-07			
13	3	3	-3.2277677238570000E-05			
14	3	6	-1.5033924542148000E-03			
15	3	35	-4.0668253562649000E-02			
16	4	1	-7.8847309559367000E-10			
17	4	2	1.2790717852285000E-08			
18	4	3	4.8225372718507000E-07			
19	5	7	2.2922076337661000E-06			
20	6	3	-1.6714766451061000E-11			
21	6	16	-2.1171472321355000E-03			
22	6	35	-2.3895741934104000E+01			
23	7	0	-5.9059564324270000E-18			
24	7	11	-1.2621808899101000E-06			
25	7	25	-3.8946842435739000E-02			
26	7	8	1.1256211360459000E-11			
27	7	36	-8.2311340897998000E+00			
28	9	13	1.9809712802088000E-08			
29	10	4	1.0406965210174000E-19			
30	10	10	-1.0234747095929000E-13			
31	10	14	-1.0018179379511000E-09			
32	16	29	-8.0882908646985000E-11			
33	16	50	1.0693031879409000E-01			
34	18	57	-3.3662250574171000E-01			
35	20	20	8.9185845355421000E-25			
36	20	35	3.0629316876232000E-13			
37	20	48	-4.2002467698208000E-06			
38	21	21	-5.9056029685639000E-26			
39	22	53	3.7826947613457000E-06			
40	23	39	-1.2768608934681000E-15			
41	24	26	7.3087610595061000E-29			
42	24	40	5.5414715350778000E-17			
43	24	58	-9.4369707241210000E-07			

Los valores numéricos de los coeficientes y exponenciales de parámetros adimensionales de la región 4:

Región 4(Saturación)	
i	n0
1	1.1670521452767000E+03
2	-7.2421316703206000E+05
3	-1.7073846940092000E+01
4	1.2020824702470000E+04
5	-3.2325550322333000E+06
6	1.4915108613530000E+01
7	-4.8232657361591000E+03
8	4.0511340542057000E+05
9	-2.3855557567849000E-01
10	6.5017534844798000E+02