

Extraction optimal conditions evaluation in regenerative steam power plants by a computational tool

Vanessa Hurtado^a, Alejandro Bolívar^b y Ángel D. Almarza^{*b}

^a*Departamento de Térmica y Energética, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

^b*Departamento de Computación, Dirección de Estudios Básicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.*

Abstract.- Steam power plants are widely used to supply the world's energy demand. Improvement in the efficiency of such systems has been studied from different perspectives as adjustments in cycle operation scheme, including the analysis of use of different working fluids, and materials of the equipment involved. Thus, regenerative steam power plants allow an improvement in efficiency by the reduction of the system heat demand. In this sense, a computational tool is proposed to determinate in regenerative cycles optimal extraction conditions, at first, thermal calculations associated with each of the elements of the system and estimation of thermodynamic properties required for this, in order to obtain the graphical and analytical behavior of the decrease in the heat demand of the cycle with respect to heating suffered by the water fed to the boiler, which is closely linked to the conditions of the extraction taken for the regenerator, which in turn are related with the improvement in the thermal efficiency of the cycle.

Keywords: regenerative rankine cycle; optimization; decrease in heat demand.

Evaluación de las condiciones óptimas de extracción en plantas de potencia a vapor regenerativas por medio de una herramienta computacional

Resumen.- Las centrales termoeléctricas a vapor son ampliamente utilizadas para suplir la demanda energética mundial. La mejora en la eficiencia de este tipo de sistemas ha sido estudiada desde diversas perspectivas, como lo son ajustes en el esquema de operación del ciclo, incluyendo el análisis de uso de distintos fluidos de trabajo, y de materiales de los equipos involucrados. Así, las plantas de potencia a vapor regenerativas permiten obtener una mejora en la eficiencia a partir de la disminución de la demanda de calor en el sistema. En este sentido, se propone una herramienta computacional por medio de la cual se determinan las condiciones óptimas de extracción en ciclos regenerativos, tomando como punto de partida los cálculos térmicos asociados a cada uno de los elementos del sistema y la estimación de las propiedades termodinámicas requeridas para ello, a los fines de obtener el comportamiento gráfico y analítico de la disminución de la demanda de calor del ciclo con respecto al calentamiento sufrido por el agua de alimentación a la caldera, que está estrechamente vinculado a las condiciones de la extracción tomada para el regenerador, que a su vez están relacionadas con la mejora en la eficiencia térmica del ciclo.

Palabras claves: ciclo rankine regenerativo; optimización; disminución de demanda de calor.

Recibido: abril 2018

Aceptado: junio 2018

1. Introducción

Las centrales termoeléctricas son ampliamente utilizadas y prácticamente las responsables del

80 % de la producción mundial de electricidad. Así, este tipo de plantas producen cerca del 91 % de la demanda energética de Estados Unidos y el 78 % de la de Europa [1] y se prevé un incremento del 70 % en la demanda mundial de energía eléctrica para el año 2035 [2], lo cual justifica la pertinencia de éste tipo de sistemas, sin dejar de reconocer los esfuerzos realizados en materia de energías renovables.

Dentro de este contexto, el comportamiento de

*Autor para correspondencia: Ángel D. Almarza
adalmarza@gmail.com

la eficiencia de las centrales térmicas a vapor ha sido objeto de análisis desde diversas perspectivas, encontrándose entre las opciones más comunes para mejorarlo, el uso del recalentamiento y la regeneración. Sin embargo, de acuerdo con Wang y otros [3], aún son muy complejos e incluso escasos los estudios específicos de optimización del esquema regenerativo en el ciclo Rankine.

Así, Rashidi y otros [4], evalúan para condiciones específicas, la relación entre parámetros de operación del ciclo regenerativo, como lo son la presión de condensación y la presión de los calentadores con la eficiencia térmica del mismo, a través del estudio de la primera y segunda ley en este tipo de sistemas. Por otro lado, Vianna y otros [5], han enfocado el análisis de minimización del consumo de combustible, y costos de operación y mantenimiento en plantas de potencia a vapor, desde otra perspectiva, a través de modelos de programación lineal. Paralelamente, se han llevado a cabo evaluaciones desde el punto de vista técnico y económico de la incorporación de recalentamiento y regeneración, como una forma de aumentar la eficiencia de los sistemas energéticos en contextos específicos como el sector azucarero [6].

En tal sentido, con la intención de analizar el efecto de las condiciones de operación de extracción en ciclo Rankine regenerativo y determinar de forma automática la presión óptima de operación del regenerador, que está vinculada a mejores valores de eficiencia energética, queda planteada la meta del presente trabajo. Este estudio, propone el diseño y desarrollo de una herramienta computacional, lo cual requiere el análisis de los cálculos térmicos respectivos, partiendo de un ciclo Rankine simple e incorporando las adaptaciones asociadas a la regeneración con un único calentador, tomando también en consideración, la determinación de los estados y propiedades termodinámicas correspondientes asociadas al uso de tablas y gráficos cuyo manejo puede ser engorroso [7]. Lo cual permite al usuario disponer de las curvas que muestran el comportamiento de la disminución de la demanda de calor y la mejora de la eficiencia térmica, la expresión analítica de la función que representa dicho comportamiento; así

como también, los valores tabulados que permiten obtener tales relaciones.

2. Desarrollo de la investigación

La investigación realizada consta de las siguientes fases:

2.1. Fase I: Estudio del comportamiento térmico del ciclo

La evaluación del comportamiento térmico del ciclo Rankine, entendido como el ciclo termodinámico que describe las interacciones de los componentes básicos de una central térmica a vapor [8], tiene como punto de partida la aplicación del balance de masa y energía, la segunda ley de la termodinámica interpretada desde el concepto de eficiencia y la determinación de las propiedades termodinámicas respectivas.

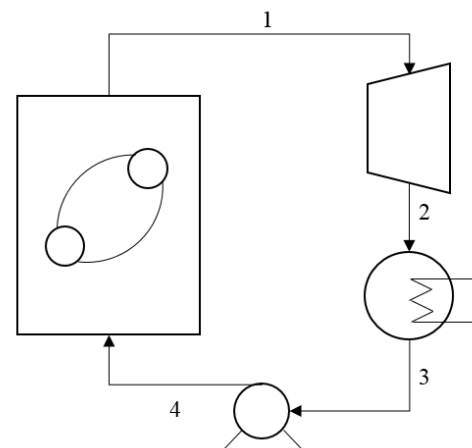


Figura 1: Ciclo Rankine Simple

En ese sentido, en un ciclo Rankine ideal simple, como el mostrado en la Figura 1, el fluido de trabajo experimenta, cuatro procesos considerados internamente reversibles, los cuales son:

1–2: Expansión adiabática y reversible del fluido de trabajo a través de la turbina, desde la presión de operación de la caldera hasta la de operación del condensador.

2–3: Transferencia de calor desde el fluido de trabajo hacia un fluido de enfriamiento a presión constante, en un condensador.

3-4: Compresión adiabática y reversible a partir de líquido saturado en la bomba.

4-1: Transferencia de calor hacia el fluido de trabajo a presión constante, en una caldera.

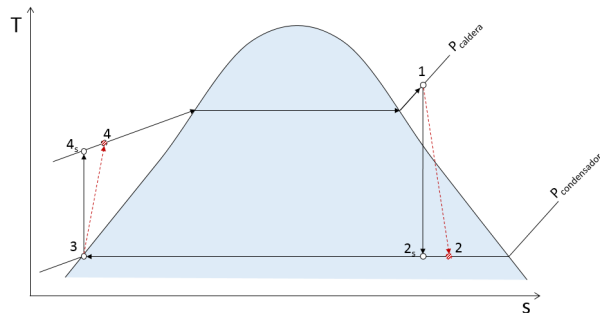


Figura 2: Diagrama T-s de un Ciclo Rankine Simple

Es de hacer notar que, son diversas las pérdidas e irreversibilidades presentes en cada uno de los procesos descritos. En tal sentido, se toman en consideración los efectos de éstas sobre el proceso de bombeo y expansión, a través de las eficiencias isoentrópicas. Parámetros que estiman la desviación existente entre el trabajo real y el isoentrópico, asociado al funcionamiento de dichos equipos, tal como queda evidenciado en las trayectorias de los procesos de la Figura 2.

Así, el parámetro que permite evaluar la utilización del calor y su transformación en energía útil, conocido como eficiencia térmica del ciclo Rankine, queda según la Ecuación (1)

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}} \quad (1)$$

donde:

W_{neto} : Trabajo neto del ciclo [kJ/kg],

$Q_{entrada}$: Calor Transferido al fluido de trabajo [kJ/kg].

La regeneración es implementada con la intención de aumentar el rendimiento térmico de las centrales térmicas a vapor, concepto que ha sido ampliamente aceptado en diversos sistemas térmicos aprovechando intercambiadores de calor de alto rendimiento, que operan con fuentes de energía a temperaturas relativamente bajas lo cual mejora la eficiencia notablemente [9]. Así, la regeneración, entendida como el precalentamiento

del agua de alimentación a la caldera [8], supone una minimización de la demanda de energía en este equipo, teniendo en cuenta una compensación por el pequeño descenso en el trabajo neto producido.

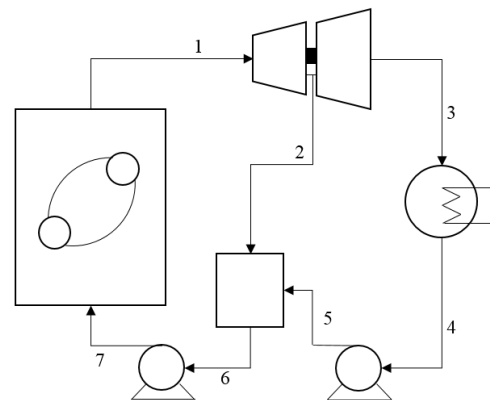


Figura 3: Ciclo Rankine regenerativo

El esquema de la Figura 3, muestra un ciclo Rankine regenerativo, que emplea un calentador de agua de alimentación abierto, donde el vapor que sale de la caldera, es sometido a una primera fase de expansión e inmediatamente después, una fracción del flujo másico total es extraída a ciertas condiciones para emplearlo como medio de calentamiento en el regenerador. El resto del fluido, una vez ha ocurrida la extracción, sufre una segunda expansión, hasta la presión de operación del condensador, de donde se obtiene líquido saturado, que es impulsado, por medio de una bomba hacia el calentador, en donde se mezcla con la extracción. La mezcla resultante, en condiciones de líquido saturado, se comprime hasta la presión de operación de la caldera. La Figura 4 muestra el comportamiento de las trayectorias de los procesos descritos.

En este sentido, las condiciones óptimas de operación de un ciclo Rankine regenerativo con una sola extracción están vinculadas con mayores valores de eficiencia térmica o interpretado de otro modo, con la mayor minimización de la demanda de energía por calor en la caldera. Para conseguir dichas condiciones, es fundamental el análisis del proceso a través del diagrama de Mollier (h-s), mostrado en la Figura 5, que permite visualizar

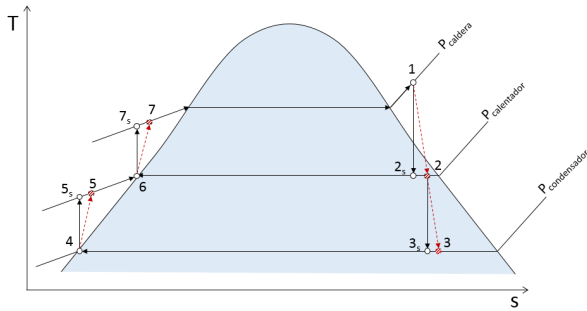


Figura 4: Diagrama T-s Ciclo Rankine regenerativo

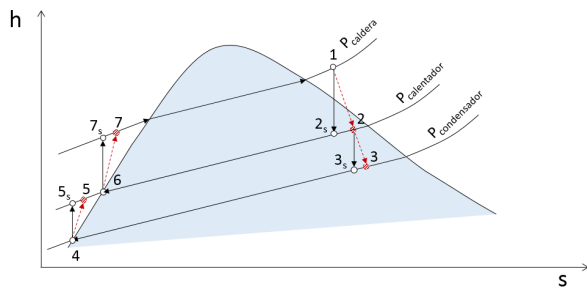


Figura 5: Diagrama h-s Ciclo Rankine regenerativo

paralelamente lo que ocurre desde la perspectiva de la primera y segunda ley de la termodinámica.

Así, el efecto que podría producir la regeneración sobre la demanda de calor, para una misma salida de trabajo neto, referida a la de un ciclo operando en forma simple entre las mismas presiones de operación de la caldera y el condensador, respectivamente; puede analizarse, por medio de la aplicación del balance de energía, según la Ecuación (2)

$$\dot{m}_{opsimple} \cdot (h_1 - h_3) = \dot{m}_{opreg} \cdot (h_1 - h_2) + (\dot{m}_{opreg} - \dot{m}_{ext}) \cdot (h_2 - h_3), \quad (2)$$

donde:

$\dot{m}_{opsimple}$: Flujo másico de operación del ciclo Rankine simple [kg/s];

\dot{m}_{opreg} : Flujo másico de operación del ciclo Rankine regenerativo [kg/s];

\dot{m}_{moext} : Flujo másico de la extracción en el ciclo regenerativo [kg/s].

Al reordenar la Ecuación (2), da como resultado

la Ecuación (3)

$$\dot{m}_{opsimple} = \dot{m}_{opreg} \cdot \dot{m}_{ext} \left[1 - \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_3)} \right], \quad (3)$$

por medio del balance de energía en el calentador, resulta la Ecuación (4)

$$\dot{m}_{ext} \cdot h_2 + (\dot{m}_{opreg} - \dot{m}_{ext}) \cdot h_5 = \dot{m}_{opreg} \cdot h_6, \quad (4)$$

la Ecuación (4) puede reescribirse para obtener la Ecuación (5)

$$\dot{m}_{ext} = \dot{m}_{opreg} \frac{(h_6 - h_5)}{(h_2 - h_5)}. \quad (5)$$

Al sustituir la Ecuación (5) en la Ecuación (3), resulta la expresión para la relación de flujos de operación del ciclo regenerativo y el ciclo simple, según la Ecuación (6)

$$\frac{\dot{m}_{opreg}}{\dot{m}_{opsimple}} = \frac{(h_2 - h_5)}{\left[(h_2 - h_6) + \left[(h_6 - h_5) \cdot \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_3)} \right] \right]}. \quad (6)$$

Paralelamente, la disminución de calor de entrada al ciclo, como producto de la incorporación de la regeneración está en la Ecuación (7)

$$\begin{aligned} DDC &= \frac{Q_{simple} - Q_{reg}}{Q_{simple}} \\ &= 1 - \frac{Q_{reg}}{Q_{simple}}. \end{aligned} \quad (7)$$

donde:

DDC : Disminución de la demanda de calor [%].

Q_{simple} : Calor de entrada al Ciclo Rankine Simple [kJ].

Q_{reg} : Calor de entrada al Ciclo Rankine regenerativo [kJ].

(2) Al estimar los calores a través de balance de energía y sustituyendo en la Ecuación (7), resulta la Ecuación (8)

$$DDC = \left[1 - \frac{\dot{m}_{opreg}}{\dot{m}_{opsimple}} \cdot \frac{h_1 - h_7}{h_1 - h_a} \right] \cdot 100, \quad (8)$$

donde h_a , representa la entalpía de la corriente de entrada a la caldera, suponiendo un ciclo Rankine simple operando entre las presiones máxima y mínima del ciclo regenerativo.

Por otro lado, el cálculo del porcentaje de incremento en la eficiencia térmica del ciclo, al incorporar la regeneración, está en la Ecuación (9)

$$I\eta = \left[\frac{\eta_{reg} - \eta_{simple}}{\eta_{simple}} \right] \cdot 100, \quad (9)$$

donde

$I\eta$: Incremento en la eficiencia [%].

η_{reg} : Eficiencia Térmica del ciclo regenerativo.

Para expresar la eficiencia del ciclo regenerativo por la Ecuación (10)

$$\eta_{reg} = \frac{(h_1 - h_2) + \left[\left(1 - \left(\frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5} \right) \right) \cdot h_2 - h_3 \right]}{(h_1 - h_7)}. \quad (10)$$

2.2. Fase 2: Diseño de la herramienta computacional para la estimación de la determinación de la presión óptima de extracción

Una vez establecidos los modelos matemáticos correspondientes al análisis térmico del ciclo Rankine regenerativo con una sola extracción, fueron estructurados los módulos de cálculo respectivos y la organización operativa de la herramienta computacional.

Así, la Figura 6 muestra los elementos que constituyen la herramienta, especificando como requerimiento para efectuar la determinación de las condiciones óptimas de la extracción, los datos de entrada definidos por el usuario, que son: la presión de operación de la caldera, la temperatura de entrada a la turbina y la presión de operación del condensador, junto a las eficiencias isoentrópicas de la turbina. Es de hacer notar que, para los efectos del cálculo de la eficiencia térmica del ciclo, se consideró despreciable el trabajo consumido por las bombas.

Paralelamente, fueron definidos los módulos que constituyen el proceso a partir del cual son obtenidos los resultados. Siendo necesario disponer de las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo, a los fines de incorporar la estimación de las mismas. Para luego, de forma secuencial y haciendo un barrido de la presión de operación del calentador asociado a la extracción, entre los valores de presión máxima y mínima del ciclo, efectuar la determinación de la disminución

de la demanda de calor y la eficiencia térmica del mismo.

Todo lo cual, queda plasmado en una representación gráfica que muestra el comportamiento de la disminución porcentual de calor demandado por el ciclo en relación al calentamiento sufrido por el agua de alimentación de la caldera, debido a la extracción tomada del proceso de expansión.

2.3. Fase 3: Desarrollo de la herramienta

La estructura de una herramienta computacional está caracterizada por la implementación del paradigma de programación orientada a objetos, en lenguaje Java, lo cual permite obtener un producto de software portable, desde el punto de vista de sistema operativo.

La herramienta cuenta con un apartado para la estimación de propiedades termodinámicas tanto en la región de líquido comprimido, como de saturación y de vapor sobrecalentado, según sea el caso, cada una de ellas con sus respectivas estructuras de datos para el manejo lógico de la información. En segundo lugar, están los métodos de soporte, que permiten disponer de mecanismos para realizar operaciones a través de procedimientos estándares, para predecir el comportamiento matemático de la función y la determinación de su respectiva expresión analítica, incluyendo el cálculo de los coeficientes de una regresión polinomial de orden n , la solución de un sistema de ecuaciones lineales a través del método iterativo Gauss–Seidel, y por último la determinación de las raíces de un polinomio a través del método de división sintética de Newton. Para finalizar, fueron conformadas las distintas ventanas que integran la herramienta, asumiendo mecanismos de validación de entrada de datos, y la presentación de resultados tanto de forma gráfica como tabulada y las respectivas expresiones analíticas obtenidas.

3. Presentación y discusión de resultados

Siguiendo las fases de investigación planteadas, la interfaz gráfica cuenta con una ventana inicial, de acuerdo a la Figura 7. Donde el usuario debe suministrar los datos de entrada con los cuales

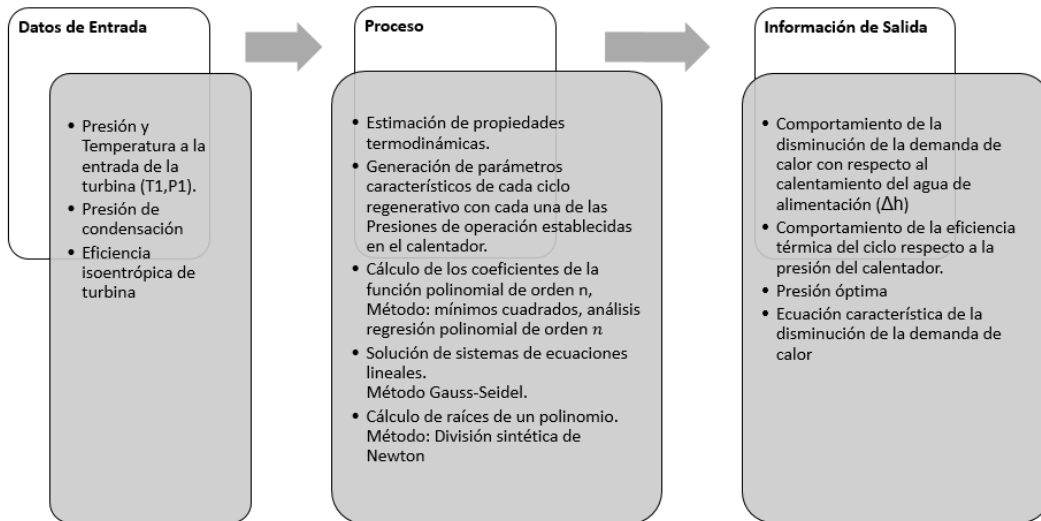


Figura 6: Elementos de diseño de la herramienta computacional

se realizan los cálculos térmicos respectivos, que dan lugar al análisis del proceso objeto de estudio y a la determinación de la presión óptima de la extracción.

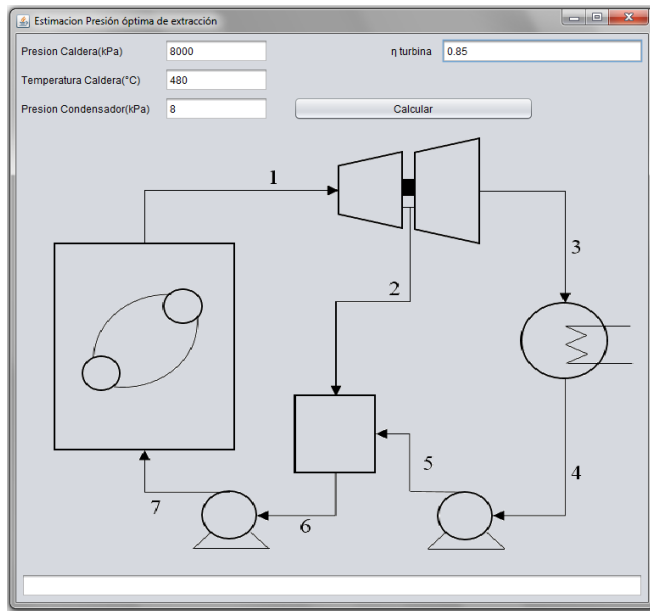


Figura 7: Ventana inicial de la herramienta

Una vez suministrada la información, y por medio del botón “Calcular”, la ventana principal del programa, referida a la Figura 8 muestra de forma gráfica el comportamiento de la

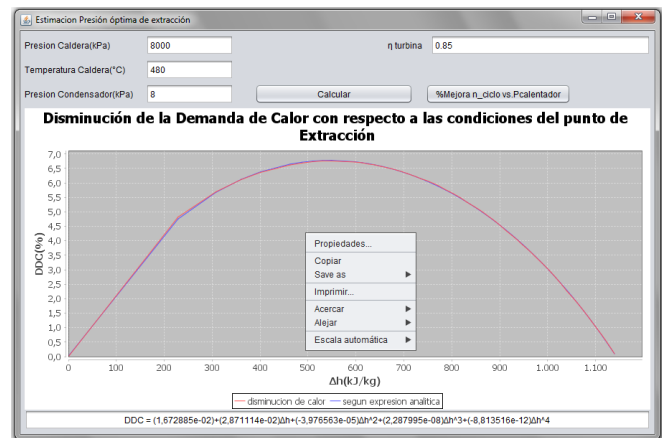


Figura 8: Ventana principal de la herramienta

disminución de la demanda de calor del ciclo con respecto al calentamiento que sufre el agua de alimentación, debido a la extracción. Dando como resultado, además, la expresión analítica de dicho comportamiento, que queda reflejada de forma gráfica en la misma figura. También, incorpora funciones para contemplar la posibilidad de guardar, imprimir, acercar o alejar y así, mejorar el análisis del gráfico resultante.

La Figura 9 muestra los resultados, en forma tabular, del cálculo de la disminución de la demanda de calor del ciclo en relación al

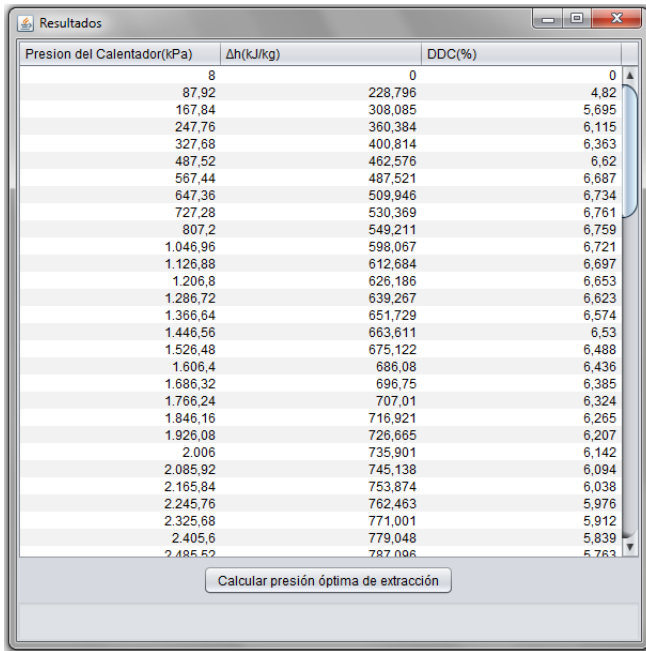


Figura 9: Estimaciones realizadas para el cálculo de la presión óptima de extracción

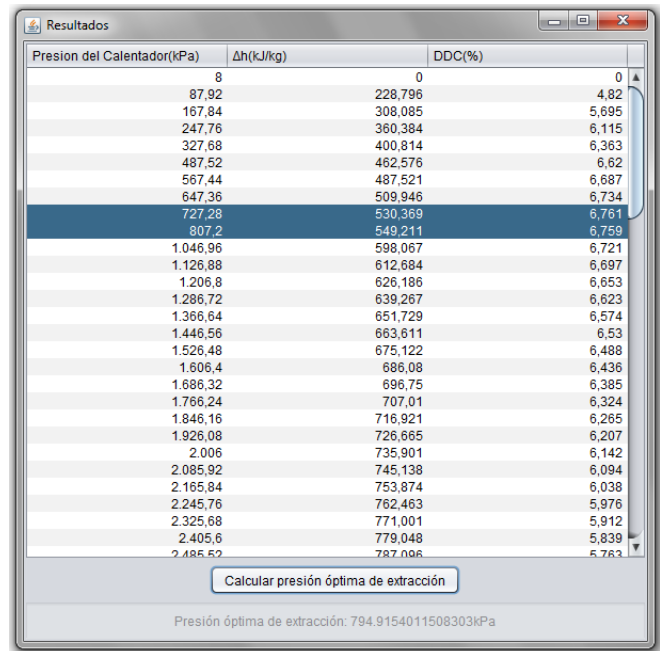


Figura 10: Cálculo de la presión óptima de extracción

calentamiento que sufre el agua de alimentación en el regenerador (calentador), proceso que está relacionado con la presión de operación de este último.

Así, la herramienta permite el cálculo de la presión óptima de operación, evidenciada en la Figura 10.

Una vez generados los resultados tabulados, se procede a estimar la expresión de la función de la disminución de la demanda de calor, a través de un análisis de regresión polinomial por el método de los mínimos cuadrados, que involucra además, de forma directa, la solución de un sistema lineal de ecuaciones y así poder establecer los coeficientes del polinomio $p(x)$ que representa la aproximación de la función, sistema resuelto a través del método iterativo de Gauss-Seidel.

Así, tomando como punto de partida el

polinomio obtenido

$$\begin{aligned}
 DDC &\cong p(\Delta h_i) \\
 &= (1,672885 \times 10^{-02}) \\
 &\quad + (2,871114 \times 10^{-02})\Delta h \\
 &\quad + (-3,976563 \times 10^{-05})\Delta h^2 \\
 &\quad + (2,287995 \times 10^{-08})\Delta h^3 \\
 &\quad + (-8,813516e \times 10^{-12})\Delta h^4
 \end{aligned}$$

y el resultado de la variable dependiente en cada caso evaluado, se calcula el error de acuerdo a la expresión representado en la Ecuación (11)

$$Error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p(\Delta h_i) - DDC_i)^2}{n + 1}} \quad (11)$$

Obteniéndose entonces para el caso analizado, un error de estimación de 0.00173, lo cual indica que existe un error de al menos una unidad en la tercera cifra decimal. El incremento de la eficiencia térmica del ciclo Rankine regenerativo alcanza un máximo en la presión óptima de operación, el cual queda determinado analíticamente evaluando la primera derivada de la ecuación característica y

posteriormente hallando las raíces del polinomio de tercer orden. Siendo la presión óptima de operación del regenerador 794.9154 kPa.

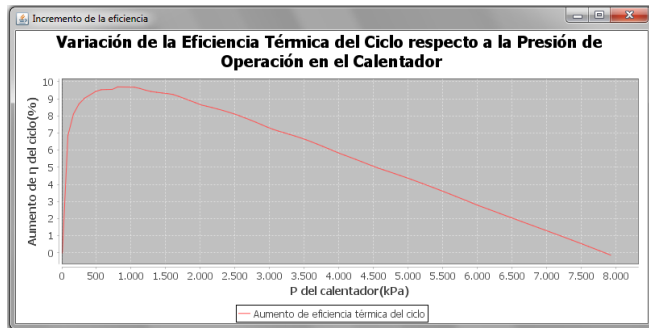


Figura 11: Variación de la eficiencia térmica del ciclo respecto a la presión de operación en el calentador

Por otro lado, la Figura 11 muestra el comportamiento del incremento de la eficiencia térmica respecto a la presión de operación del calentador, permitiendo comprobar el resultado alcanzado.

4. Conclusiones

La estimación de las condiciones óptimas de operación de la extracción en una planta de potencia a vapor regenerativa, implica el análisis y desarrollo de los cálculos térmicos de todos los procesos involucrados, estructurados a partir del primer y segundo principio de la termodinámica. Para lo cual se hace necesario, variar las condiciones de operación dentro del rango válido de presiones del proceso, definidas por las presiones máxima y mínima del ciclo que corresponde con la presión de operación de la caldera y del condensador respectivamente, resultando así un conjunto de variantes simultáneas de un ciclo Rankine regenerativo que deben ser resueltas matemáticamente, tomando en cuenta la estimación de las propiedades termodinámicas pertinentes.

La herramienta computacional desarrollada, se ha diseñado teniendo en consideración la portabilidad de la misma, y la presentación de resultados explícitos a través de los respectivos

gráficos y tablas, que permiten comprender la relación entre el calentamiento del agua de alimentación de la caldera producido en el regenerador y su vínculo con la disminución de la demanda de calor del ciclo que está asociada directamente a la presión de operación del regenerador (calentador). Así mismo, se evidencia el comportamiento de la eficiencia térmica del ciclo a través del rango de presiones del regenerador analizadas.

Paralelamente, la herramienta permite la estimación de la expresión analítica de la función que define la disminución de la demanda de calor con respecto al calentamiento ocurrido en el regenerador, siendo el error de la aproximación de la ecuación característica del orden de 0.00173, de donde se obtiene a partir de la determinación de las raíces de la primera derivada de la ecuación, el valor de la presión óptima de operación de dicho equipo.

Los elementos generados, representan el punto de partida para el análisis de situaciones que impliquen el cálculo de presiones óptimas con un número mayor de regeneradores, por medio de métodos tanto gráficos como analíticos e incluso incorporando procesos de recalentamiento.

5. Referencias

- [1] Unesco. Agua y energía, informe de las naciones unidas sobre del desarrollo de los recursos hídricos del mundo. Reporte Parte 1, División de Ciencias del Agua, Unesco, Perugia, Italia, 2014.
- [2] WEC. Consumo mundial de energía. Technical report, World Energy Council, Reino Unido, 2014.
- [3] Maojian Wang, Guilian Liu, and Chi Wai Hui. Novel shortcut optimization model for regenerative steam power plant. *Energy*, 138:529–541, 2017.
- [4] M.M. Rashidi, A. Aghagoli, and M. Ali. Thermodynamic analysis of a steam power plant with double reheat and feed water heaters. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014:1–11, 2014.
- [5] Dalessandro Soares Vianna, Jaime Batista de Sousa Junior, Edwin Benito Mitacc Meza y Marcilene de Fátima Dianin Vianna. Modelo de programação linear inteira mista para o dimensionamento ótimo de uma termelétrica – estudo de caso: Termelétrica do complexo logístico do açu. *Revista Eletrônica Gestão & Saúde*, 5(Extra 2):986–1001, 2015.
- [6] Álvaro A. Díaz Pérez, José C. Escobar Palacio, Osvaldo J. Venturini, Arnaldo M. Martínez Reyes,

Dimas J. Rúa Orozco, Electo E. Silva Lora, and Oscar A. Almazán del Olmo. Thermodynamic and economic evaluation of reheat and regeneration alternatives in cogeneration systems of the brazilian sugarcane and alcohol sector. *Energy*, 152:247–262, 2018.

- [7] Riley M. Gourde and Ben Akih-Kumgeh. A matlab program for the determination of thermodynamic properties of steam. *International Journal of mechanical engineering Education*, 45(3), 2017.
- [8] Michael J. Mora y Howard Shapiro. *Fundamentos de Termodinámica Técnica*. Reverté, España, 2004.
- [9] Shouyuan Huang and Xianfan Xu. A regenerative concept for thermoelectric power generation. *Applied Energy*, 185:119–125, 2017.