

# Análisis energético y exergético de una central termoeléctrica de 350 MW usando Visual Basic para aplicaciones

J.A. Jiménez García<sup>1\*</sup>, M.D. Duran García<sup>2</sup>, R. Torres Tovar<sup>1</sup>, N. Gaspar Sanchez<sup>1</sup> y D.M. Calderon Nepamuceno<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Centro Universitario UAEM Nezahualcóyotl Universidad Autónoma del Estado de México, Av. Bordo de Xochiaca S/N. Col. Benito Juárez, C.P. 57000, Nezahualcóyotl, Estado de México.

\*juan.jimenez.uaem@gmail.com

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. Ciudad Universitaria, Toluca Estado de México.

Área de participación: Ingeniería Química

## Resumen

Se presenta el análisis energético y exergético de la central termoeléctrica de vapor de 350 MW, que opera bajo un ciclo Rankine con recalentamiento y regeneración, y combustóleo como combustible. El análisis se realiza a diferentes regímenes de carga (100%, 98.4%, 80%, 75%, 66.6%, 50%, 30% y 25%) para ello, se desarrolló un modelo de simulación del comportamiento del ciclo térmico de vapor, la cámara de combustión y transferencia de calor en el generador de vapor, empleando Microsoft Excel 2010, con Visual Basic para aplicaciones como lenguaje de programación de diversas funciones, para determinar las propiedades termodinámicas de los fluidos de trabajo en el ciclo térmico de vapor, rutinas; para calcular la transferencia de calor en las superficies de intercambio de calor, y formularios de usuarios orientados a objetos, para realizar el cálculo térmico del hogar y el análisis del ciclo térmico de vapor, y el análisis exergético.

**Palabras clave:** Análisis Exergético, Central Térmica, Ciclo Rankine, Visual Basic para aplicaciones.

## Abstract

The energy and exergy analysis of the 350 MW steam thermoelectric power plant, which operates under a Rankine cycle with reheating and regeneration, and fuel oil as fuel is presented. The analysis is carried out at different load regimes (100%, 98.4%, 80%, 75%, 66.6%, 50%, 30% and 25%). For this, a simulation model of the steam thermal cycle behavior was developed. , the combustion chamber and heat transfer in the steam generator, using Microsoft Excel 2010, with Visual Basic for applications as a programming language of various functions, to determine the thermodynamic properties of the working fluids in the steam thermal cycle, routines; to calculate the heat transfer on the heat exchange surfaces, and object-oriented user forms, to perform the thermal calculation of the home and the analysis of the steam thermal cycle, and the exergy analysis.

**Key words:** Exergetic Analysis, Thermal Power Plant, Rankine Cycle, Visual Basic for applications.

## 1.- Introducción

De acuerdo con el Balance Nacional de Energía [SENER, 2017] el consumo de energía en México en el año 2016 superó, por primera vez, a la producción de energía primaria. Ahora, si bien el consumo de energía per cápita había tenido una tendencia decreciente desde el año 2013, en el 2016 este incrementó en un 6.1% respecto al año anterior.

En lo que respecta a la generación de energía eléctrica, se observó que en el transcurso del 2016 la producción ascendió a 1,153.24 PJ, reflejando un incremento del 3.2% respecto a lo observado durante 2016. Dicha producción se integra por la generación de las centrales eléctricas públicas 54.5%, las centrales de los

Productores Independientes de Energía (PIE) 28.5% y permisionarios de autoabastecimiento 17% y nuevos permisionarios de generación 0.3% [SENER, 2017].

El principal insumo energético de estas instalaciones fue el gas seco, registrando el 83.36% del total, seguido del combustóleo con un 13.13%, por lo que se observa que el combustóleo sigue siendo una fuente importante de energía primaria. [SENER, 2017]. En este contexto, las centrales térmicas (CT) públicas registran la mayor pérdida, comparadas con los productores independientes de energía. Así pues, analizando el contexto antes mostrado, se observa la importancia de realizar una optimización sobre los sistemas convencionales de generación de energía eléctrica [Habib y col., 1999; Ndlovu, & Majazi, 2014; Zhao y col., 2012] particularmente en las CT de Combustóleo, ya que estas aún representan un porcentaje importante de la generación total aun cuando se han implementado políticas para realizar la conversión de las centrales termoeléctricas a gas natural [CFE, 2012a]. Teniendo en cuenta lo anterior, en la presente investigación se realiza un análisis exergético de una central termoeléctrica, para ello se desarrolló un programa de cálculo que simula la operación de la central a diferentes regímenes de carga, basado en un sistema de ecuaciones de los estados termodinámicas en las que se dividió la central termoeléctrica para su estudio.

La central termoeléctrica analizada, cuenta con una potencia instalada de 350 MW, con una potencia nominal de 332.5 MW. El generadores de vapor tiene una capacidad de producción de vapor principal de 325.4 Kg/s a 541°C y 288 Kg/s de vapor recalentado a 541°C. La presión nominal del domo del generador de vapor es de 183 Bar y la presión de vapor recalentado es de 40 Bar. Se emplea combustóleo con una composición química de 83.64 %C, 11.3% H, 4.2% Azufre y 0.86% N+O. [CFE, 1987], se considera un ciclo Rankine con recalentamiento y dos regeneraciones [Moran & Shapiro, 2008; Cengel & Boles, 2012; Kitto & Stultz, 2005], para el análisis, cuyo diagrama simplificado y esquemático, se presenta en la Figura 1.0.

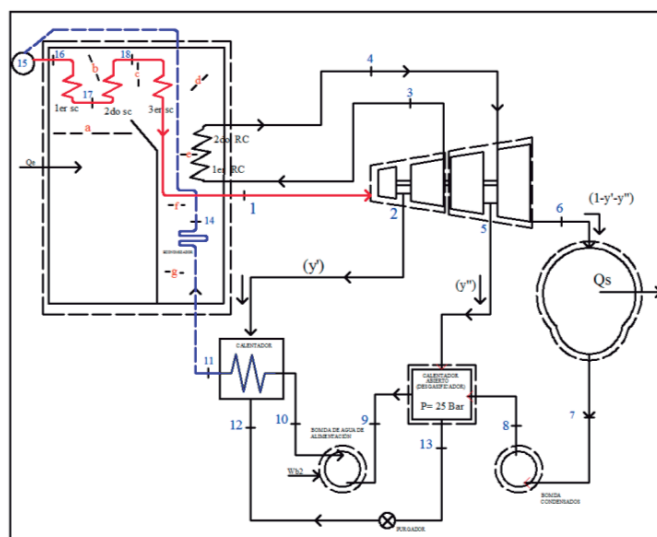


Figura 1. Ciclo Rankine con Recalentamiento y regeneración de la central termoeléctrica estudiada.

## 2.- Metodología

Para la validación del modelo en la Figura 1.0, se han rotulado dieciocho nodos para el vapor de agua, listados del 1 (línea de vapor sobrecalentado a turbina de vapor) al 18 (vapor sobrecalentado a la salida del segundo sobrecalentador) y siete nodos para los gases de combustión, listados de la a (salida de los gases de la cámara de combustión) a la g (salida de los gases del economizador).

Para cada elemento de la central termoeléctrica se realizó un análisis energético y exergético del volumen de control, tomando las siguientes consideraciones:

- Cada elemento en el ciclo fue considerado en estado estacionario.
- Las pérdidas de calor externas son consideradas menores al 5%.
- La turbina de vapor y las bombas de agua de alimentación tienen una eficiencia isentrópica del 85%.

- El efecto del cambio en la energía cinética y potencial es despreciable.
- Las variables independientes del generador de vapor son la temperatura del vapor y el flujo másico.
- Se conocen las variables geométricas del generador de vapor.
- Para el ciclo térmico de vapor, la extracción del condensador y su presión es considerada como una variable independiente.
- La geometría de la caldera es conocida, así como sus variables termodinámicas.

Los valores de las variables independientes, se tomaron del manual de operación del generador de vapor (MOGV) [CFE, 1987] para la validación del modelo.

La Figura 2.0, muestra el diagrama de flujo y la secuencia del análisis realizado en la presente investigación, se muestran las variables que se obtienen en cada módulo del programa, diferenciando aquellas que corresponden al vapor y al gas. En los apartados siguientes se explica cada uno de los módulos de cálculo más información al respecto puede encontrarse en Jiménez, 2015.

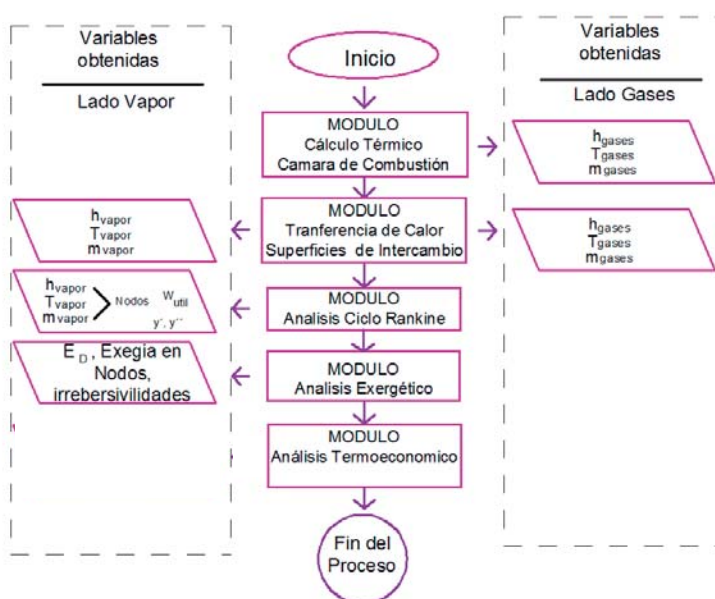
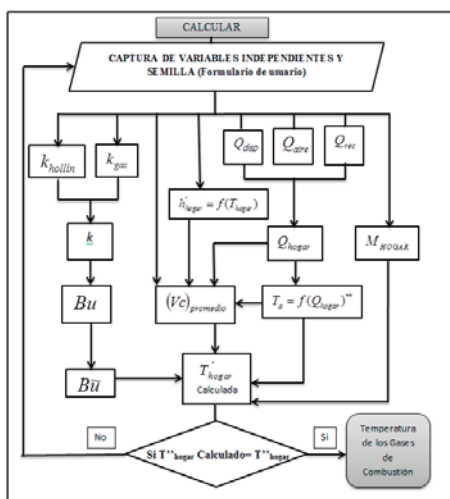


Figura 2. Diagrama de Flujo de la metodología presentada.

## 2.1 Módulo de análisis térmico del generador de Vapor

En el presente estudio se incorpora el análisis de proceso de la combustión en el hogar del generador de vapor, considerando variables independientes como el flujo de combustible, la relación aire- combustible y la fracción de gases de recirculación, en función de estas variables se determinan las propiedades de los gases de combustión como son su temperatura y flujo másico, lo que permitirá en los apartados siguientes realizar el análisis de la transferencia de calor. El diagrama de flujo del cálculo térmico se presenta en la Figura 3. a). Mayor información sobre la metodología se encuentra en [CKTI, 1973; CKTI, 1998; Mullinger & Jenkins, 2008; Jiménez, 2015]. Para simplificar el cálculo térmico del hogar y lograr una interface más amigable con el usuario, se creó un formulario de usuario, orientado a objetos, que se muestra en la Figura 3.b), donde el usuario puede colocar libremente los valores de las variables independientes del cálculo térmico del hogar del generador de vapor.



a)

b)

Figura 3. a) diagrama de flujo del cálculo térmico del hogar del generador de vapor, b) Formulario de usuario, para el cálculo térmico del hogar.

## 2.2 Módulo de transferencia de calor

El proceso del cálculo de la transferencia de calor en la zona de sobrecalentadores se describe en el diagrama de flujo de la Figura 4.0. Donde se calcula el coeficiente de transferencia de calor total  $U$  [Bejan, 2003; Jiménez, 2015; Ganapathy, 1982], de cada intercambiador de calor; empleando el método *efectividad-NTU* [Cengel, 2012; Kitto, & Stultz, 2005] para determinar las propiedades de los fluidos de trabajo, se toma en consideración las características geométricas de los intercambiadores [Pysmenny y col, 2007] y las propiedades termodinámicas de los fluidos de trabajo a la entrada de los intercambiadores, al final del proceso, se determina la temperatura de vapor principal y la temperatura de los gases de combustión a la salida del generador de vapor.

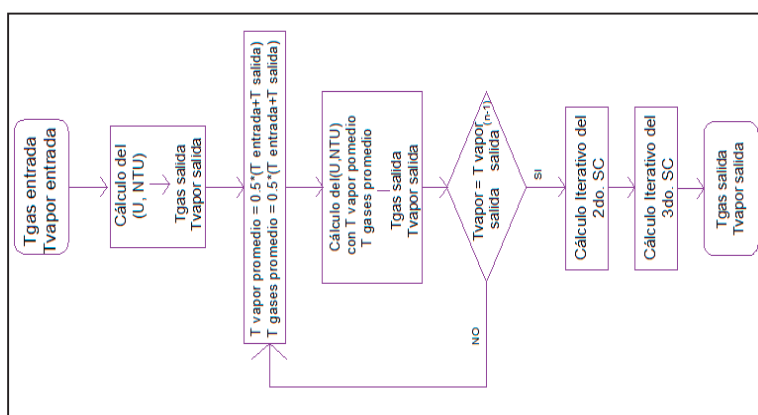


Figura 4.0 Proceso iterativo para determinar la temperatura a la salida de cada intercambiador de calor

## 3. Análisis del ciclo Rankine con recalentamiento y regeneración

Como ya se mencionado, el ciclo térmico de vapor corresponde a un ciclo Rankine con recalentamiento y dos regeneraciones [Moran & Shapiro, 2008; Cengel & Boles, 2012; Kitto & Stultz, 2005]. Las correlaciones empleadas fueron las IAWPS, más información acerca de estas, pueden encontrarse en [Duran, 2004].

Para la simulación del ciclo térmico de vapor de la central termoeléctrica se desarrolló un formulario de Usuario, llamado *Cálculo energético*, que se muestra en la Figura 5, en el cual trabaja en la misma hoja de cálculo en la

que fueron programadas las simulaciones de los módulos presentados en el apartado 2.1, 2.2. El formulario *Cálculo energético*, toma las variables ya calculadas en las simulaciones de los apartados 2.1 y 2.2 como variables de entrada, esto le permite al usuario de la aplicación seleccionar la presión de extracción de la turbina de alta presión  $P_2$ , y seleccionar la presión de extracción de la turbina de vapor de baja presión  $P_5$ , así como también definir una eficiencia isotrópica para la turbina de vapor. Este formulario, permite conocer todas las propiedades termodinámicas de los nodos del ciclo y de esta manera realizar el balance energético y exergético del ciclo de manera iterativa.

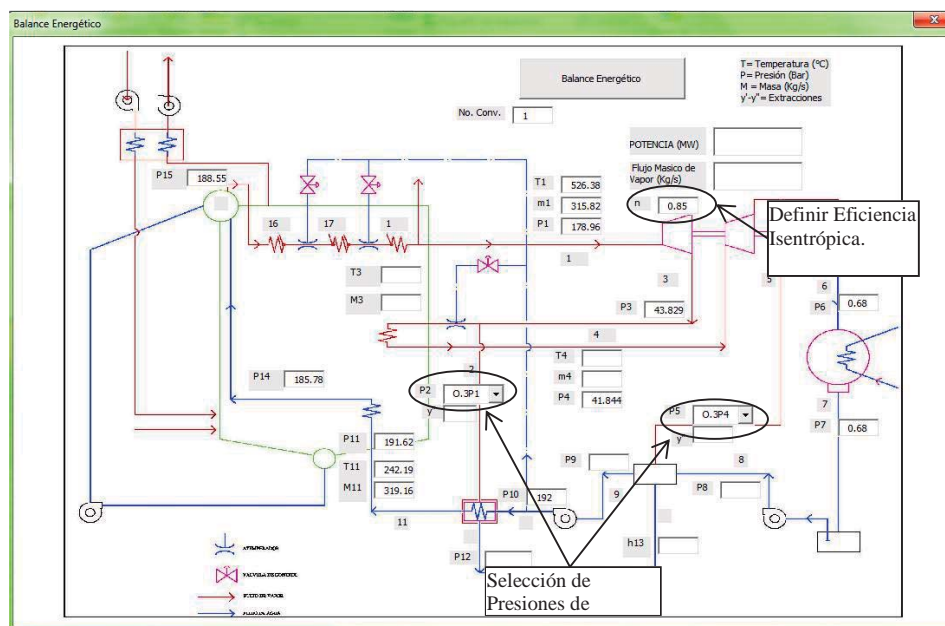


Figura 5. Cálculo energético para el análisis del ciclo térmico de la central termoeléctrica.

#### 4 Balance de exergía

La exergía puede ser transferida a través de tres mecanismos: transferencia de exergía asociada con trabajo, asociada a la transferencia de calor y asociada al flujo másico en los volúmenes de control. La destrucción de exergía para un volumen de control, se expresa como [Moran, 2005; 1997; 2005]:

$$\dot{E}_D = \sum_m \dot{m}_i e_i - \sum_n \dot{m}_e e_e \quad (1)$$

La ecuación (1), establece la destrucción de exergía para  $m$ , flujos másicos que entran y  $n$ , flujos que salen del volumen de control. Estas ecuaciones se aplican a cada elemento o nodo de la Figura 1.0, para realizar el balance de exergía y determinar las pérdidas exergéticas (irreversibilidades).

#### 5. Análisis de Resultados

En la Figura 6, se aprecia el aporte neto de exergía al sistema, el trabajo útil generada por el ciclo y la destrucción total de exergía de la central termoeléctrica analizada. Se observa que el aporte neto de exergía es muy superior al trabajo útil obtenido por el ciclo, debido a que una gran cantidad de exergía se pierde por las irreversibilidades presentes en cada uno de los elementos de la central termoeléctrica. El máximo aporte neto de exergía es de 1,025.5 MW para la carga térmica del 100% y el mínimo es de 259.9 MW para la carga térmica

del 25%, estos producen 280.5 MW y 66.5 MW de trabajo útil, respectivamente. La diferencia entre el aporte neto y el trabajo útil es la exergía destruida, producto de las irreversibilidades de los procesos y elementos de la central termoeléctrica.

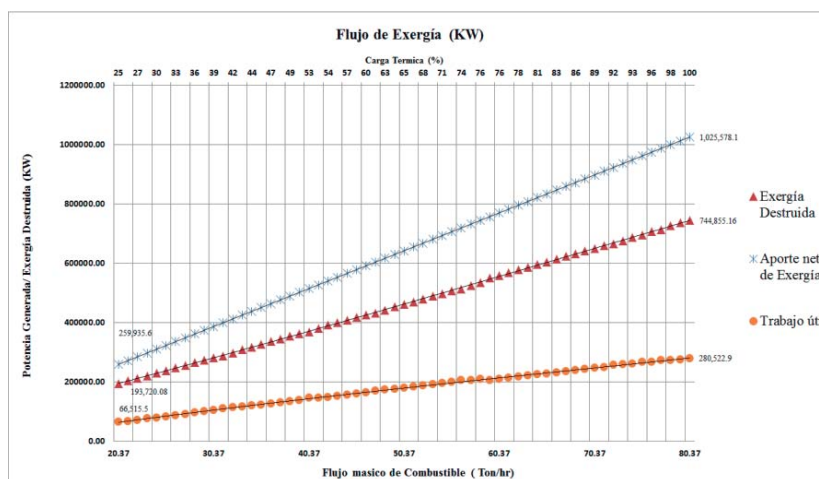
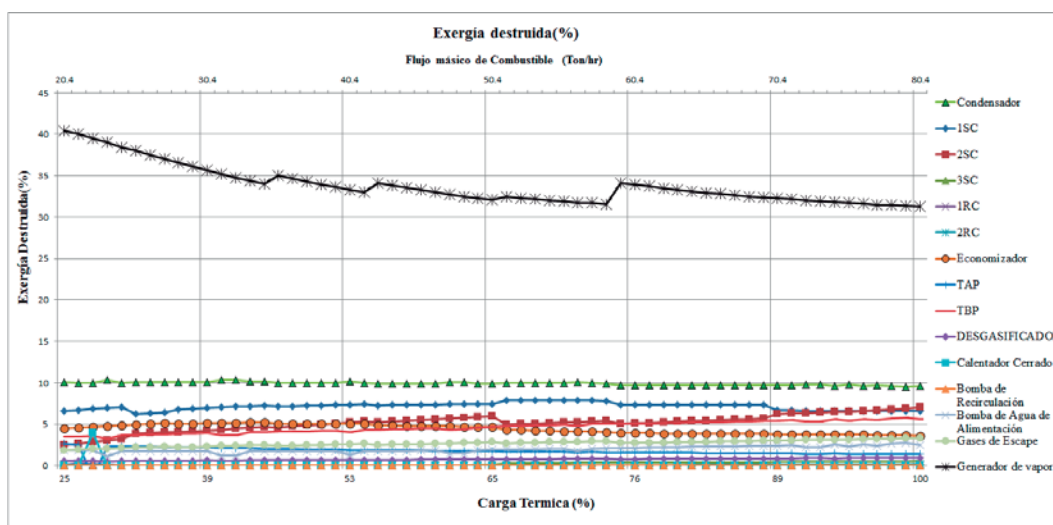


Figura 6. Exergía total destruida vs potencia neta generada.

La importancia del análisis exergético, radica es cuantificar la exergía destruida en cada componente del sistema, con el objetivo de identificar los elemento con la mayor generación de irreversibilidades y enfocar los esfuerzos en la optimización de la operación y diseño de éstos, por lo anterior, en la Figura 7, se muestra el porcentaje de exergía destruida en cada uno de los compontes de la central térmica de vapor, para valores del régimen de carga 25% hasta el 100% de carga.



\*Porcentaje de Exergía destruida en, 1SC: primer sobrecalentador, 2SC: segundo sobrecalentador, 3SC: tercer sobrecalentador, 1RC: primer recalentador, 2RC: Segundo Recalentador, TAP: turbina de alta presión, TBP: turbina de baja presión.

Figura 7. Porcentaje de exergía destruida en el ciclo térmico de vapor

En la Figura 7, se aprecia que, entre los elementos responsable de generar las mayores irreversibilidades se encuentran el hogar del generador de vapor; responsable de la destrucción exergía en el rango del 30% al 40% en el ciclo, seguido por la destrucción de exergía en el condensador en el rango del 10% y de las asociadas al propio procesos de intercambio de calor en las superficies de intercambio de calor.



Esta destrucción de exergía se puede apreciar de mejor manera, en la Figura 8, donde se agrupan las destrucciones de exergía por tipo de componente, para los diferentes regímenes de carga analizados: 100%, 98.4%, 80%, 75%, 66.6%, 50%, 30% y 25%.

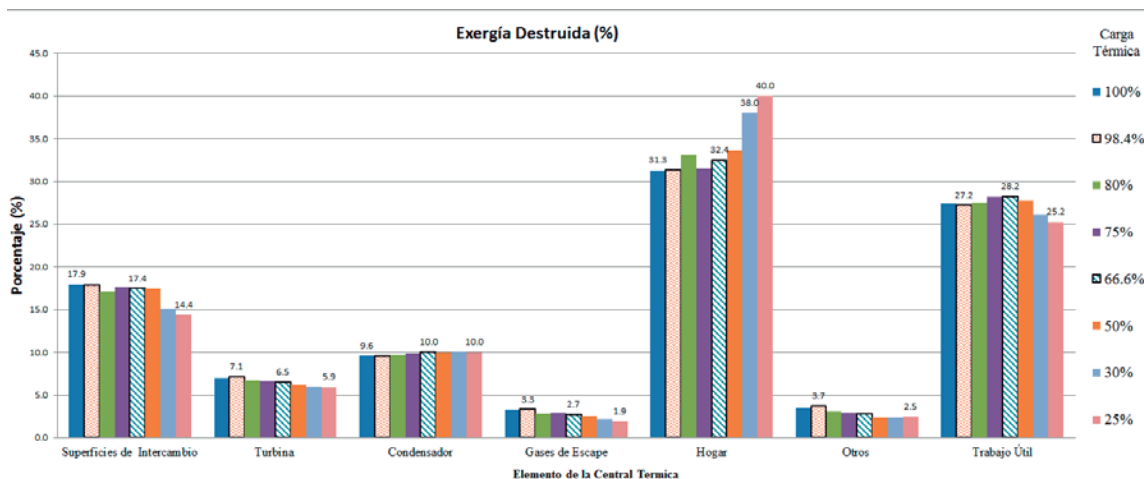


Figura 8. Porcentaje de Exergía Destruida en el ciclo térmico de vapor a diferentes regímenes de carga.

## 6. CONCLUSIONES

El análisis exergético, permite cuantificar la cantidad de exergía suministrada a la central termoeléctrica desde un estado termodinámico de referencia, los resultados obtenidos, muestran que el hogar del generador de vapor es el elemento con mayor generación de irreversibilidades, seguidos por las superficies de transferencia de calor, condensador, turbina de vapor y la exergía de desecho con gases de escape.

El máximo aporte de exergía al sistema analizado, es de 1,025.5 MW para la carga térmica del 100% y el mínimo es de 259.9 MW para la carga térmica del 25%, que producen 280.5 MW y 66.5 MW de trabajo útil, respectivamente.

La máxima destrucción de exergía es de 744.8 MW, a la carga térmica del 100% y la mínima destrucción de exergía del sistema es de 193.7 MW para el régimen de carga del 25%.

Se observa que el hogar del generador de vapor, es responsable de la destrucción de exergía del sistema en el rango del 30% al 40%. Cuando se opera a regímenes de carga menores por ejemplo al 25% de carga, llega a destruir hasta el 40% de exergía suministrada, en cambio para el régimen de carga del 100%, la exergía destruida es del 31.3%.

La destrucción de la exergía asociada a la transferencia de calor en las superficies intercambiadoras de calor (sobrecalentadores, recalentadores y economizador) representan entre el 14.4% y el 17.9% de la exergía destruida en el ciclo.

Respecto a las irreversibilidades en la turbina de vapor, se encuentran en el rango del 5.9% hasta el 7.1% en los regímenes de carga analizados del 98.4% y 25% respectivamente.

Por otra parte, el condensador opera a una presión constante de 0.68 Bar, y mantiene una destrucción de exergía prácticamente constante de alrededor del 9.6% al 10%

Los gases de escape de la central termoeléctrica constituyen entre el 2% al 3% de la destrucción de exergía del ciclo.

Las irreversibilidades producidas por las bombas de agua de alimentación y recirculación, así como los calentadores de agua de alimentación conocidos como regeneradores en el ciclo térmico de vapor, se encuentran en el rango del 3.7% al 2.5%.

Al realizar la simulación de la operación de la central termoeléctrica a régimen de carga variable, se observó que la eficiencia térmica del ciclo se encuentra en el rango del 32% al 35%. Sin embargo, la eficiencia térmica, se mantiene en el orden del  $35\% \pm 1\%$ , desde el régimen de carga 75% hasta el régimen de carga del 100%. Siendo la eficiencia térmica máxima de 35.55% al 100% de carga.

Por otra parte, se observa que la eficiencia exergética máxima del ciclo es de 29%, que se presentan a los regímenes de carga del 95.7% y 75.04% y posee otros puntos locales máximos de eficiencia exergética de 28.65% al régimen de carga del 74.1% y dos puntos máximos locales de 28.40%, para los regímenes de carga del 63.3% y 51.14% respectivamente. Por lo que se concluye, desde el punto de vista exergético que los regímenes de operación óptimos son: al 95.7%, 75.04%, 74.1%, 63.3% y 51.14%.

En cambio, las eficiencias exergéticas mínimas del ciclo son de 25.15%, 25.23% y 25.43% y ocurren en los regímenes de carga del 24.7%, 25.9% y 27.3%, respectivamente. Por lo que se concluye, desde el punto de vista exergético, que los regímenes de carga menores al 30% son altamente ineficientes.

## Referencias

1. Bejan, A. & Kraus, A. (2003). *Heat transfer Handbook*, U.S.A.: John Wiley y Sons, Inc.
2. Cengel, Y. A. & Boles, M.A. (2012). *Termodinámica* (6 Ed). México: Mc Graw Hill.
3. CFE. (2012a). *Works Program and Investment Electricity Sector 2012 - 2016* Mexico D.F: Programming Branch, Planning Coordination, CFE.
4. CFE. (2012b). *Costs and Benchmarks for formulating investment projects Electricity Sector*. México D.F.
5. CFE. (1987). *Manual del Operación de la central termoeléctrica villa de reyes*. San Luís Potosí, México: Comisión Federal de Electricidad.
6. CKTI. (1973). *Thermal calculation of steam generator Regulatory Method* (2 ed). Sankt Petersburg: CKTI.
7. CKTI. (1998). *Thermal calculation of steam generator Regulatory Method* (3 ed.) Sankt Petersburg: CKTI.
8. Duran M. (2004). *Thermoeconomic optimization of combined cycle gas turbine using genetic algorithms*, Tesis Doctoral, UPM, Madrid 2004.
9. Ganapathy, V. (1982). *Applied Heat Transfer*. Tulsa OK: Penn Wil Book.
10. Habib, M. A., Said, S. A. & Al-Zaharna, I. (1999). Thermodynamic optimization of reheat regenerative thermal-power plants. *Applied Energy*, **(63)**.
11. Jiménez, J. (2015). *Análisis Exergético y Termoeconómico de un sistema de generación de energía, estudio del caso del generador de vapor de 305 MW instalado en la central termoeléctrica Villa de Reyes*. Tesis Doctoral. México. Universidad Autónoma del Estado de México.
12. Kitto, J., & Stultz, S. (2005). *Steam its generation and use* (41 Edition), USA: The Babcock y Wilcox Company.
13. Moran M. (1997). Second Law application in thermal system design. In Boehm, R. (Ed.), *Developments in the Design of thermal Systems*. New York: Cambridge University Press.
14. Moran, M. & Shapiro H. N. (2008). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. (6th Ed.). USA: John & Sons Inc.
15. Moran M. (2005). Engineering Thermodynamics. In: Kreith, F. & Go swami D. Y., (Ed.). *The CRC handbook of Mechanical Engineering*. USA: The CRC press. Ch 2.
16. Mullinger P. & Jenkins B. (2008). *Industrial Process Furnaces, Principles and Design*, Ed. Elsevier.
17. Ndlovu, M. & Majozi, T. (2014). Design and Optimization of Power Plant Utility Systems, *Computer Aided Chemical Engineering*, **(34)**, 567-572.
18. Pysmenny, Y., Polupan, G., y Carvajal, I., 2007. Manual para el cálculo de intercambiadores de calor y bancos de tubos aletados. México: REVERTE.
19. SENER. (2017). Balance Nacional de Energía 2016. SENER. México.
20. Zhao, W., Zhang, T. & Tang, X. (2012). Application of Power Electronic Technology in Optimizing the Operation of Thermal Power Plants. *Advances in Mechanical and Electronic Engineering*, **(177)**.