

ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UNA CENTRAL TERMOLÉCTRICA DE CICLO COMBINADO

Arturo Reyes León¹, Pedro Quinto Diez², Laura Annette Romero De León³, Irving Néstor Sierra Sanchez⁴

¹Departamento de Energía, Unidad Azcapotzalco, Universidad Autónoma Metropolitana, México. Email: arthuro_reyes@yahoo.com.mx

²LABINTHAP, Unidad Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México Email: pqd510@hotmail.com

³LABINTHAP, Unidad Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México Email: lauraromero0717@gmail.com

⁴LABINTHAP, Unidad Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, México Email: isierras@yahoo.com

Resumen

Las centrales termoelectricas de ciclo combinado tienen un papel importante en la generación de energía eléctrica. El objetivo de este trabajo es evaluar por medio de la primera ley y segunda ley de la termodinámica una central de ciclo combinado que está compuesta por un arreglo de 2 TG x 1 TV a partir de sus datos de operación. Dicho análisis se realiza con el propósito de evaluar las irreversibilidades que se presentan en cada componente la central de ciclo combinado. Los resultados muestran que la cámara de combustión, el recuperador de calor, la turbina de vapor y el condensador son las principales fuentes de destrucción de exergía, representado más del 80% de toda la destrucción de exergía y la eficiencia de segunda ley de la central es de 46.5%. El software EES (Engineering Equation Solver) se utilizó para realizar este análisis.

Palabras clave: Exergía; Energía; Central de ciclo combinado, Eficiencia.

Abstract

Combined cycle thermoelectric plants play an important role in the generation of electrical energy. The objective of this work is to evaluate, by means of the first law and second law of thermodynamics, a combined cycle plant that is composed of a 2 TG x 1 TV arrangement based on its operating data. This analysis is carried out with the purpose of evaluating the irreversibilities that occur in each component of the combined cycle plant. The results show that the combustion chamber, heat recovery, steam turbine and condenser are the main sources of exergy destruction, they accounted for more than 80% of all exergy destruction and the second law efficiency of the plant is 46.5%. EES (Engineering Equation Solver) software was used to perform this analysis.

Keywords: Exergy; Energy; Combined cycle power plant, Efficiency

1. Introducción

La energía eléctrica es fundamental para muchos aspectos de la vida, juega un papel muy importante en el desarrollo económico y social de los países, el crecimiento de la población, la urbanización, los avances tecnológicos y la industrialización, han arrojado como consecuencia el aumento del consumo de energía eléctrica, esto ha provocado en los años recientes que el mundo este atravesando por una crisis

energética aunada a los problemas ambientales debido a que la industria la generación de energía eléctrica es una de las principales fuentes de emisión de CO₂, por el uso irracional de los combustibles fósiles y de la energía. Actualmente el 58.6 % de la electricidad del mundo se produce a partir de uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo, combustóleo, gas natural) que es utilizado en centrales termoelectricas, mientras que el 41.4 % restante de la electricidad se genera a partir

de fuentes como la hidráulica, nuclear, solar, geotérmica, y biogás [1]

Aun con el incremento de la generación de energía eléctrica a partir de recursos renovables, el porcentaje de electricidad producida a partir de combustibles fósiles no ha sufrido grandes cambios. La generación de energía eléctrica en los países pertenecientes a la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) en el 2022, quedo dominada por los combustibles fósiles (49.2%) principalmente gas natural y carbón. [2].

En México predomina la generación de eléctrica por medio de las tecnologías que utilizan los combustibles fósiles. En el año 2022, existía una capacidad instalada 88 744 MW, de los cuales el 66.9% corresponde a centrales que utilizan combustibles fósiles, El resto de la capacidad se reparte en Hidroeléctrica con 14.6%, Eólica con 8%, Fotovoltaica el 6.9%, Nuclear con el 1.8%, Geotérmica el 1.3% y el 0.5% restante corresponde a diversas tecnologías de generación eléctrica que utilizan Bioenergía como insumo principal. [3, 4]

Se han desarrollado fuentes alternativas de generación de energía eléctrica, sin embargo, la generación mediante combustibles fósiles es la que más utilizada para este propósito. Dentro de las tecnologías termoeléctricas se encuentran la generación por vapor, ciclo combinando, turbo gas y combustión interna, donde la generación de energía eléctrica mediante ciclo combinado es considerada como energía limpia, estas centrales de ciclo combinado acoplan el ciclo Brayton con el ciclo Rankine [5,6]

Por la situación anterior en el presente trabajo se realizó un análisis de una central termoeléctrica de ciclo combinado. El análisis se realizó aplicando la primera y segunda ley de la termodinámica, con el propósito de identificar y cuantificar los parámetros que más influencia tienen en el comportamiento de la central de ciclo combinado. Este estudio se realizó utilizando el software comercial EES, para agilizar los cálculos.

2. Metodología

2.1. Descripción del sistema

El sistema del presente trabajo se muestra en la Figura 1 y consiste en una central termoeléctrica de ciclo combinado que tiene una capacidad instalada de 493 MW. La cual se encuentra ubicada a 2098 m sobre el nivel del mar, a 84 km al norte de la Ciudad. Esta central entro en operación en la década de los ochenta.

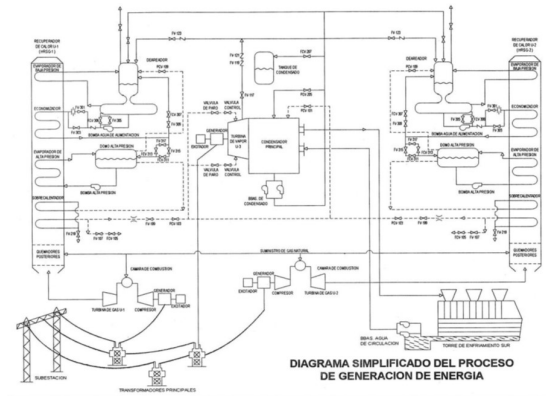


Figura 1. Diagrama esquemático de la Central de Ciclo Combinado.

La central está constituida por dos paquetes de ciclo combinado de capacidad de 238 MW (paquete sur) y 255 MW (paquete norte) cada uno. El paquete Sur está formado por dos turbinas de gas y una turbina de vapor ($2 \times 69 + 1 \times 100$) 238 MW y el paquete Norte consta de dos turbinas de gas y una turbina de vapor ($2 \times 75 + 1 \times 107$) 215 MW, como se muestra en la figura 1 [7]

Cada unidad de turbina de Gas U1, U2, U4 y U5 tiene como equipo principal un turbogenerador y un recuperador de calor (HRSG), los cuales se complementan con las turbinas de vapor U3 y U6, así como una serie de equipos y sistemas auxiliares requeridos para la realización del proceso de generación de energía eléctrica.

Como caso de estudio se seleccionó el paquete Norte el cual está constituido por dos Turbinas de gas (U4, U5) marca Westinghouse (con sus respectivas caderas de recuperación de calor marca Foster Wheeler), con una capacidad de 72 MW cada una y una turbina de vapor (U6) marca Hitachi con capacidad de 107 MW.

2.2. Análisis Termodinámico

El análisis termodinámico se realizó tomando las siguientes consideraciones:

- ✓ El sistema opera en estado estacionario [8,9]
- ✓ Los cambios de energía cinética y potencial se consideran despreciables.
- ✓ El principio de gas ideal es aplicable para el aire y los gases de combustión [10,11]
- ✓ El análisis molar del aire a la entrada del compresor es: 77.48 % N_2 , 20.59 % O_2 , 0.03% CO_2 y 1.9% de H_2O .
- ✓ La combustión que ocurre en la cámara de combustión es completa para el gas natural.
- ✓ La caída de presión en la cámara de combustión es del 5 % [9]

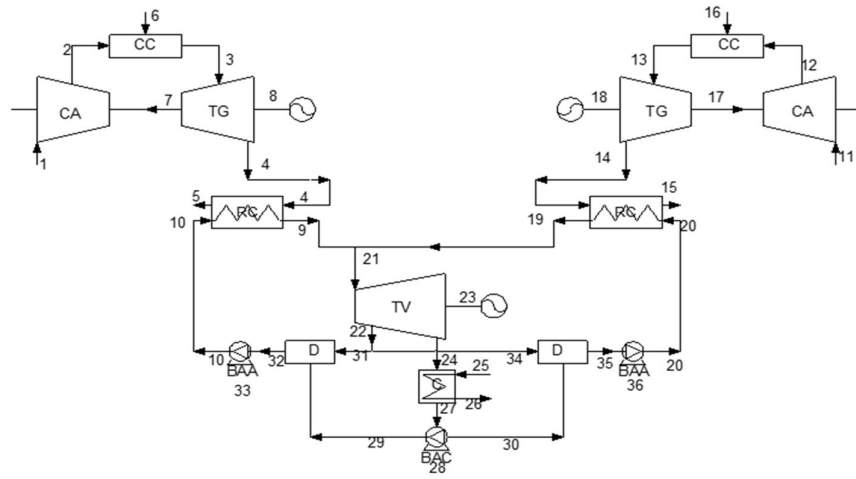


FIGURA 2- Diagrama de la Central de Ciclo Combinado, correspondiente al paquete norte. Fuente de elaboración propia

Los puntos de referencia (del 1 al 37), se indican en la Figura 2, en donde los puntos del 1 al 20 representan el ciclo de gas y el del 21 al 37 representan el ciclo de vapor.

En esta parte se desarrolló el modelo matemático, el cual se aplicó al paquete norte de la Central de Ciclo Combinado. Este modelo se desarrolló a partir de los parámetros de presiones, temperaturas y flujos másicos. El modelo se aplicó a las condiciones de operación de la central en estudio.

En la figura 2 se muestra el diagrama de la una unidad generadora de Central de Ciclo Combinado del paquete norte.

2.2.1. Análisis de Energía

El principio de la conservación de la masa y la energía (primera ley de la termodinámica), es utilizado para el análisis de los sistemas de energía. Para realizar el análisis energético de un sistema en el cual la energía, la masa y el trabajo cruzan las fronteras de los componentes del sistema es necesario aplicar la primera ley de la termodinámica [11,12]

Para aplicar el principio de conservación de la masa, se considera al sistema como un volumen de control que está en estado estacionario. Este principio expresa: “El cambio neto (incremento o disminución) de la masa total contenida dentro del volumen de control durante el mismo intervalo de tiempo Δt , es igual a cero [6, 13]. Esto se expresa como:

$$\sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s = 0 \quad (1)$$

El balance de energía corresponde al principio de conservación de energía, estable que para un volumen de control: “El cambio de energía dentro de un volumen de control es igual al flujo de energía total que entra al volumen de control menos el flujo de energía total que sale del mismo. La energía puede entrar o salir del volumen de control en forma de transferencia de trabajo, transferencia de calor o con energía asociada con la transferencia de masa o flujo” [14, 15]. Para un volumen de control, en estado permanente, en donde se indican los diferentes flujos de energía, el balance de energía está dado por:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{E}_e - \dot{W}_{vc} - \sum \dot{E}_s = 0 \quad (2)$$

Los flujos de energía que entran y salen con los flujos de masa son $\dot{E} = \dot{m} \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right)$, por lo que la ecuación (2) se escribe como:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{c_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{W}_{vc} - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{c_s^2}{2} + gz_s \right) = 0 \quad (3)$$

Y de forma alternativa, esta misma expresión se escribe:

$$\underbrace{\dot{Q}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{c_e^2}{2} + gz_e \right)}_{\text{flujo de energía de entrada}} = \underbrace{\dot{W}_{vc} + \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{c_s^2}{2} + gz_s \right)}_{\text{flujo de energía de salida}} \quad (4)$$

Para sistemas que operan en estado permanente como es el caso de las centrales de ciclo combinado y considerando que los cambios de energía cinética y potencial son despreciables la ecuación (4), puede describirse como:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e h_e = \dot{W}_{vc} + \sum_s \dot{m}_s h_s \quad (5)$$

Donde \dot{Q}_{vc} es el flujo de calor que entra al sistema y \dot{W}_{vc} es flujo de trabajo producido por el sistema, \dot{m} es el flujo masico del sistema y h es la entalpía del fluido. Los subíndices "e" y "s" representan la entrada y salida.

2.2.2. Análisis de Exergía

Al igual que la masa, la energía y la entropía, la exergía puede ser transferida desde o hacia el volumen de control por las corrientes de masa que entran y salen. La exergía, a diferencia de la energía puede ser consumida durante un proceso debido a las irreversibilidades que se presentan.

El balance de exergía se expresado como: “El cambio de exergía dentro de un volumen de control, es igual a la transferencia de exergía por medio de calor y de los flujos de masa que entran y salen del volumen de control, menos la destrucción de exergía” [16, 17].

La exergía es el trabajo máximo teórico que puede desarrollar un sistema, al pasar de su estado termodinámico inicial al estado de equilibrio con sus alrededores o medio ambiente de referencia.

Mientras que la energía es una medida de la cantidad de la energía, la exergía es una medida de la calidad de la energía. La exergía como la energía, puede ser transportada a través del límite de un sistema. Para cada transferencia de energía, existe una correspondiente transferencia de exergía

El balance de exergía emplea los principios de conservación de la masa y la energía junto con el segundo principio de la termodinámica para el diseño y análisis de sistemas térmicos, esté es una herramienta que sirve para identificar el tipo, localización, y magnitud de las pérdidas de energía. La identificación y cuantificación de estas pérdidas permite la evaluación y la propuesta de mejoras a los sistemas termodinámicos.

La exergía es la energía disponible que está en función del ambiente de referencia. Por lo tanto, la exergía es mayor cuanto más alejado del ambiente de referencia estén los potenciales intensivos del sistema. Esta función es propiedad de estado, debido a que depende

del ambiente de referencia y es independiente del proceso utilizado para producir trabajo útil.

Para un volumen de control en estado permanente el balance de exergía queda expresado por:

$$\sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e A_{fe} - \sum_s \dot{m}_s A_{fs} - \dot{A}_d = 0 \quad (6)$$

La ecuación (6) establece que la destrucción de exergía es igual a la diferencia entre la suma de las exergías de entrada y la suma de la exergía de salida.

La exergía de un sistema se dividida en cuatro componentes: exergía física, exergía cinética, energía potencial y exergía química ($A = A^f + A^{ci} + A^{po} + A^q$). Las dos más importantes son la exergía física y la exergía química, a la suma de las exergías física, potencial y cinética se le llama *exergía termo mecánica*. Las otras dos componentes que es la exergía cinética y la exergía potencial serán consideran despreciables, por no existir cambios en estas exergías, por lo que la exergía del sistema se expresa como:

$$A_t = A_f + A_q \quad (7)$$

Considerando solo la exergía específica total, esta queda como:

$$a_t = a_f + a_q \quad (8)$$

Donde

$$a_f = (h_e - h_s) - T_0(s_e - s_s) \quad (9)$$

El cálculo de la exergía química del combustible se realiza mediante la ecuación siguiente [18]

$$a_c^{QU} = \xi * PCI \quad (10)$$

Donde ξ representa la relación entre la exergía química del combustible y el poder calorífico inferior del combustible, que para el gas natural tiene un valor de 1.06 [19]

En los flujos de corriente donde se experimenta una transformación química, como es el caso de la combustión, se tiene que la exergía química para cada corriente de flujo se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$\dot{A}_i^{QU} = \frac{\dot{m}_i}{M_i} (\sum x'_k \bar{e}_k^{QU} + \bar{R}T_0 \sum x'_k \ln x'_k) \quad (11)$$

Para la obtención de estos cálculos se tomaron valores de la exergía química de las sustancias de acuerdo con el modelo I [9]

La eficiencia de segunda ley o también llamada eficiencia exergética se puede expresar como la relación entre la salida de exergía útil producida y la suministrada, por lo que la eficiencia exergética se define como:

$$\eta_{II} = \frac{\text{Exergía util producida}}{\text{Exergía suministrada}} = 1 - \frac{\dot{A}_D}{\dot{A}_e}$$

Existen herramientas computacionales que nos auxilian en dar solución a problemas de ingeniería, una de estas es el programa EES (Engineering Equation Solver), la función de este software es la resolución numérica de ecuaciones algebraicas no lineales y ecuaciones diferenciales.

En este trabajo las propiedades termodinámicas de las corrientes de los fluidos se obtuvieron mediante el uso EES. Por medio de las ecuaciones 1 y 5 se obtienen balances de masa y energía para cada componente de la central de ciclo combinado. Posteriormente con las ecuaciones 9 se obtiene la exergía física para cada componente de la central en estudio y se aplican las ecuaciones de 10 y 11 para obtener la exergía del combustible y de los gases de combustión. Finalmente se aplica la ecuación 10 para obtener la exergía específica total de cada corriente y con esto aplicar la ecuación 6 para obtener los balances de exergía de cada componente del proceso de generación de energía eléctrica.

Las eficiencias de segunda ley para cada uno de los dispositivos de la central se obtuvieron a partir de la ecuación 12.

Los balances exergéticos y las eficiencias de segunda ley para los diferentes componentes, se encuentran en la Tabla 1 y la Tabla 2, en donde al ingresar estas ecuaciones al software EES, éste da solución a las incógnitas.

Tabla 1. Balance de exergía de los equipos de la central de ciclo combinado de la figura 2.

Equipo	Balance de exergía
CA-1	$\dot{A}_{D,CA-1} = \dot{W}_{CA-1} - \dot{A}_2$
CC-1	$\dot{A}_{D,CC-1} = (\dot{A}_2 + \dot{A}_6) - \dot{A}_3$
TG-1	$\dot{A}_{D,TG} = (\dot{A}_3 - \dot{A}_4) - \dot{W}_{TG-1}$
RC-1	$\dot{A}_{D,RC-1} = (\dot{A}_4 - \dot{A}_5) - (\dot{A}_9 - \dot{A}_{10})$
CA-2	$\dot{A}_{D,CA-2} = \dot{W}_{CA-2} - \dot{A}_{12}$
CC-2	$\dot{A}_{D,CC-2} = (\dot{A}_{12} + \dot{A}_{16}) - \dot{A}_{13}$
TG-2	$\dot{A}_{D,TG} = (\dot{A}_{13} - \dot{A}_{14}) - \dot{W}_{TG-2}$

RC-2	$\dot{A}_{D,RC-2} = (\dot{A}_{14} - \dot{A}_{15}) - (\dot{A}_{19} - \dot{A}_{20})$
TV	$\dot{A}_{D,TV} = (\dot{A}_{21} - \dot{A}_{22} - \dot{A}_{24}) - \dot{W}_{TV}$
Cond.	$\dot{A}_{D,Cond.} = (\dot{A}_{24} + \dot{A}_{25}) - (\dot{A}_{26} + \dot{A}_{27})$
BAC	$\dot{A}_{D,BAC} = \dot{W}_{BAC} - (\dot{A}_{29} - \dot{A}_{30} + \dot{A}_{37})$
Dea. -1	$\dot{A}_{D,Dea.-1} = (\dot{A}_{29} + \dot{A}_{31}) - \dot{A}_{32}$
Dea. -2	$\dot{A}_{D,Dea.-2} = (\dot{A}_{30} + \dot{A}_{34}) - \dot{A}_{35}$
BAA-1	$\dot{A}_{D,BAA-1} = \dot{W}_{BAA-1} - (\dot{A}_{10} - \dot{A}_{32})$
BAA-2	$\dot{A}_{D,BAA-2} = \dot{W}_{BAA-2} - (\dot{A}_{20} - \dot{A}_{35})$

Tabla 2. Eficiencia exergética de los equipos de la central de ciclo combinado de la figura 2.

Equipo	Eficiencia exergética
CA-1	$\eta_{II} = \frac{\dot{A}_2 - \dot{A}_1}{W_C}$
CC-1	$\eta_{II,CC} = \frac{\dot{A}_3 - \dot{A}_2}{\dot{A}_6}$
TG-1	$\eta_{II} = \frac{W_{TG}}{\dot{A}_3 - \dot{A}_4}$
RC-1	$\eta_{II} = \frac{(\dot{A}_9 - \dot{A}_{10})}{\dot{A}_4 - \dot{A}_5}$
CA-2	$\eta_{II} = \frac{\dot{A}_{12} - \dot{A}_{11}}{W_C}$
CC-2	$\eta_{II} = \frac{\dot{A}_{13} - \dot{A}_{12}}{\dot{A}_{16}}$
TG-2	$\eta_{II} = \frac{W_{TG}}{\dot{A}_{13} - \dot{A}_{14}}$
RC-2	$\eta_{II} = \frac{(\dot{A}_{19} - \dot{A}_{20})}{\dot{A}_{14} - \dot{A}_{15}}$
TV	$\eta_{II} = \frac{W_{TV}}{\dot{A}_{21} - \dot{A}_{22} - \dot{A}_{24}}$
Cond.	$\eta_{II} = \frac{\dot{A}_{26} - \dot{A}_{13}}{\dot{A}_{24} - \dot{A}_{27}}$
BAC	$\eta_{II} = \frac{\dot{A}_{29} + \dot{A}_{30} - \dot{A}_{27}}{W_{BC}}$
Dea. -1	$\eta_{II} = \frac{\dot{A}_{32}}{\dot{A}_{29} + \dot{A}_{31}}$
Dea. -2	$\eta_{II} = \frac{\dot{A}_{35}}{\dot{A}_{30} + \dot{A}_{34}}$
BAA-1	$\eta_{II} = \frac{\dot{A}_{10} - \dot{A}_{32}}{W_{BAA}}$
BAA-2	$\eta_{II} = \frac{\dot{A}_{20} - \dot{A}_{35}}{W_{BAA}}$

3. Resultados.

El modelo termodinámico de la central de ciclo combinado y la solución de las ecuaciones de balance de masa, energía y exergía se realizaron con la ayuda del software EES [20, 21, 22]. En la Tabla 3 se

muestran las propiedades termodinámicas conocidas de las entradas y salidas de los fluidos para todos los puntos de la central [23].

Tabla 3. Propiedades termodinámicas de los de los diferentes puntos correspondientes a la figura 2.

Flujo	T (K)	P (bar)	\dot{m} (kg/s)
1	295.42	0.7891	262.2
2	679.3	10.29	262.2
3	1317	9.775	267.4
4	790.4	0.8113	267.4
5	432	0.7891	267.4
6	299.8	30.00	4.866
9	779.8	72.96	49.27
10	395.3	72.96	49.27
11	293.5	0.7922	259.7
12	676	10.22	259.7
13	1314	9.709	264.5
14	785.4	0.8132	264.5
15	433.8	1.013	264.5
16	299.8	30.00	4.842
19	779.8	72.96	49.27
20	395.3	72.96	49.27
21	395.3	72.96	98.53
22	393.7	2	12.91
24	315.2	0.0821	85.62
25	300.6	1.5	4368
26	310.7	0.9	4368
27	315.2	0.0821	85.62
29	315.3	13.00	42.81
30	315.3	13.00	42.81
31	393.7	2	6.455
32	394.3	4.142	49.27
34	393.7	2	6.455
35	394.3	4.142	49.27
0	295.42	0.7891	-

En la Tabla 4 se muestran los valores de las entalpías, entropía de los diferentes puntos de la central de ciclo combinado.

Tabla 4. Propiedades termodinámicas de los de los diferentes puntos correspondientes a la figura 2.

Flujo	h (kJ/kmol o kJ/kg)	s (kJ/kmol-K o kJ/kg K)
1	-4794	196
2	6752	199.6
3	3087	222.6
4	-15089	225.8
5	-26394	207
6	-71750	-
9	3423	6.796
10	517.7	1.544
11	-4850	195.8

12	6649	199.5
13	2712	222.6
14	-15528	225.6
15	-26617	207.1
16	-71750	-
19	3423	6.796
20	517.7	1.544
21	3423	6.796
22	2707	7.129
24	2326	7.42
25	115.1	0.401
26	157.2	0.539
27	175.9	0.599
29	177.3	0.5997
30	177.3	0.5997
31	2707	7.129
32	508.6	1.539
34	2707	7.129
35	508.6	1.539
Aire T ₀	-4794	196
g. c T ₀	-32460	190.2
T ₀	93.11	0.3275

Aplicando el balance de exergía desarrollado en la tabla 2, se obtienen los flujos de exergía para cada componente de la central, los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Flujos de exergía de las diferentes corrientes de la central de ciclo combinado.

Flujo	\dot{A} (MW)	Flujo	\dot{A} (MW)
1	0	19	69.9
2	104.8	20	3.2
3	327.7	21	139.9
4	152.7	22	7.8
5	53.5	23	103.9
6	238.2	24	11.8
7	105.8	25	1.15
8	171.9	26	7.1
9	69.9	27	0.22
10	3.2	28	0.13
11	0	29	0.17
12	103.1	30	0.17
13	325.45	31	3.91
14	151.6	32	2.84
15	55.6	33	0.45
16	238.2	34	3.91
17	104.2	35	2.84
18	170.7	36	0.45

La Tabla 5, muestra que la corriente de los gases de combustión que entran a la turbina (3 y 13), son las que presentan el mayor flujo de exergía y las corrientes que siguen a estas son las pertenecientes al combustible (6

y 16). Los resultados muestran que son estas corrientes las que presentan los mayores flujos de exergía.

En la Tabla 6, se muestra los flujos de exergía del recurso y el producto de cada equipo que forma la central, donde las corrientes que presentan los mayores flujos de exergía son las correspondientes a la entrada y salida de la cámara de combustión.

Tabla 6. Exergía del Recurso y Producto de los equipos de la central de ciclo combinado

Componente	Recurso (MW)	Producto (MW)
CA-1	105.8	104.8
CC-1	343.0	327.8
TG-1	175.0	171.9
RC-1	99.2	66.7
CA-2	104.2	103.2
CC-2	341.4	325.5
TG-2	173.9	170.7
RC-2	95.9	66.7
TV	120.3	103.2
Cond.	11.6	5.9
BAC	0.13	0.12
Dea.-1	4.1	2.8
Dea.-2	4.1	2.83
BAA-1	0.45	0.38
BAA-2	0.45	0.38

Aplicando el balance de exergía a cada componente y los de la Tabla 6 de las exergías del producto y del recurso, se obtiene la destrucción de exergía de equipo de la central de ciclo combinado, los resultados son mostrados en la Tabla 7, donde se observa que los equipos que presentan la mayor destrucción de exergía son los recuperadores de calor.

Tabla 7. Destrucción de exergía los equipos de la central de ciclo combinado

Componente	Exergía (MW)	Destruida
CA-1		1.1
CC-1		15.3
TG-1		3.1
RC-1		32.5
CA-2		1.1
CC-2		15.9
TG-2		3.2
RC-2		29.2
TV		17.0
Cond.		29.0
BAC		0.016
Dea.-1		1.2
Dea.-2		1.2
BAA-1		0.065

BAA-2	0.065
-------	-------

En la Figura 3, se muestra el porcentaje de la destrucción de exergía en cada equipo de la central de ciclo combinado, donde se observa que es en los recuperadores de calor donde se tienen los mayores porcentajes siendo estos de 22% en el recuperador de calor 1 y 19 % en recuperador de calor 2, seguido del condensador con el 19 %, después siguen las cámaras de combustión con el 10 % para la cámara de combustión 1 y 11 % para la cámara de combustión 2, las cámaras de combustión y la turbina de vapor con 11% y finalmente las turbinas de gas con el 2% y los compresores de aire con el 1%, los desarenadores con 1% y las bombas de agua de alimentación y de condensado con valores menores al 1%.

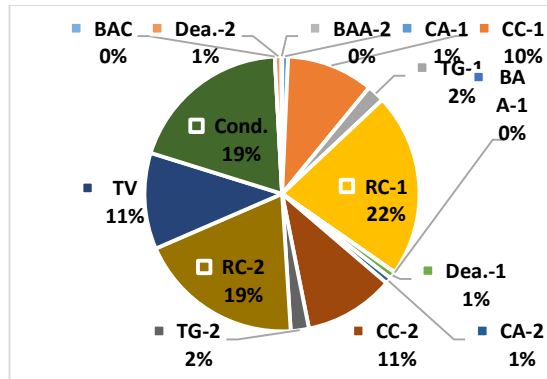


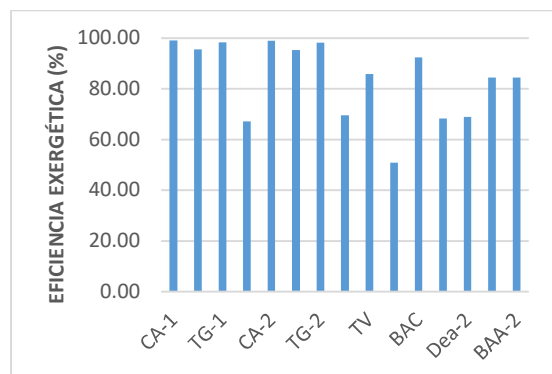
Figura 3. Distribución del porcentaje de destrucción de exergía.

En la Tabla 8 se describen las eficiencias exergéticas de los equipos y la eficiencia exergética de la central de ciclo combinado, estas se muestran gráficamente en la Figura 4.

Tabla 8. Destrucción de exergía los equipos de la central de ciclo combinado

Componente	Eficiencia Exergética (%)
CA-1	99.05
CC-1	95.57
TG-1	98.23
RC-1	67.24
CA-2	99.04
CC-2	95.34
TG-2	98.16
RC-2	69.55
TV	85.79
Cond.	50.86
BAC	92.31
Dea.-1	68.29
Dea.-2	69.02
BAA-1	84.44
BAA-2	84.44
CCC	49.65

De la Tabla 8 se observa que los compresores de aire son los que presentan las mayores eficiencias exergéticas, seguidos de las turbinas de gas, mientras que la central de ciclo combinado presenta una eficiencia exergética del 46.5 %.



4. Conclusiones

En este estudio se realizó un análisis exergético de una central de ciclo combinado a sus condiciones de operación.

Para realizar este análisis se desarrollaron los análisis de primera y según la ley de la termodinámica para cada equipo que conforma la central de ciclo combinado en estudio. Posteriormente se determinaron las corrientes que corresponden a los productos y recursos para cada equipo.

De los resultados obtenidos se realizan las siguientes observaciones:

- ✓ Las turbinas de gas a carga máxima generan 66 MW y 65 MW respectivamente, mientras que están fueron diseñadas para generar 72 MW cada una, esta es una diferencia importante que se ha ido generando con los años de operación.
- ✓ La turbina de vapor a carga máxima de operación genera 103 MW, cuando esta turbina fue diseñada para generar 111 MW.
- ✓ La mayor generación de entropía se tiene en la cámara de combustión y es en este equipo donde se tiene los mayores flujos de exergía del recurso y el producto.
- ✓ Las centrales de ciclo combinado constituyen una opción viable para la industria de generación de energía eléctrica; esto porque este tipo de centrales logran una eficiencia superior en condiciones similares a cualquier central de ciclo convencional.

La metodología desarrollada en este trabajo es una herramienta que puede ser utilizada para el análisis en

la operación de las centrales de ciclo combinado, a través de la cuantificación de las irreversibilidades de la central o de los componentes que la integran y así poder mejorar el aprovechamiento de los recursos suministrados, para tratar de mantener la producción de diseño.

5. Referencias

6. Referencias

- [1] <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/monthly-electricity-statistics>
- [2] <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/oecd-share-of-electricity-generation-by-source>
- [3] <https://www.cenace.gob.mx/>
- [4] <https://energia.conacyt.mx/planeas/electricidad/generacion>
- [5] Isam H. Aljundi.: Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan. Applied Thermal Engineering 29, 324–328(2009) <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.02.029>
- [6] M. Aliyu, A.B. AlQudaihi, S.A.M. Said, M.A. Habib, Energy, Exergy and Parametric Analysis of a Combined Cycle Power Plant, Thermal Science and Engineering Progress (2020) <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100450>
- [7] Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado Tula, Prontuario de datos técnicos. ediciones Propias de la CFE.
- [8] A. Abdollahian, M.Ameri; Effect of supplementary firing on the performance of a combined cycle power plant, Applied Thermal Engineering, 191, 117049 (2021) <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117049>
- [9] A. Bejan, G. Tsatsaronis and M. Moran, *Thermal Desing and Optimization*. John Wile & Sons, 1996
- [10] Bejan A., “Advanced Engineering Thermodynamics” 3rd Edition, Ed. J. Wile, 2006
- [11] Moran M. J., Shapiro H. N., “Fundamentos de termodinámica técnica “. 2da Edición, Reverte. 2004.
- [12] Cengel, Y.A., Boles M. A., “Termodinámica”, 5ta Edición. McGraw Hill. 2007

- [13] S. Zhu, Z. Ma, et al. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions, *Energy*, 210, 118558 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118558>
- [14] O. R. Altarawneh, A. A. Alsarayreh et al. Energy and exergy analyses for a combined cycle power plant in Jordan, *Case Studies in Thermal Engineering*, 31, 101852 (2022) <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101852>
- [15] Kotas T. J. The exergy method of thermal plant analysis, Florida: krineger Publishing Company, 1995
- [17] A.K. Mossi Idrissa, K. Goni Boulama, Advanced exergy analysis of a combined Brayton/Brayton power cycle, *Energy* 166, 724-737 (2019) <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.117>
- [18] M. Elhelw, K. S. Al Dahma, A. H. Attia, Utilizing exergy analysis in studying the performance of steam power plant at two different operation mode, *Applied Thermal Engineering*, 150, 285-293 (2019) <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.003>
- [19] S. Bandyopadhyay, N..C. Bera, S. Bhattacharyya, Thermoeconomic optimization of combined cycle power plants, *Energy Conversion and Management*, 42, 359-371 (2001), [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00056-X](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00056-X)
- [20] Chart Software, Engineering Equation Solver (EES);2010. (<http://www.fchart.com/ees/>)
- [21] Klein S., Nellis G., “Mastering EES” F-Chart Software, 2013
- [22] Klein S., Nellis G., “Thermodynamics” 1st Edition, Cambridge University Press, 2012
- [23] Laboratorio de Pruebas de la CFE (LAPEM), Informe número K3323-128-12, Reporte de las pruebas de comportamiento térmico de la Central de Ciclo Combinado Tula paquete Norte