



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS**

**“ANÁLISIS TERMOECOLÓGICO Y OPTIMIZACIÓN
DE UNA CENTRAL DE CICLO COMBINADO”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**PRESENTA
M. EN C. ARTURO REYES LEÓN**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. PEDRO QUINTO DIEZ**

CIUDAD DE MÉXICO, MAYO DE 2018

CONTENIDO

NOMENCLATURA	i
RELACIÓN DE FIGURAS	iii
RELACIÓN DE TABLAS.....	iv
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
INTRODUCCIÓN	ix
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE TERMOECONOMÍA	7
1.3 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS	9
CAPÍTULO II: ANÁLISIS TERMOECOLÓGICO DE LOS EQUIPOS DE UNA CENTRAL DE CICLO COMBINADO	11
2.1 BALANCE DE MASA	11
2.2 BALANCE DE ENERGÍA	13
2.3 BALANCE DE ENTROPÍA	15
2.4 BALANCE DE EXERGÍA	16
2.5 ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL	19
2.6 BALANCE TERMOECONÓMICO	21
CAPÍTULO III: OPTIMIZACIÓN DE CENTRALES DE CICLO COMBINADO	24
3.1 FUNDAMENTOS DE EXERGOECONÓMICA	24
3.2 COSTO DE LA EXERGÍA.....	25
3.3 FLUJOS DE COSTOS PROMEDIO DEL PRODUCTO Y EL RECURSO	26
3.4 COSTO DE LAS CORRIENTES DE EXERGÍA PERDIDA	28
3.5 VARIABLES EXERGOECONÓMICAS PARA LA EVALUACIÓN DE COMPONENTES	29
3.5.1 COSTO DE LA DESTRUCCIÓN DE LA EXERGÍA	29
3.5.2 COSTO RELATIVO.....	30
3.5.3 FACTOR EXERGOECONÓMICO.....	31
3.6 OPTIMIZACIÓN EXERGOECONÓMICA.....	31
CAPÍTULO IV: CASO DE ESTUDIO: APLICACIÓN	33
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL DE CICLO COMBINADO.....	33
4.1.1 TURBINAS DE GAS.....	34
4.1.2 CÁMARAS DE COMBUSTIÓN.....	35

4.1.3	COMPRESORES	35
4.1.4	TURBINAS DE VAPOR	35
4.1.5	RECUPERADORES DE CALOR	36
4.2	MODELO TERMOECOLÓGICO DE LA CENTRAL DE CICLO COMBINADO	36
4.2.1	BALANCE DE FLUJOS DE MASA	37
4.2.2	BALANCE DE FLUJOS ENERGÉTICOS	38
4.2.3	BALANCE DE ENTROPÍA DEL CASO DE ESTUDIO	39
4.2.4	BALANCE DE LOS FLUJOS EXERGÉTICOS	40
4.2.4.1	EXERGÍA FÍSICA.....	41
4.2.4.2	EXERGÍAS QUÍMICAS	41
4.2.4.3	EXERGÍA DEL RECURSO Y DEL PRODUCTO	41
4.2.4.4	EXERGÍA DESTRUIDA.....	42
4.2.4.5	EFICIENCIAS EXERGÉTICAS	43
4.2.5	BALANCE TERMOECONÓMICO DEL CASO DE ESTUDIO	44
4.2.6	ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL DEL CASO DE ESTUDIO	46
4.3	OPTIMIZACIÓN DE LA CENTRAL DE CICLO COMBINADO	46
4.3.1	BALANCE DE COSTOS EXERGOECONÓMICOS	46
4.3.2	COSTO PROMEDIO POR UNIDAD EXERGÍA DE LOS PRODUCTOS Y LOS RECURSOS	48
4.3.3	COSTO EXERGOECONÓMICO DE LA DESTRUCCIÓN DE EXERGÍA	50
4.3.4	CÁLCULO FACTORES EXERGOECONÓMICOS	50
4.3.5	CÁLCULO DEL COSTO RELATIVO	51
4.3.6	OPTIMIZACIÓN EXERGOECONÓMICA	52
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		54
5.1	ANÁLISIS TERMOECOLÓGICO.....	54
5.1.1	ANÁLISIS TERMOECOLÓGICO A CONDICIONES DE DISEÑO	54
5.1.2	ANÁLISIS TERMOECOLÓGICO A CONDICIONES DE OPERACIÓN	59
5.2	ANÁLISIS DE LA OPTIMIZACIÓN EXERGOECONÓMICA	64
5.2.1	ANÁLISIS DE LA OPTIMIZACIÓN EXERGOECONÓMICA A CONDICIONES DE DISEÑO	64
5.2.2	ANÁLISIS DE LA OPTIMIZACIÓN EXERGOECONÓMICA A CONDICIONES DE OPERACIÓN	68
CONCLUSIONES		72
RECOMENDACIONES		74
REFERENCIAS		75

APÉNDICES	80
APÉNDICE A: PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE	80
APÉNDICE B: PROPIEDADES TERMODINÁMICAS.....	83
APÉNDICE C: MODELO ECONÓMICO	85
APÉNDICE D: PROGRAMA DE CÁLCULO	88

NOMENCLATURA

A	Exergía total, kJ	\dot{Z}	Costo de inversión, \$/s
\dot{A}	Flujo de exergía, kJ/s	Z	Costo de compra, \$
a	Exergía específica, kJ/kg	Letras griegas	
A^*	Consumo exergético, kJ/s	η_{II}	Eficiencia exergética, %
\dot{C}	Costo Exergoeconómico \$/s	ε	Eficiencia ecológica, %
c	Costo exergoeconómico unitario, \$/GJ	η	Eficiencia energética, %
CRF	Factor de recuperación de Capital	σ	Generación de entropía, kJ/K
\dot{E}	Energía total, kJ/s	Π_g	Indicador de contaminación kg/MJ
f	Factor exergoeconómico, %	φ	Factor de Mantenimiento.
g	Fuerza de gravedad, m/s ²	Superíndice	
h	Entalpía específica, kJ/kg	CI	Costo de inversión
\bar{h}_f°	Entalpía de formación, kJ/kmol	FI	Física
k^*	Costo exergético unitario,	OM	Costo de Operación y Mantenimiento
M	Masa molar, kmol	QU	Química
\dot{m}	Flujo másico, kg/s	Subíndice	
N	Número de horas de Operación	a	aire
p	Presión, bar	c	Combustible
PCI	Poder calorífico inferior, kJ/kg	D	Destrucción de la exergía
\dot{Q}	Flujo de calor, kJ/s	e	entrada
\bar{R}	Constante universal de los gases, 8.314 kJ/kmol K	g	gas
r	Costo relativo, %	$g.c.$	Gases de combustión
r_p	Relación de presión	k	k-esimo componente
\dot{S}	Flujo de entropía, kJ/K	R	Recurso
\bar{s}	Entropía específica, kJ/kmol-K	Re	Residuo
T	Temperatura, °C o K	P	Producto
\dot{W}	Potencia, kW	Pe	Pérdida
		s	salida

<i>vc</i>	Volumen de control	TV	Turbina de vapor
0	Estado de referencia	C	Condensador
CA	Compresor de aire	BAC	Bomba de Agua de Condensado
CC	Cámara de combustión	D	Deaerador
TG	Turbina de gas	BAA	Bomba de agua de alimentación
RC	Recuperador de calor.	ae	Agua de enfriamiento
1,2,3, n	Número de flujo de corriente		

RELACIÓN DE FIGURAS

FIGURA 2.1- Diagrama de una Central de Ciclo Combinado

FIGURA 2.2- Flujo de masa en un volumen de control en estado permanente

FIGURA 2.3- Flujo de energía en un volumen de control en estado permanente

FIGURA 2.4- Flujo de entropía en un volumen de control en estado permanente

FIGURA 2.5- Flujo de exergía en un volumen de control en estado permanente

FIGURA 2.6- Sistema secuencial

FIGURA 4.1- Diagrama del proceso de generación de la Central de Ciclo Combinado Tula.

FIGURA 4.2- Diagrama de la Central de Ciclo Combinado Tula.

FIGURA 5.1- Generación de entropía de los equipos del ciclo combinado a sus condiciones de diseño al 100 % de carga.

FIGURA 5.2- Distribución de los flujos de exergía del ciclo combinado a sus condiciones de diseño al 100% de carga.

FIGURA 5.3- Eficiencia exergética de los equipos del ciclo combinado a sus condiciones de diseño a 100% de carga.

FIGURA 5.4- Eficiencia energética, exergética y ecológica de la central analizada a condiciones de diseño.

FIGURA 5.5- Generación de entropía de los equipos de la central analizada a condiciones de operación.

FIGURA 5.6- Distribución de los flujos de exergía de los equipos del ciclo combinado a condiciones de operación.

FIGURA 5.7- Eficiencia exergética de los equipos del ciclo combinado a condiciones de operación.

FIGURA 5.8- Eficiencia energética, exergética y ecológica de la central a condiciones de operación.

RELACIÓN DE TABLAS

- TABLA 3.1.-** Definición del Recurso-Producto del sistema de la figura 2.1
- TABLA 3.2.-** Costo promedio del recurso y el producto del sistema de la figura 2.1
- TABLA 4.1.-** Capacidad instalada de la Central de Ciclo Combinado Tula
- TABLA 4.2.-** Características de la Turbina de Gas
- TABLA 4.3.-** Características de la Cámara de Combustión.
- TABLA 4.4.-** Características del Compresor de Aire.
- TABLA 4.5.-** Características de la Turbina de Vapor
- TABLA 4.6.-** Características del Recuperador de Calor.
- TABLA 5.1-** Flujos de exergía a condiciones de diseño.
- TABLA 5.2-** Exergía del recurso y producto a condiciones de diseño.
- TABLA 5.3-** Exergía destruida a condiciones de diseño.
- TABLA 5.4-** Dióxido de carbono equivalente e indicador de contaminación para las condiciones de diseño.
- TABLA 5.5-** Costos exergéticos unitarios para las condiciones de diseño.
- TABLA 5.6-** Consumos exergéticos a condiciones de diseño.
- TABLA 5.7-** Flujos de exergía a condiciones de operación.
- TABLA 5.8-** Exergía del recurso y el producto a condiciones de operación.
- TABLA 5.9** Destrucción de exergía a condiciones de operación.
- TABLA 5.10** Dióxido de carbono equivalente e indicador de contaminación para condiciones de operación.
- TABLA 5.11** Costos exergéticos unitarios para condiciones de operación.
- TABLA 5.12** Consumos exergéticos para condiciones de operación.
- TABLA 5.13** Costos exergoeconómicos unitario y costos exergoeconómicos a condiciones de diseño.
- TABLA 5.14** Costo del recurso y producto a condiciones de diseño.
- TABLA 5.15** Costo de la destrucción de exergía a condiciones de diseño.
- TABLA 5.16** Costo de capital de inversión, operación y mantenimiento a condiciones de diseño.
- TABLA 5.17** Costo relativo y factor exergoeconómico a condiciones de diseño.
- TABLA 5.18** Valores de las variables de decisión en el caso optimo a condiciones de diseño.
- TABLA 5.19** Costo exergoeconómico unitario y costos exergoeconómicos a condiciones de operación.

TABLA 5.20 Costo del recurso y producto a condiciones de operación.

TABLA 5.21 Costo de la exergía destruida a condiciones de operación.

TABLA 5.22 Costo de capital de inversión, operación y mantenimiento a condiciones de operación.

TABLA 5.23 Costo relativo y factor exergoeconómico a condiciones de operación.

TABLA 5.24 Valores de las variables de decisión en el caso óptimo a condiciones de operación.

TABLA A.1.- Composición del gas natural empleado en la CCCT a condiciones de diseño.

TABLA A.2.- Composición del gas natural empleado en la CCCT a condiciones de operación.

TABLA A.3.- Composición del aire para las condiciones de diseño y operación.

TABLA A.4.- Composición de los gases de combustión a condiciones de diseño.

TABLA A.5.- Composición de los gases de combustión a condiciones de operación.

TABLA A.6.- Propiedades de los compuestos de las sustancias de trabajo.

TABLA B.1- Parámetros termodinámicos de las corrientes del ciclo combinado a sus condiciones de diseño.

TABLA B.2- Parámetros termodinámicos de las corrientes del ciclo combinado a sus condiciones de operación.

TABLA B.3- Entalpías y entropías calculadas del ciclo combinado a sus condiciones de diseño.

TABLA B.4- Entalpías, entropías calculadas del ciclo combinado a sus condiciones de operación

TABLA C.1.- Constantes utilizadas en los costos de compra de los componentes

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el análisis termoecológico y optimización de una central de ciclo combinado. El análisis se hizo aplicando los balances de masa, energía, entropía, exergía, termoeconómico, impacto ambiental y exergoeconómico a partir de la teoría de costos exergéticos, con el propósito de identificar y cuantificar los parámetros que más influencia tienen en el comportamiento de la central de ciclo combinado.

El estudio se realizó a partir de las condiciones de diseño y operación de la central. Se presenta una metodología para el cálculo de los balances de masa, energía, entropía, exergía e impacto ambiental a lo largo del ciclo combinado, se determinaron parámetros tales como: potencia del compresor de aire, potencia de las turbinas de gas y vapor, flujo de calor de condensador y el recuperador de calor, flujos de exergía, eficiencia exergética y ecológica, el dióxido de carbono equivalente (CO_2)_e producido por la combustión del gas natural, exergía destruida en los diferentes equipos que forman la central.

Con la teoría del costo exergético se determinaron los costos exergéticos unitarios y flujos exergéticos de las diferentes corrientes de la central cuando se toma en cuenta los residuos, por medio del análisis exergoeconómico se obtuvieron los costos exergoeconómicos unitarios, los costos exergoeconómicos de las corrientes del ciclo, se determinó el costo de los recursos, los productos y de la exergía destruida, el costo de inversión y mantenimiento, costo de compra de los diferentes equipos, se determinó la diferencial de costo relativo, el factor exergoeconómico. Por otra parte, se analizó las influencias de las variables de decisión la relación de presión y la eficiencia del compresor de aire, la temperatura de los productos de combustión que entran en la turbina de gas y las eficiencias de las turbinas de gas y vapor, la temperatura de entrada del vapor a la turbina y las eficiencias de las bombas de agua de alimentación y de agua de condensado.

A fin de disponer de una herramienta que permita agilizar los cálculos, en el presente trabajo se desarrolló un programa computacional en el software comercial Engineering Equation Solver (ESS), el programa calcula las propiedades termodinámicas de las diferentes corrientes del ciclo combinado, y con los datos de diseño y operación, el código es capaz de realizar los balances antes mencionados.

Finalmente, por medio de la metodología desarrollada en el presente trabajo y con ayuda del programa de computo desarrollado, se obtienen resultados del análisis termoecológico y optimización de la central de ciclo combinado.

De los resultados demostraron que la mayor generación de entropía ocurre en la cámara de combustión para las condiciones de diseño y operación, los mayores flujos de exergía del recurso y del producto se tienen en la cámara de combustión, el mayor valor del costo exergético unitario se presentó en las corrientes de salida de los deareadores para las condiciones de diseño y operación, el máximo costo exergoeconómico unitario se obtuvo en las corrientes de salida de los deareadores, el valores mayores de costo exergoeconómico se obtuvo en las corrientes de los gases de combustión que entran a la turbina de gas y finalmente los valores menores del factor exergoeconómico se tienen en la cámara de combustión y el condensador, por lo que se podría considerar mejorar la eficiencia de estos equipos, aunque la cámara de combustión está limitada por el proceso de combustión que ocurre dentro de ella.

Se concluye que la metodología utilizada en este trabajo ayuda a mejorar los ciclos combinados a través de disminuir la cantidad de recursos utilizados y mantener la producción de diseño, por medio de la correcta asignación de los recursos y el mejor aprovechamiento de los mismo.

ABSTRACT

In the present work, the thermoecological analysis and optimization of a combined cycle power plant was carried out. The analysis was carried out by applying mass, energy, entropy, exergy, thermoeconomics, environmental impact and exergetoeconomics balances based on the exergetic costs, with the purpose of identifying and quantifying the parameters that have the most influence on the behavior of the plant of combined cycle.

The study was carried out from the design and operation conditions of the plant, a methodology is presented for the calculation of the mass, energy, entropy, exergy and environmental impact balances throughout the combined cycle, such parameters were determined such as: power of the air compressor, power of the gas and steam turbines, heat flow of the condenser and heat recovery, exergetic flows, exergetic and ecological efficiency, the equivalent carbon dioxide (CO_2)_e produced by the combustion of natural gas, exergy destroyed in the different teams that form the power station.

With the exergy cost theory the unitary exergetic costs and exergetic flows of the different currents of the plant were determined when the residuals are taken into account, by means of the exergetoeconomic analysis the exergetoeconomic unit costs, the exergetoeconomic costs of the currents of the cycle were obtained, cost of the resources, the products and the destroyed exergy, the cost of investment and maintenance, the cost of purchasing the different equipment, the relative cost differential, the exergetoeconomic factor were determined. On the other hand, the influences of the decision variables the pressure ratio and efficiency of the air compressor, the temperature of the combustion products entering the gas turbine and the efficiencies of the gas and steam turbines were analyzed, the steam inlet temperature to the turbine and the efficiencies of the feedwater and condense water pumps.

In order to have a tool that allows to speed up the calculations, in the present work a computer program was developed in the commercial software Engineering Equation Solver (ESS), the program calculates the thermodynamic properties of the different currents of the combined cycle, and with the design and operation data, the code is capable of carrying out the mentioned balances.

Finally, by means of the methodology developed in this work and with the help of the developed computer program, results are obtained from the thermoecological analysis and optimization of the combined cycle power plant.

From the results showed that the highest generation of entropy occurs in the combustion chamber for design and operation conditions, the greater exergy flows of the resource and the product are in the combustion chamber, the greater value of the unit exergetic cost is presented in the exit currents of the deaerators for the design and operation conditions, the maximum unit exergetoeconomic cost was obtained in the exit currents of the deaerators, the higher exergetoeconomic cost values were obtained in the flue gas currents that enter the gas turbine and finally the lower values of the exergetoeconomic factor are in the combustion chamber and the condenser, so it could be considered to improve the efficiency of these components, even though the combustion chamber is limited by the process of combustion that occurs within it.

It is concluded that the methodology used in this work helps to improve combined cycles by reducing the amount of resources used and maintaining design production, through the correct allocation of resources and the best use of them.

INTRODUCCIÓN

La Termoeconomía, mediante la aplicación integrada y rigurosa de la economía y la termodinámica, proporciona una herramienta para el análisis, la evaluación y la optimización de centrales de ciclo combinado. Todo ingeniero debe ser capaz de analizar y evaluar los equipos e instalaciones que encuentre en su campo de actividad, con el objetivo de optimizar los costos de producción. Por otra parte, la actividad distintiva del ingeniero es el proyecto. Éste tiene por objeto sintetizar algo que antes no existía y evaluarlo con criterios técnicos además de criterios basados en la economía, la seguridad, la fiabilidad y el impacto ambiental. Las capacidades de síntesis y evaluación son la esencia misma de la actividad creadora del ingeniero.

Es sabido que en toda instalación industrial se debe procurar minimizar el consumo de energía y otros recursos, así como la producción de efluentes y residuos. Estos últimos no son siempre consecuencias inevitables de su funcionamiento: cuanto menos eficiente es una planta, más residuos genera, y recíprocamente. Los efluentes y residuos no producidos, por ser la planta más eficiente, ahorran equipos costosos y aminoran su impacto ambiental. Aquí se encuentra la raíz de las tecnologías limpias, que han de ser siempre eficientes. El proyecto de sistemas limpios y eficientes requiere un empleo riguroso de los recursos científicos y tecnológicos adecuados. Por lo general, cuanto más limpio y eficiente es un sistema, tanto mayor es la inversión que requiere, con la consiguiente repercusión en los costos. La Termoeconomía facilita el logro del costo óptimo, conjugando las mejoras en el consumo de recursos y la eficiencia energética con los requerimientos de capital.

La Termoeconomía se aplica a una extraordinaria variedad de sistemas, tales como los que pueden encontrarse en la industria petrolera, química o metalúrgica, generación de energía eléctrica, climatización, etc. Su utilización se extiende tanto al diseño de nuevas plantas como al análisis de instalaciones existentes - para diagnosticar y valorar las deficiencias - y la evaluación de mejoras, ampliaciones o modificaciones.

El desarrollo de este trabajo se divide en 5 capítulos con las recomendaciones y conclusiones.

En el **capítulo I**, “Marco Teórico”, se describen los antecedentes de la investigación, se definen los conceptos básicos de la investigación, se define el alcance y objetivo del trabajo.

En el **capítulo II**, “Análisis Termoeológico de los equipos de una central de ciclo combinado” se describen los análisis termodinámicos que rigen la operación de una central de ciclo combinado que operan en estado permanente. Los análisis incluidos son los análisis de masa, energía, entropía, exergía, de impacto ambiental y termoeconómico.

En el **capítulo III** “Optimización de centrales de ciclo combinado” se describen la metodología de optimización exergoeconómica, se presentan desde los fundamentos de la exergoeconómica hasta las bases y aplicación de la optimización exergoeconómica.

En el **capítulo IV**, “Caso de estudio: Aplicación”, el capítulo inicia con la descripción de la central de ciclo combinado y los equipos que forman la central que se analiza, se aplica la metodología de análisis termoeológico y optimización exergoeconómica a la central de ciclo combinado en estudio a las condiciones de diseño y operación al 100% de cargas. Dentro del análisis se obtienen tanto los costos exergéticos como los costos exergoeconómicos para poder evaluar el sistema. Para automatizar los cálculos se desarrolló un programa de computo en el software comercial Engineering Equation Solver (EES).

En el **capítulo V**, “Análisis de resultados”, se presentan y analizan los resultados obtenidos del análisis termoecológico y optimización exergeoeconómica para las condiciones de diseño y operación de la central de ciclo combinado analizada.

Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones, referencias y apéndices de este trabajo

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

El consumo de energía es uno de los indicadores más importantes que muestra las etapas de desarrollo de los países y el nivel de vida de las comunidades. El incremento de la población, la urbanización, la industrialización, el desarrollo tecnológico traen como consecuencia directa el aumento del consumo de energía. Esta tendencia de rápido crecimiento a nivel mundial ha provocado graves problemas ambientales como la contaminación y el efecto invernadero.

Actualmente, el 58.6 % de electricidad en el mundo se produce a partir de uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo, combustóleo, gas natural) que es suministrado en centrales termoeléctricas, mientras que el 41.4% restante de la electricidad se produce a partir de diferentes fuentes como la hidráulica, nuclear, eólica, solar, geotérmica y biogás [1].

La generación de electricidad en los países pertenecientes a la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) en 2014 quedó dominada por los combustibles fósiles (59%), principalmente carbón y gas.

El 40% de las emisiones de CO₂ que se arrojan al medio ambiente están relacionadas con la energía proveniente de la generación de energía eléctrica [2, 3].

Tradicionalmente el rendimiento de las centrales termoeléctricas es evaluado a través del criterio del rendimiento energético basado en la primera ley de la termodinámica. En décadas recientes, la determinación del rendimiento exergético basado en la segunda ley de la termodinámica se ha encontrado como un método más útil para el diseño, evaluación, optimización y mejoramiento de las centrales termoeléctricas.

El análisis exergético no solo puede determinar magnitudes, ubicación y causa de las irreversibilidades en las centrales termoeléctricas, sino que también proporciona una evaluación más significativa de la eficiencia individual de los diferentes equipos de estas centrales. Los puntos anteriores son la diferencia entre el análisis exergético y el análisis energético. Por lo tanto, se puede decir que la realización de análisis exergético y energético en conjunto pueden dar una representación completa de las características de las centrales termoeléctricas [4, 5].

Una Central de Ciclo Combinado es una planta de producción de energía eléctrica que combina dos ciclos para obtener el máximo rendimiento, y estos son el ciclo Brayton y el ciclo Rankine. En el ciclo Brayton, los gases de combustión accionan directamente una turbina de gas, y en el ciclo Rankine, se aprovecha la energía residual de los gases de escape de la turbina de gas para generar vapor en un recuperador de calor, para accionar a su vez una turbina de vapor.

Cada máquina térmica (turbina de gas y turbina de vapor) acciona un generador eléctrico donde se transforma la energía mecánica en eléctrica. La combinación de los ciclos Brayton y Rankine permite que las Centrales de Ciclo Combinado tengan una eficiencia energética muy superior (del orden del 57%) a la de las Centrales Térmicas Convencionales (en torno al 35%).

Algunos de los aspectos relevantes de las Centrales de Ciclo Combinado son [4]:

- La central puede operar a plena carga o cargas parciales, hasta un mínimo de aproximadamente el 45% de la potencia máxima.
- Proporciona mayor eficiencia para un margen más amplio de potencias.
- El costo de inversión es más bajo por MW instalado.
- Los periodos de construcción son cortos.
- Se requiere menor superficie de planta por MW instalado al compararlo con las centrales termoeléctricas convencionales.
- Su consumo de agua de enfriamiento es bajo.
- La utilización de gas natural para la generación de electricidad mediante esta tecnología, se encuentra dentro de la política medio ambiental de un gran número de países, ya que ofrece muchas ventajas en comparación con el resto de tecnologías de producción eléctrica. En concreto, las emisiones de CO₂ en relación a los kW-h producidos son menos de la mitad de las emisiones de una central termoeléctrica convencional.

1.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Muchos investigadores e ingenieros se refieren al método de análisis exergético como una herramienta muy poderosa para analizar, evaluar, diseñar, mejorar y optimizar los sistemas y procesos. Por las razones anteriores no es de extrañar que el método exergético sea utilizado en algunas industrias, aunque la idea es que lo usen todas las industrias.

Autores como Tadeusz, Kotas, Bejan, Sciubba, Dincer, Rosen y Tsatsaronis han realizado investigaciones sobre el análisis del desempeño energético y exergético en los diferentes sistemas o procesos de la industria. Estos estudios han provocado que en los últimos años el uso del análisis exergético aumente. Como ejemplos de este aumento de este tipo de análisis se pueden ilustrar algunas empresas de generación eléctrica, que utilizan métodos de exergía para diseñar mejores centrales, mejorar la eficiencia y evitar el deterioro del rendimiento en las centrales existentes. Además, algunas instalaciones de cogeneración utilizan métodos exergéticos tanto para mejorar la eficiencia como para evaluar los costos económicos de producción [6].

El-Sayed y Evans (1970) [7] introdujeron el concepto de termoeconomía, donde se asignan costos a las ineficiencias de un sistema. Tsatsaronis (1985) [8] propuso el análisis exergoeconómico de las plantas de conversión de energía. Valero (1986) [9] propuso la teoría del Costo Exergético.

Torres (1991) [10] presentó en su tesis doctoral los fundamentos de la Teoría del Coste Exergético en términos de la Exergoeconomía Simbólica con la cual sentó las bases matemáticas de la termoeconomía. Realizó un análisis termoeconómico a una central de cogeneración, donde estudió las posibles mejoras estructurales para reducir los costos de producción.

Erlach, Serra y Valero (1999), propusieron la Teoría Estructural de la Termoeconomía como una formulación matemática estándar para todas las demás metodologías termoeconómicas las cuales pueden ser expresadas por modelos de ecuaciones lineales. Dentro de estas metodologías está la teoría del Costo Exergético (ETC) y el Análisis Funcional Termoeconómico (TFA) [11].

Correas (2001), presentó una formulación detallada del problema del diagnóstico aplicado a sistemas térmicos y propuso un modelo de diagnóstico para una central de ciclo combinado. Su enfoque de diagnóstico tiene como base la Teoría Estructural de la Termoeconomía [12].

Verkhivker et al. (2001), planteó el mejoramiento del desempeño de dispositivos generadores y consumidores de energía durante su diseño y operación mediante la combinación del análisis de exergía y económico. Muestra su aplicación al caso de una planta nuclear, en la cual se calcula el coeficiente de desempeño del sistema [13].

Valdés y Rapun (2001), presentaron la optimización de un generador de vapor (HRSG) de un ciclo combinado mediante la utilización del método de coeficientes de influencia y el método de Newton Raphson. Se optimiza la distribución del área de la caldera entre sus distintos componentes mediante la técnica propuesta [14].

Franco y Russo (2002) realizaron la optimización termoeconomica de un recuperador de calor (HRSG) de una central de ciclo combinado. El objetivo de la optimización termoeconómica es la disminución de los costos, que es la suma de los costos de las ineficiencias y el costo del recuperador de calor. Los resultados de la aplicación de la optimización termoeconómica muestran un aumento significativo en la eficiencia térmica de la central que se aproxima al 60 %, obtenido con el aumento de la superficie de calor y la reducción del Pinch Point [15].

Torres et al. (2002), realizaron un diagnóstico termoeconómico de los sistemas energéticos complejos. Este análisis fue aplicado para diagnosticar las causas de consumo adicional de combustible provocado por la ineficiencia de los componentes en una planta operando en estado estacionario. Se presentó un nuevo método basado en la teoría estructural y la termoeconomía simbólica e introdujeron los conceptos de: mal función intrínseca, mal función inducida y disfunción [16].

Kwak et al. (2003), presentaron un análisis exergético y termoeconómico de una central de ciclo combinado de 500 MW de capacidad nominal. En este análisis se aplicaron las leyes de conservación de masa y energía, los balances de exergía y costo exergético para cada componente del sistema y para el sistema completo. El modelo exergoeconómico representa la estructura productiva del sistema, este se utilizó para observar el proceso de formación de costos y la interacción productiva entre sus componentes [17].

Mirandola y Stoppato (2003), desarrollaron un enfoque paso a paso para optimizar centrales de conversión de energía: análisis de energía (Primera Ley), análisis de exergía, análisis termoeconómico, evaluaciones micro económicas, evaluación de impacto ambiental. Se tomó como caso de estudio la planta de cogeneración de Torino Italia [18].

Verda (2004), propuso un método para diagnóstico termoeconómico. El procedimiento inicialmente fue desarrollado para la localización de anomalías y posteriormente se amplió incluyendo los ahorros obtenidos cuando dichas anomalías son eliminadas. El modelo termoeconómico del sistema corresponde a la planta sin anomalías. Los efectos inducidos por las anomalías fueron removidos progresivamente [19].

Valero et al. (2004), en el artículo titulado “On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions. Part 1: thermoeconomic approach to the diagnosis of energy utility system (the TADEUS problema).”, pusieron una base común para la aplicación de la Termoeconomía

y así identificar mal funciones y evaluar sus efectos sobre el desempeño de la central. Se revisaron los aspectos principales al realizar un diagnóstico de las mal funciones de un sistema energético utilizando la termoeconomía. En la segunda parte de este artículo, se analiza con mayor profundidad la forma de interpretar y analizar los índices y variables Termoeconómicas: “Part 2: Malfunctions definitions and assessment” [20 y 21].

Verda, Serra y Valero (2004), examinaron los efectos del sistema de control en la propagación de mal funciones y la forma de tratarlos mediante el uso de la Teoría Estructural Termoeconómica. Se distingue el uso del término disfunción, el cual se presenta cuando un componente aumenta su producción sin cambiar su eficiencia. El propósito del estudio es explicar cómo se pueden eliminar los efectos del sistema de control con el fin hacer evidente las anomalías reales que causan las mal funciones [22].

Zaleta et al. (2004), presentaron una metodología de diagnóstico para sistemas de generación de potencia para detectar y evaluar el origen de las mal funciones e ilustrarlas mediante su aplicación al problema TADEUS. La metodología se basa en la comparación de dos condiciones operativas: la condición operativa de prueba (TOP) que muestra las condiciones reales y la condición operativa de referencia (ROP) basada en modelos de simulación [23].

Verda, Serra y Valero (2005), presentaron un compendio de los avances de los tres años anteriores relacionados con las técnicas de diagnóstico termoeconómico en dos artículos: “Thermoeconomic Diagnosis: Zooming Strategy Applied to Highly Complex Energy Systems. Part 1”. El primer artículo se refiere a la detección y localización de anomalías. El segundo trata sobre la selección de la estructura productiva y tiene por título “Thermoeconomic Diagnosis: Zooming Strategy Applied to Highly Complex Energy Systems. Part 2” [24 y 25].

Vieira, Donatelli y Cruz (2005), describieron un enfoque integrado para la optimización exergoeconómica de sistemas térmicos y su aplicación al problema del sistema de cogeneración CGAM (C. Frangopoulos, G. Tsatsaronis, A. Valero y M. von Spakovsky) para lo cual se utiliza un simulador comercial y una interfaz en Excel con macros y subrutinas escritos en Visual Basic para aplicaciones [26].

Zhang et al. (2006), presentaron un método de análisis de costo termoeconómico (costo exergético mejorado) aplicándolo a una central térmica de carbón pulverizado localizada en Hunan, China, donde obtuvieron como resultado que el costo específico de irreversibilidad es un mejor indicador que el costo exergético unitario para evaluar el desempeño de un componente [27].

Li, Marechal, et al. (2006), desarrollaron una metodología para el análisis de los sistemas complejos que poseen un gran número de parámetros técnicos, económicos y ambientales. Hicieron una modelación termoeconómica a un ciclo combinado de gas natural con separación de CO₂ integrado mediante algoritmos multi-objetivos para caracteriza los resultados económicos y ambientales de estos sistemas. Los resultados muestran la influencia de la configuración y los parámetros técnicos sobre las eficiencias de la central y sus subsistemas; también proporcionan información sobre la relación entre el costo de generación de energía y las emisiones de CO₂, y permiten un análisis de los parámetros económicos importantes, como los precios del gas natural y de la electricidad [28].

Koch, Cziesla y Tsatsaronis (2007), desarrollaron un algoritmo evolutivo para la reducción del costo de producción de una central de ciclo combinado. Se optimizó de manera simultánea la configuración del diseño y las variables del proceso. Este algoritmo fue aplicado a una central de ciclo combinado

de 240 MW, donde se obtuvo un diseño óptimo en el cual se identifican las magnitudes, localización y las causas de las ineficiencias termodinámicas [29].

Aljundi, (2009), presentó un análisis de energía y exergía de una central eléctrica de Jordania. Los objetivos principales de su trabajo fueron analizar los componentes del sistema por separado, para identificar y cuantificar los sitios donde se tienen las mayores pérdidas de energía y exergía. Además, se presentó el efecto de la variación del estado de referencia en el análisis. Los resultados principales del estudio son: las principales pérdidas de energía se presentan en el condensador con 66%, la eficiencia térmica del ciclo fue de 26 %, mientras que la eficiencia exergética es de 25%. La principal fuente de destrucción de exergía es el generador de vapor con 77%, donde la reacción química es la fuente más significativa de la destrucción de exergía en un generador de vapor. [30].

Ataei, Yoo (2010) realizaron una simulación de una planta de potencia de vapor de 325 MW usando el simulador Cycle Tempo 5.0 y se optimizaron los parámetros de funcionamiento del ciclo de Rankine, combinando el concepto de exergía con una aproximación en base al Pinch Point. Los resultados de la combinación muestran una reducción del consumo de combustible en 5.3% en la planta y el rendimiento del ciclo termodinámico aumenta de 39.4 a 41.9 % [31].

Kaushik, Siva, Tyagi (2011), presentaron un estudio del análisis energético y exergético de las centrales termoeléctricas que utilizan carbón y gas, como combustible. En este artículo se proporciona una revisión de los estudios realizados sobre las centrales térmicas en los últimos años. La conclusión de este trabajo es que la mayor pérdida de exergía se produce en el generador de vapor y en la cámara de combustión de las centrales analizadas [32].

Godoy, Benz, Scenna (2011) realizaron la optimización de una central de ciclo combinado por medio de los costos mínimos específicos anuales; estos fueron determinados del capital de inversión y los costos operativos, a través de un modelo de programación matemática no lineal. Las variables de decisión para la optimización fueron el área de transferencia de calor y la generación de energía. El análisis permitió observar el comportamiento del diseño de la central de potencia y las variables de operación cuando se enfrentan a diferentes condiciones de mercado de acuerdo al costo de inversión y el costo operativo provocado por el consumo de combustible [33].

Ahmadi, Dincer y Rosen (2011) realizaron un análisis exergético, exergoeconómico y de impacto ambiental y optimización en varias centrales de ciclo combinado. En la primera parte, se realizó un análisis termodinámico de acuerdo al balance de energía y exergía de las centrales de ciclo combinado. Se analizaron los efectos de la alimentación complementaria de gas en el desempeño del ciclo y de las emisiones de CO₂, utilizando la primera y segunda leyes de la termodinámica. En la segunda parte, se realizó una optimización multi-objetivo para determinar los "mejores" parámetros de diseño, considerando factores exergéticos, económicos y ambientales. Las funciones objetivo de la optimización fueron: la eficiencia exergética, el costo total de los productos del sistema y las emisiones de CO₂ de la central. Los resultados de ambos análisis de exergía y exergoeconómico muestran que las mayores destrucciones de exergía se producen en la cámara de combustión del Combined Cycle Power Plant (CCPP) y el aumento de la temperatura de entrada de turbina de gas disminuye el costo de la destrucción de exergía. Los resultados de la optimización demuestran que las emisiones de CO₂ se reducen mediante la selección de los mejores componentes y usando una velocidad baja de inyección de combustible en la cámara de combustión [34].

Petrakopoulou, Tsatsaronis, et al (2012) analizaron una central de ciclo combinado utilizando análisis exergético convencional y avanzado. Excepto en el sistema de expansión de la turbina de gas y la

turbina de vapor de alta presión, la mayor parte de la destrucción de exergía en los componentes de la planta es inevitable. Esta parte inevitable se ve limitada por las limitaciones tecnológicas internas. Los resultados muestran que una alta destrucción de exergía es causada por la cámara de combustión. Casi el 87% de la total destrucción de exergía dentro de este componente es resultado de la operación del componente y el 68 % de la destrucción total de exergía no se puede evitar. En total, hay un cierto potencial de mejora para la planta en general, relacionado con las condiciones de funcionamiento interno de los componentes (destrucción de exergía endógena), mientras que las interacciones de componentes (destrucción de exergía exógena) son menos significativas [35].

Reza, Amidpour y Ehsan (2012), realizaron un estudio de la optimización multi-objetivo para el diseño combinado de una turbina de gas y una planta de desalinización. En su estudio de optimización se consideraron aspectos exergéticos, económicos y ambientales al mismo tiempo. Con el fin de lograr el diseño óptimo, se utilizó la técnica de algoritmo genético multi-objetivos (MOGA). La función objetivo termoambiental se obtuvo integrando los impactos ambientales y termoeconómicos. Los resultados de la optimización mostraron que el costo de los productos y del impacto del costo ambiental se reducen en un 13.4 % y 53.4 %, respectivamente, mientras que un aumento del 14.8 % ocurre en la eficiencia exergética total [36].

Tica et al. (2012), presentaron un método para transformar un modelo físico de una del Combined Cycle Power Plant (CCPP) diseñada para la simulación en un modelo orientado a la optimización, que se puede utilizar con algoritmos eficientes para mejorar el rendimiento de puesta en operación. La metodología se basa principalmente en la reformulación de la planta inicialmente representado con fuentes de discontinuidad en un modelo uniforme, mediante el uso de aproximaciones continuas. Los resultados de la validación demuestran que el modelo es consistente y enfatizan el hecho de que es lo suficientemente preciso para ser utilizado con fines de optimización y control [37].

Tajik, Ahmadi et al. (2012) presentaron un estudio de los efectos de los niveles de presión del HRSG en la eficiencia exergética de una central de ciclo combinado. Se evaluaron tres tipos de ciclos combinados, con la misma turbina de gas. Se modelaron uno a doble presión y dos a triple presión en el HRSG. Los resultados muestran que el aumento en el número de niveles de presión afecta a la destrucción de exergía en el HRSG, y como resultado, se produce un aumento en la eficiencia exergética del ciclo. Los resultados de análisis termodinámico muestran que las pérdidas debidas a la transferencia de calor en el HRSG y en la salida de los gases de combustión en un ciclo combinado de recalentamiento de triple presión son menores que los otros casos. Desde el análisis económico, se encontró que aumentando el número de niveles de presión de generación de vapor conduce a un aumento del costo de la inversión total y específicamente de la planta aproximadamente 6 y 4 %, respectivamente. [38].

Ganjeh et al. (2012), realizaron un modelado termodinámico completo de una central de ciclo combinado de doble presión. Los resultados obtenidos fueron comparados con datos reales tomados de una planta de energía de Irán. Se realizó una optimización multi-objetivo. La primera función objetivo fue el conjunto de costos de los componentes, el costo de combustible inyectado en la cámara de combustión, el costo del ducto de quemadores y el costo de la destrucción de exergía. La segunda función objetivo fue la eficiencia exergética del ciclo. Por lo tanto, la optimización multi-objetivo del ciclo se llevó a cabo utilizando un código de simulación mediante algoritmos genéticos. Los resultados mostraron que la temperatura de la turbina de gas, la relación de la presión del compresor y la temperatura del Pinch Point son parámetros importantes en el diseño. Esto significa que cualquier cambio en estos parámetros de diseño conducen a un cambio drástico en las funciones objetivo [39].

Ganjeh et al. (2013), realizaron un estudio a una central de ciclo combinado con doble nivel de presión y alimentación suplementaria. El procedimiento de diseño óptimo incluye la función objetivo de diseño, la destrucción de exergía por unidad de gas de entrada al HRSG sujetos a una lista de restricciones. Los parámetros de diseño (variables de diseño) fueron la presión, la diferencia de temperatura pinch point y el flujo de masa de vapor de los niveles de alta y baja presión en el HRSG. Los resultados muestran que el aumento de la temperatura de los gases de entrada en el HRSG hasta 650 °C trae como consecuencia el aumento de la eficiencia térmica y la eficiencia de exergía del ciclo [40].

Taillon y Blanchard (2015) presentaron un trabajo donde se representan todas las eficiencias mediante un sistema de gráficas. En la primera parte se muestran la eficiencia eléctrica, térmica y exergética; en la segunda parte del trabajo se separan las eficiencias energéticas y exergéticas en dos componentes: las pérdidas térmicas de la planta y la calidad de producción de calor útil. Datos de 24 plantas existentes se usaron para soportar las gráficas [41].

Reza y Toghraie (2016) analizaron un ciclo de vapor de una planta de potencia en Iran de 200 MW de capacidad. Para este trabajo utilizaron ecuaciones de balance de masa, energía y exergía, para todos los equipos del ciclo, donde se calcularon la eficiencia energética, eficiencia exergética y las irreversibilidades en cada componente y del ciclo. Los resultados muestran que el 69.8% del total de la energía perdida en el ciclo se produce en el condensador, mientras que el análisis de exergía muestra al generador de vapor como el equipo principal donde se pierde la exergía, con el 85.66% de la exergía total que se pierde en el el ciclo [42].

1.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE TERMOECONOMÍA

El término termoeconomía implica la combinación de los conceptos de la termodinámica y de la economía. Un sistema energético es una red compleja de procesos en los cuales intervienen flujos de masa y energía. La comparación de alternativas de diseño desde el punto de vista energético no necesariamente conduce a seleccionar la mejor alternativa en términos económicos. En estos procesos se requiere un balance entre la eficiencia energética y el costo económico. “El objeto de la termoeconomía es sentar las bases teóricas para una ciencia del ahorro de energía, buscando criterios generales que permitan evaluar la eficiencia de sus procesos y el costo de sus productos, en sistemas con un consumo intensivo de energía” [43].

En termoeconomía, se utiliza el concepto de exergía (“trabajo disponible”) como base para calcular el costo, debido a que este concepto tiene en cuenta tanto la cantidad de energía disponible como su calidad, características estas, que no están presentes en las mediciones de eficiencia e irreversibilidades energéticas. La variable más relevante, desde el punto de vista de formación de los costos, es el costo exergético, que informa sobre la cantidad de exergía necesaria para producir un flujo de energía.

La termoeconomía permite lograr resultados que no se obtienen con los métodos de análisis termodinámico y económico tradicionales. La diferencia fundamental radica en el uso del Segundo Principio de la Termodinámica y la noción de exergía. Se toma la exergía como base racional para asignación de costes económicos a los recursos y productos que intervienen en los procesos industriales y para la valoración económica de las imperfecciones termodinámicas de dichos procesos. Todo esto constituye una aportación sustancial al análisis, evaluación y optimización de sistemas.

La termoeconomía se puede utilizar como una herramienta para el diseño y optimización de sistemas, para el análisis y diagnóstico de sistemas existentes, como herramienta para la evaluación costo-beneficio de acciones de mantenimiento o mejoramiento, como herramienta para el cálculo y asignación de costos en sistemas energéticos complejos.

Como herramienta de diagnóstico la termoeconomía se puede utilizar para determinar la presencia de mal funciones, su ubicación y posibles causas. Para realizar el diagnóstico de un sistema se compara el estado real con respecto a un estado de referencia que corresponde al comportamiento ideal del sistema en las mismas condiciones ambientales o de frontera del sistema real respecto de temperatura, presión, humedad, calidad de combustible e iguales cargas eléctricas y térmicas.

Una anomalía o mal función constituye un cambio o irregularidad en el comportamiento de un componente que causa variaciones locales y globales en el desempeño del sistema. La disminución de la eficiencia implica un mayor consumo de recursos y aumento del costo.

Aunque el aumento de la eficiencia si bien se considera positivo, debe tomarse con cautela puesto que puede deberse a condiciones de mayor esfuerzo del sistema, lo que en última instancia puede conducir a fallas del sistema, suspensión de la operación y acortamiento de su vida útil [4].

Observar un cambio en las condiciones de operación de un elemento no significa necesariamente que este sea la fuente del cambio o causa primaria. Para identificar la causa primaria o conjunto de causas se requiere un entendimiento basado en el conocimiento y la experiencia. El conocimiento se obtiene de la comprensión de los componentes, relaciones y principios del sistema organizados en un modelo matemático que permite la representación y simulación de la operación del sistema para unas condiciones dadas. La experiencia se traduce como un conocimiento experto derivado de la observación y vivencia del día a día y que es susceptible de formalizarse en una serie de reglas prácticas, pero sin una formulación matemática rigurosa [4].

El mejoramiento de la eficiencia es el objetivo común porque implica identificar las desviaciones de eficiencia y la determinación de sus causas. Aunque un sistema de monitoreo proporciona grandes cantidades de información, un sistema efectivo debe convertirla a un formato que permita tomar decisiones en los distintos niveles.

En sistemas térmicos este costo no es fácil de obtener debido a la complejidad de los procesos y es en este aspecto donde la teoría del costo termoeconómico aclara el panorama. En esencia, la teoría del costo termoeconómico permite asignarle un valor monetario a cada uno de los flujos que circulan por un sistema térmico incluyendo sus productos finales. Para expresarlo en términos simples, el costo termoeconómico de un flujo es su valor monetario por unidad de tiempo. Este valor se obtiene teniendo en cuenta el valor de los insumos utilizados, el costo de operación, administración, mantenimiento y la recuperación de la inversión con una tasa de descuento que corresponde al costo del capital empleado sobre la vida útil del sistema.

En un sistema energético dado, cuando se conocen los costos económicos de cada uno de sus flujos se pueden tomar decisiones con respecto al diseño, al mantenimiento y a la operación del sistema con una racionalidad económica que permita maximizar el beneficio. El análisis termoeconómico parte del supuesto de que se conoce la topología del sistema y los valores termodinámicos de las propiedades de todos los flujos. Es decir, se conoce la exergía de cada flujo, la cual es trabajo disponible en cada flujo.

Cuando con un sistema dado se obtiene un solo producto, su costo de producción será sencillamente la suma de todos los costes originados, y se calcula mediante un balance de costos. Pero si tuviera

más de un producto, se necesitarían tantas ecuaciones adicionales como productos que excedan de uno. La exergía proporciona un criterio riguroso para la formulación de dichas ecuaciones y la consiguiente determinación de los costes de producción individuales. Por ejemplo, en una planta de cogeneración, sería absurdo determinar los costos de las salidas de calor y electricidad en proporción a sus energías. Lo correcto es asignar los costos en proporción a las exergías contenidas, que reflejan adecuadamente sus respectivos efectos útiles. De haberlo hecho en proporción a las energías, habría resultado un costo excesivo para el calor y demasiado bajo para la electricidad.

En general, la termoeconomía tiene los siguientes fines:

- ✓ Calcular los costos de los productos intermedios y finales de los procesos.
- ✓ Analizar el proceso de formación y el flujo de los costos en los procesos.
- ✓ Valorar los costos de las destrucciones y pérdidas de exergía.
- ✓ Optimizar el funcionamiento de cada componente de un sistema y éste en su conjunto.
- ✓ Optimizar el costo de los productos de un sistema.

Por ejemplo, las comparaciones de costos de la destrucción de exergía en los equipos con sus respectivos costos de inversión permiten juzgar si el ahorro exergético aportado por una cierta mejora de eficiencia justifica la mayor inversión que probablemente se requiera. Estos cálculos son sumamente útiles en la toma de decisiones de mejora.

Cuando se trata de un sistema complejo, el uso de aproximaciones sucesivas, guiadas por la termoeconomía, constituye probablemente el mejor recurso práctico de optimización existente en la actualidad.

1.3 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS

La justificación de este estudio está basado en la importancia que tiene hacer un uso eficiente de la energía en los diferentes equipos y procesos energéticos debido al rápido agotamiento de las fuentes convencionales de energía y en consecuencia al incremento de los precios de estos recursos. Es por esto que el uso racional de la energía es un área importante de investigación en la actualidad.

En décadas pasadas muchos grupos de investigadores han hecho estudios para la optimización de sistemas energéticos. La tendencia y normativa actual en la industria de la generación de energía eléctrica, es reducir costos de producción optimizando sus procesos y minimizando emisiones contaminantes al medio ambiente.

En la actualidad se tiene la necesidad de aplicar el procedimiento de optimización en la operación de los sistemas energéticos, para mejorar la calidad y capacidad de las plantas y reducir los costos de operación con el fin de hacerlas más competitivas y cumplir con normas de reducción de la contaminación ambiental. Por lo anterior, cualquier iniciativa para reducir emisiones y gases de efecto invernadero (esto es, aumentar la eficiencia) está plenamente justificada.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una herramienta computacional para el análisis termoeológico y optimización de centrales de ciclo combinado,

Para alcanzar este objetivo se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Formular un modelo matemático para el cálculo de los balances de masa, energía y exergía de los componentes principales de la central de ciclo combinado.
- Desarrollar el modelo de optimización en base a costos exergoeconómicos.
- Demostrar la viabilidad de la herramienta computacional desarrollada con la aplicación a un problema de entidad real, como lo es una Central de Ciclo Combinado.

CAPÍTULO II: ANÁLISIS TERMOECOLÓGICO DE LOS EQUIPOS DE UNA CENTRAL DE CICLO COMBINADO

En este capítulo se describen los balances termodinámicos que rigen la operación de los equipos de las Centrales de Ciclo Combinado cuando estos operan en estado permanente. Los balances incluidos son los balances de masa, energía, entropía, exergía, análisis de impacto ambiental y termoeconómico.

En la figura 2.1 se muestra el esquema de la configuración básica de los principales elementos constitutivos de un ciclo combinado.

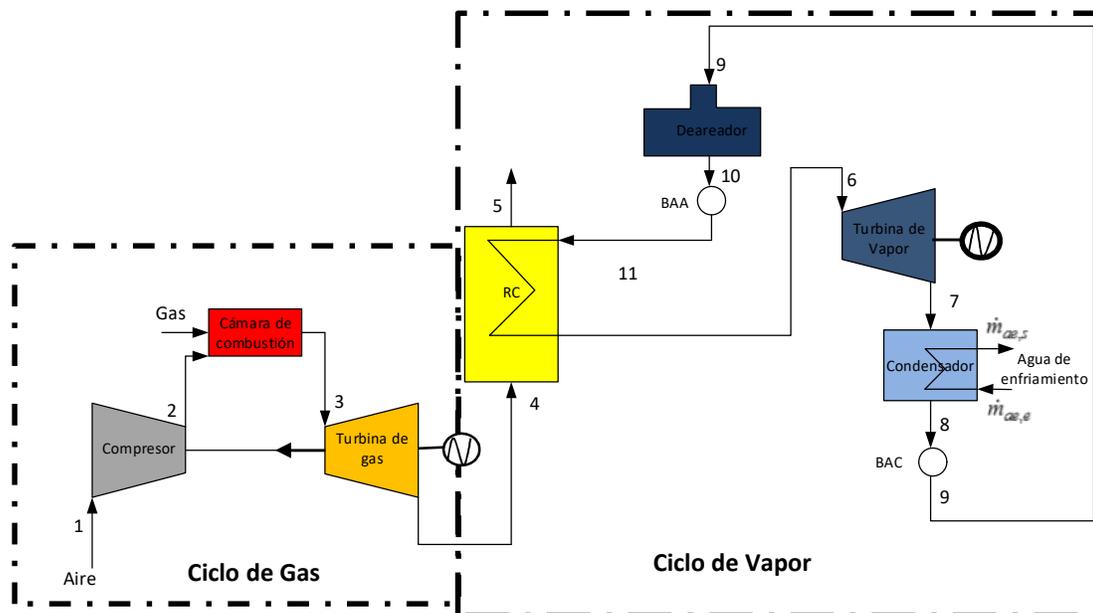


Figura 2.1 Diagrama de una Central de Ciclo Combinado.

La configuración básica de un ciclo combinado está compuesta de dos ciclos, uno de gas (1-4) y otro de vapor (4-11). El ciclo de gas está compuesto por un compresor (1-2), una cámara de combustión (2-3), una turbina de gas (3-4) y el ciclo de vapor está compuesto por un recuperador de calor (4-5), una turbina de vapor (6-7), un condensador (7-8), una bomba de agua de circulación (8-9), un deaerador (9-10) y una bomba de agua de alimentación (10-11) y el sistema de agua de enfriamiento.

Los balances de los equipos antes enunciados se indican a continuación.

2.1 BALANCE DE MASA

El principio de conservación de la masa para un volumen de control en estado permanente como el que se muestra en la figura 2.2, se expresa como: “El cambio neto (incremento o disminución) de la masa total contenida dentro del volumen de control (VC) durante el mismo intervalo de tiempo Δt , es igual a cero [44 y 45]. Esto se expresa como:

$$\left(\text{Masa total que entra} \right) - \left(\text{Masa total que sale} \right) = 0$$

(2.1)

O bien,

$$\sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s = 0$$

(2.2)

En la figura 2.2 se muestra esquemáticamente un volumen de control que cuenta con varias entradas y salidas de masa, y que se usa para describir el balance de masa en un volumen de control en estado permanente. Para este volumen de control, la ecuación de balance de masa expresada en la ecuación (2.2) queda como:

$$\left(\dot{m}_{e,1} + \dots + \dot{m}_{e,i} + \dots + \dot{m}_{e,n} \right) - \left(\dot{m}_{s,1} + \dots + \dot{m}_{s,i} + \dots + \dot{m}_{s,n} \right) = 0$$

(2.3)

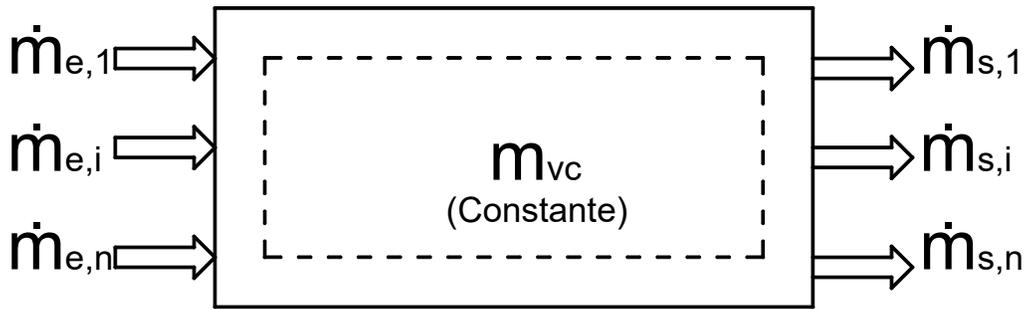


Figura 2.2 Flujos de masa en un volumen de control en estado permanente.

Para el caso de la configuración de la Central de Ciclo Combinado de la figura 2.1, el balance de masa para cada equipo se muestra a continuación

Compresor de aire (CA):

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = 0 \rightarrow \dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

(2.4)

Cámara de combustión (CC):

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_g - \dot{m}_3 = 0 \rightarrow \dot{m}_2 + \dot{m}_g = \dot{m}_3$$

(2.5)

Turbina de gas (TG):

$$\dot{m}_3 - \dot{m}_4 = 0 \rightarrow \dot{m}_3 = \dot{m}_4$$

(2.6)

Recuperador de calor (RC):

$$\left(\dot{m}_4 + \dot{m}_{11} \right) - \left(\dot{m}_5 + \dot{m}_6 \right) = 0 \rightarrow \left(\dot{m}_4 + \dot{m}_{11} \right) = \left(\dot{m}_5 + \dot{m}_6 \right)$$

(2.7)

Turbina de vapor (TV):

$$\dot{m}_6 - \dot{m}_7 = 0 \rightarrow \dot{m}_6 = \dot{m}_7$$

(2.8)

Condensador (C):

$$\dot{m}_7 + \dot{m}_{ae,e} - \left(\dot{m}_8 + \dot{m}_{ae,s} \right) = 0 \rightarrow \dot{m}_7 + \dot{m}_{ae,e} = \dot{m}_8 + \dot{m}_{ae,s}$$

(2.9)

Bomba de agua de condensado (BAC):

$$\dot{m}_8 - \dot{m}_9 = 0 \rightarrow \dot{m}_8 = \dot{m}_9$$

(2.10)

Deareador (D):

$$\dot{m}_9 - \dot{m}_{10} = 0 \rightarrow \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \quad (2.11)$$

Bomba de agua de alimentación (BAA):

$$\dot{m}_{10} - \dot{m}_{11} = 0 \rightarrow \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} \quad (2.12)$$

2.2 BALANCE DE ENERGÍA

La primera ley de la termodinámica o de balance de energía corresponde al principio de conservación de la energía, y establece 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 asociada con la transferencia de masa o flujo” [46 y 47].

Para un volumen de control, en estado permanente como se muestra en la figura 2.3 en donde se indican los diferentes flujos de energía, el balance de energía está dado por:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{E}_e - \dot{W}_{vc} - \sum \dot{E}_s = 0 \quad (2.13)$$

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 (2.13) se escribe como:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{c_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{W}_{vc} - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{c_s^2}{2} + gz_s \right) = 0 \quad (2.14)$$

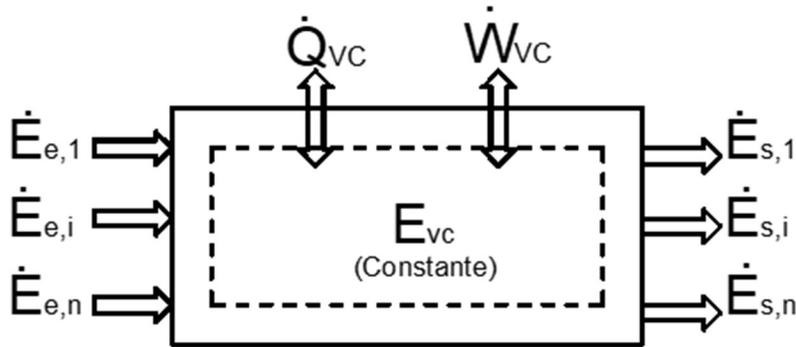


Figura 2.3 Flujos de energía en un volumen de control en estado permanente

Y de forma alternativa, esta misma expresión se escribe:

$$\underbrace{\dot{Q}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{c_e^2}{2} + gz_e \right)}_{\text{flujo de energía de entrada}} = \underbrace{\dot{W}_{vc} + \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{c_s^2}{2} + gz_s \right)}_{\text{flujo de energía de salida}} \quad (2.15)$$

Aplicando el balance de energía a los equipos de la Central de Ciclo Combinado de la figura 2.1, se obtienen las siguientes expresiones a partir de la aplicación de la ecuación (2.14)

Compresor de aire (CA):

Considerando $\dot{Q}_{CA} = 0$,

$$\dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2 - \dot{W}_{CA} = 0 \rightarrow |\dot{W}_{CA}| = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_1 (h_1 - h_2) \quad (2.16)$$

Cámara de combustión (CC):

Considerando $\dot{Q}_{CC} = 0$,

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_g PCI - \dot{m}_3 h_3 = 0 \rightarrow \dot{m}_g PCI = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_2 h_2 \quad (2.17)$$

Turbina de gas (TG):

Considerando $\dot{Q}_{TG} = 0$,

$$\dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_4 h_4 - \dot{W}_{TG} = 0 \rightarrow \dot{W}_{TG} = \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 (h_3 - h_4) \quad (2.18)$$

Recuperador de calor (RC):

Considerando $\dot{Q}_{RC} = 0$,

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{11} h_{11} - \dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_6 h_6 = 0 \rightarrow \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{11} h_{11} = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_6 h_6 \quad (2.19)$$

Turbina de vapor (TV):

Considerando $\dot{Q}_{TV} = 0$,

$$\dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_7 h_7 - \dot{W}_{TV} = 0 \rightarrow \dot{W}_{TV} = \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_6 (h_6 - h_7) \quad (2.20)$$

Condensador (C):

Considerando $\dot{Q}_C = 0$,

$$\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_{ae,e} h_{ae,e} - (\dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_{ae,s} h_{ae,s}) = 0 \rightarrow \dot{m}_{ae,e} (h_{ae,e} + h_{ae,s}) = \dot{m}_7 (h_8 - h_7) \quad (2.21)$$

Bomba de agua de condensado (BAC):

Considerando $\dot{Q}_{BAC} = 0$,

$$\dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_9 h_9 - \dot{W}_{BAC} = 0 \rightarrow |\dot{W}_{BAC}| = \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_8 (h_8 - h_9) \quad (2.22)$$

Deaerador (D):

Considerando $\dot{Q}_D = 0$,

$$\dot{m}_9 h_9 - \dot{m}_{10} h_{10} = 0 \rightarrow \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_{10} h_{10} \quad (2.23)$$

Bomba de agua de alimentación (BAA):

Considerando $\dot{Q}_{BAA} = 0$,

$$\dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_{11} h_{11} - \dot{W}_{BAA} = 0 \rightarrow |\dot{W}_{BAA}| = \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_{11} h_{11} = \dot{m}_{10} (h_{10} - h_{11}) \quad (2.24)$$

2.3 BALANCE DE ENTROPIA

Un balance de energía por sí solo no permite predecir la dirección en la que un proceso se desarrolla, ni permite distinguir los procesos que son posibles de los que no lo son. Para resolver esta situación se utiliza la Segunda Ley de la Termodinámica, para complementar la información proporcionada por la Primera Ley.

Los enunciados más comunes de la segunda Ley de la Termodinámica son:

1. Enunciado de Clausius. - Es imposible la existencia de un sistema que pueda funcionar de modo que su único efecto sea una transferencia de energía mediante calor de un cuerpo frío a otro más caliente. [39 y 40]
2. Enunciado de Kelvin-Planck. - Es imposible construir un sistema que, operando según un ciclo termodinámico, ceda una cantidad neta de trabajo a su entorno mientras recibe energía por transferencia de calor procedente de un único depósito térmico. [44 y 45]

Otra información valiosa que proporciona la segunda ley de la termodinámica es la evaluación de las irreversibilidades que se presentan en los procesos y que son evaluadas a través de la generación de entropía. La segunda ley de la termodinámica se puede expresar a través de un balance de entropías que para un volumen de control en estado estacionario como se muestra en la figura 2.4, se expresa por la ecuación siguiente:

$$\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_e \dot{S}_e - \sum_s \dot{S}_s + \dot{\sigma}_{vc} = 0 \quad (2.25)$$

En función de las entropías específicas y haciendo $\dot{S} = \dot{m}s$, se tiene:

$$\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \dot{\sigma}_{vc} = 0 \quad (2.26)$$

En la ecuación (2.26) aparecen los términos de transferencia de entropía por transferencia de calor y por transferencia de masa, así como la generación de entropía, debido a las irreversibilidades que ocurren en el volumen de control.

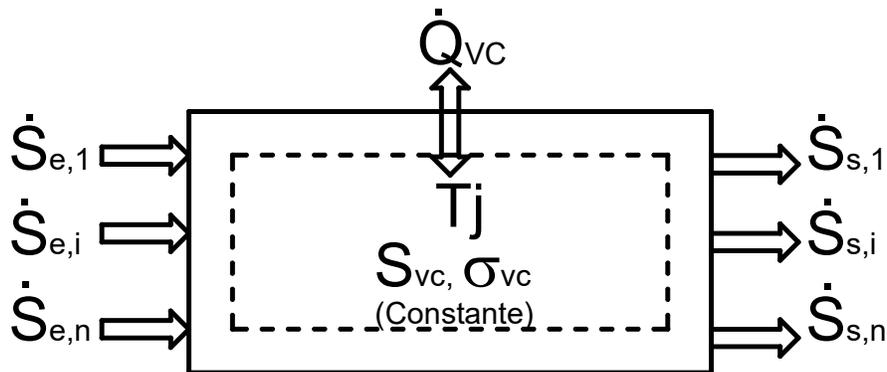


Figura 2.4 Flujos de entropía para un volumen de control en estado permanente

Aplicando el balance de entropía para los equipos de la central de ciclo combinado, se obtienen las siguientes expresiones:

Compresor de aire (CA):

$$\dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_2 s_2 + \dot{\sigma}_{CA} = 0 \rightarrow \dot{\sigma}_{CA} = \dot{m}_2 s_2 - \dot{m}_1 s_1 = \dot{m}_1 (s_2 - s_1) \quad (2.27)$$

Cámara de combustión (CC):

$$\dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_g s_g - \dot{m}_3 s_3 + \dot{\sigma}_{CC} = 0 \rightarrow \dot{\sigma}_{CC} = \dot{m}_3 s_3 - (\dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_g s_g) \quad (2.28)$$

Turbina de gas (TG):

$$\dot{m}_3 s_3 - \dot{m}_4 s_4 + \dot{\sigma}_{TG} = 0 \rightarrow \dot{\sigma}_{TG} = \dot{m}_4 s_4 - \dot{m}_3 s_3 = \dot{m}_3 (s_4 - s_3) \quad (2.29)$$

Recuperador de calor (RC):

$$\dot{m}_4 s_4 + \dot{m}_{11} s_{11} - \dot{m}_5 s_5 - \dot{m}_6 s_6 + \dot{\sigma}_{RC} = 0 \rightarrow \dot{\sigma}_{RC} = \dot{m}_5 s_5 + \dot{m}_6 s_6 - (\dot{m}_4 s_4 + \dot{m}_{11} s_{11}) = \dot{m}_4 (s_5 - s_4) + \dot{m}_6 (s_{11} - s_6) \quad (2.30)$$

Turbina de vapor (TV):

$$\dot{m}_6 s_6 - \dot{m}_7 s_7 + \dot{\sigma}_{TV} = 0 \rightarrow \dot{\sigma}_{TV} = \dot{m}_7 s_7 - \dot{m}_6 s_6 = \dot{m}_6 (s_7 - s_6) \quad (2.31)$$

Condensador (C):

$$(\dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_{ae,e} s_{ae,e}) - (\dot{m}_8 s_8 + \dot{m}_{ae,s} s_{ae,s}) + \dot{\sigma}_C = 0 \rightarrow \dot{\sigma}_C = (\dot{m}_8 s_8 + \dot{m}_{ae,s} s_{ae,s}) - (\dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_{ae,e} s_{ae,e}) = \dot{m}_7 (s_8 - s_7) + \dot{m}_{ae,e} (s_{ae,s} + s_{ae,e}) \quad (2.32)$$

Bomba de agua de condensado (BAC):

$$\dot{m}_8 s_8 - \dot{m}_9 s_9 + \dot{\sigma}_{BAC} = 0 \rightarrow \dot{\sigma}_{BAC} = \dot{m}_9 s_9 - \dot{m}_8 s_8 = \dot{m}_8 (s_9 - s_8) \quad (2.33)$$

Deaerador (D):

$$\dot{m}_9 s_9 - \dot{m}_{10} s_{10} + \dot{\sigma}_D = 0 \rightarrow \dot{\sigma}_D = \dot{m}_{10} s_{10} - \dot{m}_9 s_9 = \dot{m}_9 (s_{10} - s_9) \quad (2.34)$$

Bomba de agua de alimentación (BAA):

$$\dot{m}_{10} s_{10} - \dot{m}_{11} s_{11} + \dot{\sigma}_{BAA} = 0 \rightarrow \dot{\sigma}_{BAA} = \dot{m}_{11} s_{11} - \dot{m}_{10} s_{10} = \dot{m}_{10} (s_{11} - s_{10}) \quad (2.35)$$

2.4 BALANCE 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 queda 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” [44 y 48].

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, y a este estado termodinámico se le conoce como “estado muerto”. 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.

Mientras que la energía expresa 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, éste 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.

Para un volumen de control en estado permanente como el que se muestra en la figura 2.5 el balance de exergía queda expresado por:

$$\sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{A}_{fe} - \sum_s \dot{A}_{fs} - \dot{A}_d = 0 \quad (2.36)$$

La ecuación (2.36) establece que la destrucción de exergía es igual a la diferencia entre la suma de las exergías de entrada y la suma de las exergías de salida.

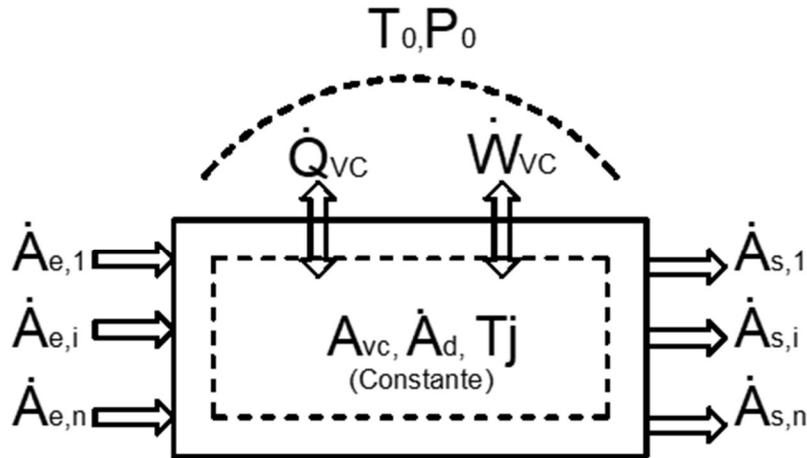


Figura 2.5 Flujos de exergía en un volumen de control en estado estacionario.

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

$$A = A^{FI} + A^{QU} \quad (2.37)$$

Considerando solo la exergía específica total, esta queda como:

$$a = a_f + a_q \quad (2.38)$$

Donde la exergía específica de los flujos se expresa como:

$$a = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (2.39)$$

En la ecuación (2.39), h y s representan la entalpía y la entropía específicas, respectivamente, en la entrada o salida, h_0 y s_0 representan los valores respectivos de estas propiedades en el estado muerto.

Aplicando el balance de exergía para cada componente de la Central de Ciclo Combinado mostrada en la figura 2.1, se obtienen las siguientes expresiones:

Compresor de aire (CA):

$$\dot{A}_{d,C} = \dot{A}_1 - \dot{A}_2 - \dot{W}_c \quad (2.40)$$

Cámara de combustión (CC):

$$\dot{A}_{d,CC} = \dot{A}_2 + \dot{A}_g - \dot{A}_3 \quad (2.41)$$

Turbina de gas (TG):

$$\dot{A}_{d,TG} = \dot{A}_3 - \dot{A}_4 - \dot{W}_{TG} \quad (2.42)$$

Recuperador de calor (RC):

$$\dot{A}_{D,RC} = \dot{A}_4 + \dot{A}_{11} - \dot{A}_5 - \dot{A}_6 = (\dot{A}_4 + \dot{A}_5) - (\dot{A}_{11} - \dot{A}_6) \quad (2.43)$$

Turbina de vapor (TV):

$$\dot{A}_{D,TV} = \dot{A}_6 - \dot{A}_7 - \dot{W}_{TV} \quad (2.44)$$

Condensador (C):

$$\dot{A}_{D,C} = (\dot{A}_7 + \dot{A}_{ae,e}) - (\dot{A}_8 + \dot{A}_{ae,s}) \quad (2.45)$$

Bomba de agua de condensado (BAC):

$$\dot{A}_{D,BAC} = \dot{A}_8 - \dot{A}_9 - \dot{W}_{BAC} \quad (2.46)$$

Deareador (D):

$$\dot{A}_{D,D} = \dot{A}_9 - \dot{A}_{10} \quad (2.47)$$

Bomba de agua de alimentación (BAA):

$$\dot{A}_{D,BAA} = \dot{A}_{10} - \dot{A}_{11} - \dot{W}_{BAA} \quad (2.48)$$

En términos de la exergía específica, el balance de exergía para cada componente de la Central de Ciclo Combinado, se obtienen las siguientes expresiones:

Compresor de aire (CA):

$$\dot{A}_{D,C} = \dot{m}_1 a_1 - \dot{m}_2 a_2 - \dot{W}_c = \dot{m}_1 (a_1 - a_2) + \dot{W}_c \quad (2.49)$$

Cámara de combustión (CC):

$$\dot{A}_{D,CC} = \dot{m}_2 a_2 + \dot{m}_g a_g - \dot{m}_3 a_3 \quad (2.50)$$

Turbina de gas (TG):

$$\dot{A}_{D,TG} = \dot{m}_3 a_3 - \dot{m}_4 a_4 + \dot{W}_{TG} = \dot{m}_3 (a_3 - a_4) + \dot{W}_{TG} \quad (2.51)$$

Recuperador de calor (RC):

$$\dot{A}_{D,RC} = \dot{m}_4 a_4 + \dot{m}_{11} a_{11} - \dot{m}_5 a_5 - \dot{m}_6 a_6 = \dot{m}_4 (a_4 - a_5) + \dot{m}_6 (a_{11} - a_6) \quad (2.52)$$

Turbina de vapor (TV):

$$\dot{A}_{D,TV} = \dot{m}_6 a_6 - \dot{m}_7 a_7 - \dot{W}_{TV} = \dot{m}_6 (a_6 - a_7) - \dot{W}_{TV} \quad (2.53)$$

Condensador (C):

$$\dot{A}_{D,C} = (\dot{m}_7 a_7 + \dot{m}_{ae,e} a_{ae,e}) - (\dot{m}_8 a_8 + \dot{m}_{ae,s} a_{ae,s}) = \dot{m}_7 (a_7 - a_8) + \dot{m}_{ae,e} (a_{ae,e} - a_{ae,s}) \quad (2.54)$$

Bomba de agua de condensado (BAC):

$$\dot{A}_{D,BAC} = \dot{m}_8 a_8 - \dot{m}_9 a_9 - \dot{W}_{BAC} = \dot{m}_8 (a_8 - a_9) - \dot{W}_{BAC} \quad (2.55)$$

Deaerador (D):

$$\dot{A}_{D,D} = \dot{m}_9 a_9 - \dot{m}_{10} a_{10} = \dot{m}_9 (a_9 - a_{10}) \quad (2.56)$$

Bomba de agua de alimentación (BAA):

$$\dot{A}_{D,BAA} = \dot{m}_{10} a_{10} - \dot{m}_{11} a_{11} - \dot{W}_{BAA} = \dot{m}_{10} (a_{10} - a_{11}) - \dot{W}_{BAA} \quad (2.57)$$

2.5 ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL

La protección al medio ambiente es uno de los problemas más urgentes a resolver en la actualidad. La reducción de los indicadores de contaminación de las sustancias tóxicas en el ambiente, producidas por los sectores de la industria y el transporte, es uno de los problemas más importantes que está siendo tomado en cuenta por la mayoría de los países industrializados y es necesario que estos sectores tomen medidas que permitan reducir la emisión de contaminantes a la atmósfera, con el propósito de reducir concentraciones peligrosas en el aire.

El análisis de impacto de las Centrales de Ciclo Combinado en el medio ambiente como resultado de la emisión de gases nocivos ha despertado el interés de la comunidad científica en las últimas tres décadas. Los gases de combustión contienen componentes que afectan directamente a la vida del ser humano, animales y plantas. Indirectamente, tiene efectos negativos como resultado de los componentes CO₂ y NO_x que generan el llamado efecto invernadero. Los componentes nocivos más importantes de los gases de combustión son los óxidos de carbono (CO y CO₂), los óxidos de azufre (SO₂ y SO₃) y los óxidos de nitrógeno (NO y NO₂, generalmente denotados por NO_x) resultantes de uso de cualquier tipo de combustible.

En la actualidad se están tomando medidas para reducir al mínimo posible las emisiones nocivas; el mejor método para reducir las emisiones contaminantes es la construcción de nuevas instalaciones o modernizar las existentes para obtener la máxima eficiencia de conversión de energía. La máxima eficiencia, trae como consecuencia la cantidad mínima posible de emisiones de gases nocivos a la

atmósfera por unidad de energía eléctrica y/o energía térmica, producida, a partir de la combustión de algún combustible.

En las centrales de generación se usan métodos de control para reducir las emisiones de gases contaminantes. Un interés particular se ha puesto en el CO₂, porque el incremento en las concentraciones de este gas en la atmosfera ha traído como consecuencia el aumento de la temperatura ambiente. Aunque este gas no es tóxico es inevitable emitir grandes cantidades de este gas durante el proceso de combustión.

Para poder medir el impacto ambiental que causan los gases de combustión de algún hidrocarburo es necesario un indicador que permita medir los efectos de estos gases en el medio ambiente. El dióxido de carbono equivalente (CO₂)_e es el indicador que permite realizar esta función a partir de las máximas concentraciones permisibles en el ambiente de CO₂, SO₂ y NO_x.

La expresión para la evaluación del (CO₂)_e propuesta por Cardu y Baica es [49]:

$$(CO_2)_e = (CO_2) + 700(SO_2) + 1000(NO_x) \quad (2.58)$$

En la ecuación (2.28) las equivalencias de las emisiones de dióxido de de azufre y de NO_x a dióxido de carbono son: a partir del dióxido de azufre (CO₂)_e = 700 (SO₂) y el equivalente de óxido de nitrógeno es (CO₂)_e = 1000 (NO_x). El (CO₂)_e se expresa en kg/kg de combustible y el SO₂ y NO_x de la ecuación (2.58) también se expresa en kg/kg de combustible.

Para cuantificar el impacto ambiental de la quema de un combustible, se define el término “indicador de contaminación” que se expresa como [50 y 51]:

$$\Pi_g = \frac{(CO_2)_e}{PCI} \quad (2.59)$$

En la ecuación (2.59) el poder calorífico inferior del combustible se expresa en MJ/kg de combustible y las unidades de Π_g son kg/MJ.

Para evaluar el impacto ambiental de las centrales generadoras se utiliza el término “eficiencia ecológica” que se define como un parámetro que permite evaluar el rendimiento de la central generadora, en función del indicador de contaminación y de la eficiencia térmica de acuerdo con la emisión de contaminantes, mediante la comparación de las emisiones contaminantes (emisiones de CO₂ equivalente), con los estándares de calidad del aire existentes. La eficiencia ecológica se determina mediante la siguiente expresión empírica propuesta por Cardu y Baica [52 y 53]:

$$\varepsilon = \left[\frac{0.204\eta_t}{\eta_t + \Pi_g} \ln(135 - \Pi_g) \right]^{0.5} \quad (2.60)$$

Donde el valor de 135 se obtiene conociendo que Π_g , varia de un intervalo de $\Pi_g = 0$ kg/MJ (para H₂) y $\Pi_g = 134$ kg/MJ (para S) para que se cumpla que la eficiencia ecológica sea igual a cero ($\varepsilon = 0$), para todos los valores de η_t [50].

En la ecuación (2.60) η_t corresponde a la eficiencia térmica de la central generadora.

La eficiencia térmica de la central está definida como: [54]

$$\eta_t = \frac{W_T}{\dot{Q}} \quad (2.60a)$$

2.6 BALANCE TERMOECONÓMICO

Al describir un sistema térmico desde el punto de vista de la Termoeconomía es necesario definir el modelo matemático correspondiente, que es el conjunto de ecuaciones que relacionan las variables termodinámicas y físicas de los distintos flujos y equipos de la planta y el modelo económico que está constituido por el conjunto de ecuaciones que permiten calcular los costos exergéticos del sistema.

Para el desarrollo del análisis termoeconómico se recurre también a la aplicación de conceptos y juicios de valores económicos. En primer lugar, además de la estructura física del sistema, se necesita conocer su estructura económica o productiva. Es necesario saber si una corriente tiene el carácter de un recurso suministrado (R) a un equipo o de un producto (P) generado por éste. También hay que identificar aquellas salidas de un sistema que no tengan valor económico alguno o incluso sean perjudiciales, que se clasificarán como residuos (Re).

Se empieza por abordar la representación de un sistema cualquiera en función de sus recursos, productos y residuos (representación “R/P/Re”) [9, 44].

A modo de ejemplo se considera el sistema formado por dos componentes 1 y 2, con eficiencias definidas y unidos de forma secuencial como se muestra en la figura 2.6

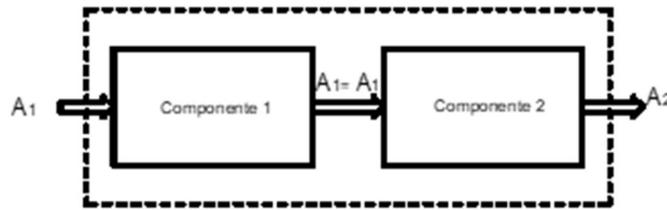


Figura 2.6 Sistema secuencial

Para producir P_2 , que es el producto del sistema formado por los componentes 1 y 2, es necesario consumir R_1 recursos locales. Así el consumo exergético unitario del componente 2 es $k_2 = R_2 / P_2$; pero R_2 a su vez es producto del equipo 1, $R_2 = P_1$, y para producir P_1 han sido necesarios R_1 recursos locales, que son también los recursos totales que llegan al sistema. Por lo tanto, el costo exergético unitario del producto del sistema es: R_1/P_2 . Estas relaciones pueden expresarse en términos de costos exergéticos unitarios como se indica a continuación.

$$k_{R,1}^* = 1 = R_1/R_1 \quad (2.61)$$

$$k_{P,1}^* = k_1^* = R_1/P_1 \quad (2.62)$$

$$k_{R,2}^* = k_2^* = R_2/P_1 \quad (2.63)$$

$$k_{P,2}^* = k_1^* * k_2^* = R_2/P_2 = R_1/P_1 * R_2/P_2 \quad (2.64)$$

La teoría de costos exergéticos requiere de ciertos criterios o “proposiciones recurso-producto” para establecer las ecuaciones que definen las interacciones de los flujos exergéticos en el sistema energético en su estructura productiva. Estos criterios están basados en el costo exergético unitario de cada flujo, como se mencionan a continuación:

1. Debido a la ausencia de asignaciones externas, el costo unitario de los recursos de entrada al sistema será igual a la unidad (su costo exergético es igual a su exergía).
2. El costo del producto o productos de un componente debe ser igual a la suma de los costos exergéticos de los flujos de entrada.
3. Todos los flujos que provienen del entorno y entran al sistema tienen un costo exergético unitario igual a la unidad. Por ejemplo, el aire de entrada a un compresor.
4. En los equipos con una entrada (recurso) y dos o más salidas (producto), los costos de sus productos tendrán el mismo costo exergético unitario, ya que llevaron el mismo proceso de formación.
5. El costo de los residuos es agregado al proceso o equipo donde fue producido, y no donde es finalmente expulsado hacia el medio ambiente. Pero cuando éstos no se quieren tomar en cuenta en el análisis de costos exergéticos, tienen valor cero.

Luego de aplicar las proposiciones indicadas en el balance de costos exergéticos de cada uno de los equipos, la ecuación resultante para la figura 2.6 es:

$$k_1^* \dot{A}_1 = k_2^* \dot{A}_2 \quad (2.65)$$

La parte izquierda de la ecuación representa el recurso, y la parte derecha el producto. Aplicando las proposiciones indicadas en el balance de costos exergéticos de cada uno de los equipos de la figura 2.6, las ecuaciones resultantes se muestran a continuación:

Compresor de aire (CA):

$$k_2^* \dot{A}_2 - k_1^* \dot{A}_1 = k_{CA}^* \dot{W}_{CA} \quad (2.66)$$

Cámara de combustión (CC):

$$k_2^* \dot{A}_2 + k_g^* \dot{A}_g = k_3^* \dot{A}_3 \quad (2.67)$$

Turbina de gas (TG) :

$$k_3^* \dot{A}_3 - k_2^* \dot{A}_2 = k_{TG}^* \dot{W}_{TG} \quad (2.68)$$

Recuperador de calor (RC):

$$k_4^* \dot{A}_4 - k_5^* \dot{A}_5 = k_6^* \dot{A}_6 - k_{11}^* \dot{A}_{11} \quad (2.69)$$

Turbina de vapor (TV):

$$k_6^* \dot{A}_6 - k_7^* \dot{A}_7 = k_{TV}^* \dot{W}_{TV} \quad (2.70)$$

Condensador (C):

$$k_7^* \dot{A}_7 + k_{ae,e}^* \dot{A}_{ae,e} = k_8^* \dot{A}_8 + k_{ae,s}^* \dot{A}_{ae,s} \quad (2.71)$$

Bomba de agua de condensado (BAC):

$$k_{BAC}^* \dot{W}_{BAC} = k_9^* \dot{A}_9 - k_8^* \dot{A}_8 \quad (2.72)$$

Deareador (D):

$$k^*_9\dot{A}_9 = k^*_{10}\dot{A}_{10} \quad (2.73)$$

Bomba de agua de alimentación (BAA):

$$k^*_{BAA}\dot{W}_{BAA} = k^*_{11}\dot{A}_{11} - k^*_{10}\dot{A}_{10} \quad (2.74)$$

CAPÍTULO III: OPTIMIZACIÓN DE CENTRALES DE CICLO COMBINADO

En este capítulo se introduce el concepto de Optimización Exergoeconómica a los equipos que forman la Central de Ciclo Combinado. Dicha metodología combina los principios del análisis exergético y económico. Dentro del análisis exergoeconómico se obtienen los costos exergoeconómicos necesarios para poder evaluar el sistema.

Se han desarrollado técnicas para evaluar las ineficiencias termodinámicas de las centrales de ciclo combinado, evaluando las pérdidas de exergía y destrucciones de exergía. Sin embargo, esto no es suficiente porque es necesario conocer el costo de esas ineficiencias. El conocimiento de estos costos es muy útil para mejorar el costo efectivo de la central, y así reducir el costo de los productos finales producidos por la central.

El objetivo de un análisis exergoeconómico es:

- a) Calcular el costo monetario de cada producto generado por un sistema.
- b) Formar los costos de los recursos y los productos y el flujo de costos en el sistema.
- c) Optimizar variables específicas de un componente del sistema.
- d) Optimizar todo el sistema.

En este capítulo se describirán los elementos básicos para la optimización a partir de la exergoeconómica que incluye balances de costos, los medios para calcular el costo de transferencia de exergía, las diferentes variables exergoeconómicas usadas en la optimización y en la evaluación del diseño de Centrales de Ciclo Combinado. Estos elementos se aplicarán a la figura 2.1

3.1 FUNDAMENTOS DE EXERGOECONÓMICA

La contabilidad de costos económicos tiene que ver principalmente con:

- a) Determinar el costo actual de los productos o servicios.
- b) Proporcionar una base racional para lograr buenos precios.
- c) Establecer medios de control y asignación de gastos.
- d) Proporcionar información en la cual las decisiones de operación puedan ser fundamentadas y evaluadas.

Lo anterior lleva a establecer el uso de los balances de costos. En un análisis económico un balance de costos normalmente es formulado como: [55- 57]

$$\dot{C}_{P,T} = \dot{C}_{R,T} + \dot{Z}_T^{CI} + \dot{Z}_T^{OM} \quad (3.1)$$

El balance de costos expresa que los costos asociados con el producto del sistema ($\dot{C}_{P,T}$) son igual al total de los gastos realizados para generar el producto conocido como el costo de los recursos totales ($\dot{C}_{R,T}$) y los costos asociados con la inversión del capital (\dot{Z}_T^{CI}) y los costos de operación y mantenimiento (\dot{Z}_T^{OP}). Cuando se hace referencia a una corriente particular asociada con un combustible o producto, se usa la expresión corriente de combustible o corriente de producto. Los costos \dot{Z}^{CI} y \dot{Z}^{OM} son calculados dividiendo los costos de la contribución anual del capital invertido

y de la operación y mantenimiento anual (O&M), respectivamente, por el número de unidades de tiempo (horas o segundos) de la operación del sistema por año. La suma de estas dos variables se designa por \dot{Z} :

$$\dot{Z} = \dot{Z}^{CI} + \dot{Z}^{OM} \quad (3.2)$$

La variable \dot{C} denota el costo asociado con una corriente de exergía: corriente de materia, trabajo, o transferencia de calor, mientras la variable \dot{Z} representa todos los costos restantes.

3.2 COSTO DE LA EXERGÍA

Para la operación de un sistema en estado estacionario pueden participar un número importante de corrientes de entrada y de salida de materiales, así como interacciones de trabajo y calor con los alrededores. Asociados con estas transferencias de materia y energía se encuentran las transferencias de exergía de entrada y de salida del sistema, así como las destrucciones de exergía causadas por las irreversibilidades dentro del sistema. Puesto que la exergía es el verdadero valor termodinámico de tales efectos y los costos solo deben ser asignados al valor de los productos, esto justifica el uso de la exergía como una base para la asignación de costos en los sistemas térmicos. A esto se le designa como costo exergético.

Los costos de exergía se asocian a cada corriente de exergía. Así, para las corrientes de materia de entrada y salida con los flujos de exergía \dot{A}_e y \dot{A}_s , así como al flujo de trabajo \dot{W} , y al flujo de transferencia de exergía asociada con la transferencia de calor \dot{A}_Q , se escribe respectivamente:[55, 58-60].

$$\dot{C}_e = c_e \dot{A}_e = c_e (\dot{m}_e a_e) \quad (3.3)$$

$$\dot{C}_s = c_s \dot{A}_s = c_s (\dot{m}_s a_s) \quad (3.4)$$

$$\dot{C}_W = c_W \dot{W} \quad (3.5)$$

$$\dot{C}_Q = c_Q \dot{A}_Q \quad (3.6)$$

Donde c_e , c_s , c_W y c_Q designan los costos promedio por unidad de exergía en (\$/GJ).

El costo de exergía involucra balances de costos formulados individualmente para cada componente. Un balance de costos aplicado al k-ésimo componente del sistema muestra que la suma de los costos asociados con todas las corrientes de exergía de salida es igual a la suma de los costos de todas las corrientes de exergía de entrada más los costos de inversión de capital (\dot{Z}_k^{CI}) y los costos de O&M (\dot{Z}_k^{OM}). La suma de los últimos dos términos es \dot{Z}_k . Por lo tanto, para un componente que recibe una transferencia de calor y genera potencia, se tiene:

$$\sum_s \dot{C}_{s,k} + \dot{C}_{W,k} = \dot{C}_{Q,k} + \sum_e \dot{C}_{e,k} + \dot{Z}_k \quad (3.7)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.3), (3.4), (3.5) y (3.6) en la ecuación (3.7) se tiene:

$$\sum_s (c_s \dot{A}_s)_k + c_{W,k} \dot{W}_k = c_{Q,k} \dot{A}_{q,k} + \sum_e (c_e \dot{A}_e)_k + \dot{Z}_k \quad (3.8)$$

Los flujos de exergía \dot{A}_s , \dot{W} , \dot{A}_q y \dot{A}_e del k-esimo componente son calculados mediante el análisis de exergía desarrollado en el capítulo II. El termino \dot{Z}_k se obtiene a partir de la metodología desarrollada por Antonio Valero y et al. en su trabajo titulado "CGAM Problem: Definition and Conventional Solution [61-63].

Aplicando la ecuación (3.7) a cada componente de una central de ciclo combinado en estado permanente, considerada en la figura 2.1.

Compresor de aire (CA):

$$\dot{C}_2 + \dot{C}_{W,CA} = \dot{C}_1 + \dot{Z}_{CA} \quad (3.9)$$

Cámara de combustión (CC):

$$\dot{C}_3 = \dot{C}_2 + \dot{C}_g + \dot{Z}_{CC} \quad (3.10)$$

Turbina de gas (TG):

$$\dot{C}_4 + \dot{C}_{W,TG} = \dot{C}_3 + \dot{Z}_{TG} \quad (3.11)$$

Recuperador de calor (RC):

$$\dot{C}_6 + \dot{C}_5 = \dot{C}_4 + \dot{C}_{11} + \dot{Z}_{RC} \quad (3.12)$$

Turbina de vapor (TV):

$$\dot{C}_7 + \dot{C}_{W,TV} = \dot{C}_6 + \dot{Z}_{TV} \quad (3.13)$$

Condensador (C):

$$\dot{C}_8 + \dot{C}_{ae,s} = \dot{C}_7 + \dot{C}_{ae,e} + \dot{Z}_C \quad (3.14)$$

Bomba de agua de condensado (BAC):

$$\dot{C}_9 = \dot{C}_8 + \dot{C}_{W,BAC} + \dot{Z}_{BAC} \quad (3.15)$$

Deareador

$$\dot{C}_{10} = \dot{C}_9 + \dot{Z}_D \quad (3.16)$$

Bomba de agua de alimentación.

$$\dot{C}_{11} = \dot{C}_{10} + \dot{C}_{W,BAA} + \dot{Z}_{BAA} \quad (3.17)$$

3.3 FLUJOS DE COSTOS PROMEDIO DEL PRODUCTO Y EL RECURSO

En la definición de la eficiencia exergética los conceptos de producto y recurso juegan un papel importante. Los productos están definidos de acuerdo a los propósitos del componente considerando. El recurso representa la suma de los recursos gastados en la generación del producto. El producto y el recurso son expresados en términos de exergía.

Los flujos de costos asociados con el recurso (\dot{C}_R) y el producto (\dot{C}_P) de un componente se obtienen simplemente por la sustitución de los flujos de exergía (\dot{A}) por los flujos de costos (\dot{C}).

En la tabla 3.1 se muestran la definición de los recursos y los productos para el sistema mostrado en la figura 2.1.

Tabla 3.1 Definición de Recurso-Producto del sistema de la figura 2.1

Componente	Recurso	Producto
Compresor de aire (CA)	$\dot{C}_{W,C}$	$\dot{C}_2 - \dot{C}_1$
Cámara de Combustión (CC)	$\dot{C}_2 + \dot{C}_g$	\dot{C}_3
Turbina de Gas (TG)	$\dot{C}_3 - \dot{C}_4$	$\dot{C}_{W,TG}$
Recuperador de Calor (RC)	$\dot{C}_4 - \dot{C}_5$	$\dot{C}_6 - \dot{C}_{11}$
Turbina de vapor (TV)	$\dot{C}_6 - \dot{C}_7$	$\dot{C}_{W,TV}$
Condensador (C)	$\dot{C}_{ae,s} - \dot{C}_{ae,e}$	$\dot{C}_8 - \dot{C}_7$
Bomba de Agua de condensado (BAC)	$\dot{C}_{W,BAC}$	$\dot{C}_9 - \dot{C}_8$
Deareador (D)	\dot{C}_9	\dot{C}_{10}
Bomba de Agua de alimentación (BAA)	$\dot{C}_{W,BAA}$	$\dot{C}_{11} - \dot{C}_{10}$

Después de los cálculos de los flujos de costos asociados con el recurso (\dot{C}_R) y el producto (\dot{C}_P) se pueden calcular los costos promedio por unidad de exergía del recurso y el producto para un componente. La unidad del costo promedio del recurso ($c_{R,k}$) para el k-ésimo componente es definido por [55, 64-66]:

$$c_{R,k} = \frac{\dot{C}_{R,k}}{\dot{A}_{R,k}} \quad (3.18)$$

La ecuación (3.18) expresa el costo promedio por unidad de exergía del recurso que es suministrada al k-esimo componente. Similarmente, el costo promedio por unidad de exergía del producto ($c_{P,k}$) para el k-ésimo componente es el costo promedio al cual cada unidad de exergía del producto del k-ésimo componente es generado y se expresa por la ecuación siguiente:

$$c_{P,k} = \frac{\dot{C}_{P,k}}{\dot{A}_{P,k}} \quad (3.19)$$

Los costos promedio por unidad de exergía del recurso y el producto son usados en la evaluación termoeconómica de los componentes de una central de ciclo combinado.

Con los datos de la tabla 3.1 y las ecuaciones (3.18) y (3.19), se tiene el costo promedio del recurso y el producto para cada componente de la figura 2.1.

Tabla 3.2 Costo promedio del recurso y el producto del sistema de la figura 2.1

Componente	$c_{R,k}$	$c_{P,k}$
Compresor de aire (CA)	$c_{R,CA} = \frac{\dot{C}_{W,CA}}{\dot{A}_{W,CA}}$	$c_{P,CA} = \frac{\dot{C}_2 - \dot{C}_1}{\dot{A}_2 - \dot{A}_1}$
Cámara de Combustión (CC)	$c_{R,CC} = \frac{\dot{C}_2 + \dot{C}_g}{\dot{A}_2 + \dot{A}_g}$	$c_{P,CC} = \frac{\dot{C}_3}{\dot{A}_3}$
Turbina de Gas (TG)	$c_{R,TG} = \frac{\dot{C}_3 - \dot{C}_4}{\dot{A}_3 - \dot{A}_4}$	$c_{P,TG} = \frac{\dot{C}_{W,TG}}{\dot{A}_{W,TG}}$
Recuperador de Calor (RC)	$c_{R,RC} = \frac{\dot{C}_4 - \dot{C}_5}{\dot{A}_4 - \dot{A}_5}$	$c_{P,RC} = \frac{\dot{C}_6 - \dot{C}_{11}}{\dot{A}_6 - \dot{A}_{11}}$
Turbina de vapor (TV)	$c_{R,TV} = \frac{\dot{C}_6 - \dot{C}_7}{\dot{A}_6 - \dot{E}_7}$	$c_{P,TV} = \frac{\dot{C}_{W,TV}}{\dot{A}_{W,TV}}$
Condensador (C)	$c_{R,Cond.} = \frac{\dot{C}_{ae,s} - \dot{C}_{ae,e}}{\dot{A}_{ae,s} - \dot{A}_{ae,e}}$	$c_{P,Cond.} = \frac{\dot{C}_8 - \dot{C}_7}{\dot{A}_8 - \dot{A}_7}$
Bomba de Agua de condensado (BAC)	$c_{R,BAC} = \frac{\dot{C}_{W,BAC}}{\dot{A}_{W,BAC}}$	$c_{P,BAC} = \frac{\dot{C}_9 - \dot{C}_8}{\dot{A}_9 - \dot{A}_8}$
Deareador (D)	$c_{R,D} = \frac{\dot{C}_9}{\dot{A}_9}$	$c_{P,D} = \frac{\dot{C}_{10}}{\dot{A}_{10}}$
Bomba de Agua de alimentación (BAA)	$c_{R,BAA} = \frac{\dot{C}_{W,BAA}}{\dot{A}_{W,BAA}}$	$c_{P,BAA} = \frac{\dot{C}_{11} - \dot{C}_{10}}{\dot{A}_{11} - \dot{A}_{10}}$

3.4 COSTO DE LAS CORRIENTES DE EXERGÍA PERDIDA

El flujo de costos asociados con la exergía perdida (\dot{C}_{Pe}) representa la pérdida monetaria asociada con la exergía perdida desde un sistema hacia sus alrededores. La exergía perdida ($\dot{A}_{Pe,k}$) del k-ésimo componente de un sistema puede componerse de la exergía pérdida asociada con la transferencia de calor hacia los alrededores, los flujos de las corrientes enviadas a los alrededores y no utilizadas dentro del sistema total analizado o en otro sistema. Usando los flujos de costos asociados con el recurso, el producto y la exergía pérdida para el k-ésimo componente, el balance del flujo del costo es [67 y 68]:

$$\dot{C}_{P,k} = \dot{C}_{R,k} - \dot{C}_{Pe,k} + \dot{Z}_k \quad (3.20)$$

Que también puede ser escrita como:

$$c_{P,k} \dot{A}_{P,k} = c_{R,k} \dot{A}_{R,k} - \dot{C}_{Pe,k} + \dot{Z}_k \quad (3.21)$$

En la ecuación (3.21) se observa que el flujo del costo de la corriente de exergía pérdida ($\dot{C}_{Pe,k}$) afecta al flujo del costo asociado con el producto del componente ($\dot{C}_{P,k}$).

La consideración más simple para el costo de exergía perdida asociada con el componente k-ésimo es:

$$\dot{C}_{Pe,k} = 0$$

Cuando ($\dot{C}_{Pe,k}$) es cero, el producto expresado por $c_{P,k}$ considera todos los costos asociados con el k-ésimo componente del sistema. Esta consideración es aplicada a los balances de costo formulados para el todo un sistema cuando el propósito del análisis termoeconómico es calcular los costos de los productos finales o para evaluar u optimizar el sistema.

Ésta consideración sólo se debe aplicar a las corrientes que son descargadas al medio ambiente. Cuando el propósito del análisis termoeconómico es entender el proceso de formación de costos y flujos de costo en un sistema para evaluar el funcionamiento de un componente u optimizar variables en un componente, todas las corrientes de exergía perdida deberán contabilizarse como si fueran a ser usados posteriormente en el sistema. Haciendo esto, se calcula la pérdida monetaria ($\dot{C}_{Pe,k}$) asociada con la exergía pérdida ($\dot{A}_{Pe,k}$) en el k-ésimo componente. Esto se expresa por la ecuación (3.22):

$$\dot{C}_{Pe,k} = c_{R,k} \dot{A}_{Pe,k} \quad (3.22)$$

También se podría suponer que la exergía perdida resulta en una reducción de la exergía del producto $\dot{A}_{P,k}$ y que el costo promedio de generación del producto prácticamente permanece constante para la exergía perdida en el k-ésimo componente, por lo que la pérdida monetaria asociada con la exergía perdida queda como:

$$\dot{C}_{Pe,k} = c_{P,k} \dot{A}_{Pe,k} \quad (3.23)$$

3.5 VARIABLES EXERGOECONÓMICAS PARA LA EVALUACIÓN DE COMPONENTES

Muchos parámetros juegan un papel importante en el análisis exergoeconómico de centrales de ciclo combinado o sistemas de conversión de energía. Esos parámetros son el costo promedio de unidad de exergía del producto ($c_{P,k}$), el costo promedio de unidad de exergía del recurso ($c_{R,k}$), el factor exergoeconómico (f_k), el costo relativo (r_k) y el costo de la destrucción de exergía ($\dot{C}_{D,k}$).

3.5.1 COSTO DE LA DESTRUCCIÓN DE LA EXERGÍA

En el balance de costo formulado para un componente, no existe un término de costo directamente asociado con la destrucción de la exergía. Por lo tanto, el costo asociado con la destrucción de exergía en un componente o proceso es un costo escondido, pero muy importante, que solo se puede revelar a través de un análisis exergoeconómico.

Suponiendo que el producto ($\dot{A}_{P,k}$) se mantiene fijo y que el costo unitario de recurso c_R , del k-ésimo componente es independiente de la destrucción de exergía, el costo de la destrucción de exergía se define como:

$$C_{D,k} = c_{R,k} \dot{A}_{D,k} \quad (3.24)$$

En la ecuación (3.24) $\dot{C}_{D,k}$ se puede interpretar como el costo de recurso adicional que debe consumir el componente k-ésimo (adicional al necesario por el producto) para cubrir la destrucción de exergía.

En un sistema bien diseñado, la destrucción de la exergía en el componente (k) afecta directamente al capital de inversión para el mismo componente y el costo del recurso de otros componentes. Para la mayoría de los componentes bien diseñados, cuando la destrucción de la exergía disminuye o cuando la eficiencia aumenta, el término $C_{D,k}$ disminuye, pero el capital Z^{CI} aumenta.

La optimización del diseño de un simple componente en forma aislada, consiste en encontrar los intercambios apropiados entre $(\dot{C}_{D,k})$ y (\dot{Z}_k) que minimice el costo unitario del producto generado en el mismo componente.

3.5.2 COSTO RELATIVO

El costo relativo r_k para el componente (k) se define como:

$$r_k = \frac{c_{P,k} - c_{R,k}}{c_{R,k}} = \frac{c_{P,k}}{c_{R,k}} - 1 \quad (3.25)$$

Esta variable expresa el incremento relativo en el costo promedio por unidad de exergía entre el producto y el recurso de un componente. La diferencia de costo relativo es una variable útil para la evaluación y optimización de los componentes de un sistema.

El costo relativo puede ser expresada también por la siguiente ecuación:

$$r_k = \frac{c_{R,k}(\dot{A}_{D,k} + \dot{A}_{Pe,k}) + (\dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM})}{c_{R,k} \dot{A}_{P,k}} \quad (3.26)$$

La ecuación (3.26) muestra las fuentes reales de los costos asociadas con el componente (k). Estas fuentes que provocan un incremento en el costo por unidad de exergía entre el recurso y el producto, son los costos asociados con [65 y 67]:

- Capital de inversión \dot{Z}_k^{CI}
- Operación y mantenimiento \dot{Z}_k^{OM}
- Destrucción de exergía $c_{R,k} \dot{A}_{D,k}$
- Pérdida de exergía $c_{R,k} \dot{A}_{Pe,k}$

Usando la eficiencia exergética del componente (k),

$$\eta_{II,k} = \frac{\dot{A}_{P,k}}{\dot{A}_{R,k}} = 1 - \frac{\dot{A}_{D,k} + \dot{A}_{Pe,k}}{\dot{A}_{R,k}} \quad (3.27)$$

EL costo relativo se puede re-escribir como:

$$r_k = \frac{1 - \eta_{II,k}}{\eta_{II,k}} + \frac{\dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM}}{c_{R,k} \dot{A}_{P,k}} \quad (3.28)$$

3.5.3 FACTOR EXERGOECONÓMICO

Como las ecuaciones (3.27) y (3.28) indican, las fuentes de los costos en un componente pueden ser agrupados en dos categorías. La primera consiste en los costos no relacionados con la exergía (inversión de capital y costos de O&M) y la segunda categoría está formada por la destrucción de exergía y la exergía pérdida. Al evaluar el desempeño de un componente, se quiere conocer el significado relativo de cada categoría, esto se realiza por medio del factor exergoeconómico f_k definido para un componente (k):

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{R,k}(\dot{A}_{D,k} + \dot{A}_{Pe,k})} \quad (3.29)$$

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + \dot{C}_{D,k} + \dot{C}_{Pe,k}} \quad (3.30)$$

Los valores típicos del factor de exergoeconómico dependen del tipo de componente. Por ejemplo, el valor de f_k es típicamente menor a 55% para intercambiador de calor, entre 35 y 75% para compresores y turbinas y sobre 70% para bombas hidráulicas.

Este factor expresa la contribución del costo de equipamiento, al aumento del costo exergoeconómico en el equipo. Si f_k tiene un valor bajo (cercano a cero), será recomendable aumentar \dot{Z} con objeto de disminuir el coste de la irreversibilidad y al contrario si f_k tiene un valor alto (cercano a uno), el coste de la irreversibilidad es pequeño comparado con \dot{Z} , por lo que no es aconsejable invertir para mejorar la eficiencia del proceso [68 y 69].

3.6 OPTIMIZACIÓN EXERGOECONÓMICA

El objetivo de la optimización exergoeconómica es reducir el costo del producto. Este costo es proporcional al costo del recurso utilizado y la suma de los costos de inversión de capital, mantenimiento y operación. Las sumas de los costos asociados con la inversión de capital son minimizadas considerando los principios de la termodinámica y la economía. Así, la función objetivo se convierte en un problema de minimización. La función objetivo para este problema se define como minimizar la función de costo total. La función objetivo requerida para minimizar el costo unitario del producto se expresarse como [70 y 71]:

$$\dot{C}_T = c_c * \dot{m}_c * PCI + \sum_k \dot{Z}_k \quad (3.31)$$

Donde \dot{Z}_k representa el costo de capital de inversión y mantenimiento del k-esimo componente y se obtiene por medio de la ecuación siguiente:

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k * CRF * \varphi}{(N * 3600)} \quad (3.32)$$

Utilizando la ecuación (3.32) y considerando que $\dot{C}_c = c_c * \dot{m}_c * PCI$, la ecuación (3.31) se re-escribe como:

$$\dot{C}_T = \dot{C}_c + \sum_k \frac{Z_K * CRF * \varphi}{(N * 3600)} \quad (3.33)$$

En el diseño y optimización es necesario definir las variables de decisión, que para el caso de estudio estas variables son la relación de presión del compresor de aire (r_p), la eficiencia del compresor (η_{CA}), eficiencia de la turbina de gas (η_{TG}), temperatura de entrada de la turbina de gas ($T_{e,TG}$), la temperatura de entrada del vapor a la turbina de vapor ($T_{e,TV}$), la eficiencia de la turbina de vapor (η_{TV}) y la eficiencia de las bombas de agua de alimentación (η_{BAA}), y de agua de condensado (η_{BAC}). Con estos parámetros de decisión, se minimiza la función objetivo \dot{C}_T [72 y 73].

CAPÍTULO IV: CASO DE ESTUDIO: APLICACIÓN

El desarrollo de esta tesis ha tomado como un caso real de aplicación, una Central de Ciclo Combinado. Para el análisis se utilizaron datos de diseño y de operación al 100% de la carga.

En la primera parte de este capítulo se presenta una descripción de la central, las características principales de operación de cada uno de los equipos que la componen, haciendo mención de sus características y funcionamiento más relevante. En la segunda parte se aplica la metodología de análisis termoecológico desarrollada a cada equipo que forma la central en estudio y finalmente se aplica la metodología de optimización a la central.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL DE CICLO COMBINADO

El caso de estudio es la “Central Ciclo Combinado Tula (CCCT). Esta central forma parte del paquete de generación de la Empresa Productiva Subsidiaria II (EPS II) de la Comisión Federal de Electricidad que es parte de la Gerencia de Producción Occidente.

La Central está ubicada a 83 km. al norte de la Ciudad de México, en el estado de Hidalgo y a 8 km al sur de la Ciudad de Tula de Allende, ocupa una superficie de 12 hectáreas y se encuentra a una altitud de 2098 MSNM. Cabe señalar que en el mismo predio se encuentra construida la Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos. Ambas centrales ocupan un total de 94 hectáreas y colindan con la Refinería Miguel Hidalgo de Petróleos Mexicanos [74].

La CCCT cuenta con una capacidad instalada de 493 MW. Inició su operación como Ciclo Abierto con las Turbinas de Gas el 8 de mayo de 1981 y posteriormente como Ciclo Combinado el 1.º de noviembre de 1985. La Central está constituida por dos paquetes de Ciclo Combinado de capacidad de 238 y 255 MW cada uno, dando un total de 493 MW, distribuidos como se indica en la tabla 4.1.

TABLA 4.1- Capacidad instalada de la Central de Ciclo Combinado Tula

Paquete Norte	255 MW
2 Turbinas de Gas, cada una de 72 MW:	144 MW
1 Turbina de Vapor de 111 MW:	111 MW
Paquete Sur	238 MW
2 Turbinas de Gas, cada una de 69 MW:	138 MW
1 Turbina de Vapor de 100 MW:	100 MW

En la figura 4.1 se muestra el diagrama de esquemático del sistema de generación de la CCCT. A continuación, se describe cada uno de los equipos que componen.

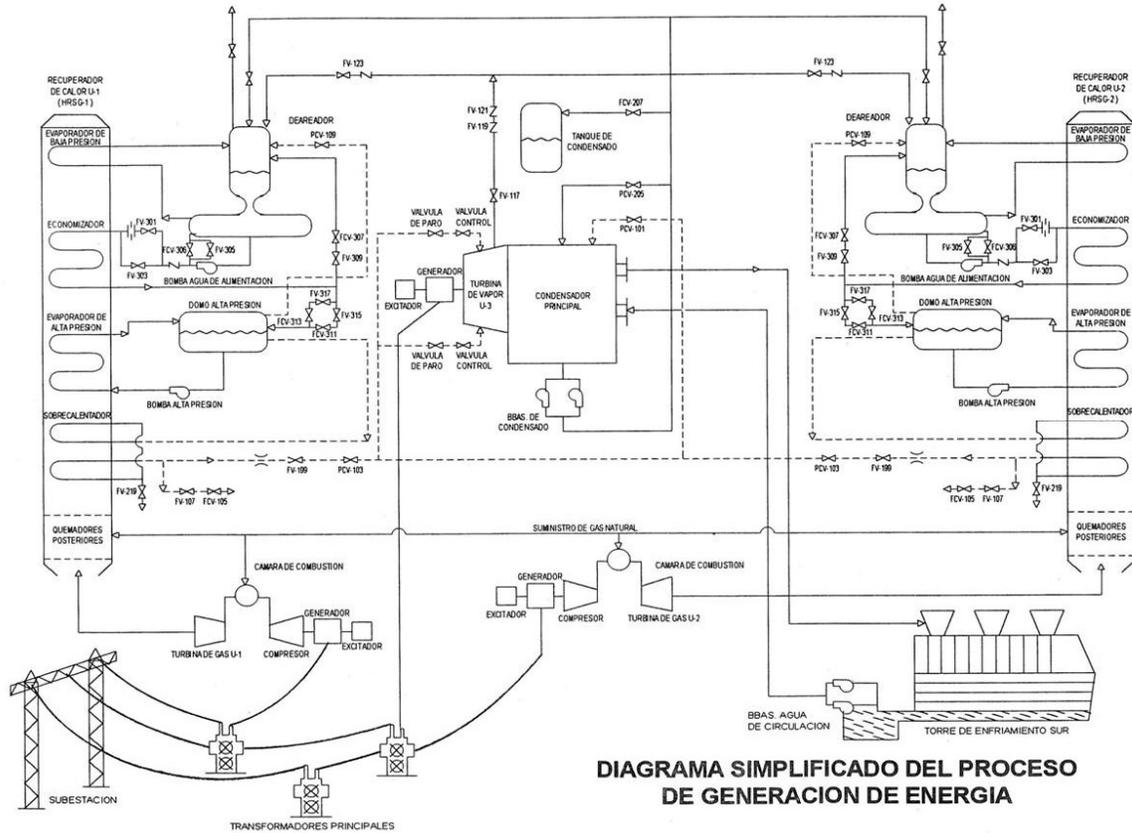


FIGURA 4.1- -Diagrama del proceso de Generación de la Central de Ciclo Combinado Tula

4.1.1 TURBINAS DE GAS

Las Turbinas de Gas están integradas por un Compresor Axial, una Cámara de Combustión y la Turbina misma. Se encuentran acopladas directamente a los Generadores Eléctricos.

En la tabla 4.2 se indican las características de las turbinas. Las correspondientes a U1 y U2 son Parte del paquete Sur y las U4 y U5 corresponden al paquete Norte.

TABLA 4.2- Características de la turbina de gas

		U1-U2	U4-U5
Fabricante		Westinghouse	Westinghouse
No. de serie		W 501 D24	W 501 D5
Tipo		Reacción	Reacción
Capacidad de carga	MW	94	99
Capacidad efectiva	MW	69	72
Velocidad	rpm	3 600	3 600
Numero de pasos		4	4
Flujo de gases a la Salida	kg/h	1 004 351	1 004 351

4.1.2 CÁMARAS DE COMBUSTIÓN

Es un equipo diseñado para que en él se realice la combustión y sirve de generador de gases, produciendo la energía térmica que se convierte en trabajo mecánico en la Turbina. En dicha Cámara se combina el aire procedente del Compresor Axial y el combustible que va a quemarse. El número de Combustores varía dependiendo de la unidad. Cada cámara de combustión está integrada por: Toberas de Combustible, Ducto de Transición, Tubo de Cruce de Flama, Bujía de Encendido y Detectores de Flama.

Las características de estos equipos se muestran en la tabla 4.3.

TABLA 4.3- Características de la Cámara de Combustión

	U1-U2	U4-U5
Fabricante	Westinghouse	Westinghouse
Combustores para gas natural y diesel	16	14
Arreglo	Concéntrico al eje	Concéntrico al eje
Tipo de bujía de encendido	Retráctil	Retráctil
Tipo de detectores de flama	Ultra violeta	Ultra violeta
No. de detectores de flama	4	4

4.1.3 COMPRESORES

Las características de los compresores axiales se muestran en la tabla 4.4.

TABLA 4.4- Características del Compresor de Aire

	U1-U2	U4-U5
Fabricante	Westinghouse	Westinghouse
No. de pasos	19	19
Tipo	Flujo Axial	Flujo Axial
Fluido	Aire atmosférico	Aire atmosférico
Relación de compresión	17	14

4.1.4 TURBINAS DE VAPOR

La Turbina de vapor está integrada por 10 pasos de acción y 3 de reacción. En la tabla 4.5 se muestran las características de estos equipos.

TABLA 4.5- Características de la Turbina de Vapor

		U3	U6
Fabricante		Westinghouse	Hitachi
Potencia	MW	100	111.3
Tipo		Acción -reacción	Impulso
Paso de acción		10	-
Pasos de reacción		3	-
No. de válvulas de admisión		2	2
No. de extracciones		1	1
Flujo de vapor máx. capacidad	kg/h	404 546	377 086
Presión de vapor de entrada	kg/cm ²	80.5	84.9
Temperatura vapor entrada	°C	507	507.8
Presión de escape	mmHg	635	696.5
Velocidad	rpm	3 600	3 600
No. de cuerpos		1	1

4.2.1 BALANCE DE FLUJOS DE MASA

La composición del gas natural y del aire utilizados se muestran en el apéndice A

Las ecuaciones (2.1) y (2.2) de balances de masa, se aplican a los equipos de la CCCT y se obtiene lo siguiente:

Compresor de aire-1 (CA-1):

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (4.1)$$

Compresor de aire-2 (CA-2):

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} \quad (4.2)$$

Cámara de combustión-1 (CC-1):

$$\dot{m}_6 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (4.3)$$

Cámara de combustión-2 (CC-2):

$$\dot{m}_{16} + \dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} \quad (4.4)$$

Turbina de gas-1 (TG-1):

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (4.5)$$

Turbina de gas-2 (TG-2):

$$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} \quad (4.6)$$

Recuperador de calor-1 (RC-1):

$$\dot{m}_4 + \dot{m}_{10} = \dot{m}_5 + \dot{m}_9 \quad (4.7)$$

Recuperador de calor-2 (RC-2):

$$\dot{m}_{14} + \dot{m}_{20} = \dot{m}_{15} + \dot{m}_{19} \quad (4.8)$$

Turbina de vapor (TV):

$$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{22} + \dot{m}_{24} \quad (4.9)$$

Condensador (C):

$$\dot{m}_{24} + \dot{m}_{25} = \dot{m}_{26} + \dot{m}_{27} \quad (4.10)$$

Bomba de agua de condensado (BAC):

$$\dot{m}_{27} = \dot{m}_{29} + \dot{m}_{30} \quad (4.11)$$

Deareador-1 (D-1):

$$\dot{m}_{29} + \dot{m}_{31} = \dot{m}_{32} \quad (4.12)$$

Deareador-2 (D-2):

$$\dot{m}_{30} + \dot{m}_{34} = \dot{m}_{35} \quad (4.13)$$

Bomba de agua de alimentación-1 (BAA-1):

$$\dot{m}_{32} = \dot{m}_{10} \quad (4.14)$$

Bomba de agua de alimentación-2 (BAA-2):

$$\dot{m}_{35} = \dot{m}_{20} \quad (4.15)$$

4.2.2 BALANCE DE FLUJOS ENERGÉTICOS

El modelo termodinámico de primera ley para la central de ciclo combinado se describe a continuación. Para cada equipo que forma la central se establecen las ecuaciones de primera ley.

Los cálculos de los parámetros termodinámicos (entalpías, entropías), se realizan tomando los datos de diseño y de operación para la central de ciclo combinado.

Compresor de aire-1 (CA-1):

$$|\dot{W}_{CA-1}| = \frac{\dot{m}_1}{M_a} (\bar{h}_1 - \bar{h}_2) \quad (4.16)$$

Compresor de aire (CA-2):

$$|\dot{W}_{CA-2}| = \frac{\dot{m}_{11}}{M_a} (\bar{h}_{11} - \bar{h}_{12}) \quad (4.17)$$

Cámara de combustión-1 (CC-1):

$$\frac{\dot{m}_6}{M_c} PCI = \frac{\dot{m}_3}{M_{gc}} \bar{h}_3 - \frac{\dot{m}_2}{M_a} \bar{h}_2 \quad (4.18)$$

Cámara de combustión-2 (CC-2):

$$\frac{\dot{m}_{16}}{M_c} PCI = \frac{\dot{m}_{13}}{M_{gc}} \bar{h}_{13} - \frac{\dot{m}_{12}}{M_a} \bar{h}_{12} \quad (4.19)$$

Turbina de gas-1 (TG-1):

$$\dot{W}_{TG-1} = \frac{\dot{m}_4}{M_{gc}} (\bar{h}_3 - \bar{h}_4) \quad (4.20)$$

Turbina de gas-2 (TG-2):

$$\dot{W}_{TG-2} = \frac{\dot{m}_{14}}{M_{gc}} (\bar{h}_{13} - \bar{h}_{14}) \quad (4.21)$$

Recuperador de calor-1 (RC-1):

$$\frac{\dot{m}_4}{M_{gc}} (\bar{h}_4 - \bar{h}_5) = \dot{m}_9 (h_9 - h_{10}) \quad (4.22)$$

Recuperador de calor-2 (RC-2):

$$\frac{\dot{m}_{14}}{M_{gc}} (\bar{h}_{14} - \bar{h}_{15}) = \dot{m}_{19} (h_{19} - h_{20}) \quad (4.23)$$

Turbina de vapor (TV):

$$\dot{W}_{TV} = \dot{m}_{21}(h_{21} - h_{22} - h_{24}) \quad (4.24)$$

Condensador (C):

$$\dot{m}_{24}(h_{24} - h_{27}) = \dot{m}_{25}(h_{26} - h_{25}) \quad (4.25)$$

Bomba de agua de condensado (BAC):

$$|\dot{W}_{BAC}| = \dot{m}_{27}(h_{27} - (h_{29} + h_{30})) \quad (4.26)$$

Deaerador-1 (D-1):

$$\dot{m}_{29}h_{29} + \dot{m}_{31}h_{31} - \dot{m}_{32}h_{32} = 0 \quad (4.27)$$

Deaerador-2 (D-2):

$$\dot{m}_{30}h_{30} + \dot{m}_{34}h_{34} - \dot{m}_{18}h_{18} = 0 \quad (4.28)$$

Bomba de agua de alimentación-1 (BAA-1):

$$|\dot{W}_{BAA-1}| = \dot{m}_{32}(h_{32} - h_{10}) \quad (4.29)$$

Bomba de agua de alimentación-2 (BAA-2):

$$|\dot{W}_{BAA-2}| = \dot{m}_{35}(h_{35} - h_{20}) \quad (4.30)$$

4.2.3 BALANCE DE ENTROPÍA DEL CASO DE ESTUDIO

Aplicando los balances de entropía desarrollados en el capítulo II a los equipos de la central de ciclo combinado en estudio se obtienen las siguientes ecuaciones.

Compresor de aire-1 (CA-1):

$$\dot{\sigma}_{CA-1} = \frac{\dot{m}_1}{M_a}(\bar{s}_2 - \bar{s}_1) \quad (4.31)$$

Compresor de aire-2 (CA-2):

$$\dot{\sigma}_{CA-2} = \frac{\dot{m}_{11}}{M_a}(\bar{s}_{12} - \bar{s}_{11}) \quad (4.32)$$

Cámara de combustión-1 (CC-1):

$$\dot{\sigma}_{CC-1} = \frac{\dot{m}_3}{M_{gc}}\bar{s}_3 - \frac{\dot{m}_2}{M_a}\bar{s}_2 \quad (4.33)$$

Cámara de combustión-2 (CC-2):

$$\dot{\sigma}_{CC-2} = \frac{\dot{m}_{13}}{M_{gc}}\bar{s}_{13} - \frac{\dot{m}_{12}}{M_a}\bar{s}_{12} \quad (4.34)$$

Turbina de gas-1 (TG-1):

$$\dot{\sigma}_{TG-1} = \frac{\dot{m}_3}{M_{gc}}(\bar{s}_4 - \bar{s}_3) \quad (4.35)$$

Turbina de gas-2 (TG-2):

$$\dot{\sigma}_{TG-2} = \frac{\dot{m}_{13}}{M_{gc}} (\bar{s}_{14} - \bar{s}_{13}) \quad (4.36)$$

Recuperador de calor-1 (RC-1):

$$\dot{\sigma}_{RC-1} = \frac{\dot{m}_4}{M_{gc}} (\bar{s}_5 - \bar{s}_4) + \dot{m}_9 (s_{10} - s_9) \quad (4.37)$$

Recuperador de calor-2 (RC-2):

$$\dot{\sigma}_{RC-1} = \frac{\dot{m}_{14}}{M_{gc}} (\bar{s}_{15} - \bar{s}_{14}) + \dot{m}_{19} (s_{20} - s_{19}) \quad (4.38)$$

Turbina de vapor (TV):

$$\dot{\sigma}_{TV} = (\dot{m}_{22} * s_{22} + \dot{m}_{24} * s_{24} - \dot{m}_{21} * s_{21}) \quad (4.39)$$

Condensador (C):

$$\dot{\sigma}_C = \dot{m}_{24} (s_{27} - s_{24}) + \dot{m}_{25} (s_{26} - s_{25}) \quad (4.40)$$

Bomba de agua de condensado (BAC):

$$\dot{\sigma}_{BAC} = \dot{m}_{24} * (s_{29} + s_{30} - s_{27}) \quad (4.41)$$

Deaerador-1 (D-1):

$$\dot{\sigma}_{D-1} = (\dot{m}_{32} * s_{32}) - ((\dot{m}_{29} * s_{29}) + (\dot{m}_{31} * -s_{31})) \quad (4.42)$$

Deaerador-2 (D-2):

$$\dot{\sigma}_{D-2} = (\dot{m}_{35} * s_{35}) - ((\dot{m}_{30} * s_{30}) + (\dot{m}_{34} * s_{34})) \quad (4.43)$$

Bomba de agua de alimentación-1 (BAA-1):

$$\dot{\sigma}_{BAA-1} = \dot{m}_{32} (s_{10} - s_{32}) \quad (4.44)$$

Bomba de agua de alimentación-2 (BAA-2):

$$\dot{\sigma}_{BAA} = \dot{m}_{35} (s_{20} - s_{35}) \quad (4.45)$$

4.2.4 BALANCE DE LOS FLUJOS EXERGÉTICOS

El cálculo de la exergía de cada flujo de corriente de los equipos que conforman la central en estudio, se hizo considerando a cada equipo como un volumen de control en estado estacionario, considerando a los flujos de aire y combustible como gas ideal y despreciando los efectos de la energía cinética y la energía potencial [44 y 45].

El balance exergético inicia con el cálculo de las exergía de cada flujo para poder finalmente evaluar para cada equipo, la destrucción de exergía y la eficiencia exergética, como se muestra a continuación:

4.2.4.1 EXERGÍA FÍSICA

Para la evaluación de la exergía físicas de los flujos de cada corriente de los equipos de la central se realiza por medio de la ecuación siguiente:

$$\dot{A}_i^{FI} = \frac{\dot{m}_i}{M_i} \times \bar{a}_i^{FI} \quad (4.46)$$

Donde se tiene que:

$$\bar{a}_i^{FI} = [\bar{h}_i - \bar{h}_0 - T_0(\bar{s}_i - \bar{s}_0)] \quad (4.47)$$

Y para el caso del modelo gas ideal, que es el que aquí se considera,

$$\bar{a}_i^{FI} = \bar{h}_i - \bar{h}_0 - \left(\{ \bar{s}^\circ_{(T_i)} - \bar{s}^\circ_{(T_0)} \} - \bar{R}T_0 \frac{p_i}{p_0} \right) \quad (4.48)$$

Cuando alguno de los flujos (modelo gas ideal) alcanza la condición de referencia (estado muerto) del sistema, se cumple que $T_i = T_0$, $\bar{h}_i = \bar{h}_0$ y $\bar{s}^\circ_{(T_i)} = \bar{s}^\circ_{(T_0)}$. Si la presión parcial del componente es diferente de la presión de referencia, la ecuación (3.48) queda como:

$$\bar{a}_i^{FI} = \bar{R}T_0 \ln \frac{p_i}{p_0} \quad (4.49)$$

4.2.4.2 EXERGÍAS QUÍMICAS

El cálculo de la exergía química del combustible se realiza mediante la ecuación siguiente [75]:

$$a_c^{QU} = \xi * PCI \quad (4.50)$$

Donde ξ representa la relación entre la exirgia química del combustible y el poder calirifico inferior del combsutible, que para el gas natural ξ tiene una valor de 1.06 [76].

En la central en estudio la exergía química de los gases de combustión tiene un papel importante en el balance de exergía. Los productos de combustión se asumen como una mezcla de gas ideal durante el análisis, el cálculo de la exergía química de la mezcla se realiza se usa la siguiente ecuación [75]:

$$\dot{E}_i^{QU} = \frac{\dot{m}_i}{M_i} (\sum x'_i \bar{e}_i^{QU} + \bar{R}T_0 \sum x'_i \ln x'_i) \quad (4.50a)$$

4.2.4.3 EXERGÍA DEL RECURSO Y DEL PRODUCTO

Con los valores del flujo de exergía específica y los flujos máxicos se determina la exergía de los recursos y los productos de los equipos de la CCCT:

- **Compresor de aire-1 (CA-1):** $\dot{A}_{R,CA-1} = \dot{W}_{CA-1} \quad (4.51)$

$$\dot{A}_{P,CA-1} = \dot{A}_2 - \dot{A}_1 \quad (4.52)$$

• Compresor de aire-2 (CA-2):	$\dot{A}_{R,CA-2} = \dot{W}_{CA-2}$	(4.53)
	$\dot{A}_{P,CA-2} = \dot{A}_{12} - \dot{A}_{11}$	(4.54)
• Cámara de combustión-1 (CC-1):	$\dot{A}_{R,CC-1} = \dot{A}_2 + \dot{A}_6$	(4.55)
	$\dot{A}_{P,CC-1} = \dot{A}_3$	(4.56)
• Cámara de combustión-2 (CC-2):	$\dot{A}_{R,CC-2} = \dot{A}_{12} + \dot{A}_{16}$	(4.57)
	$\dot{A}_{P,CC-2} = \dot{A}_{13}$	(4.58)
• Turbina de gas-1 (TG-1):	$\dot{A}_{R,TG-1} = \dot{A}_3 - \dot{A}_4$	(4.59)
	$\dot{A}_{P,TG-1} = \dot{W}_{TG-1}$	(4.60)
• Turbina de gas-2 (TG-2):	$\dot{A}_{R,TG-2} = \dot{A}_{13} - \dot{A}_{14}$	(4.61)
	$\dot{A}_{P,TG-2} = \dot{W}_{TG-2}$	(4.62)
• Recuperador de calor-1 (RC-1):	$\dot{A}_{R,RC-1} = \dot{A}_4 - \dot{A}_5$	(4.63)
	$\dot{A}_{P,RC-1} = \dot{A}_9 - \dot{A}_{10}$	(4.64)
• Recuperador de calor-2 (RC-2):	$\dot{A}_{R,RC-2} = \dot{A}_{14} - \dot{A}_{15}$	(4.65)
	$\dot{A}_{P,RC-2} = \dot{A}_{19} - \dot{A}_{20}$	(4.66)
• Turbina de vapor (TV):	$\dot{A}_{R,TV} = \dot{A}_{21} - \dot{A}_{22} - \dot{A}_{24}$	(4.67)
	$\dot{A}_{P,TV} = \dot{W}_{TV}$	(4.68)
Condensador (C):	$\dot{A}_{R,C} = \dot{A}_{24} - \dot{A}_{27}$	(4.69)
	$\dot{A}_{P,C} = \dot{A}_{26} - \dot{A}_{25}$	(4.70)
• Bomba de Agua de Condensado (BAC):	$\dot{A}_{R,BAC} = \dot{W}_{BAC}$	(4.71)
	$\dot{A}_{P,BAC} = \dot{A}_{29} + \dot{A}_{30} - \dot{A}_{27}$	(4.72)
• Deaerador-1 (D-1):	$\dot{A}_{R,D-1} = \dot{A}_{29} + \dot{A}_{31}$	(4.73)
	$\dot{A}_{P,D-1} = \dot{A}_{32}$	(4.74)
• Deaerador-2 (D-2):	$\dot{A}_{R,D-2} = \dot{A}_{30} + \dot{A}_{34}$	(4.75)
	$\dot{A}_{P,D-2} = \dot{A}_{35}$	(4.76)
• Bomba de Agua de Alimentación-1 (BAA):	$\dot{A}_{R,BAA-1} = \dot{W}_{BAA}$	(4.77)
	$\dot{A}_{P,BAA-1} = \dot{A}_{10} - \dot{A}_{32}$	(4.78)
• Bomba de Agua de Alimentación-2 (BAA-2):	$\dot{A}_{R,BAA-2} = \dot{W}_{BAA}$	(4.79)
	$\dot{A}_{P,BAA-2} = \dot{A}_{20} - \dot{A}_{35}$	(4.80)

4.2.4.4 EXERGÍA DESTRUIDA

Con los flujos de exergía de los recursos y productos de cada componente de la CCCT se obtienen la destrucción de exergía correspondiente:

Compresor de aire-1 (CA-1):	$\dot{A}_{D,CA-1} = \dot{W}_{CA-1} - \dot{A}_2$	(4.81)
Compresor de aire-2 (CA-2):	$\dot{A}_{D,CA-2} = \dot{W}_{CA-2} - \dot{A}_{12}$	(4.82)
Cámara de combustión-1 (CC-1):	$\dot{A}_{D,CC-1} = (\dot{A}_2 + \dot{A}_6) - \dot{A}_3$	(4.83)
Cámara de combustión-2 (CC-2):	$\dot{A}_{D,CC-2} = (\dot{A}_{12} + \dot{A}_{16}) - \dot{A}_{13}$	(4.84)
Turbina de gas-1 (TG-1):	$\dot{A}_{D,TG-1} = (\dot{A}_3 - \dot{A}_4) - \dot{W}_{TG-1}$	(4.85)
Turbina de gas-2 (TG-2):	$\dot{A}_{D,TG-2} = (\dot{A}_{13} - \dot{A}_{14}) - \dot{W}_{TG-2}$	(4.86)
Recuperador de calor-1 (RC-1):	$\dot{A}_{D,RC-1} = (\dot{A}_4 - \dot{A}_5) - (\dot{A}_9 - \dot{A}_{10})$	(4.87)
Recuperador de calor-2 (RC-2):	$\dot{A}_{D,RC-2} = (\dot{A}_{14} - \dot{A}_{15}) - (\dot{A}_{19} - \dot{A}_{20})$	(4.88)
Turbina de vapor (TV):	$\dot{A}_{D,TV} = (\dot{A}_{21} - \dot{A}_{22} - \dot{A}_{24}) - \dot{W}_{TV}$	(4.89)

Condensador (C): $\dot{A}_{D,C} = (\dot{A}_{24} + \dot{A}_{25}) - (\dot{A}_{26} + \dot{A}_{27})$ (4.90)

Bomba de Agua de Condensado (BAC): $\dot{A}_{D,BAC} = \dot{W}_{BAC} - (\dot{A}_{29} + \dot{A}_{30} - \dot{A}_{27})$ (4.91)

Deaerador-1 (D-1): $\dot{A}_{D,D-1} = (\dot{A}_{29} + \dot{A}_{31}) - \dot{A}_{32}$ (4.92)

Deaerador-2 (D-2): $\dot{A}_{D,D-2} = (\dot{A}_{30} + \dot{A}_{34}) - \dot{A}_{35}$ (4.93)

Bomba de Agua de Alimentación-1 (BAA): $\dot{A}_{D,BAA-1} = \dot{W}_{BAA} - (\dot{A}_{10} - \dot{A}_{32})$ (4.94)

Bomba de Agua de Alimentación-2 (BAA-2): $\dot{A}_{D,BAA-2} = \dot{W}_{BAA} - (\dot{A}_{20} - \dot{A}_{35})$ (4.95)

4.2.4.5 EFICIENCIAS EXERGÉTICAS

Para el cálculo de la eficiencia exergética para cada equipo de la CCCT, se realiza mediante las ecuaciones siguientes:

Compresor de aire-1 (CA-1):

$$\eta_{II,CA-1} = \frac{\dot{A}_2 - \dot{A}_1}{|\dot{W}_{CA-1}|} \quad (4.96)$$

Compresor de aire-2 (CA-2):

$$\eta_{II,CA-2} = \frac{\dot{A}_{12} - \dot{A}_{11}}{|\dot{W}_{CA-2}|} \quad (4.97)$$

Cámara de combustión-1 (CC-1):

$$\eta_{II,CC-1} = \frac{\dot{A}_3 - \dot{A}_2}{\dot{A}_6} \quad (4.98)$$

Cámara de combustión-2 (CC-2):

$$\eta_{II,CC-2} = \frac{\dot{A}_{13} - \dot{A}_{12}}{\dot{A}_{16}} \quad (4.99)$$

Turbina de gas-1 (TG-1):

$$\eta_{II,TG-1} = \frac{\dot{W}_{TG-1}}{\dot{A}_3 - \dot{A}_4} \quad (4.100)$$

Turbina de gas-2 (TG-2):

$$\eta_{II,TG-2} = \frac{\dot{W}_{TG-2}}{\dot{A}_{13} - \dot{A}_{14}} \quad (4.101)$$

Recuperador de calor -1 (RC-1):

$$\eta_{II,RC-1} = \frac{\dot{A}_9 - \dot{A}_{10}}{\dot{A}_4 - \dot{A}_5} \quad (4.102)$$

Recuperador de calor-2 (RC-2):

$$\eta_{II,RC-2} = \frac{\dot{A}_{19} - \dot{A}_{20}}{\dot{A}_{14} - \dot{A}_{15}} \quad (4.103)$$

Turbina de vapor (TV):

$$\eta_{II,TV} = \frac{\dot{W}_{TV}}{\dot{A}_{21} - \dot{A}_{22} - \dot{A}_{24}} \quad (4.104)$$

Condensador (C):

$$\eta_{II,C} = \frac{\dot{A}_{26} - \dot{A}_{25}}{\dot{A}_{24} - \dot{A}_{27}} \quad (4.105)$$

Bomba de agua de condensado (BAC):

$$\eta_{II,BC} = \frac{\dot{A}_{29} + \dot{A}_{30} - \dot{A}_{27}}{|\dot{W}_{BAC}|} \quad (4.106)$$

Deareador-1 (D-1):

$$\eta_{II,D-1} = \frac{\dot{A}_{32}}{\dot{A}_{29} + \dot{A}_{31}} \quad (4.107)$$

Deareador-1 (D-2):

$$\eta_{II,D-2} = \frac{\dot{A}_{35}}{\dot{A}_{30} + \dot{A}_{34}} \quad (4.108)$$

Bomba de agua de alimentación-1 (BAA-1):

$$\eta_{II,BAA-1} = \frac{\dot{A}_{10} - \dot{A}_{32}}{|\dot{W}_{BAA-1}|} \quad (4.109)$$

Bomba de agua de alimentación-1 (BAA-2):

$$\eta_{II,BAA-2} = \frac{\dot{A}_{20} - \dot{A}_{35}}{|\dot{W}_{BAA-2}|} \quad (4.110)$$

4.2.5 BALANCE TERMOECONÓMICO DEL CASO DE ESTUDIO

Aplicando la teoría de los costos exergéticos a los equipos de la CCCT y conociendo los flujos de exergía de las corrientes de los recursos y los productos de los equipos. Se calculan los costos exergéticos unitarios resolviendo el sistema de ecuaciones que resulta del balance de costos exergéticos, que para CCCT es el siguiente:

- **Compresor de aire-1** $k^*_2 \dot{A}_2 - k^*_1 \dot{A}_1 = k^*_7 \dot{W}_{CA-1}$ (4.111)
- **Compresor de aire-2** $k^*_{12} \dot{A}_{12} - k^*_{11} \dot{A}_{11} = k^*_{17} \dot{W}_{CA-2}$ (4.112)
- **Cámara de combustión-1** $k^*_6 \dot{A}_6 + k^*_2 \dot{A}_2 = k^*_3 \dot{A}_3 - k^*_5 \dot{A}_5$ (4.113)
- **Cámara de combustión-2** $k^*_{16} \dot{A}_{16} + k^*_{12} \dot{A}_{12} = k^*_{13} \dot{A}_{13} - k^*_{15} \dot{A}_{15}$ (4.114)
- **Turbina de gas-1** $k^*_3 \dot{A}_3 - k^*_4 \dot{A}_4 = k^*_8 \dot{W}_{TG}$ (4.115)
- **Turbina de gas-2** $k^*_{13} \dot{A}_{13} - k^*_{14} \dot{A}_{14} = k^*_{18} \dot{W}_{TG}$ (4.116)
- **Recuperador de calor-1** $k^*_4 \dot{A}_4 - k^*_5 \dot{A}_5 = k^*_9 \dot{A}_9 - k^*_{10} \dot{A}_{10}$ (4.117)
- **Recuperador de calor-2** $k^*_{14} \dot{A}_{14} - k^*_5 \dot{A}_5 = k^*_{19} \dot{A}_{19} - k^*_{20} \dot{A}_{20}$ (4.118)
- **Turbina de vapor** $k^*_{21} \dot{A}_{21} - k^*_{22} \dot{A}_{22} - k^*_{24} \dot{A}_{24} = k^*_{23} \dot{W}_{TV}$ (4.119)
- **Condensador** $k^*_{24} \dot{A}_{24} - k^*_{27} \dot{A}_{27} = k^*_{37} \dot{A}_{37}$ (4.120)
- **Bomba de Agua de Condensador** $k^*_{28} \dot{W}_{BAC} = k^*_{29} \dot{A}_{29} + k^*_{30} \dot{A}_{30} - k^*_{27} \dot{A}_{27}$ (4.121)
- **Deareador-1** $k^*_{29} \dot{A}_{29} + k^*_{31} \dot{A}_{31} = k^*_{32} \dot{A}_{32}$ (4.122)
- **Deareador-2** $k^*_{30} \dot{A}_{30} + k^*_{34} \dot{A}_{34} = k^*_{35} \dot{A}_{35}$ (4.123)

• **Bomba de Agua de Alimentación-1** $k^*_{33}\dot{W}_{BAA-1} = k^*_{10}\dot{A}_{10} - k^*_{32}\dot{A}_{32}$ (4.124)

• **Bomba de Agua de Alimentación-2** $k^*_{36}\dot{W}_{BAA-2} = k^*_{20}\dot{A}_{20} - k^*_{35}\dot{A}_{35}$ (4.125)

Para la resolución de este sistema de ecuaciones, se hacen las siguientes consideraciones para los costos exergéticos unitarios:

- Los flujos de entrada al sistema son igual a su exergía, por lo que su costo exergético unitario es igual a uno. $k^*_1 = 1, k^*_6 = 1, k^*_{11} = 1, k^*_{16} = 1$.
- El costo unitario de los productos de un equipo son iguales: $k^*_3 = k^*_4 = k^*_5, k^*_7 = k^*_8, k^*_{13} = k^*_{14} = k^*_{15}, k^*_{17} = k^*_{18}, k^*_{21} = k^*_{22} = k^*_{24} = k^*_{27} = k^*_{31} = k^*_{34}, k^*_{23} = k^*_{28} = k^*_{33} = k^*_{36}, k^*_{29} = k^*_{30}$

En este sistema de ecuaciones se obtendrán quince incógnitas:

$$\begin{aligned}
 & k^*_2 \\
 & k^*_3 = k^*_4 = k^*_5, \\
 & k^*_7 = k^*_8 \\
 & k^*_{12} \\
 & k^*_{13} = k^*_{14} = k^*_{15} \\
 & k^*_{17} = k^*_{18} \\
 & k^*_{21} = k^*_{22} = k^*_{24} = k^*_{27} = k^*_{31} = k^*_{34} \\
 & k^*_{23} = k^*_{28} = k^*_{33} = k^*_{36} \\
 & k^*_{29} = k^*_{30} \\
 & k^*_9, k^*_{10}, k^*_{19}, k^*_{20}, k^*_{32}, k^*_{35},
 \end{aligned}$$

Después de resolver el sistema de ecuaciones generado y obtener los costos exergéticos unitarios de cada corriente, se calcula el consumo exergético por medio de la ecuación siguiente:

$$A^* = k^* \times \dot{A} \quad (4.126)$$

Los consumos exergéticos para el ciclo combinado analizado son los siguiente:

Compresor de aire-1 $A^*_2 - A^*_1 = A^*_7$ (4.127)

Compresor de aire-2 $A^*_{12} - A^*_{11} = A^*_1$ (4.128)

Cámara de combustión-1 $A^*_6 + A^*_2 = A^*_3 - A^*_5$ (4.129)

Cámara de combustión-2 $A^*_{16} + A^*_{16} = A^*_{13} - A^*_{15}$ (4.130)

Turbina de gas-1 $A^*_3 - A^*_4 = A^*_7 + A^*_8$ (4.131)

Turbina de gas-2 $A^*_{13} - A^*_{14} = A^*_{17} + A^*_{18}$ (4.132)

Recuperador de calor-1 $A^*_4 - A^*_5 = A^*_9 - A^*_{10}$ (4.133)

Recuperador de calor-2 $A^*_{14} - A^*_{15} = A^*_{19} - A^*_{20}$ (4.134)

Turbina de vapor $A^*_{21} - A^*_{22} - A^*_4 = A^*_{23}$ (4.135)

Condensador $A^*_{24} - A^*_{27} = A^*_{37}$ (4.136)

Bomba de Agua de Condensado $A^*_{28} = A^*_{29} + A^*_{30} - A^*_{27}$ (4.137)

Dearedor-1 $A^*_{29} + A^*_{31} = A^*_{32}$ (4.138)

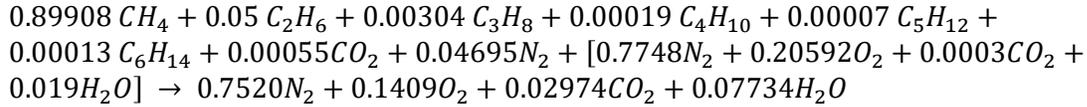
Dearedor-1 $A^*_{30} + A^*_{34} = A^*_{35}$ (4.139)

$$\text{Bomba de Agua de Alimentación-1} \quad A^*_{33} = A^*_{10} - A^*_{32} \quad (4.140)$$

$$\text{Bomba de Agua de Alimentación-2} \quad A^*_{36} = A^*_{20} - A^*_{35} \quad (4.141)$$

4.2.6 ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL DEL CASO DE ESTUDIO

Con el análisis estequiométrico de la combustión del gas natural se calcula el CO₂ equivalente. El análisis estequiométrico correspondiente es:



A partir de este resultado se calcula la emisión de CO₂ equivalente [77 y 78]:

$$(CO_2)_e = (CO_2) + 700(SO_2) + 1000(NO_x) \quad (4.142)$$

Y con el poder calorífico inferior del gas natural del apéndice A. se calcula el índice de contaminación:

$$\Pi_g = \frac{(CO_2)_e}{PCI} \quad (4.143)$$

Con la eficiencia energética de la central y el índice de contaminación calculado por la ecuación (4.97). se calcula la eficiencia ecológica para medir el impacto ambiental: [79 y 80]

$$\varepsilon = \left[\frac{0.204 \eta_I}{\eta_I + \Pi_g} \ln(135 - \Pi_g) \right]^{0.5} \quad (4.144)$$

La eficiencia energética y exergética para la central está definida como sigue: [76, 81,82]

$$\eta_I = \frac{(\dot{W}_{TV} + \dot{W}_{TG-1} + \dot{W}_{TG-2}) - (\dot{W}_{CA-1} + \dot{W}_{CA-2} + \dot{W}_{BAC} + \dot{W}_{BAA-1} + \dot{W}_{BAA-2})}{(\dot{m}_6 * PCI) + (\dot{m}_{16} * PCI)} \quad (4.145)$$

$$\eta_{II} = \frac{(\dot{W}_{TV} + \dot{W}_{TG-1} + \dot{W}_{TG-2}) - (\dot{W}_{CA-1} + \dot{W}_{CA-2} + \dot{W}_{BAC} + \dot{W}_{BAA-1} + \dot{W}_{BAA-2})}{(\dot{m}_6 * PCI * 1.06) + (\dot{m}_{16} * PCI * 1.06)} \quad (4.146)$$

4.3 OPTIMIZACIÓN DE LA CENTRAL DE CICLO COMBINADO

4.3.1 BALANCE DE COSTOS EXERGOECONÓMICOS

En el análisis exergoeconómico a los equipos de la CCCT, se sigue el mismo procedimiento de las reglas de asignación de los recursos y productos del análisis termoeconómico. Las ecuaciones de balance exergoeconómico que se obtienen para cada equipo de la CCCT, se indican en las siguientes ecuaciones:

- Compresor de aire-1 $\dot{C}_7 + \dot{Z}_{CA-1} = \dot{C}_2 - \dot{C}_1 \quad (4.147)$

- Compresor de aire-2 $\dot{C}_{17} + \dot{Z}_{CA-2} = \dot{C}_{12} - \dot{C}_{11} \quad (4.148)$

- Cámara de combustión-1 $\dot{C}_6 + \dot{C}_2 + \dot{Z}_{CC-1} = \dot{C}_3 \quad (4.149)$

- Cámara de combustión-2 $\dot{C}_{16} + \dot{C}_{12} + \dot{Z}_{CC-2} = \dot{C}_{13} \quad (4.150)$

- Turbina de gas-1 $\dot{C}_3 - \dot{C}_4 + \dot{Z}_{TG-1} = \dot{C}_7 + \dot{C}_8$ (4.151)
- Turbina de gas-2 $\dot{C}_{13} - \dot{C}_{14} + \dot{Z}_{TG-2} = \dot{C}_{17} + \dot{C}_{18}$ (4.152)
- Recuperador de calor-1 $\dot{C}_4 - \dot{C}_5 + \dot{Z}_{RC-1} = \dot{C}_9 - \dot{C}_{10}$ (4.153)
- Recuperador de calor-2 $\dot{C}_{14} - \dot{C}_{15} + \dot{Z}_{RC-2} = \dot{C}_{19} - \dot{C}_{20}$ (4.154)
- Turbina de vapor $\dot{C}_{21} - \dot{C}_{22} - \dot{C}_{24} + \dot{Z}_{TV} = \dot{C}_{23}$ (4.155)
- Condensador $\dot{C}_{24} - \dot{C}_{27} + \dot{Z}_C = \dot{C}_{26} - \dot{C}_{25}$ (4.156)
- Bomba de Agua de Condensado $\dot{C}_{28} + \dot{Z}_{BAC} = \dot{C}_{29} + \dot{C}_{30} - \dot{C}_{27}$ (4.157)
- Deaerador-1 $\dot{C}_{29} + \dot{C}_{31} + \dot{Z}_{D-1} = \dot{C}_{32}$ (4.158)
- Deaerador-2 $\dot{C}_{30} + \dot{C}_{34} + \dot{Z}_{D-2} = \dot{C}_{35}$ (4.159)
- Bomba de Agua de Alimentación-1 $\dot{C}_{33} + \dot{Z}_{BAA-1} = \dot{C}_{10} - \dot{C}_{32}$ (4.160)
- Bomba de Agua de Alimentación-2 $\dot{C}_{36} + \dot{Z}_{BAA-2} = \dot{C}_{20} - \dot{C}_{35}$ (4.161)

En términos del costo exergoeconómico unitario el sistema de ecuaciones anteriores se re-escribe como:

- Compresor de aire-1 $c_7 \dot{W}_{CA-1} + \dot{Z}_{CA-1} = c_2 \dot{A}_2 - c_1 \dot{A}_1$ (4.162)
- Compresor de aire-2 $c_7 \dot{W}_{CA-2} + \dot{Z}_{CA-2} = c_{12} \dot{A}_{12} - c_{11} \dot{A}_{11}$ (4.163)
- Cámara de combustión-1 $c_6 \dot{A}_6 + c_2 \dot{A}_2 + \dot{Z}_{CC-1} = c_3 \dot{A}_3$ (4.164)
- Cámara de combustión-2 $c_{16} \dot{A}_{16} + c_{12} \dot{A}_{12} + \dot{Z}_{CC-2} = c_{13} \dot{A}_{13}$ (4.165)
- Turbina de gas-1 $c_3 \dot{A}_3 - c_4 \dot{A}_4 + \dot{Z}_{TG-1} = c_8 \dot{W}_{TG}$ (4.166)
- Turbina de gas-2 $c_{13} \dot{A}_{13} - c_{14} \dot{A}_{14} + \dot{Z}_{TG-2} = c_{18} \dot{W}_{TG}$ (4.167)
- Recuperador de calor-1 $c_4 \dot{A}_4 - c_5 \dot{A}_5 + \dot{Z}_{RC-1} = c_9 \dot{A}_9 - c_{10} \dot{A}_{10}$ (4.168)
- Recuperador de calor-2 $c_{14} \dot{A}_{14} - c_{15} \dot{A}_{15} + \dot{Z}_{RC-2} = c_{19} \dot{A}_{19} - c_{20} \dot{A}_{20}$ (4.169)
- Turbina de vapor $c_{21} \dot{A}_{21} - c_{22} \dot{A}_{22} - c_{24} \dot{A}_{24} + \dot{Z}_{TV} = c_{23} \dot{W}_{TV}$ (4.170)
- Condensador $c_{23} \dot{A}_{24} - c_{27} \dot{A}_{27} + \dot{Z}_C = c_{26} \dot{A}_{26} - c_{25} \dot{A}_{25}$ (4.171)
- Bomba de Agua de Condensado $c_{28} \dot{W}_{28} + \dot{Z}_{BAC} = c_{29} \dot{A}_{29} + c_{30} \dot{A}_{30} - c_{27} \dot{A}_{27}$ (4.172)
- Deaerador-1 $c_{29} \dot{A}_{29} + c_{31} \dot{A}_{31} + \dot{Z}_{D-1} = c_{32} \dot{A}_{32}$ (4.173)
- Deaerador-2 $c_{30} \dot{A}_{30} + c_{34} \dot{A}_{34} + \dot{Z}_{D-2} = c_{35} \dot{A}_{35}$ (4.174)
- Bomba de Agua de Alimentación-1 $c_{33} \dot{W}_{33} + \dot{Z}_{BAA-1} = c_{10} \dot{A}_{10} - c_{32} \dot{A}_{32}$ (4.175)
- Bomba de Agua de Alimentación-2 $c_{36} \dot{W}_{36} + \dot{Z}_{BAA-2} = c_{20} \dot{A}_{20} - c_{35} \dot{A}_{35}$ (4.176)

En las ecuaciones anteriores, el costo exergoeconómico de las corrientes de entrada 1, 11 y 25 son iguales a cero, por lo que:

$$c_1 = 0, c_{11} = 0, c_{25} = 0$$

Los costos exergoeconómicos unitarios c_6 y c_{16} , que representan el costo del combustible, que para el caso de estudio es de 4.153 \$/GJ [83].

El costo exergoeconómico unitario de los productos de un equipo son iguales:

$$c_3 = c_4 = c_5$$

$$c_7 = c_8$$

$$c_{13} = c_{14} = c_{15}$$

$$c_{17} = c_{18}$$

$$c_{21} = c_{22} = c_{24} = c_{27} = c_{31} = c_{34}$$

$$c_{23} = c_{28} = c_{33} = c_{36}$$

$$c_{29} = c_{30}$$

Con las consideraciones anteriores se puede resolver el sistema de ecuaciones.

El cálculo del costo asociado con el capital de inversión y mantenimiento para un componente (\dot{Z}_k) se muestra en el apéndice C y es calculado con la ecuación siguiente: [66,85]:

$$\dot{Z}_k = Z_k * CRF * \varphi / (N * 3600) \quad (4.177)$$

En la ecuación (4.177) donde N es el número de horas de operación de la central y $\varphi = 1.06$ el factor de mantenimiento [66, 84], Z_k es el costo de compra del k-esimo equipo en dólares, [75], la expresión para cada equipo de la CCCT y el modelo económico es presentado en el Apéndice C, el factor de recuperación de capital (CRF) depende de la tasa de interés, así como la vida útil estimada del equipo, por lo que CRF se determina mediante la expresión siguiente [86,87]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4.178)$$

donde i es la tasa de interés y n el periodo total de operación del sistema en un año-

4.3.2 COSTO PROMEDIO POR UNIDAD EXERGÍA DE LOS PRODUCTOS Y LOS RECURSOS

Con el cálculo del costo exergético y los flujos de exergías se calculan los costos promedio por unidad de exergía del producto y el costo promedio por unidad de exergía del recurso para cada equipo de la CCCT, como se muestra a continuación:

Compresor de aire-1 (CA-1):
$$c_{P,CA-1} = \frac{\dot{C}_2}{\dot{A}_2} \quad (4.179)$$

Compresor de aire-2 (CA-2):
$$c_{P,CA-2} = \frac{\dot{C}_{12}}{\dot{A}_{12}} \quad (4.180)$$

Cámara de combustión-1 (CC-1):
$$c_{P,CC-1} = \frac{\dot{C}_3}{\dot{A}_3} \quad (4.181)$$

Cámara de combustión-2 (CC-2):
$$c_{P,CC-2} = \frac{\dot{C}_{13}}{\dot{A}_{13}} \quad (4.182)$$

Turbina de gas-1 (TG-1):
$$c_{P,TG-1} = \frac{\dot{C}_8}{\dot{W}_{TG}} \quad (4.183)$$

Turbina de gas-2 (TG-2):
$$c_{P,TG-2} = \frac{\dot{C}_{18}}{\dot{W}_{18}} \quad (4.184)$$

Recuperador de calor-1 (RC-1):
$$c_{P,RC-1} = \frac{\dot{C}_9 - \dot{C}_{10}}{\dot{A}_9 - \dot{A}_{10}} \quad (4.185)$$

Recuperador de calor-2 (RC-2):
$$c_{P,RC-2} = \frac{\dot{C}_{19} - \dot{C}_{20}}{\dot{A}_{19} - \dot{A}_{20}} \quad (4.186)$$

Turbina de vapor (TV):
$$c_{P,TV} = \frac{\dot{C}_{23}}{\dot{W}_{TV}} \quad (4.187)$$

Condensador (C):
$$c_{P,C} = \frac{\dot{C}_{26} - \dot{C}_{25}}{\dot{A}_{26} - \dot{A}_{25}} \quad (4.188)$$

Bomba de Agua de Condensado (BAC):
$$c_{P,BAC} = \frac{(\dot{C}_{29} + \dot{C}_{30} - \dot{C}_{27})}{(\dot{A}_{29} + \dot{A}_{30} - \dot{A}_{27})} \quad (4.189)$$

Dearedor-1 (D-1):
$$c_{P,D-1} = \frac{\dot{C}_{32}}{\dot{A}_{32}} \quad (4.190)$$

Dearedor-2 (D-2):
$$c_{P,D-1} = \frac{\dot{C}_{35}}{\dot{A}_{35}} \quad (4.191)$$

Bomba de Agua de Alimentación-1 (BAA):
$$c_{P,BAA-1} = \frac{(\dot{C}_{10} - \dot{C}_{32})}{(\dot{A}_{10} - \dot{A}_{32})} = \quad (4.192)$$

Bomba de Agua de Alimentación-2 (BAA-2):
$$c_{P,BAA-1} = \frac{(\dot{C}_{20} - \dot{C}_{35})}{(\dot{A}_{20} - \dot{A}_{35})} \quad (4.193)$$

Compresor de aire-1 (CA-1):
$$c_{R,CA-1} = \frac{\dot{C}_1 + \dot{C}_7}{\dot{A}_1 + \dot{W}_{CA-1}} \quad (4.194)$$

Compresor de aire-2 (CA-2):
$$c_{R,CA-1} = \frac{\dot{C}_{11} + \dot{C}_{17}}{\dot{A}_{11} + \dot{W}_{CA-2}} \quad (4.195)$$

Cámara de combustión-1 (CC-1):
$$c_{R,CC-1} = \frac{\dot{C}_2 + \dot{C}_6}{\dot{A}_2 + \dot{A}_6} \quad (4.196)$$

Cámara de combustión-2 (CC-2):
$$c_{R,CC-1} = \frac{\dot{C}_{12} + \dot{C}_{16}}{\dot{A}_{12} + \dot{A}_{16}} \quad (4.197)$$

Turbina de gas-1 (TG-1):
$$c_{R,TG-1} = \frac{\dot{C}_3 - \dot{C}_4}{\dot{A}_3 - \dot{A}_4} \quad (4.198)$$

Turbina de gas-2 (TG-2):
$$c_{R,TG-2} = \frac{\dot{C}_{13} - \dot{C}_{14}}{\dot{A}_{13} - \dot{A}_{14}} \quad (4.199)$$

Recuperador de calor-1 (RC-1):
$$c_{R,RC-1} = \frac{(\dot{C}_4 - \dot{C}_5)}{(\dot{A}_4 - \dot{A}_5)} \quad (4.200)$$

Recuperador de calor-2 (RC-2):
$$c_{R,RC-1} = \frac{(\dot{C}_{14} - \dot{C}_{15})}{(\dot{A}_{14} - \dot{A}_{15})} \quad (4.201)$$

Turbina de vapor (TV):
$$c_{R,TV} = \frac{(\dot{C}_{21} - \dot{C}_{22} - \dot{C}_{24})}{(\dot{A}_{21} - \dot{A}_{22} - \dot{A}_{24})} \quad (4.202)$$

Condensador (C):
$$c_{R,C} = \frac{(\dot{C}_{24} - \dot{C}_{27})}{(\dot{A}_{24} - \dot{A}_{27})} \quad (4.203)$$

Bomba de Agua de Condensado (BAC):
$$c_{R,BAC} = \frac{\dot{C}_{28}}{\dot{W}_{BAC}} \quad (4.204)$$

Dearedor-1 (D-1):
$$c_{R,D-1} = \frac{(\dot{C}_{29} + \dot{C}_{31})}{(\dot{A}_{29} + \dot{A}_{31})} \quad (4.205)$$

Dearedor-2 (D-2):
$$c_{R,D-2} = \frac{(\dot{C}_{30} + \dot{C}_{34})}{(\dot{A}_{30} + \dot{A}_{34})} \quad (4.206)$$

$$\text{Bomba de Agua de Alimentación-1 (BAA):} \quad c_{R,BAA-1} = \frac{\dot{C}_{33}}{\dot{W}_{BAA-1}} \quad (4.207)$$

$$\text{Bomba de Agua de Alimentación-2 (BAA-2):} \quad c_{R,BAA-2} = \frac{\dot{C}_{36}}{\dot{W}_{BAA-2}} \quad (4.208)$$

4.3.3 COSTO EXERGEOECONÓMICO DE LA DESTRUCCIÓN DE EXERGÍA

Con el cálculo de los costos promedio de los recursos y el flujo de exergía destruida se calculan los costos exergoeconómico de la destrucción de exergía para cada equipo de la CCCT, como se muestra continuación:

$$\text{Compresor de aire-1 (CA-1):} \quad \dot{C}_{D,CA-1} = c_{R,CA-1} * \dot{A}_{D,CA-1} \quad (4.209)$$

$$\text{Compresor de aire-2 (CA-2):} \quad \dot{C}_{D,CA-2} = c_{R,CA-2} * \dot{A}_{D,CA} \quad (4.210)$$

$$\text{Cámara de combustión-1 (CC-1):} \quad \dot{C}_{D,CC-1} = c_{R,CC-1} * \dot{A}_{D,CC-1} \quad (4.211)$$

$$\text{Cámara de combustión-2 (CC-2):} \quad \dot{C}_{D,CC-2} = c_{R,CC-2} * \dot{A}_{D,CC-2} \quad (4.212)$$

$$\text{Turbina de gas-1 (TG-1):} \quad \dot{C}_{D,TG-1} = c_{R,TG-1} * \dot{A}_{D,TG-1} \quad (4.213)$$

$$\text{Turbina de gas-2 (TG-2):} \quad \dot{C}_{D,TG-2} = c_{R,TG-2} * \dot{A}_{D,TG-2} \quad (4.214)$$

$$\text{Recuperador de calor-1 (RC-1):} \quad \dot{C}_{D,RC-1} = c_{R,RC-1} * \dot{A}_{D,RC-1} \quad (4.215)$$

$$\text{Recuperador de calor-2 (RC-2):} \quad \dot{C}_{D,RC-2} = c_{R,RC-2} * \dot{A}_{D,RC-2} \quad (4.216)$$

$$\text{Turbina de vapor (TV):} \quad \dot{C}_{D,TV} = c_{R,TV} * \dot{A}_{D,TV} \quad (4.217)$$

$$\text{Condensador (C):} \quad \dot{C}_{D,C} = c_{R,C} * \dot{A}_{D,C} \quad (4.218)$$

$$\text{Bomba de Agua de Condensado (BAC):} \quad \dot{C}_{D,BAC} = c_{R,BAC} * \dot{A}_{D,BAC} \quad (4.219)$$

$$\text{Deaerador-1 (D-1):} \quad \dot{C}_{D,D-1} = c_{R,D-1} * \dot{A}_{D,D-1} \quad (4.220)$$

$$\text{Deaerador-2 (D-2):} \quad \dot{C}_{D,D-2} = c_{R,D-2} * \dot{A}_{D,D-2} \quad (4.221)$$

$$\text{Bomba de Agua de Alimentación-1 (BAA):} \quad \dot{C}_{D,BAA-1} = c_{R,BAA-1} * \dot{A}_{D,BAA-1} \quad (4.222)$$

$$\text{Bomba de Agua de Alimentación-2 (BAA-2):} \quad \dot{C}_{D,BAA-2} = c_{R,BAA-2} * \dot{A}_{D,BAA-2} \quad (4.223)$$

4.3.4 CÁLCULO FACTORES EXERGEOECONÓMICOS

Con el cálculo de los costos de inversión y mantenimiento y el costo de la destrucción de exergía se calculan el factor exergoeconómico para cada equipo de la CCCT, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Compresor de aire-1 (CA-1):} \quad f_{CA-1} = \frac{\dot{Z}_{CA-1}}{\dot{Z}_{CA-1} + \dot{C}_{D,CA-1}} \quad (4.224)$$

$$\text{Compresor de aire-2 (CA-2):} \quad f_{CA-2} = \frac{\dot{Z}_{CA-2}}{\dot{Z}_{CA-2} + \dot{C}_{D,CA-2}} \quad (4.225)$$

$$\text{Cámara de combustión-1 (CC-1):} \quad f_{CC-1} = \frac{\dot{Z}_{CC-1}}{\dot{Z}_{CC-1} + \dot{C}_{D,CC-1}} \quad (4.226)$$

$$\text{Cámara de combustión-2 (CC-2):} \quad f_{CC-2} = \frac{\dot{Z}_{CC-2}}{\dot{Z}_{CC-2} + \dot{C}_{D,CC-2}} \quad (4.227)$$

$$\text{Turbina de gas-1 (TG-1):} \quad f_{TG-1} = \frac{\dot{Z}_{TG-1}}{\dot{Z}_{TG-1} + \dot{C}_{D,TG-1}} \quad (4.228)$$

$$\text{Turbina de gas-2 (TG-2):} \quad f_{TG-2} = \frac{\dot{Z}_{TG-2}}{\dot{Z}_{TG-2} + \dot{C}_{D,TG-2}} \quad (4.229)$$

$$\text{Recuperador de calor-1 (RC-1):} \quad f_{RC-1} = \frac{\dot{Z}_{RC-1}}{\dot{Z}_{RC-1} + \dot{C}_{D,RC-1}} \quad (4.230)$$

$$\text{Recuperador de calor-2 (RC-2):} \quad f_{RC-2} = \frac{\dot{Z}_{RC-2}}{\dot{Z}_{RC-2} + \dot{C}_{D,RC-2}} \quad (4.231)$$

$$\text{Turbina de vapor (TV):} \quad f_{TV} = \frac{\dot{Z}_{TV}}{\dot{Z}_{TV} + \dot{C}_{D,TV}} \quad (4.232)$$

$$\text{Condensador (C):} \quad f_C = \frac{\dot{Z}_C}{\dot{Z}_C + \dot{C}_{D,C}} \quad (4.233)$$

$$\text{Bomba de Agua de Condensado (BAC):} \quad f_{BAC} = \frac{\dot{Z}_{BAC}}{\dot{Z}_{BAC} + \dot{C}_{D,BAC}} \quad (4.234)$$

$$\text{Deaerador-1 (D-1):} \quad f_{D-1} = \frac{\dot{Z}_{D-1}}{\dot{Z}_{D-1} + \dot{C}_{D,D-1}} \quad (4.235)$$

$$\text{Deaerador-2 (D-2):} \quad f_{D-2} = \frac{\dot{Z}_{D-2}}{\dot{Z}_{D-2} + \dot{C}_{D,D-2}} \quad (4.236)$$

$$\text{Bomba de Agua de Alimentación-1 (BAA):} \quad f_{BAA-1} = \frac{\dot{Z}_{BAA-1}}{\dot{Z}_{BAA-1} + \dot{C}_{D,BAA-1}} \quad (4.237)$$

$$\text{Bomba de Agua de Alimentación-2 (BAA-2):} \quad f_{CA-1} = \frac{\dot{Z}_{BAA-2}}{\dot{Z}_{BAA-2} + \dot{C}_{D,BAA-2}} \quad (4.238)$$

4.3.5 CÁLCULO DEL COSTO RELATIVO

Con el cálculo de los costos promedio de los productos y los recursos de cada equipo se obtienen la diferencia de costo relativo para cada equipo:

$$\text{Compresor de aire-1 (CA-1):} \quad r_{CA-1} = \frac{c_{P,CA-1} - c_{R,CA-1}}{c_{R,CA-1}} \quad (4.239)$$

$$\text{Compresor de aire-2 (CA-2):} \quad r_{CA-2} = \frac{c_{P,CA-2} - c_{R,CA-2}}{c_{R,CA-2}} \quad (4.240)$$

$$\text{Cámara de combustión-1 (CC-1):} \quad r_{CC-1} = \frac{c_{P,CC-1} - c_{R,CC-1}}{c_{R,CC-1}} \quad (4.241)$$

$$\text{Cámara de combustión-2 (CC-2):} \quad r_{CC-2} = \frac{c_{P,CC-2} - c_{R,CC-2}}{c_{R,CC-2}} \quad (4.242)$$

$$\text{Turbina de gas-1 (TG-1):} \quad r_{TG-1} = \frac{c_{P,TG-1} - c_{R,TG-1}}{c_{R,TG-1}} \quad (4.243)$$

$$\text{Turbina de gas-2 (TG-2):} \quad r_{TG-2} = \frac{c_{P,TG-2} - c_{R,TG-2}}{c_{R,TG-2}} \quad (4.244)$$

$$\text{Recuperador de calor-1 (RC-1):} \quad r_{RC-1} = \frac{c_{P,RC-1} - c_{R,RC-1}}{c_{R,RC-1}} \quad (4.245)$$

$$\text{Recuperador de calor-2 (RC-2):} \quad r_{RC-2} = \frac{c_{P,RC-2} - c_{R,RC-2}}{c_{R,RC-2}} \quad (4.246)$$

$$\text{Turbina de vapor (TV):} \quad r_{TV} = \frac{c_{P,TV} - c_{R,TV}}{c_{R,TV}} \quad (4.247)$$

$$\text{Condensador (C):} \quad r_C = \frac{c_{P,C} - c_{R,C}}{c_{R,C}} \quad (4.248)$$

$$\text{Bomba de Agua de Condensado (BAC):} \quad r_{BAC} = \frac{c_{P,BAC} - c_{R,BAC}}{c_{R,BAC}} \quad (4.249)$$

$$\text{Deaerador-1 (D-1):} \quad r_{D-1} = \frac{c_{P,D-1} - c_{R,D-1}}{c_{R,D-1}} \quad (4.250)$$

$$\text{Deaerador-2 (D-2):} \quad r_{CA-2} = \frac{c_{P,D-2} - c_{R,D-2}}{c_{R,D-2}} \quad (4.251)$$

$$\text{Bomba de Agua de Alimentación-1 (BAA):} \quad r_{CC-1} = \frac{c_{P,BAA-1} - c_{R,BAA-1}}{c_{R,BAA-1}} \quad (4.252)$$

$$\text{Bomba de Agua de Alimentación-2 (BAA-2):} \quad r_{CC-2} = \frac{c_{P,BAA-2} - c_{R,BAA-2}}{c_{R,BAA-2}} \quad (4.253)$$

4.3.6 OPTIMIZACIÓN EXERGEOECONÓMICA

El proceso de optimización de la central se realizó utilizando el software comercial MATLAB, aplicando algoritmos genéticos y considerando como función objetivo \dot{C}_T . y las variables de decisión para la optimización del caso de estudio son: la relación de presión del compresor ($r_C \leq 14$), la eficiencia del compresor ($\eta_{CA} \leq 0.8361$), eficiencia de la turbina de gas ($\eta_{TG} \leq 0.8778$), temperatura de entrada a la turbina de gas ($T_{e,TG} \leq 1093 \text{ }^\circ\text{C}$), la temperatura de entrada del vapor a la turbina de vapor ($T_{e,TVC} \leq 507.8 \text{ }^\circ\text{C}$), la eficiencia de la turbina de vapor ($\eta_{TV} \leq 0.8317$) y la

eficiencia de las bombas de agua de alimentación ($\eta_{BAA} \leq 0.8394$) y de agua de condensado ($\eta_{CA} \leq 0.8619$), estableciendo estos parámetros se procede a minimizar la función objetivo [60].

$$\begin{aligned} \dot{C}_T = c_6 * \dot{m}_6 * PCI + c_{16} * \dot{m}_{16} * PCI + \dot{Z}_{CA-1} + \dot{Z}_{CA-2} + \dot{Z}_{CC-1} + \dot{Z}_{CC-2} + \dot{Z}_{TG-1} \\ + \dot{Z}_{TG-2} + \dot{Z}_{RC-1} + \dot{Z}_{RC-2} + \dot{Z}_{TV} + \dot{Z}_C + \dot{Z}_{BAC} + \dot{Z}_{D-1} + \dot{Z}_{D-2} \\ + \dot{Z}_{BAA-1} + \dot{Z}_{BAA-2} \end{aligned} \quad (4.254)$$

Utilizando la ecuación (4.177), considerando que $\dot{C}_6 = c_6 * \dot{m}_6 * PCI$ y $\dot{C}_{16} = c_{16} * \dot{m}_{16} * PCI$ se tiene :la ecuación (4.254) se re-escibe como:

$$\begin{aligned} \dot{C}_T = \dot{C}_6 + \dot{C}_{16} + \frac{Z_{CA-1} * CRF * \varphi}{(N * 3600)} + \frac{Z_{CA-2} * CRF * \varphi}{(N * 3600)} + \frac{Z_{CC-1} * CRF * \varphi}{(N * 3600)} \\ + \frac{Z_{CC-2} * CRF * \varphi}{(N * 3600)} + \frac{Z_{TG-1} * CRF * \varphi}{(N * 3600)} + \frac{Z_{TG-2} * CRF * \varphi}{(N * 3600)} \\ + \frac{Z_{RC-1} * CRF * \varphi}{(N * 3600)} + \frac{Z_{RC-2} * CRF * \varphi}{(N * 3600)} + \frac{Z_{TV} * CRF * \varphi}{(N * 3600)} \\ + \frac{Z_C * CRF * \varphi}{(N * 3600)} + \frac{Z_{BAC} * CRF * \varphi}{(N * 3600)} + \frac{Z_{D-1} * CRF * \varphi}{(N * 3600)} \\ + \frac{Z_{D-2} * CRF * \varphi}{(N * 3600)} + \frac{Z_{BAA-1} * CRF * \varphi}{(N * 3600)} + \frac{Z_{BAA-2} * CRF * \varphi}{(N * 3600)} \end{aligned} \quad (4.255)$$

Donde Z_{CA-1} , Z_{CA-2} , Z_{CC-1} , Z_{CC-2} , Z_{TG-1} , Z_{TG-2} , Z_{RC-1} , Z_{RC-2} , Z_{TV} , Z_C , Z_{BAC} , Z_{D-1} , Z_{D-2} , Z_{BAA-1} , Z_{BAA-2} , se obtienen a partir del modelo económico del apéndice C.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el desarrollo de esta tesis se tomó como referencia un caso real de una central de ciclo combinado que se describió en el capítulo IV, la cual utiliza como combustible gas natural. Para el análisis del ciclo se utilizaron datos de diseño al 100% de carga, los cuales fueron tomados de los manuales del fabricante y datos de operación. Estos se obtuvieron de los instrumentos instalados en la central y de reportes de inspección de la misma.

En la primera parte de este capítulo se presentan los resultados del análisis termoecológico a las condiciones de diseño y operación para el ciclo de potencia. Todos los resultados son a 100% de carga.

En la segunda parte del capítulo se muestran los resultados de la optimización que incluye el costo exergoeconómico unitario, costo exergoeconómico, el costo de inversión de los equipos, el costo promedio por unidad de exergía del producto y el recurso, el costo de la destrucción de exergía, el factor exergoeconómico, la diferencia de costo relativo.

Las variables de decisión para la optimización del caso de estudio son: la relación de presión del compresor, la eficiencia del compresor, las eficiencias de la turbina de gas y de vapor, la temperatura de entrada a la turbina de gas, la temperatura de entrada a la turbina de vapor y las eficiencias de las bombas de agua de alimentación y de agua de condensado.

5.1 ANÁLISIS TERMOECOLÓGICO

Se presentan los resultados del análisis termoecológico de la planta a sus condiciones de diseño y operación. Los datos utilizados para este estudio se muestran la en el apéndice B.

En el apéndice D se muestra el código desarrollado en el software comercial Engineering Equation Solver (EES) para el cálculo termoecológico, de acuerdo a la metodología descrita en el capítulo IV.

El modelo termoecológico desarrollado en el software comercial EES, se realizó tomando las siguientes consideraciones [55,85]

- El sistema opera de acuerdo al modelo de estado estacionario.
- Los cambios en la energía cinética y potencial se consideran despreciables.
- El principio de gas ideal se aplica para el aire y los gases de combustión.
- El análisis molar del aire a la entrada del compresor es: 77.48% N₂, 20.59 % O₂, 0.03 CO₂, y 1.9% de H₂O.
- Se asume como una combustión completa para el gas natural en la cámara de combustión.
- Se considera una caída de presión en la cámara de combustión del 5% [55].

Los puntos de referencia (del 1 al 37), se indicaron en la figura 4.2, en donde los puntos del 1 al 20 representan el ciclo de gas y el del 21 al 37 representan el ciclo de vapor.

5.1.1 ANÁLISIS TERMOECOLÓGICO A CONDICIONES DE DISEÑO

Con los datos de la Tabla B1 del Apéndice B, y aplicando el modelo termoecológico desarrollado en el capítulo IV, se calculan los flujos de entalpías, entropías y exergías específica para cada línea de

corriente de los equipos de la central analizada. Con los datos de la Tabla B3, se calculan la generación de entropía, los flujos de exergía de cada corriente y los flujos de exergía de los recursos y de los productos para cada componente de la central.

En la figura 5.1 se muestra la generación de entropía en los diferentes equipos, de la central a sus condiciones de diseño.

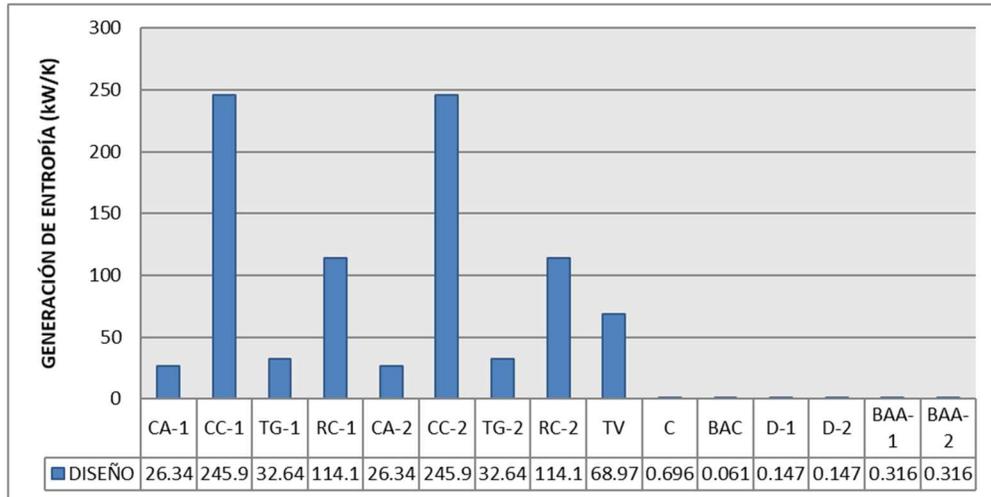


FIGURA 5.1 Generación de entropía de los equipos del ciclo combinado a sus condiciones de diseño al 100% de carga.

En la figura 5.1 se observa que las cámaras de combustión los equipos que presentan la mayor generación de entropía (245.9 kW/K) y de forma descendente los siguientes equipos son los recuperadores de calor.

En la tabla 5.1 se presentan los valores obtenidos de los flujos de exergía de las corrientes a condiciones de diseño.

TABLA 5.1 Flujos de exergía a condiciones de diseño

Corriente	Ā(MW)	Corriente	Ā(MW)
1	0	19	77.4
2	100.5	20	3.0
3	347.8	21	15.5
4	166	22	8.0
5	78.2	23	109.3
6	252	24	17.5
7	101	25	5.4
8	177.8	26	17.3
9	77.4	27	0.45
10	3.086	28	0.14
11	0	29	0.29
12	100.5	30	0.29
13	347.8	31	4.0
14	166.0	32	2.6
15	78.2	33	0.57
16	252	34	4.0
17	101.4	35	2.6
18	177.8	36	0.57

En la tabla 5.1 se observa que son las corrientes número 3 y 13 las que presenta el mayor flujo de exergía con 347849 kW; dicha corriente corresponde a los gases de combustión que ingresan a las turbinas de gas.

En la tabla 5.2 se muestran los flujos de exergía de los recursos y de los productos para los equipos que forman la central en estudio, los cuales se definieron a través del análisis termoeconómico desarrollado en el capítulo IV.

TABLA 5.2 Exergía del recurso y el producto a condiciones de diseño.

Componente	Recurso (MW)	Producto (MW)
Compresor de aire-1	101.4	100.5
Cámara de Combustión-1	352.9	347.8
Turbina de Gas-1	181.8	177.8
Recuperador de Calor-1	87.8	74.3
Compresor de aire-2	101.4	100.5
Cámara de Combustión-2	352.9	347.8
Turbina de Gas-2	181.8	177.8
Recuperador de Calor-2	87.8	74.3
Turbina de Vapor	129.9	109.3
Condensador	17.0	11.8
Bomba de agua de Condensado	0.14	0.12
Deareador-1	4.3	2.6
Deareador-2	4.3	2.6
Bomba de agua de alimentación-1	0.57	0.48
Bomba de agua de alimentación-2	0.57	0.48

En la tabla 5.3 se muestra la exergía destruida para cada equipo del ciclo analizado, en la tabla 5.2 se observa que las corrientes que presentan los mayores flujos de exergía para el recurso y el producto son las correspondientes a la cámara de combustión.

TABLA 5.3 Exergía destruida a condiciones de diseño.

Componente	Exergía Destruída (MW)
Compresor de aire-1	0.84
Cámara de Combustión-1	5.1
Turbina de Gas-1	4.04
Recuperador de Calor-1	13.5
Compresor de aire-2	0.84
Cámara de Combustión-2	5062
Turbina de Gas-2	4.04
Recuperador de Calor-2	13.5
Turbina de Vapor	19.9
Condensador	22.2
Bomba de agua de Condensado	0.017
Deareador-1	1.7
Deareador-2	1.7
Bomba de agua de alimentación-1	0.091
Bomba de agua de alimentación-2	0.091

En la tabla 5.3 se observa que es en el condensador donde se presenta la mayor destrucción de exergía, ya que es en este equipo en el que se envía la exergía no aprovechada al medio ambiente por medio del agua de enfriamiento.

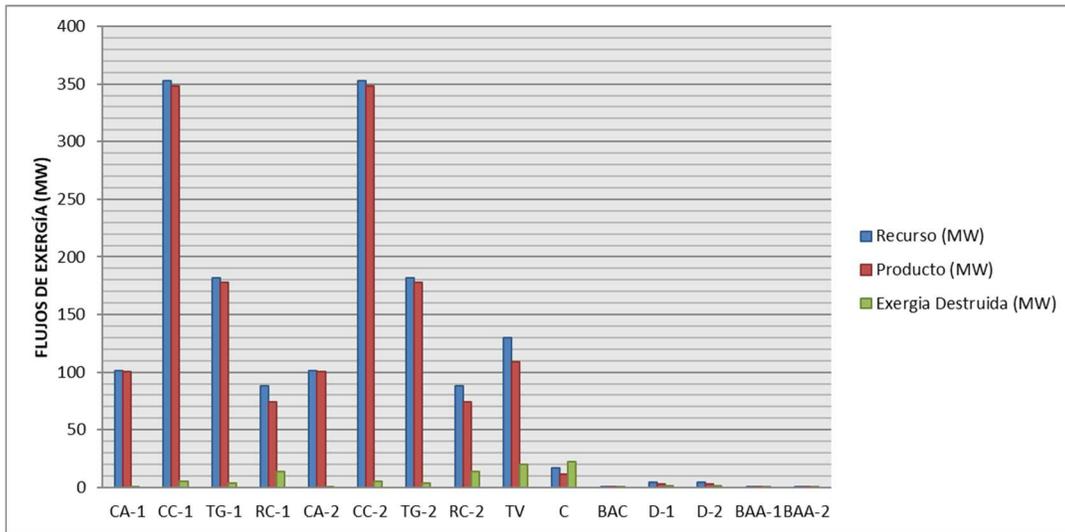


FIGURA 5.2 Distribución de los flujos de exergía de los equipos del ciclo combinado a sus condiciones de diseño al 100% de carga.

En la figura 5.2 se presentan la distribución de las exergías de los recursos, los productos y exergía destruida para cada uno de los equipos a las condiciones de diseño. Donde se muestra que los flujos mayores de exergía para el producto y el recurso corresponde a los flujos de entrada y salida de la cámara de combustión y la mayor destrucción de exergía ocurre en el condensador.

La eficiencia exergética de los equipos se muestra en la figura 5.3, donde se observa que los equipos que presentan la mayor eficiencia exergética son los compresores de aire y los deaeradores son los equipos que presenta la menor eficiencia exergética.

Con la ayuda del análisis de impacto ambiental desarrollado en el capítulo IV, se determina la eficiencias ecológica, energética y exergética, así como el dióxido de carbono equivalente (CO₂)_e y el indicador de contaminación para las condiciones de operación.

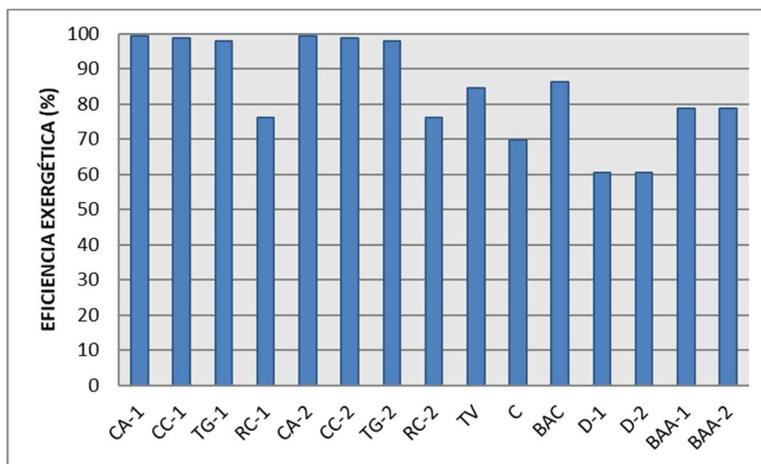


FIGURA 5.3 Eficiencia exergética de los equipos del ciclo combinado a sus condiciones de diseño al 100% de carga.

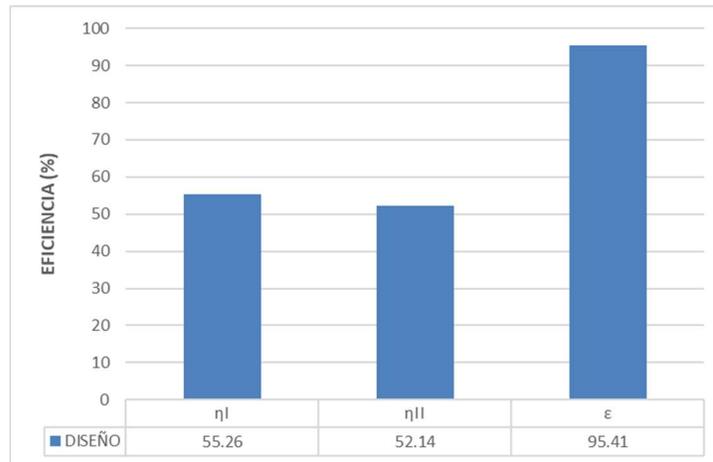


FIGURA 5.4 Eficiencia energética, exergética y ecológica de la central analiza a condiciones de diseño.

En la figura 5.4 se muestran la eficiencia energética, exergética y ecológica de la central analizada a condiciones de diseño, donde se observa que la eficiencia energética es mayor respecto a la eficiencia exergética. Esta diferencia se debe a que la exergía química del combustible es mayor respecto al poder calorífico inferior del combustible; de la misma forma se observa que la central tiene una eficiencia ecológica de 95.41 %, esta eficiencia representa que la central emite muy poco CO₂ equivalente al medio ambiente.

En la tabla 5.4 se muestra el dióxido de carbono equivalente emitido y se observa que se emiten 1.417 kg/kg de combustible y también se muestra el indicador de contaminación el cual tiene un valor de 0.027 kg /MJ, los que indica que la CCCT contamina poco.

TABLA 5.4 Dióxido de carbono equivalente (CO₂)_e e indicador de contaminación para las condiciones de diseño.

(CO ₂) _e (kg/kg _{combustible})	II (kg/MJ)
1.417	0.027

Aplicando el análisis termoeconómico desarrollado en el capítulo IV y con la ayuda del código desarrollado en EES, se obtienen los costos exergéticos unitarios, los cuales se presentan en la tabla 5.5, donde se observa que la corriente que presenta el mayor costo exergético unitario es el agua que sale del deareador. Estos resultados son semejantes a los obtenidos por A. Baghernejad, M. Yaghoubi, K. Jafarpur. [88] y E. J. Cidade Cavalcanti [89], donde en sus respectivos estudios el mayor costo se obtiene en la corriente que sale del deareador.

TABLA 5.5 Costo exerético unitario para las condiciones de diseño.

Corriente	k* (-)	Corriente	k* (-)	Corriente	k* (-)
1	1	14	1.521	27	2.06
2	1.568	15	1.521	28	2.47
3	1.521	16	1	29	1.859
4	1.521	17	1.555	30	1.859
5	1.521	18	1.555	31	2.06
6	1	19	2.06	32	3.396
7	1.555	20	3.318	33	2.47
8	1.555	21	2.06	34	2.06
9	2.06	22	2.06	35	3.396
10	3.318	23	2.47	36	2.47
11	1	24	2.06	37	2.061
12	1.568	25	-		
13	1.521	26	-		

Con los costos exeréticos unitarios y la exería de cada corriente se obtienen los consumos exeréticos de las corrientes para sus condiciones de diseño, los resultados se muestran en la tabla 5.6.

TABLA 5.6 Consumos exeréticos a condiciones de diseño.

Corriente	A* (MW)	Corriente	A* (MW)	Corriente	A* (MW)
1	0	14	252.5	27	0.9317
2	157.7	15	119	28	0.3451
3	529	16	252.4	29	0.5337
4	252.5	17	157.7	30	0.5337
5	119	18	276.5	31	8.32
6	252.4	19	159.4	32	8.86
7	157.7	20	10.24	33	1.401
8	276.5	21	318.8	34	8.32
9	159.4	22	16.64	35	8.86
10	10.24	23	270	36	1.401
11	0	24	35.99	37	35.06
12	157.7	25	-		
13	529	26	-		

En la tabla 5.6, se observa que la corriente con mayor consumo exerético es la corriente de los gases de combustión que entran a la turbina de gas, en orden descendente el siguiente consumo exerético corresponde a la corriente del flujo de combustible.

5.1.2 ANÁLISIS TERMOECOLÓGICO A CONDICIONES DE OPERACIÓN

Con los datos de la Tabla B2 del Apéndice B, se calculan los flujos de entalpías, entropías y exerías específicas para cada línea de corriente de los equipos de la central analizada: Con los datos de la Tabla B4, de la misma forma como se realizó a condiciones de diseño se calculan, la generación de entropía, los flujos exería de cada corriente y los flujos de exería de los recursos y los productos para cada componente de la central.

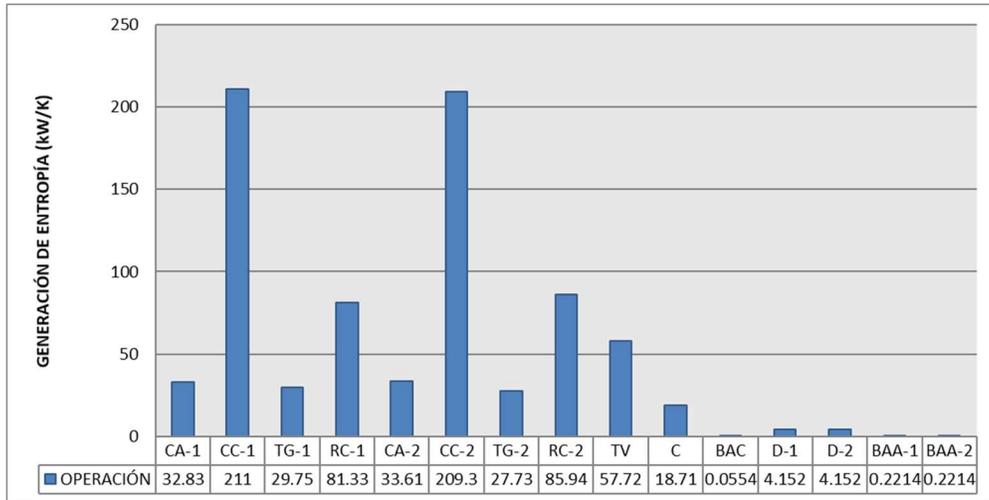


FIGURA 5.5 Generación de entropía de los equipos de la central analizada a condiciones de operación.

La figura 5.5 muestra la generación de entropía de los diferentes equipos, donde se observa que son nuevamente las cámaras de combustión las que presentan la mayor generación de entropía (211 kW/K y 209.3 kW/K), seguido de forma descendente de los recuperadores de calor y el equipo que presentan la menor generación de entropía es la bomba de agua de condensado (0.0554 kW/K) y bomba de agua de alimentación (0.2214 kW/K).

Aplicando el balance exergetico desarrollado en el capítulo IV, se obtienen los flujos de exergía, de la misma forma como se realizó a las condiciones de diseño. En la tabla 5.7 se muestran los valores obtenidos para las condiciones de operación.

TABLA 5.7 Flujos de exergía a condiciones de operación

Corriente	\dot{A} (MW)	Corriente	\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 5.7, muestra que es nuevamente las corrientes de los gases de combustión que entran a las turbinas (3 y 13), las que presentan el mayor flujo de exergía, seguido de las corrientes del combustible (6 y 16), los resultados obtenidos son similares a los obtenidos a las condiciones de diseño. Donde estas mismas corrientes fueron las que presentaron los mayores flujos de exergía.

TABLA 5.8 Exergía del recurso y el producto a condiciones de operación.

Componente	Recurso (MW)	Producto (MW)
Compresor de aire-1	105.8	104.8
Cámara de Combustión-1	343.0	327.8
Turbina de Gas-1	175.0	171.9
Recuperador de Calor-1	99.2	66.7
Compresor de aire-2	104.2	103.2
Cámara de Combustión-2	341.4	325.5
Turbina de Gas-2	173.9	170.7
Recuperador de Calor-2	95.9	66.7
Turbina de Vapor	120.3	103.2
Condensador	11.6	5.9
Bomba de agua de Condensado	0.13	0.12
Deareador-1	4.1	2.8
Deareador-2	4.1	2.83
Bomba de agua de alimentación-1	0.45	0.38
Bomba de agua de alimentación-2	0.45	0.38

Los flujos de exergía de los recursos y los productos de los equipos que forman la central analizada son mostrados en la tabla 5.8, donde las corrientes que presentan los mayores flujos de exergía son las correspondientes a la entrada y salida de la cámara de combustión, estos resultados son similares a los obtenidos a las condiciones de diseño.

Con ayuda de la exergía de los recursos y los productos y aplicando la metodología de análisis exergético desarrollada en el capítulo IV se obtiene la destrucción de exergía. En la tabla 5.9 se muestra la exergía destruida, donde se observa que el equipo que presenta la mayor destrucción de exergía son los recuperadores de calor.

TABLA 5.9 Destrucción de exergía a condiciones de operación.

Componente	Exergía Destruida (MW)
Compresor de aire-1	1.1
Cámara de Combustión-1	15.3
Turbina de Gas-1	3.1
Recuperador de Calor-1	32.5
Compresor de aire-2	1.1
Cámara de Combustión-2	15.9
Turbina de Gas-2	3.2
Recuperador de Calor-2	29.2
Turbina de Vapor	17.0
Condensador	29.0
Bomba de agua de Condensado	0.016
Deareador-1	1.2
Deareador-2	1.2
Bomba de agua de alimentación-1	0.065
Bomba de agua de alimentación-2	0.065

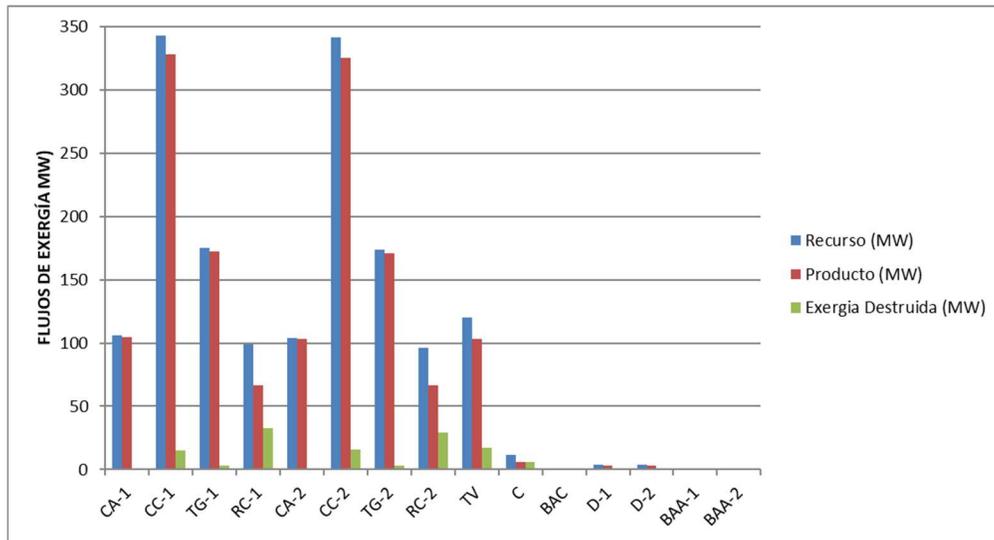


FIGURA 5.6 Distribución de los flujos de exergía de los equipos del ciclo combinado a condiciones de operación.

La figura 5.6 muestra gráficamente los flujos de exergía de los productos, los recursos y la exergía destruida de los equipos de la central analizada, donde se observa que son los flujos de la cámara de combustión los que presentan los valores mayores para el recurso y el producto y la mayor destrucción de exergía ocurre en el recuperador de calor.

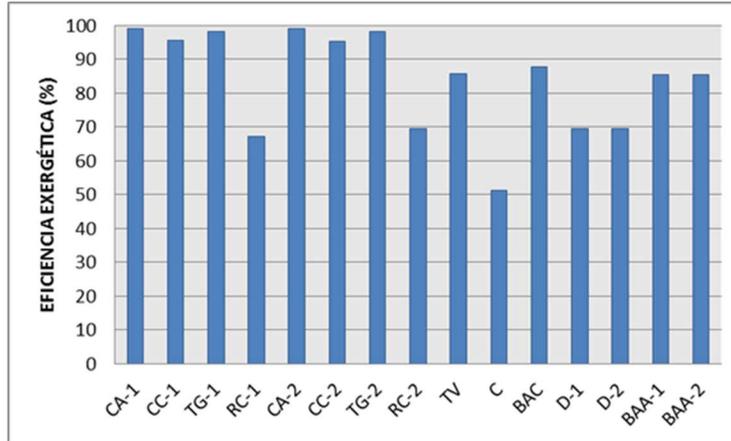


FIGURA 5.7 Eficiencia exergética de los equipos del ciclo combinado a condiciones de operación.

En la figura 5.7 se muestra que son nuevamente los compresores de aire los equipos que presentan la mayor eficiencia exergética, seguidos de las turbinas de gas, estos resultados son similares a los obtenidos a las condiciones de diseño.

La eficiencia energética, exergética y ecológica de la central analizada a sus condiciones de operación se obtienen de la misma forma como se hizo a las condiciones de diseño. Los resultados son mostrados en la figura 5.8, donde se observa que la eficiencia energética, exergética y ecológica tienen el mismo comportamiento que a las condiciones de diseño.

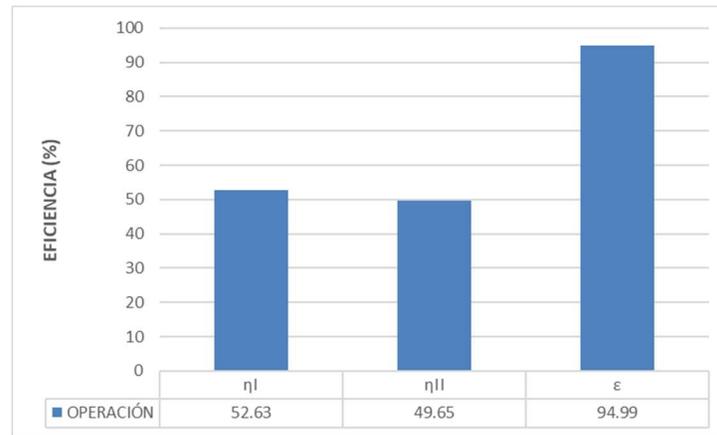


FIGURA 5.8 Eficiencia energética, exergética y ecológica de la central analiza a condiciones de operación.

En la tabla 5.4 se muestra el dióxido de carbono equivalente, donde el combustible utilizado emite 2.632 kg/kg de combustible y también se muestra el indicador de contaminación teniendo un valor de 0.05729 kg /MJ.

TABLA 5.10 Dióxido de carbono equivalente (CO_2)_e e indicador de contaminación para las condiciones de operación.

$(CO_2)_e$ (kg/kg _{combustible})	Π (kg/MJ)
2.632	0.05729

De la misma forma como se realizó a las condiciones de diseño se obtienen los costos exergéticos unitarios, estos se presentan en la tabla 5.11, donde se observa que la corriente que presenta el mayor costo exergético unitario es flujo que abandona el deareador, estos resultados son similares a los obtenidos a las condiciones de diseño, donde esta misma corriente obtuvo el mayor costo exergético unitario.

TABLA 5.11 Costo exergético unitario para las condiciones de operación.

Corriente	k* (-)	Corriente	k* (-)	Corriente	k* (-)
1	1	14	1.456	27	2.341
2	1.472	15	1.456	28	2.754
3	1.431	16	1	29	2.076
4	1.431	17	1.483	30	2.076
5	1.431	18	1.483	31	2.341
6	1	19	2.325	32	3.418
7	1.457	20	3.392	33	2.754
8	1.457	21	2.341	34	2.341
9	2.358	22	2.341	35	3.418
10	3.392	23	2.754	36	2.754
11	1	24	2.341	37	2.342
12	1.499	25	-		
13	1.456	26	-		

De forma similar como se realizó a las condiciones de diseño se obtienen los consumos exergéticos de las corrientes, para sus condiciones de operación. Los resultados se muestran en la tabla 5.12.

TABLA 5.12 Consumos exergeticos para las condiciones de operación.

Corriente	A* (MW)	Corriente	A* (MW)	Corriente	A* (MW)
1	0	14	220.6	27	0.519
2	154.2	15	80.93	28	0.364
3	469	16	238.2	29	0.3504
4	218.5	17	154.6	30	0.3504
5	76.54	18	253.1	31	9.147
6	238.2	19	162.6	32	9.689
7	154.2	20	10.91	33	1.23
8	250.4	21	327.5	34	9.147
9	164.9	22	18.29	35	9.689
10	10.91	23	284.3	36	1.23
11	0	24	27.59	37	27.07
12	154.6	25	-		
13	473.7	26	-		

En la tabla 5.12 se observa que son nuevamente las corrientes de los gases de combustión que entran a las turbinas de gas, las corrientes con los mayores consumos exergeticos, en orden descendente los siguientes consumos exergeticos corresponden a las corrientes del flujo de combustible, estos resultados son similares a los obtenidos a las condiciones de diseño.

5.2 ANÁLISIS DE LA OPTIMIZACIÓN EXERGOECONÓMICA

En esta parte se presentan los resultados del análisis de la optimización exergoeconómica del ciclo combinado a sus condiciones de diseño y operación, estos se obtienen aplicando el modelo de análisis exergoeconómico del capítulo IV y con la ayuda del código desarrollado en EES, aquí se presenta el costo exergoeconómico unitario, costo exergoeconómico, los costos promedio por unidad de exergía de los recursos y los productos, el costo de la destrucción de exergía, el factor exergoeconómico y la diferencia de costo relativo.

5.2.1 ANÁLISIS DE LA OPTIMIZACIÓN EXERGOECONÓMICA A CONDICIONES DE DISEÑO

En el apéndice D se muestra el código desarrollado en el software comercial EES para la optimización exergoeconómica, de acuerdo a la metodología descrita en el capítulo IV y con los flujos de exergía para cada línea de corrientes y el modelo económico desarrollado en el apéndice C, se calculan los costos exergoeconómicos unitarios y los costos exergoeconómicos. Los resultados son mostrados en la tabla 5.13

TABLA 5.13 Costos exergoeconómicos unitarios y costos exergoeconómicos a condiciones de diseño.

Corriente	c (\$/GJ)	\dot{C} (\$/s)	Corriente	c (\$/GJ)	\dot{C} (\$/s)	Corriente	c (\$/GJ)	\dot{C} (\$/s)
1	0	0	13	4.046	1.407	25	0	0
2	4.75	0.4776	14	4.046	0.6718	26	6.214	0.1072
3	4.046	1.407	15	4.046	0.3165	27	6.256	0.002829
4	4.046	0.6718	16	3.94	0.9296	28	7.394	0.001033
5	4.046	0.3165	17	4.339	0.44	29	7.192	0.002065
6	3.94	0.9296	18	4.339	0.7714	30	7.192	0.002065
7	4.339	0.44	19	6.256	0.484	31	6.258	0.02527
8	4.339	0.7714	20	11	0.03394	32	11.4	0.02975
9	6.256	0.484	21	6.256	0.968	33	7.394	0.004194
10	11	0.03394	22	6.256	0.05052	34	6.258	0.02527
11	0	0	23	7.394	0.8082	35	11.4	0.02975
12	4.75	0.4776	24	6.256	0.1093	36	7.394	0.004194

En la tabla 5.13, se observa que el mayor costo exergoeconómico unitario se presenta en la salida del deareador (11.4 \$/GJ) y la corriente que le sigue es la correspondiente a el agua de alimentación que entra al recuperador de calor (11 \$/GJ), estos resultados son similares a los reportados por A. Baghernejad, M. Yaghoubi, K. Jafarpur. [88] y E. J. Cidade Cavalcanti [89], con los costos exergoeconómicos unitarios y flujos de exergía de las diferentes corrientes, se obtienen los costos exergoeconómicos, donde el mayor costo exergoeconómico se presenta en la corriente de los gases de combustión que entran a la turbina de gas (1.407 \$/s), seguido de la corriente del combustible (0.9296 \$/s).

Aplicando el modelo desarrollado en el capítulo IV para la optimización exergoeconómica y con los costos exergoeconómicos y los flujos de exergía de las corrientes, se obtiene el costo de los recursos y los productos, los resultados se muestran en la tabla 5.14

TABLA 5.14 Costos de los recursos y los productos a condiciones de diseño.

Componente	c_R (\$/GJ)	c_P (\$/GJ)
Compresor de aire-1	4.339	4.75
Cámara de Combustión-1	3.987	4.046
Turbina de Gas-1	4.046	4.339
Recuperador de Calor-1	4.046	6.059
Compresor de aire-2	4.339	4.75
Cámara de Combustión-2	3.987	4.046
Turbina de Gas-2	4.046	4.339
Recuperador de Calor-2	4.046	6.059
Turbina de Vapor	6.256	7.394
Condensador	6.256	9.055
Bomba de agua de Condensado	4.957	10.66
Deareador-1	6.32	11.4
Deareador-2	6.32	11.4
Bomba de agua de alimentación-1	7.394	8.793
Bomba de agua de alimentación-2	7.394	8.793

En la tabla 5.14 se muestra que el mayor costo del recurso se tiene en las bombas de agua de alimentación (7.394 \$/GJ) y el mayor costo para el producto se tiene en la salida del deareador (11.4 \$/GJ).

Con los costos exergoeconómicos de los recursos y la exergía destruida del análisis exergético, se obtiene el costo de la exergía destruida para cada componente de la central analizada., los resultados son mostrados en la tabla 5.15.

TABLA 5.15 Costos de la destrucción de exergía a condiciones de diseño.

Componente	\dot{C}_D (\$/h)
Compresor de aire-1	13.14
Cámara de Combustión-1	72.65
Turbina de Gas-1	58.896
Recuperador de Calor-1	2361.24
Compresor de aire-2	13.09
Cámara de Combustión-2	72.65
Turbina de Gas-2	58.896
Recuperador de Calor-2	2361.24
Turbina de Vapor	447.48
Condensador	499.68
Bomba de agua de Condensado	0.4712
Deareador-1	39.06
Deareador-2	39.06
Bomba de agua de alimentación-1	2.40
Bomba de agua de alimentación-2	2.40

En la tabla 5.15 se observa que el mayor costo de exergía destruida se tiene en el recuperador de calor (2361.24 \$/h) y el menor en las bombas de agua de condensado (0.4712 \$/h).

Con el modelo económico desarrollado en el apéndice C, el factor de recuperación de capital (CRF), el factor de mantenimiento (ϕ) y las horas de operación (N), se obtienen los costos de inversión operación y mantenimiento, de acuerdo a la metodología desarrollada en el capítulo IV. Los resultados se muestran en la tabla 5.16.

TABLA 5.16 Costos de capital de inversión, operación y mantenimiento a condiciones de diseño.

Componente	\dot{Z} (\$/h)
Compresor de aire-1	135.46
Cámara de Combustión-1	0.91188
Turbina de Gas-1	128.8
Recuperador de Calor-1	340.88
Compresor de aire-2	135.46
Cámara de Combustión-2	0.91188
Turbina de Gas-2	128.8
Recuperador de Calor-2	340.88
Turbina de Vapor	224.42
Condensador	2.739
Bomba de agua de Condensado	0.963
Deareador-1	8.68
Deareador-2	8.68
Bomba de agua de alimentación-1	2.39
Bomba de agua de alimentación-2	2.39
Total	1462.36

En la tabla 5.16 se muestran los costos del capital de inversión, operación y mantenimiento para los equipos que forman la central analizada, el equipo que tiene el mayor costo es el recuperador de calor (340.42 \$/h) y el menor la cámara de combustión (0.911 \$/h).

Con los costos promedio del recurso, del producto de las diferentes corrientes de la central analizada y aplicando la metodología de análisis exergoeconómico del capítulo IV, se obtiene el diferencial de costo relativo.

Utilizando los costos de inversión y mantenimiento, el costo de la exergía destruida y aplicando la metodología desarrollada en el capítulo IV, se obtiene el factor exergoeconómico, para las condiciones de diseño. Los resultados son mostrados en la tabla 5.17.

TABLA 5.17 Costo relativo y factor exergoeconómico a condiciones de diseño.

Componente	<i>r</i> (%)	<i>f</i> (%)
Compresor de aire-1	9.46	91.16
Cámara de Combustión-1	1.473	1.24
Turbina de Gas-1	7.25	68.63
Recuperador de Calor-1	49.75	63.33
Compresor de aire-2	9.46	91.16
Cámara de Combustión-2	1.473	1.24
Turbina de Gas-2	7.25	68.63
Recuperador de Calor-2	49.75	63.33
Turbina de Vapor	27.28	65.28
Condensador	44.73	0.948
Bomba de agua de Condensado	41.99	65.45
Deareador-1	80.35	18.14
Deareador-2	80.35	18.14
Bomba de agua de alimentación-1	36.36	47.94
Bomba de agua de alimentación-2	36.36	47.94

En la tabla 5.17 se muestra el costo relativo donde se observa que son los deareadores los que tienen el valor mayor (80.35 %) y la cámara de combustión el valor menor (1.473), de la misma forma se muestra el factor exergoeconómico donde el compresor de aire tiene el valor mayor (91.16%), con lo que se demuestra que el costo de las irreversibilidades es muy pequeño comparado con el costo de inversión, por lo que no es recomendable invertir en este equipo para mejorar la eficiencia del proceso y el condensador y la cámara de combustión tienen los valores menores de 0.948 % y 1.24 % respectivamente lo que demuestra que el costo del condensador y la cámara de combustión es muy pequeño comparado con el costo de las irreversibilidades, por lo que se podría considerar en mejorar el rendimiento de estos equipos, aun el rendimiento de la cámara de combustión está muy limitado por el proceso de combustión que se lleva a cabo en ella.

En la tabla 5.18 se muestran los valores de las variables de decisión obtenidas en la optimización del costo total de generación a condiciones de diseño.

TABLA 5.18 Valores de las variables de decisión en el caso óptimo a condiciones de diseño.

Componente	Caso óptimo
Eficiencia de los Compresores de Aire	75 %
Relación de compresión	9
Temperatura de entrada a las Turbinas de Gas	1350 K
Eficiencia de las Turbinas de Gas	75 %
Eficiencia de la Turbina de Vapor	75%
Temperatura de entrada a la Turbina de Vapor	723.15 K
Eficiencia de la Bomba de agua de Condensado	75 %
Eficiencia de las Bombas de agua de alimentación	75 %
Costo de generación (\dot{C}_T)	2.185 \$/s

5.2. 2 ANÁLISIS DE LA OPTIMIZACIÓN EXERGOECONÓMICA A CONDICIONES DE OPERACIÓN

De la misma forma como se realizó para las condiciones de diseño, se obtienen los costos exergoeconómicos unitarios de las diferentes corrientes de la central analizada y con estos costos y los flujos de exergía se calculan los costos exergoeconómicos. Los resultados se muestran en la tabla 5.19

TABLA 5.19 Costos exergo económicos unitarios y costos exergo económicos para las condiciones de operación.

Corriente	c (\$/GJ)	\dot{C} (\$/s)	Corriente	c (\$/GJ)	\dot{C} (\$/s)	Corriente	c (\$/GJ)	\dot{C} (\$/s)
1	0	0	13	4.281	1.393	25	0	0
2	4.844	0.5076	14	4.281	0.6488	26	12.72	0.09323
3	4.227	1.385	15	4.281	0.238	27	8.00	0.001774
4	4.227	0.6454	16	3.94	0.8807	28	9.91	0.00131
5	4.227	0.2261	17	4.688	0.4887	29	9.916	0.001674
6	3.94	0.8763	18	4.688	0.8	30	9.916	0.001674
7	4.564	0.4831	19	7.94	0.5553	31	7.995	0.03124
8	4.564	0.7847	20	12.55	0.04036	32	12.49	0.0354
9	8.062	0.5639	21	8.00	1.119	33	9.91	0.004425
10	12.55	0.04036	22	8.00	0.06252	34	7.99	0.03124
11	0	0	23	9.91	1.023	35	12.49	0.0354
12	4.957	0.5113	24	8.00	0.0943	36	9.91	0.004425

En la tabla 5.19, se observa que el mayor costo exergético unitario se tiene en la corriente del agua de enfriamiento que abandona el condensador (12.72 \$/GJ) y el mayor costo exergoeconómico se tiene nuevamente en los gases de combustión que abandonan la cámara de combustión (1.385 y 1.393 \$/s), este comportamiento es similar al que se obtuvo en las condiciones de diseño.

De forma similar a la como se realizó a las condiciones de diseño se obtienen los costos de los recursos y los productos para las condiciones de operación, los resultados son mostrados en la tabla 5.20.

TABLA 5.20 Costos de los recursos y los productos a condiciones de operación.

Componente	c_R (\$/GJ)	c_P (\$/GJ)
Compresor de aire-1	4.569	4.844
Cámara de Combustión-1	4.034	4.227
Turbina de Gas-1	4.227	4.564
Recuperador de Calor-1	4.227	7.846
Compresor de aire-2	4.078	4.957
Cámara de Combustión-2	4.281	4.281
Turbina de Gas-2	4.046	4.688
Recuperador de Calor-2	4.281	7.718
Turbina de Vapor	8.00	9.908
Condensador	8.00	15.09
Bomba de agua de Condensado	9.908	13.58
Deareador-1	8.08	12.49
Deareador-2	8.08	12.49
Bomba de agua de alimentación-1	9.908	13.02
Bomba de agua de alimentación-2	9.908	13.02

En la tabla 5.20 se muestran los costos de los recursos y los productos de los equipos de la central analizada, donde se observa que el mayor costo del recurso se tiene en las bombas de agua de alimentación y de agua de condensado (9.908 \$/GJ) y el mayor costo del producto se tiene en el condensador (15.09 \$/GJ).

Con el costo de recurso de cada equipo y la exergía destruida, se calcula de la misma forma como se realizó a las condiciones de diseño el costo de la exergía destruida, los resultados se muestran en la tabla 5.21.

TABLA 5.21 Costos de la exergía destruida para condiciones de operación.

Componente	\dot{C}_D (\$/h)
Compresor de aire-1	17.38
Cámara de Combustión-1	222.26
Turbina de Gas-1	47.12
Recuperador de Calor-1	494.28
Compresor de aire-2	18.36
Cámara de Combustión-2	200.45
Turbina de Gas-2	49.93
Recuperador de Calor-2	450.72
Turbina de Vapor	491.04
Condensador	488.52
Bomba de agua de Condensado	0.5814
Deareador-1	36.07
Deareador-2	36.07
Bomba de agua de alimentación-1	2.34
Bomba de agua de alimentación-2	2.34

En la tabla 5.21, se muestra el costo de la destrucción de exergía para los componentes, donde se observa que es el recuperador de calor-1 el que tiene el mayor costo de destrucción de exergía (494.28 \$/h) y el menor costo se tiene en la bomba de agua de condensado (0.5814 \$/h).

De la misma forma como se realizó a las condiciones de diseño, se obtiene los costos de inversión de capital, operación y mantenimiento para los diferentes equipos que forman la central, los resultados se muestran en la tabla 5.22.

TABLA 5.22 costos de inversión de capital, operación y mantenimiento a condiciones de operación.

Componente	\dot{Z} (\$/h)
Compresor de aire-1	88.09
Cámara de Combustión-1	4.79
Turbina de Gas-1	161.82
Recuperador de Calor-1	374.76
Compresor de aire-2	81.43
Cámara de Combustión-2	4.73
Turbina de Gas-2	200.34
Recuperador de Calor-2	374.76
Turbina de Vapor	217.55
Condensador	2.54
Bomba de agua de Condensado	0.9508
Deareador-1	8.96
Deareador-2	8.96
Bomba de agua de alimentación-1	1.93
Bomba de agua de alimentación-2	1.93
Total	1531.61

En la tabla 5.22, se muestran los costos de inversión de capital, operación y mantenimiento, donde se observa que es el recuperador de calor el equipo que tiene el mayor costo (374.76 \$/h).

De manera similar como se realizó para las condiciones de diseño se obtienen el diferencial de costo relativo y factor exergoeconómico para las condiciones de operación. Los resultados se muestran en la tabla 5.23.

TABLA 5.23 Costo relativo y factor exergoeconómico a condiciones de operación.

Componente	r (%)	f (%)
Compresor de aire-1	6.125	83.52
Cámara de Combustión-1	4.98	2.11
Turbina de Gas-1	7.99	77.45
Recuperador de Calor-1	85.63	43.12
Compresor de aire-2	5.732	81.06
Cámara de Combustión-2	4.77	2.30
Turbina de Gas-2	9.52	80.05
Recuperador de Calor-2	80.29	45.41
Turbina de Vapor	23.83	30.07
Condensador	88.56	0.5171
Bomba de agua de Condensado	41.99	62.05
Deareador-1	54.64	19.91
Deareador-2	54.64	19.91
Bomba de agua de alimentación-1	31.45	45.26
Bomba de agua de alimentación-2	31.45	45.26

En la Tabla 5.23, se muestran el costo de costo relativo para cada equipo de la central analizada, donde el condensador tiene el mayor valor (88.56 %), esta tabla también muestra el factor exergoeconómico de los equipos, los compresores de aire poseen el mayor valor (83.52 y 81.06%), el valor menor se tiene en el condensador, seguido de las cámaras de combustión, estos resultados son similares a los obtenidos a las condiciones de diseño.

En la tabla 5.24 se muestran los valores de las variables de decisión obtenidas en la optimización del costo total de generación a condiciones de diseño y operación.

TABLA 5.24 Valores de las variables de decisión en el caso óptimo a condiciones de operación.

Componente	Caso óptimo
Eficiencia de los Compresores de Aire	75 %
Relación de compresión	9
Temperatura de entrada a las Turbinas de Gas	1350 K
Eficiencia de las Turbinas de Gas	75 %
Eficiencia de la Turbina de Vapor	75%
Temperatura de entrada a la Turbina de Vapor	723.15 K
Eficiencia de la Bomba de agua de Condensado	75 %
Eficiencia de las Bombas de agua de alimentación	75 %
Costo de generación (\dot{C}_T)	2.156 \$/s

CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se realizó el análisis termoeológico y de optimización exergoeconómica de una central de ciclo combinado a través de la teoría de los costos energéticos desarrollada ampliamente por A. Valero, G. Tsatsaronis, A. Bejan, et al. Este análisis se hizo para las condiciones de diseño y operación de la central en estudio.

Para realizar este análisis, se desarrollaron los análisis de primera y segunda ley de la termodinámica para cada equipo que forma la central; posteriormente se determinaron las corrientes que corresponden a los productos y recursos para cada equipo de la central.

Así se determinaron los costos exergéticos unitarios, el consumo exergético, los costos exergoeconómicos, los costos de los recursos y los productos. Posteriormente se determinaron las variables de optimización exergoeconómica, como es el factor exergoeconómico, el costo relativo y el costo de la destrucción de exergía.

Finalmente, mediante la optimización se determinaron los valores de las variables de decisión; cabe señalar cualquier cambio en los valores de una variable de decisión no solo afecta el rendimiento de un equipo, sino que también incide sobre el rendimiento de otros equipos.

De los resultados obtenidos se hacen las siguientes observaciones:

- Las turbinas de gas a carga máxima de operación, generan 66 MW y 65 MW respectivamente, mientras que a condiciones de diseño generan 72 MW. Esta es una diferencia importante que se ha ido generando con los años de operación.
- La turbina de vapor a carga máxima en condiciones de operación, genera 103 MW, mientras que a condiciones de diseño genera 111 MW.
- La mayor generación de entropía ocurre en la cámara de combustión y es en este equipo donde se tienen los mayores flujos de exergía del recurso y del producto, tanto para las condiciones de diseño y como para las condiciones de operación.
- Los mayores costos exergéticos unitarios y costos exergoeconómicos unitarios se tienen en la corriente que abandona el deareador para las condiciones de diseño y de operación.
- Los menores valores del factor exergoeconómico se tienen en el condensador y la cámara de combustión. Esto demuestra que el costo de estos equipos es muy pequeño comparado con el costo de las irreversibilidades, por lo que se debería de mejorar el rendimiento de los mismos, aunque la cámara de combustión está limitada por el proceso de combustión.
- 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.

Como producto relevante de este trabajo, se señala el programa de cómputo que se desarrolló utilizando el software comercial Engineering Equation Solver (EES), que facilita los cálculos requeridos para los análisis del comportamiento de la central.

RECOMENDACIONES

- 1.- Una recomendación para mejorar éste trabajo, es evaluar la Central de Ciclo Combinado, a diferentes condiciones de carga, por periodo estacional y la operación de día y noche para que de esta forma pueda observar la influencia de la temperatura ambiente en el desempeño de la Central, ya que en este trabajo solo se evaluó bajo una condición fija de temperatura ambiente. Para poder tener un mejor punto de vista es necesario hacer un trabajo posterior bajo las condiciones antes mencionadas
- 2.- Para la continuación de este trabajo se recomienda incluir en la optimización los costos de la destrucción de exergía e impacto ambiental, para poder contar con información más detallada.
- 3.- Se recomienda realizar un análisis exergoambiental, por medio de los indicadores exergéticos como la eficiencia exergética, la destrucción exergética y con los indicadores ambientales se puede conocer el impacto hacia el medio ambiente, entre los principales indicadores ambientales se encuentra el potencial de calentamiento global (IGWP), potencial de lluvia ácida (IARP) y potencial de formación de smog (ISFP).

REFERENCIAS

- [1]] <http://www.iea.org/media/statistics/surveys/electricity/mes.pdf>
- [2] http://www.iea.org/bookshop/661-Energy_Balances_of_OECD_Countries
- [3] Ameri M., Ahmadi P. y Hamidi A., “Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a steam plant: A case study”, *International Journal of Energy Research* 33 (2009). 499-512.
- [4] Sabugal S., Gómez F., “Centrales Térmicas de Ciclo Combinado” Ed. Díaz de Santos, 2006.
- [5] Kaushik S.C., Siva Reddy V., Tyagi S.K., “Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1857–1872.
- [6] Barclay F. J., “Combined Power and Process an Exergy Approach”, Professional Engineering Publishing, Second Edition 1998
- [7] El-Sayed Y. M. y Evans R. B., “Thermoeconomics and the design of heat systems”. *Journal of Engineering for Power* 92 (1970) 27–35.
- [8] Tsatsaronis G. “Exergoeconomic analysis and evaluation of energy-conversion plants-II. Analysis of a coal-fired steam power plants” *Energy* 10 (1985) 81-94.
- [9] Lozano M. A. y Valero A., “Theory of the exergetic cost” *Energy* 18 (1993) 939-960.
- [10] Torres, C. Exergoeconomía simbólica. Metodología para el análisis termoeconómico de los sistemas energéticos. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Departamento de Ingeniería Mecánica, 1991.
- [11] Erlach B., Serra L., Valero A. “Structural theory as standard for thermoeconomics”. *Energy Conversion & Management* 40 (1999) 1627-1649.
- [12] Correas L. Diagnostico termoeconómico de la operación de un ciclo combinado. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Departamento de Ingeniería Mecánica. 2001.
- [13] Verkhincker G. P. Kosoy B. V. “On the exergy analysis of power plants”. *Energy Conversion and Management* 42 (2001) 2053-2059.
- [14] Valdes M., Rapun J. L. “Optimization of heat recovery steam generators for combined cycle gas turbine power plants”. *Applied Thermal Engineering* 21 (2001) 1149 – 1159.
- [15] Franco A., Russo A., “Combined cycle plant efficiency increase based on the optimization of the heat recovery steam generator operating parameters. *International Journal of Thermal Sciences* 41 (2002) 843-859.
- [16] Torres C., et al. “Structural theory and thermoeconomic diagnosis Part I. On malfunction and dysfunction analysis. En: *Energy Conversion and Management* 43 (2002) 1503-1518.
- [17] Kwak H. y, Kim D. J. y Jeon J. S. “Exergetic and thermoeconomic analyses of power plants. *Energy* 28 (2003) 343-360.
- [18] Mirandola, A. y Stoppato A. “Aviable approach to the optimization of energy systems. *International Journal of Thermodynamics* 6 (2003) 157-167.
- [19] Verda V. Thermoeconomic analysis and diagnosis of energy utility systems: From diagnosis to prognosis. *International Journal of Thermodynamics* 7 (2004) 73-83.
- [20] Valero A. et al. “On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions. Part 1: the TADEUS problem”. *Energy* 29 (2004) 1875 – 1887.

- [21] Valero A., et al “On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions. Part 2: Malfunction definitions and assessment” *Energy* 29 (2004) 1889 – 1907.
- [22] Verda V., Serra L., Valero A. “The effects of the control system on the thermoeconomic diagnosis of a power plant. *Energy* 29 (2004) 331 – 359.
- [23] Zaleta A., et al “A reconciliation method based on a module simulator” *International journal of Thermodynamics* 7 (2004) 51 – 60.
- [24] Verda V., Serra L., Valero A., “Thermoeconomic diagnosis: Zooming strategy applied to highly complex energy systems. Part 1: Detection and localization of anomalies. *Journal of Energy Resources Technology* 127 (2005) 42-49.
- [25] Verda V., Serra L., Valero A., “Thermoeconomic Diagnosis: Zooming Strategy Applied to Highly Complex Energy Systems. Part 2: On the Choice of the Productive Structure. *Journal of Energy Resources Technology* 127 (2005) 50-58.
- [26] Vieira L. S. R., Donattelli J. L. M., Cruz M. E. C. “Integration of a mathematical exergoeconomic optimization procedure with a process simulator: Application to the CGAM SYSTEM”. *Thermal Engineering* 4 (2005) 163 -172.
- [27] Zhang C., et al. “Exergy cost analysis of a coal fired power plant based on structural theory of thermoeconomic” *Energy Conversion and Management* 47 (2006) 817- 843.
- [28] Li H., Marechal F., Burer M., Favrat D., “Multi-objective optimization of an advanced combined cycle power plant including CO₂ separation options”. *Energy* 31 (2006) 3117–3134.
- [29] Koch C., Cziesla F., Tsatsaronis G., “Optimization of combined cycle power plants using evolutionary algorithms”, *Chemical Engineering and Processing* 46 (2007) 1151–1159.
- [30] Aljundi I. H. “Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan”, *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 324–328.
- [31] Ataei A., Yoo C., “Combined pinch and exergy analysis for energy efficiency optimization in a steam power plant, *International Journal of the Physical Sciences* 5 (2010) 1110-1123.
- [32] Kaushik S.C., Siva V., Tyagi S.K., “Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1857–1872.
- [33] Godoy E., Benz S.J., Scenna N.J., “A strategy for the economic optimization of combined cycle gas turbine power plants by taking advantage of useful thermodynamic relationships” *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 852-871.
- [34] Ahmadi P, Dincer I., Rosen M., “Exergy, exergoeconomic and environmental analyses and evolutionary algorithm based multi-objective optimization of combined cycle power plants” *Energy* 36 (2011) 5886-5898.
- [35] Petrakopoulou F., Tsatsaronis G., Morosuk T., Carassai A., “Conventional and advanced exergetic analyses applied to a combined cycle power plant” *Energy* 41 (2012) 146-152.
- [36] Ehsan S., Reza S., Amidpour M., Aghanajaf C., “Multi-objective optimization of a cogeneration plant for supplying given amount of power and fresh water” *Desalination* 286 (2012) 225–234.
- [37] Tica A., Guéguen H., Dumur D., Faille D., Davelaar D., “Design of a combined cycle power plant model for optimization” *Applied Energy* 98 (2012) 256–265.
- [38] Tajik M., Ahmadi P., Ganjeh A., Nazri M., “Exergetic and economic evaluation of the effect of HRSG configurations on the performance of combined cycle power plants” *Energy Conversion and Management* 58 (2012) 47–58.

- [39] Ganjeh A., Nazri M., Mat T., “Modeling and multi-objective exergy based optimization of a combined cycle power plant using a genetic algorithm” *Energy Conversion and Management* 58 (2012) 94–103.
- [40] Ganjeh A., Nazri M., Mat T., Barzegaravval H., “Exergoenvironmental optimization of Heat Recovery Steam Generators in combined cycle power plant through energy and exergy analysis” *Energy Conversion and Management* 67 (2013) 27–33.
- [41] Taillon J., Blanchard R.E., “Exergy efficiency graphs for thermal power plants, *Energy* 88 (2015) 57–66.
- [42] Reza G., Toghraie D., “Energy and exergy analysis of Montazeri Steam Power Plant in Iran” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56 (2016) 454–463.
- [43] Abusoglu A., Kanoglu M., “Exergoeconomic analysis and optimization of combined heat and power production: A review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 2295–2308.
- [44] Moran M. J., Shapiro H. N., “Fundamentos de termodinámica técnica “. 2da Edición, Reverte. 2004.
- [45] Cengel, Y.A., Boles M. A., “Termodinámica”, 5ta Edición. McGraw Hill. 2007
- [46] Abusoglu A., Kanoglu M., “First and second law analysis of diesel engine powered cogeneration systems” *Energy Conversion and Management* 49 (2008) 2026–2031.
- [47] Prins M. J., Ptasinski K. J., Janssen F. J. J. G., “Thermodynamics of gas-char reactions: First and second law analysis” *Chemical Engineering Science* 58 (2003) 1003 – 1011.
- [48] Bejan A., “Advanced Engineering Thermodynamics” 3rd Edition, Ed. J. Wiley, 2006.
- [49] Cardu M., Baica M., “Regarding a global methodology to estimate the energy-ecologic efficiency of power plants” *Energy Conversion & Management* 40 (1999) 71-87.
- [50] Cardu M., Baica M., “Regarding a new variant methodology to estimate the gobally the ecologic impact of power plants” *Energy Conversion & Management* 40 (1999) 1569-1575.
- [51] Rodriguez C., de Castro A., Silveira J., “Ecological efficiency in CHP: Biodiesel case” *Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 458-463.
- [52] Cardu M., Baica M., “Regarding the energy ecologic efficiency of desulphurization and denox sustems and instalations in thermopower plants” *Energy Conversion & Management* 41(2000) 1155-1164.
- [53] Silveira J., de Queiroz W., Tuna E., et al. “Ecological efficiency and thermoeconomic analysis of a cogeneration system at a hospital” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 2894-2906.
- [54] Abuelnuor A.A.A. et al., “Exergy analysis of Garri “2” 180 MW combined cycle power plant”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79 (2017) 960-969.
- [55] A. Bejan, G. Tsatsaronis, *Thermal Design and Optimization*, John Wiley & Sons, 1996.
- [56] P. Ahmadi, I. Dincer, “Thermodynamic analysis and thermoeconomic optimization of a dual pressure combined cycle power plant with a supplementary firing unit”, *Energy Conversion and Management*, 52 (2011) 2293-2308.
- [57] Carapellucci R., Giordano L., “A comparison between exergetic and economic criteria for optimizing the heat recovery steam generators of gas-steam power plants”, *Energy* 58 (2013) 458-472.
- [58] Ameri M., Ahmadi P., Hamidi A., “Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a steam power plant: A case study” *International Journal of Energy Research* 33 (2009) 499–512.
- [59] Yilmaz C., “Thermoeconomic modeling and optimization of a hydrogen production system using geothermal energy”, *Geothermics* 65 (2017) 32-43.
- [60] Kazemi S., et al., “Exergoeconomic analysis and optimization of a triple-pressure combined cycle plant using evolutionary algorithm”, *Energy* 93 (2015) 555-567.

- [61] Valero A, et al., “CGAM problem: definition and conventional solution”, *Energy* 19 (3) (1994) 279–286.
- [62] Ameri M., Ahmadi P., Khanmohammadi S., “Exergy analysis of a 420 MW combined cycle power plant”, *International Journal of Energy Research* 32 (2008) 175-183.
- [63] Nemati A., Nami H., Ranjbar F., Yari M., “A comparative thermodynamic analysis of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery: A case study for CGAM cogeneration system”, *Case Studies in Thermal Engineering* 9 (2017) 1–13.
- [64] Saghafifar M., Gadalla M., “Thermo-economic optimization of hybrid solar Maisotenko bottoming cycle using heliostat field collector: Comparative analysis” *Applied Energy* 190 (2017) 686-702
- [65] Braimakis K., Karellas S., “Integrated thermoeconomic optimization of standard and regenerative ORC for different heat source type and capacities” *Energy* 121 (2017) 570-598.
- [66] Nami H., Mahmoudi S.M.S., Nemati A., “Exergy, economic and environmental impact assessment and optimization of a novel cogeneration system including a gas turbine, a supercritical CO₂ and an organic Rankine cycle (GT-HRSG/SCO₂)”, *Applied Thermal Engineering* 110 (2017) 1315–1330
- [67] Cidade E. J., “Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of an integrated solar combined cycle system, *Renewable and sustainable energy reviews*” 67 (2017) 507-519.
- [68] Torres. C., Valero A., “Curso de Doctorado de Termoeconomía” Cursos 2000-1. Universidad de Zaragoza.
- [69] Farsi A., Hojjat S. M., Ameri M., “Thermo-economic comparison of three configuration of combined supercritical CO₂, refrigeration and multi-effect desalination systems”, *Applied Thermal Engineering* 112 (2017) 855-870.
- [70] Dixit M., Arora A., Kaushik S.C., “Thermodynamic and thermoeconomic analyses of two stage hybrid absorption compression refrigeration system”, *Applied Thermal Engineering* 113 (2017) 120-131.
- [71] Baghernejad A., Yaghoubi M., Jafarpur K., “Exergoeconomic optimization and environmental analysis of a novel solar-trigeneration system for heating, cooling and power production purpose, *Solar Energy* 134 (2016) 165-179.
- [72] Baghernejad A., Yaghoubi M., “Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm, *Energy Conversion and Management* 52 (2011) 2193-2203.
- [73] Baghernejad A., Yaghoubi M., “Multi-objective exergoeconomic optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System using evolutionary algorithms”, *International Journal of Energy Research* 35 (2011) 601-615.
- [74] Prontuario de la Central de Ciclo Combinado Tula, Ediciones Propias de la CFE, 2013.
- [75] Kotas T.J. “The exergy method of thermal plant analysis”, Florida: Krieger Publishing Company, 1995.
- [76] Ersayin E., Ozgener L., “Performance analysis of combined cycle power plants: A case study”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015) 832–842.
- [77] Cárdua M., Baica M., “SONOX criterion application for ecological analysis of thermopower plants operation”, *Energy Conversion and Management* 50 (2009) 304–308.
- [78] Cardua M., Baica M., “Regarding the greenhouse gas emissions of thermopower plant” *Energy Conversion and Management* 43 (2002) 2135–2144.
- [79] Rodriguez C., Villela A., Silveira J. L., “Ecological efficiency in CHP: Biodiesel case”, *Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 458–463.

- [80] Rodriguez C., et al., “Determination of ecological efficiency in internal combustion engines: The use of biodiesel”, *Applied Thermal Engineering* 29 (2009)1887–1892.
- [81] Kanoglu M., Dincer I., Rosen M. A., “Understanding energy and exergy efficiencies for improved energy management in power plants”, *Energy Policy* 35 (2007) 3967–3978.
- [82] Ameri M., Ahmadi P., Khanmohammadi S., “Exergy analysis of a 420 MW combined cycle power plant”, *International Journal of Energy Research* 32 (2008) 175–183.
- [83] <https://www.gob.mx/cre/documentos/indice-de-referencia-nacional-de-precios-de-gas-natural-al-mayoreo-ipgn>.
- [84] Barzegar H., et al., “Thermo-economic-environmental multiobjective optimization of a gas turbine power plant with preheater using evolutionary algorithm” *International Journal of Energy Research* 35 (2011) 389–403.
- [85] Memon A. G., Memon R. A., Qureshia S., “Thermo-environmental and economic analyses of combined cycle power plants with regression modelling and optimization” *Applied Thermal Engineering* 125 (2017) 489-512.
- [86] Ganjehkaviri A., et al., “Modelling and optimization of combined cycle power plant based on exergoeconomic and environmental analysis”, *Applied Thermal Engineering*, 67 (2014) 566-578.
- [87] Yao H., et al., “Exergoeconomic analysis of a combined cycle system utilizing associated gases from steel production process based on structural theory of thermoeconomics”, *Applied Thermal Engineering* 51 (2013) 476-489.
- [88] Baghernejad A., Yaghoubi M., Jafarpur K.,” Exergoeconomic optimization and environmental analysis of a novel solar-trigeneration system for heating, cooling and power production purpose”, *Solar Energy* 134 (2016) 165–179.
- [89] Cidade E. J., Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of an integrated solar combined cycle system”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67(2017) 507-519.
- [90] 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.
- [91] Roosen P., Uhlenbruck S., Lucas K., “Pareto optimization of a combined cycle power system as a decision support tool for trading off investment vs. operating costs”, *International Journal of Thermal Sciences* 42 (2003) 553–560.
- [92] Baghernejad A, Yaghoubi M., “Multi-objective exergoeconomic optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System using evolutionary algorithms”, *International Journal of Energy Research* 35 (2011) 601–615
- [93] Klein S., Nellis G., “Thermodynamics”, 1st Edition, Cambridge University Press,2012.
- [94] Klein S., Nellis G., “Mastering EES” F-Chart Software, 2013.

APÉNDICES

APÉNDICE A: PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE

TABLA A.1.- Composición del gas natural empleado en la CCCT a condiciones de diseño. [74]

Componente	Fórmula	Fracción molar del combustible ([%])
Metano	CH ₄	92.00
Etano	C ₂ H ₆	7.13
Propano	C ₃ H ₈	0.77
Butano	C ₄ H ₁₀	0.1
Pentano	C ₅ H ₁₂	0.0
Hexano	C ₆ H ₁₄	0.0
Nitrógeno	N ₂	0.00
Dióxido de Carbono	CO ₂	0.0
		100 %

TABLA A.2.- Composición del gas natural empleado en la CCCT a condiciones de operación. [90]

Componente	Fórmula	Fracción molar del combustible ([%])
Metano	CH ₄	89.908
Etano	C ₂ H ₆	5.00
Propano	C ₃ H ₈	0.3040
Butano	C ₄ H ₁₀	0.007
Pentano	C ₅ H ₁₂	0.020
Hexano	C ₆ H ₁₄	0.0130
Nitrógeno	N ₂	4.695
Dióxido de Carbono	CO ₂	0.055
		100 %

TABLA A.3.- Composición del aire para las condiciones de diseño y operación [55]

Componente	Fórmula	Fracción molar del aire (Yci [%])
Nitrógeno	N ₂	77.48
Oxígeno	O ₂	20.59
Dióxido de Carbono	CO ₂	0.03
Agua	H ₂ O	1.9
		100 %

TABLA A.4.- Composición de los gases de combustión a condiciones de diseño.

Componente	Fórmula	Fracción molar de los gases de combustión (Yci [%])
Nitrógeno	N ₂	75.15
Oxígeno	O ₂	13.96
Dióxido de Carbono	CO ₂	3.033
Agua	H ₂ O	7.85
		100 %

TABLA A.5.- Composición de los gases de combustión a condiciones de operación.

Componente	Fórmula	Fracción molar de los gases de combustión (Yci [%])
CICLO DE GAS -1		
Nitrógeno	N ₂	75.2
Oxígeno	O ₂	14.09
Dióxido de Carbono	CO ₂	2.974
Agua	H ₂ O	7.734
		100 %
CICLO DE GAS -2		
Nitrógeno	N ₂	75.17
Oxígeno	O ₂	14.02
Dióxido de Carbono	CO ₂	3.006
Agua	H ₂ O	7.797

TABLA A.6.- Propiedades de los compuestos de las sustancias de trabajo.

Componente	Fórmula	Masa molar [kg/kmol]	Entalpía de Formación [kJ/kmol]	Exergía Química [kJ/kmol]
Metano	CH ₄	16.0430	-74850	824350
Etano	C ₂ H ₆	30.0700	-84680	1493.9
Propano	C ₃ H ₈	44.0970	-103850	2149
Butano	C ₄ H ₁₀	58.1230	-126150	2802.5
Pentano	C ₅ H ₁₂	72.1500	-146440	3455.8
Hexano	C ₆ H ₁₄	86.1770	-	4110
Nitrógeno	N ₂	28.0134	0	640
Dióxido de Carbono	CO ₂	44.0100	-393520	14175
Oxígeno	O ₂	32.0000	0	3950

APÉNDICE B: PROPIEDADES TERMODINÁMICAS.

TABLA B.1- Parámetros termodinámicos de las corrientes del ciclo combinado a sus condiciones de diseño [74].

Flujo	Temperatura (K)	Presión (bar)	Flujo másico (kg/s)	Flujo	Temperatura (K)	Presión (bar)	Flujo másico (kg/s)
1	288.2	1.013	258.80	20	380.10	83.25	52.37
2	662.2	14.18	258.80	21	781	83.25	104.7
3	1366	10.5	263.7	22	394	2	12.33
4	817.4	0.8132	263.7	24	315.2	0.0821	92.41
5	494.5	1.013	263.7	25	301.2	1.5	4368
6	299.8	30.00	4.84	26	312.2	0.9	4368
9	781	83.25	52.37	27	315.2	0.0821	92.41
10	380.10	83.25	52.37	29	315.3	13.00	46.21
11	288.2	1.013	258.80	30	315.3	13.00	46.21
12	662.2	14.18	258.80	31	394	2	6.167
13	1366	10.5	263.7	32	378.9	1.62	52.37
14	817.4	0.8132	263.7	34	394	2	6.167
15	494.5	1.013	263.7	35	817.4	1.62	52.37
16	299.8	30.00	4.84	0	288.2	1.013	-
19	781	83.25	52.37				

TABLA B.2- Parámetros termodinámicos de las corrientes del ciclo combinado a sus condiciones de operación [90].

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

TABLA B.3- Entalpías y entropías del ciclo combinado a sus condiciones de diseño.

Flujo	Entalpía (kJ/kmol o kJ/kg)	Entropía (kJ/kmol-K o kJ/kg-K)	Flujo	Entalpía (kJ/kmol o kJ/kg)	Entropía (kJ/kmol-K o kJ/kg-K)
1	-5004	193.2	21	3414	6.727
2	6219	196.2	22	2708	7.13
3	4356	223.4	24	2107	7.42
4	-14705	226.9	25	117.4	0.4088
5	-24999	209.1	26	163.4	0.5589
6	-75478	-	27	175.9	0.599
9	3414	6.727	29	177.4	0.5997
10	454.3	1.378	30	177.4	0.5997
11	-5004	193.2	31	2708	7.13
12	6219	196.2	32	443.4	1.371
13	4356	223.4	34	2708	7.13
14	-14705	226.9	35	443.4	1.371
15	-24999	209.1	Aire T ₀	-5004	193.2
16	-75478	-	g. c T ₀	-33953	185.4
19	3314	6.727	T ₀	163.4	0.5589
20	454.3	1.378			

TABLA B.4- Entalpías, entropías calculadas del ciclo combinado a sus condiciones de operación.

Flujo	Entalpía (kJ/kmol o kJ/kg)	Entropía (kJ/kmol-K o kJ/kg-K)	Flujo	Entalpía (kJ/kmol o kJ/kg)	Entropía (kJ/kmol-K o kJ/kg-K)
1	-4794	196	21	3423	6.796
2	6752	199.6	22	2707	7.129
3	3087	222.6	24	2326	7.42
4	-15089	225.8	25	115.1	0.401
5	-26394	207	26	157.2	0.539
6	-71750	-	27	175.9	0.599
9	3423	6.796	29	177.3	0.5997
10	517.7	1.544	30	177.3	0.5997
11	-4850	195.8	31	2707	7.129
12	6649	199.5	32	508.6	1.539
13	2712	222.6	34	2707	7.129
14	-15528	225.6	35	508.6	1.539
15	-26617	207.1	Aire T ₀	-4794	196
16	-71750	-	g. c T ₀	-32460	190.2
19	3423	6.796	T ₀	93.11	0.3275
20	517.7	1.544			

APÉNDICE C: MODELO ECONÓMICO

Las ecuaciones para determinar los costos anuales de operación y mantenimiento de los equipos son las siguientes: [55,85, 91,92]

Compresor de aire-1 (CA-1).

$$Z_{CA-1} = \left(\frac{C_{11}\dot{m}_1}{C_{12} - \eta_{CA-1}} \right) \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Cámara de combustión-1 (CC):

$$Z_{CC-1} = \left(\frac{C_{21}\dot{m}_2}{C_{22} - \frac{p_3}{p_2}} \right) [1 + \exp(C_{23}T_4 - C_{24})]$$

Turbina de gas (TG-1):

$$Z_{TG-1} = \left(\frac{C_{31}\dot{m}_3}{C_{32} - \eta_{TG-1}} \right) \ln \left(\frac{p_3}{p_4} \right) * [1 + \exp(C_{33}T_3 - C_{34})]$$

Recuperador de calor (RC-1):

$$Z_{RC-1} = C_{41} * \left[\frac{\dot{m}_3(h_4 - h_5)}{\log(T_4 - T_5)} \right]^{0.8} + C_{42} * \dot{m}_9 + C_{43} * \dot{m}_3$$

Compresor de aire-2 (CA-2).

$$Z_{CA-2} = \left(\frac{C_{11}\dot{m}_{11}}{C_{12} - \eta_{CA-1}} \right) \left(\frac{p_{12}}{p_{11}} \right) \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Cámara de combustión-1 (CC):

$$Z_{CC-2} = \left(\frac{C_{21}\dot{m}_{aire}}{C_{22} - \frac{p_{13}}{p_{12}}} \right) [1 + \exp(C_{23}T_{14} - C_{24})]$$

Turbina de gas (TG-2):

$$Z_{TG-2} = \left(\frac{C_{31}\dot{m}_{gas}}{C_{32} - \eta_{TG}} \right) \ln \left(\frac{p_{13}}{p_{14}} \right) * [1 + \exp(C_{33}T_{13} - C_{34})]$$

Recuperador de calor (RC-2):

$$Z_{RC-2} = C_{41} * \left[\frac{\dot{m}_{13}(h_{14} - h_{15})}{\log(T_{14} - T_{15})} \right]^{0.8} + C_{42} * \dot{m}_{19} + C_{43} * \dot{m}_{13}$$

Turbina de vapor (TV):

$$Z_{TV} = C_{51} * (\dot{W}_{TV})^{0.7} \left(1 + \left(\frac{0.05}{1 - \eta_{TV}} \right)^3 \right) * \left(1 + 5 * \exp\left(\frac{T_{21} - 866}{10.42} \right) \right)$$

Condensador (C):

$$Z_C = C_{61} * \dot{m}_{24}$$

Bomba de agua de condensado (BAC):

$$Z_{BAC} = C_{71} * (\dot{W}_{BAC})^{0.71} \left(1 + \frac{0.2}{1 - \eta_{BAC}} \right)$$

Deareador-1 (D-1):

$$Z_{D-1} = C_{81} * (\dot{m}_{31})^{0.7}$$

Deareador-2 (D-2):

$$Z_{D-2} = C_{81} * (\dot{m}_{34})^{0.7}$$

Bomba de agua de alimentación (BAA-1):

$$Z_{BAA} = C_{71} * (\dot{W}_{BAA-1})^{0.71} \left(1 + \frac{0.2}{1 - \eta_{BAA}} \right)$$

Bomba de agua de condensado (BAA-2):

$$Z_{BAA} = C_{71} * (\dot{W}_{BAA-2})^{0.71} \left(1 + \frac{0.2}{1 - \eta_{BAA}} \right)$$

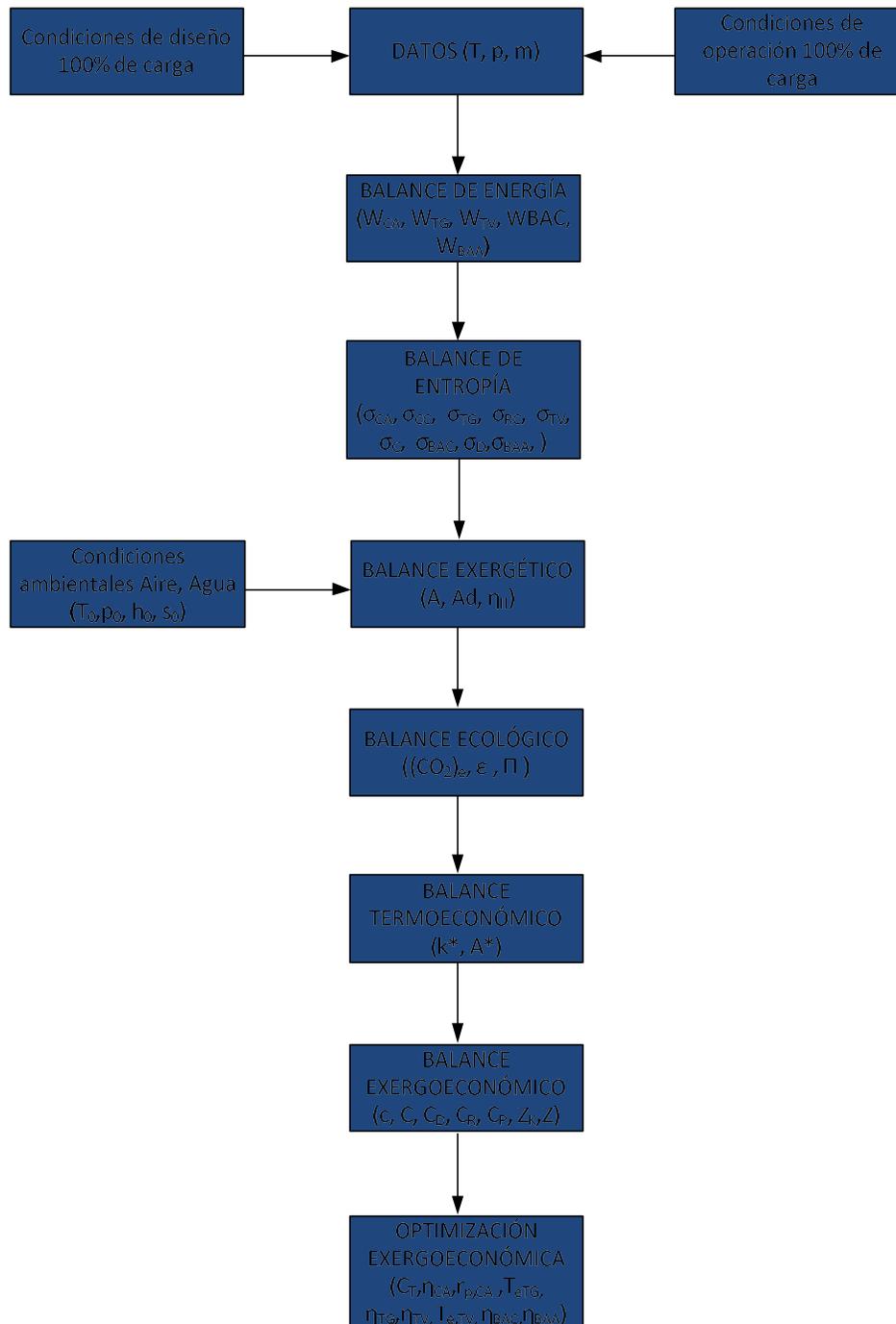
Los valores de las constantes usadas en las ecuaciones para el costo de compra de los componentes del sistema se muestran en la tabla siguiente. [55, 85, 91,92]

TABLA C.1.- Constantes utilizadas en los costos de compra de los componentes

Compresor de aire (CA):	$C_{11}=71.01\$/(\text{kg/s})$, $C_{12} = 0.9$
Cámara de Combustión (CC):	$C_{21} = 46.08 \$/(\text{kg/s})$, $C_{22} = 0.995$ $C_{23} = 0.018 (\text{K}^{-1})$, $C_{24} = 26.4$
Turbina de Gas (TG):	$C_{31} = 479.34 \$/(\text{kg/s})$, $C_{32} = 0.92$ $C_{33} = 0.036 (\text{K}^{-1})$, $C_{34} = 54.4$
Recuperador de calor (RC):	$C_{41} = 4745 \$/ (\text{kW K})$, $C_{42} = 11820 \$/(\text{kg/s})$, $C_{43} = 658 \$/(\text{kg/s})$
Turbina de vapor (TV):	$C_{51} = 3880.5 \$/ \text{kW}$
Condensador (C):	$C_{61} = 1773 \text{ s/ kg}$
Bomba de agua de condensado (BAC)	$C_{71} = 705.48 \$/ \text{kg s}$
Deaerador (D)	$C_{81} = 145315 \$/ \text{kg s}$
Bomba de agua de alimentación (BAA)	$C_{71} = 705.48 \$/ \text{kg s}$

APÉNDICE D: PROGRAMA DE CÁLCULO

El programa que fue utilizado en los cálculos de este trabajo fue Engineering Equation Solver (EES). El programa que se desarrolló contiene: 1. Balance Estequiométrico, 2. Balance de masa, 3. Balance energético, 4. Balance de entropía 5. Balance Exergético, 6. Balance Termoeconómico, 7. Balance exergoeconómico y optimización exergoeconómica [93,94]



\$UnitSystem SI Molar Radian kJ K MPa

"CICLO DE GAS 1"
"COMBUSTIBLE"

y_CH4=0.89908 [-] "Fracción molar de Metano"
y_C2H6=0.05 [-] "Fracción molar de Etano"
y_C3H8=0.00304 [-] "Fracción molar de Propano"
y_C4H10=0.00007 [-] "Fracción molar de Butano"
y_C5H12=0.00002 [-] "Fracción molar de Pentano"
y_C6H14=0.000013 [-] "fracción molar de Hexano"
y_CO2=0.00055 [-] "fracción molar de Dióxido de carbono"
y_N2=0.04695 [-] "fracción molar de Nitrógeno"

"AIRE"

y_N2_a=0.7748 [-] "fracción molar de Nitrógeno"
y_O2=0.2059 [-] "fracción molar de Oxígeno"
y_CO2_a=0.0003 [-] "fracción molar de Dióxido de carbono"
y_H2O=0.019 [-] "fracción molar de Agua"

"GASES DE COMBUSTIÓN"

y_N2_gc=y_N2_a/(1+f) "fracción molar de Nitrógeno"
y_O2_gc=(y_O2-(2*f))/(1+f) "fracción molar de Oxígeno"
y_CO2_gc=(y_CO2_a+f)/(1+f) "fracción molar de Dióxido de Carbono"
y_H2O_gc=(y_H2O+(2*f))/(1+f) "fracción molar de Agua"

$$f=(m_dot[6]/m_dot[1])*(MW_aire/MW_f)$$

"BALANCE ESTEQUIOMETRICO"

MW_f=y_CH4*molarmass(CH4)+y_C2H6*molarmass(C2H6)&
+y_C3H8*molarmass(C3H8)+y_C4H10*molarmass(C4H10)&
+y_C5H12*molarmass(C5H12)+y_C6H14*molarmass(C6H14)&
+y_CO2*molarmass(CO2)+y_N2*molarmass(N2) "masa molar del combustible"

MW_gc=y_CO2_gc*molarmass(CO2)+y_H2O_gc*molarmass(H2O)&
+y_N2_gc*molarmass(N2)+y_O2_gc*molarmass(O2) "masa molar de los gases de combustión"

MW_aire=(y_N2_a*molarmass(N2))+(y_O2*molarmass(O2))&
+(y_CO2_a*molarmass(CO2))+(y_H2O*molarmass(H2O)) "masa molar del aire"

"Datos"

T[1]=converttemp(C,K,22.2[C])
P[1]=0.7891 [bar]*convert(bar,MPa)
rc=13
m_dot[1]=262.60
T[2]=converttemp(C,K,406.1 [C])
P[2]=10.29 [bar]*convert(bar,MPa)
T[3]=converttemp(C,K,1044.13[C])
P[3]=9.775 [bar]*convert(bar,MPa)
T[4]=converttemp(C,K,517.2[C])
P[4]=0.8113 [bar]*convert(bar, MPa)
m_dot[4]=267.44
T[5]=converttemp(C,K,158.8[C])

P[5]=0.7891 [bar]*convert(bar,MPa)
 T[6]=converttemp(C,K, 26.6[C])
 P[6]=30 [bar]*convert(bar,MPa)
 T_ref=converttemp(C,K,22.2[C])
 P_ref=0.7891 [bar]*convert(bar,MPa)
 m_dot[6]=4.8415
 PCI=45936
 cp=1.012
 m_agua=49.27
 h[10]=518.1
 h[9]=3423
 s[9]=6.796
 s[10]=1.545
 P[9]=7.296
 s_l=69.948

"PROPIEDADES TERMODINAMICAS"

" Entrada del Compresor"

h_bar_O2=enthalpy(O2,T=T[1])
 h_bar_N2_a=enthalpy(N2,T=T[1])
 h_bar_CO2_a=enthalpy(CO2,T=T[1])
 h_bar_H2O=enthalpy(H2O,T=T[1])
 h[1]=(y_N2_a*h_bar_N2_a)+(y_O2*h_bar_O2)+(y_CO2_a*h_bar_CO2_a)+(y_H2O*h_bar_H2O)

s_bar_O2=entropy(O2, T=T[1],P=P[1])
 s_bar_N2_a=entropy(N2,T=T[1],P=P[1])
 s_bar_CO2_a=entropy(CO2,T=T[1],P=P[1])
 s_bar_H2O=entropy(H2O,T=T[1],P=P[1])
 s[1]=(y_N2_a*s_bar_N2_a)+(y_O2*s_bar_O2)+(y_CO2_a*s_bar_CO2_a)+(y_H2O*s_bar_H2O)

"Salida del Compresor"

h_bar_O2[2]=enthalpy(O2,T=T[2])
 h_bar_N2[2]=enthalpy(N2,T=T[2])
 h_bar_CO2[2]=enthalpy(CO2,T=T[2])
 h_bar_H2O[2]=enthalpy(H2O,T=T[2])
 h[2]=(y_N2_a*h_bar_N2[2])+(y_O2*h_bar_O2[2])+(y_CO2_a*h_bar_CO2[2])+(y_H2O*h_bar_H2O[2])

s_bar_O2[2]=entropy(O2,T=T[2],P=P[2])
 s_bar_N2[2]=entropy(N2,T=T[2],P=P[2])
 s_bar_CO2[2]=entropy(CO2,T=T[2],P=P[2])
 s_bar_H2O[2]=entropy(H2O,T=T[2],P=P[2])
 s[2]=(y_N2_a*s_bar_N2[2])+(y_O2*s_bar_O2[2])+(y_CO2_a*s_bar_CO2[2])+(y_H2O*s_bar_H2O[2])

s_bar_O2_s[2]=s_bar_O2
 s_bar_N2_s[2]=s_bar_N2_a
 s_bar_CO2_s[2]=s_bar_CO2_a
 s_bar_H2O_s[2]=s_bar_H2O

h_bar_O2_s[2]=enthalpy(O2,P=P[2],s=s_bar_O2_s[2])
 h_bar_N2_s[2]=enthalpy(N2,P=P[2],s=s_bar_N2_s[2])
 h_bar_CO2_s[2]=enthalpy(CO2,P=P[2],s=s_bar_CO2_s[2])
 h_bar_H2O_s[2]=enthalpy(H2O,P=P[2],s=s_bar_H2O_s[2])

$$h_{s[2]}=(y_{N2_a}*h_{bar_N2_s[2]})+(y_{O2}*h_{bar_O2_s[2]})+(y_{CO2_a}*h_{bar_CO2_s[2]})+(y_{H2O}*h_{bar_H2O_s[2]})$$

" Gas Natural"

$$\begin{aligned} h_{bar_CH4}&=enthalpy(CH4,T=T[6]) \\ h_{bar_C2H6}&=enthalpy(C2H6,T=T[6]) \\ h_{bar_C3H8}&=enthalpy(C3H8,T=T[6]) \\ h_{bar_C4H10}&=enthalpy(C4H10,T=T[6]) \\ h_{bar_C5H12}&=enthalpy(C5H12,T=T[6]) \\ h_{bar_C6H14}&=enthalpy(C6H14,T=T[6]) \\ h_{bar_CO2}&=enthalpy(CO2,T=T[6]) \\ h_{bar_N2}&=enthalpy(N2,T=T[6]) \\ h[6]&=(y_{CH4}*h_{bar_CH4})+(y_{C2H6}*h_{bar_C2H6})+(y_{C3H8}*h_{bar_C3H8})+(y_{C4H10}*h_{bar_C4H10})& \\ &+(y_{C5H12}*h_{bar_C5H12})+(y_{C6H14}*h_{bar_C6H14})+(y_{CO2}*h_{bar_CO2})+(y_{N2}*h_{bar_N2}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_{bar_CH4}&=entropy(CH4,T=T[6],P=P[6]) \\ s_{bar_C2H6}&=entropy(C2H6,T=T[6],P=P[6]) \\ s_{bar_C3H8}&=entropy(C3H8,T=T[6],P=P[6]) \\ s_{bar_C4H10}&=entropy(C4H10,T=T[6],P=P[6]) \\ s_{bar_C5H12}&=entropy(C5H12,T=T[6],P=P[6]) \\ s_{bar_C6H14}&=entropy(C6H14,T=T[6],P=P[6]) \\ s_{bar_CO2}&=entropy(CO2,T=T[6],P=P[6]) \\ s_{bar_N2}&=entropy(N2,T=T[6],P=P[6]) \\ s[6]&=(y_{CH4}*s_{bar_CH4})+(y_{C2H6}*s_{bar_C2H6})+(y_{C3H8}*s_{bar_C3H8})+(y_{C4H10}*s_{bar_C4H10})& \\ &+(y_{C5H12}*s_{bar_C5H12})+(y_{C6H14}*s_{bar_C6H14})+(y_{CO2}*s_{bar_CO2})+(y_{N2}*s_{bar_N2}) \end{aligned}$$

"Salida Cámara de Combustión"

$$\begin{aligned} h_{bar_CO2[3]}&=enthalpy(CO2,T=T[3]) \\ h_{bar_H2O[3]}&=enthalpy(H2O,T=T[3]) \\ h_{bar_N2[3]}&=enthalpy(N2,T=T[3]) \\ h_{bar_O2[3]}&=enthalpy(O2,T=T[3]) \\ h[3]&=(y_{N2_gc}*h_{bar_N2[3]})+(y_{O2_gc}*h_{bar_O2[3]})+(y_{CO2_gc}*h_{bar_CO2[3]})+(y_{H2O_gc}*h_{bar_H2O[3]}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_{bar_CO2[3]}&=entropy(CO2,T=T[3],P=P[3]) \\ s_{bar_H2O[3]}&=entropy(H2O,T=T[3],P=P[3]) \\ s_{bar_N2[3]}&=entropy(N2,T=T[3],P=P[3]) \\ s_{bar_O2[3]}&=entropy(O2,T=T[3],P=P[3]) \\ s[3]&=(y_{CO2_gc}*s_{bar_CO2[3]})+(y_{H2O_gc}*s_{bar_H2O[3]})+(y_{N2_gc}*s_{bar_N2[3]})+(y_{O2_gc}*s_{bar_O2[3]}) \end{aligned}$$

"Salida Turbina de Gas"

$$\begin{aligned} h_{bar_N2[4]}&=enthalpy(N2,T=T[4]) \\ h_{bar_O2[4]}&=enthalpy(O2,T=T[4]) \\ h_{bar_CO2[4]}&=enthalpy(CO2,T=T[4]) \\ h_{bar_H2O[4]}&=enthalpy(H2O,T=T[4]) \end{aligned}$$

$$h[4]=(y_{N2_gc}*h_{bar_N2[4]})+(y_{O2_gc}*h_{bar_O2[4]})+(y_{CO2_gc}*h_{bar_CO2[4]})+(y_{H2O_gc}*h_{bar_H2O[4]})$$

$$\begin{aligned} s_{bar_N2[4]}&=entropy(N2,T=T[4],P=P[4]) \\ s_{bar_O2[4]}&=entropy(O2,T=T[4],P=P[4]) \\ s_{bar_CO2[4]}&=entropy(CO2,T=T[4],P=P[4]) \\ s_{bar_H2O[4]}&=entropy(H2O,T=T[4],P=P[4]) \end{aligned}$$

$$s[4]=(y_{N2_gc}*s_bar_{N2}[4])+(y_{O2_gc}*s_bar_{O2}[4])+(y_{CO2_gc}*s_bar_{CO2}[4])+(y_{H2O_gc}*s_bar_{H2O}[4])$$

$$\begin{aligned} s_bar_{N2}[3]&=s_bar_{N2}[4] \\ s_bar_{O2}[3]&=s_bar_{O2}[4] \\ s_bar_{CO2}[3]&=s_bar_{CO2}[4] \\ s_bar_{H2O}[3]&=s_bar_{H2O}[4] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_s_bar_{N2}[4]&=enthalpy(N2,s=s_bar_{N2}[3],P=P[4]) \\ h_s_bar_{O2}[4]&=enthalpy(O2,s=s_bar_{O2}[3],P=P[4]) \\ h_s_bar_{CO2}[4]&=enthalpy(CO2,s=s_bar_{CO2}[3],P=P[4]) \\ h_s_bar_{H2O}[4]&=enthalpy(H2O,s=s_bar_{H2O}[3],P=P[4]) \end{aligned}$$

$$h_s[4]=(y_{N2_gc}*h_s_bar_{N2}[4])+(y_{O2_gc}*h_s_bar_{O2}[4])+(y_{CO2_gc}*h_s_bar_{CO2}[4])+(y_{H2O_gc}*h_s_bar_{H2O}[4])$$

"Salida de gases de Combustión"

$$\begin{aligned} h_bar_{CO2}[5]&=enthalpy(CO2,T=T[5]) \\ h_bar_{H2O}[5]&=enthalpy(H2O,T=T[5]) \\ h_bar_{N2}[5]&=enthalpy(N2,T=T[5]) \\ h_bar_{O2}[5]&=enthalpy(O2,T=T[5]) \\ h[5]&=(y_{CO2_gc}*h_bar_{CO2}[5])+(y_{H2O_gc}*h_bar_{H2O}[5])+(y_{N2_gc}*h_bar_{N2}[5])+(y_{O2_gc}*h_bar_{O2}[5]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_bar_{CO2}[5]&=entropy(CO2,T=T[5],P=P[5]) \\ s_bar_{H2O}[5]&=entropy(H2O,T=T[5],P=P[5]) \\ s_bar_{N2}[5]&=entropy(N2,T=T[5],P=P[5]) \\ s_bar_{O2}[5]&=entropy(O2,T=T[5],P=P[5]) \\ s[5]&=(y_{CO2_gc}*s_bar_{CO2}[5])+(y_{H2O_gc}*s_bar_{H2O}[5])+(y_{N2_gc}*s_bar_{N2}[5])+(y_{O2_gc}*s_bar_{O2}[5]) \end{aligned}$$

" BALANCE DE MASA"

$$\begin{aligned} m_dot[3]&=m_dot[1]+m_dot[6] && \text{"balance de masa cámara de combustión"} \\ m_dot[5]&=m_dot[4] && \text{"balance de masa recuperador de calor"} \end{aligned}$$

"BALANCE DE ENERGÍA"

"Compresor de aire"

$$\eta_{CA}=(h_s[2]-h[1])/(h[2]-h[1])$$

$$W_dot_{CA}=(m_dot[1]/MW_{aire})*(h[2]-h[1])$$

"Cámara de combustión"

$$Q_{CC}=((MW_{aire}+MW_f)/(m_dot[3]))*(h[3]-(h[2]+h[6]))$$

"Turbina de Gas"

$$\begin{aligned} W_dot_{TG}&=((m_dot[3])/(MW_{gc}))* (h[3]-h[4]) \\ W_dot_{TG_iso}&=((m_dot[3])/(MW_{gc}))* (h[3]-h_s[4]) \\ \eta_{TG}&=(h[3]-h[4])/(h[3]-h_s[4]) \end{aligned}$$

"Recuperador de calor"

$$Q_{RC}=m_{dot}[3]*cp*(T[4]-T[5])$$

"eficiencia del ciclo"

$$\eta_{CICLO}=(\frac{m_{dot}[3]}{MW_{gc}}*(h[3]-h[4])-(\frac{m_{dot}[1]}{MW_{aire}}*(h[2]-h[1]))}{m_{dot}[6]*PCI})$$

"BALANCE DE ENTROPÍA"

"Compresor"

$$s_{dot_gen_CA}=(\frac{m_{dot}[1]}{MW_{aire}})*(s[2]-s[1])$$

"Cámara de Combustión"

$$s_{dot_gen_CC}=(\frac{m_{dot}[1]}{MW_{aire}})*(s[3]-s[2])$$

"Turbina de Gas"

$$s_{dot_gen_TG}=(\frac{m_{dot}[3]}{MW_{gc}})*(s[4]-s[3])$$

"Recuperador de calor"

$$s_{dot_gen_RC}=(\frac{m_{dot}[3]}{MW_{gc}}*(s[5]-s[4])+(m_{agua}*(s[9]-s[10])))$$

"BALANCE EXERGÉTICO"

$$T[0]=T[1]$$

$$P[0]=P[1]$$

$$h[1]=h[0]$$

$$s[0]=s[1]$$

"Punto 1"

$$A_{dot_f[1]}=(\frac{m_{dot}[1]}{MW_{aire}}*(h[1]-h[0])-(T[0]*(s[1]-s[0])))$$

"Punto2"

$$A_{dot_f[2]}=(\frac{m_{dot}[1]}{MW_{aire}}*(h[2]-h[0])-(T[0]*(s[2]-s[0])))$$

"Fracción de vapor de agua en los productos"

$$x_g=y_{CO2_gc}+y_{N2_gc}+y_{O2_gc}$$

$$p_v=P_{sat}$$

$$P_{sat}=p_{sat}(Water, T=T[1])$$

$$n_v=(x_g*p_v)/(P[5]-p_v)$$

$$n_l=y_{H2O_gc}-n_v$$

$$h_{ref}=\text{enthalpy_formation}(H2O)$$

$$h_{0_gc}=(y_{N2_gc}*h_{bar_N2_a})+(y_{O2_gc}*h_{bar_O2})+(y_{CO2_gc}*h_{bar_CO2_a})+(n_v*h_{bar_H2O})+(h_{ref}*n_l)$$

$$s_{0_gc}=(y_{N2_gc}*s_{bar_N2_a})+(y_{O2_gc}*s_{bar_O2})+(y_{CO2_gc}*s_{bar_CO2_a})+(n_v*s_{bar_H2O})+(s_l*n_l)$$

"punto3"

$$A_{\text{dot}_f[3]} = (m_{\text{dot}[3]}/MW_{\text{gc}}) * (h[3] - h_{0_gc}) - (T[0] * (s[3] - s_{0_gc}))$$

"punto 4"

$$A_{\text{dot}_f[4]} = (m_{\text{dot}[3]}/MW_{\text{gc}}) * (h[4] - h_{0_gc}) - (T[0] * (s[4] - s_{0_gc}))$$

"Punto 5"

$$A_{\text{dot}_f[5]} = (m_{\text{dot}[3]}/MW_{\text{gc}}) * (h[5] - h_{0_gc}) - (T[0] * (s[5] - s_{0_gc}))$$

"Punto 6"

$$A_{\text{dot}_f[6]} = (m_{\text{dot}[6]}/MW_f) * (R * T[1] * \ln(P[6]/P[1]))$$

"Exergía Química"

$$A_{\text{dot}_q[1]} = 0$$

$$A_{\text{dot}_q[2]} = 0$$

"Combustible"

$$a_{\text{q_CO2}} = 14175$$

$$a_{\text{q_N2}} = 639$$

"gases de combustión"

$$a_{\text{q_H2O}_g} = 8636$$

$$a_{\text{q_H2O}_l} = 45$$

$$a_{\text{q_O2}} = 3951$$

"Exergía química del combustible"

$$a_{\text{q}[6]} = PCI * 1.06$$

$$A_{\text{dot}_q[6]} = (m_{\text{dot}[6]}) * a_{\text{q}[6]}$$

"Salida de cámara de combustión"

$$x_t = y_{\text{CO2_gc}} + y_{\text{N2_gc}} + y_{\text{O2_gc}} + n_v$$

$$x_{\text{N2}} = (y_{\text{N2_gc}} * 1) / x_t$$

$$x_{\text{CO2}} = (y_{\text{CO2_gc}} * 1) / x_t$$

$$x_{\text{O2}} = (y_{\text{O2_gc}} * 1) / x_t$$

$$x_{\text{H2O}_g} = (n_v * 1) / x_t$$

$$x_g_l = x_{\text{N2}} + x_{\text{CO2}} + x_{\text{O2}} + x_{\text{H2O}_g}$$

R=8.314 "Constante universal de los gases"

$$a_{\text{q}_g} = ((x_{\text{CO2}} * a_{\text{q_CO2}}) + (x_{\text{N2}} * a_{\text{q_N2}}) + (x_{\text{O2}} * a_{\text{q_O2}}) + (x_{\text{H2O}_g} * a_{\text{q_H2O}_g}) + (R * T[0] * ((x_{\text{CO2}} * \ln(x_{\text{CO2}})) + (x_{\text{N2}} * \ln(x_{\text{N2}})) + (x_{\text{O2}} * \ln(x_{\text{O2}})) + (x_{\text{H2O}_g} * \ln(x_{\text{H2O}_g}))))))$$

$$a_{\text{q}_l} = (n_l * a_{\text{q_H2O}_l})$$

$$a_{\text{q}[3]} = (a_{\text{q}_g * x_t) + a_{\text{q}_l}$$

$$A_{\text{dot}_q[3]} = (m_{\text{dot}[3]}/MW_{\text{gc}}) * a_{\text{q}[3]}$$

$$A_{\dot{q}[4]}=A_{\dot{q}[3]}$$

$$A_{\dot{q}[5]}=A_{\dot{q}[3]}$$

$$A_{\dot{1}}=(A_{\dot{f}[1]}+A_{\dot{q}[1]})$$

$$A_{\dot{2}}=(A_{\dot{f}[2]}+A_{\dot{q}[2]})$$

$$A_{\dot{3}}=(A_{\dot{f}[3]}+A_{\dot{q}[3]})$$

$$A_{\dot{4}}=(A_{\dot{f}[4]}-A_{\dot{q}[4]})$$

$$A_{\dot{5}}=(A_{\dot{f}[5]}+A_{\dot{q}[5]})$$

$$A_{\dot{6}}=(A_{\dot{f}[6]}+A_{\dot{q}[6]})$$

"Compresor de Aire"

$$A_{\dot{7}}=(m_{\dot{1}}/MW_{\text{aire}})*(h[2]-h[1])$$

$$A_{P_CA}=A_{\dot{2}}-A_{\dot{1}}$$

$$\eta_{\text{exe_CA}}=A_{P_CA}/A_{\dot{7}}$$

"Cámara de Combustión"

$$A_{P_CC}=A_{\dot{3}}$$

$$A_{R_CC}=A_{\dot{6}}+A_{\dot{2}}$$

$$\eta_{\text{exe_CC}}=A_{P_CC}/A_{R_CC}$$

"Turbina de gas"

$$A_{\dot{8}}=W_{\dot{TG}}$$

$$A_{R_TG}=A_{\dot{3}}-A_{\dot{4}}$$

$$A_{P_TG}=W_{\dot{TG}}$$

$$\eta_{\text{exe_TG}}=A_{P_TG}/A_{R_TG}$$

"Recuperador de calor"

$$A_{R_RC}=A_{\dot{4}}-A_{\dot{5}}$$

$$A_{P_RC}=66721$$

$$\eta_{\text{exe_RC}}=A_{P_RC}/A_{R_RC}$$

"Eficiencia del ciclo"

$$\eta_{\text{exe_ciclo}}=(W_{\dot{TG}}-W_{\dot{CA}})/(A_{\dot{6}})$$

"CICLO DE GAS 2"

"COMBUSTIBLE"

$y_{CH4}=0.89908$ [-]	"fracción molar de Metano"
$y_{C2H6}=0.05$ [-]	"fracción molar de Etano"
$y_{C3H8}=0.00304$ [-]	"fracción molar de Propano"
$y_{C4H10}=0.00007$ [-]	"fracción molar de Butano"
$y_{C5H12}=0.00002$ [-]	"fracción molar de Pentano"
$y_{C6H14}=0.000013$ [-]	"fracción molar de hexano"
$y_{CO2}=0.00055$ [-]	"fracción molar de Dióxido de carbono"
$y_{N2}=0.04695$ [-]	"fracción molar de Nitrógeno"

"AIRE"

$y_{N2_a}=0.7748$ [-]	"fracción molar de Nitrógeno"
$y_{O2}=0.2059$ [-]	"fracción molar de Oxígeno"
$y_{CO2_a}=0.0003$ [-]	"fracción molar de Dióxido de Carbono"
$y_{H2O}=0.019$ [-]	"fracción molar de agua"

"GASES DE COMBUSTIÓN"

$y_{N2_gc} = y_{N2_a} / (1+f)$ "fracción molar de Nitrógeno"
 $y_{O2_gc} = (y_{O2} - (2*f)) / (1+f)$ "fracción molar de Oxígeno"
 $y_{CO2_gc} = (y_{CO2_a} + f) / (1+f)$ "fracción molar de Dióxido de Carbono"
 $y_{H2O_gc} = (y_{H2O} + (2*f)) / (1+f)$ "fracción molar de Agua"

$$f = (m_dot[16] / m_dot[11]) * (MW_aire / MW_f)$$

"BALANCE ESTEQUIOMETRICO"

$MW_f = y_{CH4} * molar\ mass(CH4) + y_{C2H6} * molar\ mass(C2H6) +$
 $y_{C3H8} * molar\ mass(C3H8) + y_{C4H10} * molar\ mass(C4H10) +$
 $y_{C5H12} * molar\ mass(C5H12) + y_{C6H14} * molar\ mass(C6H14) +$
 $y_{CO2} * molar\ mass(CO2) + y_{N2} * molar\ mass(N2)$ "masa molar del combustible"

$MW_gc = y_{CO2_gc} * molar\ mass(CO2) + y_{H2O_gc} * molar\ mass(H2O) +$
 $y_{N2_gc} * molar\ mass(N2) + y_{O2_gc} * molar\ mass(O2)$ "masa molar de los gases de
 combustión"

$MW_aire = (y_{N2_a} * molar\ mass(N2)) + (y_{O2} * molar\ mass(O2)) +$
 $(y_{CO2_a} * molar\ mass(CO2)) + (y_{H2O} * molar\ mass(H2O))$ "masa molar del aire"

"CICLO DE GAS"

"Datos"

$T[11] = converttemp(C,K,20.3[C])$
 $P[11] = 0.7922 [bar] * convert(bar,MPa)$
 $rc = 13$
 $m_dot[11] = 259.70$
 $T[12] = converttemp(C,K,402.8 [C])$
 $P[12] = 10.22 [bar] * convert(bar,MPa)$
 $T[13] = converttemp(C,K,1041.17[C])$
 $P[13] = 9.709 [bar] * convert(bar,MPa)$
 $T[14] = converttemp(C,K,512.2[C])$
 $P[14] = 0.8106 [bar] * convert(bar,MPa)$
 $m_dot[14] = 264.541$
 $T[15] = converttemp(C,K,160.6[C])$
 $P[15] = 0.7922 [bar] * convert(bar,MPa)$
 $T[16] = converttemp(C,K,26.6[C])$
 $P[16] = 30 [bar] * convert(bar,MPa)$
 $T_ref = converttemp(C,K,20.3[C])$
 $P_ref = 0.7922 [bar] * convert(bar,MPa)$
 $m_dot[16] = 4.8415$
 $PCI = 45936$
 $cp = 1.012$
 $m_agua = 49.27$
 $h[20] = 518.1$
 $h[19] = 3423$
 $s[19] = 6.796$
 $s[20] = 1.545$
 $P[19] = 7.296$

"PROPIEDADES TERMODINAMICAS"

" Entrada del Compresor"

$h_{\text{bar_O2}} = \text{enthalpy}(\text{O2}, T=T[11])$
 $h_{\text{bar_N2_a}} = \text{enthalpy}(\text{N2}, T=T[11])$
 $h_{\text{bar_CO2_a}} = \text{enthalpy}(\text{CO2}, T=T[11])$
 $h_{\text{bar_H2O}} = \text{enthalpy}(\text{H2O}, T=T[11])$
 $h[11] = (y_{\text{N2_a}} * h_{\text{bar_N2_a}}) + (y_{\text{O2}} * h_{\text{bar_O2}}) + (y_{\text{CO2_a}} * h_{\text{bar_CO2_a}}) + (y_{\text{H2O}} * h_{\text{bar_H2O}})$

$s_{\text{bar_O2}} = \text{entropy}(\text{O2}, T=T[11], P=P[11])$
 $s_{\text{bar_N2_a}} = \text{entropy}(\text{N2}, T=T[11], P=P[11])$
 $s_{\text{bar_CO2_a}} = \text{entropy}(\text{CO2}, T=T[11], P=P[11])$
 $s_{\text{bar_H2O}} = \text{entropy}(\text{H2O}, T=T[11], P=P[11])$
 $s[11] = (y_{\text{N2_a}} * s_{\text{bar_N2_a}}) + (y_{\text{O2}} * s_{\text{bar_O2}}) + (y_{\text{CO2_a}} * s_{\text{bar_CO2_a}}) + (y_{\text{H2O}} * s_{\text{bar_H2O}})$

"Salida del Compresor"

$h_{\text{bar_O2}[12]} = \text{enthalpy}(\text{O2}, T=T[12])$
 $h_{\text{bar_N2}[12]} = \text{enthalpy}(\text{N2}, T=T[12])$
 $h_{\text{bar_CO2}[12]} = \text{enthalpy}(\text{CO2}, T=T[12])$
 $h_{\text{bar_H2O}[12]} = \text{enthalpy}(\text{H2O}, T=T[12])$
 $h[12] = (y_{\text{N2_a}} * h_{\text{bar_N2}[12]}) + (y_{\text{O2}} * h_{\text{bar_O2}[12]}) + (y_{\text{CO2_a}} * h_{\text{bar_CO2}[12]}) + (y_{\text{H2O}} * h_{\text{bar_H2O}[12]})$

$s_{\text{bar_O2}[12]} = \text{entropy}(\text{O2}, T=T[12], P=P[12])$
 $s_{\text{bar_N2}[12]} = \text{entropy}(\text{N2}, T=T[12], P=P[12])$
 $s_{\text{bar_CO2}[12]} = \text{entropy}(\text{CO2}, T=T[12], P=P[12])$
 $s_{\text{bar_H2O}[12]} = \text{entropy}(\text{H2O}, T=T[12], P=P[12])$
 $s[12] = (y_{\text{N2_a}} * s_{\text{bar_N2}[12]}) + (y_{\text{O2}} * s_{\text{bar_O2}[12]}) + (y_{\text{CO2_a}} * s_{\text{bar_CO2}[12]}) + (y_{\text{H2O}} * s_{\text{bar_H2O}[12]})$

$s_{\text{bar_O2_s}[12]} = s_{\text{bar_O2}}$
 $s_{\text{bar_N2_s}[12]} = s_{\text{bar_N2_a}}$
 $s_{\text{bar_CO2_s}[12]} = s_{\text{bar_CO2_a}}$
 $s_{\text{bar_H2O_s}[12]} = s_{\text{bar_H2O}}$

$h_{\text{bar_O2_s}[12]} = \text{enthalpy}(\text{O2}, P=P[12], s=s_{\text{bar_O2_s}[12]})$
 $h_{\text{bar_N2_s}[12]} = \text{enthalpy}(\text{N2}, P=P[12], s=s_{\text{bar_N2_s}[12]})$
 $h_{\text{bar_CO2_s}[12]} = \text{enthalpy}(\text{CO2}, P=P[12], s=s_{\text{bar_CO2_s}[12]})$
 $h_{\text{bar_H2O_s}[12]} = \text{enthalpy}(\text{H2O}, P=P[12], s=s_{\text{bar_H2O_s}[12]})$

$h_{\text{s}[12]} = (y_{\text{N2_a}} * h_{\text{bar_N2_s}[12]}) + (y_{\text{O2}} * h_{\text{bar_O2_s}[12]}) + (y_{\text{CO2_a}} * h_{\text{bar_CO2_s}[12]}) + (y_{\text{H2O}} * h_{\text{bar_H2O_s}[12]})$

" Gas Natural"

$h_{\text{bar_CH4}} = \text{enthalpy}(\text{CH4}, T=T[16])$
 $h_{\text{bar_C2H6}} = \text{enthalpy}(\text{C2H6}, T=T[16])$
 $h_{\text{bar_C3H8}} = \text{enthalpy}(\text{C3H8}, T=T[16])$
 $h_{\text{bar_C4H10}} = \text{enthalpy}(\text{C4H10}, T=T[16])$
 $h_{\text{bar_C5H12}} = \text{enthalpy}(\text{C5H12}, T=T[16])$
 $h_{\text{bar_C6H14}} = \text{enthalpy}(\text{C6H14}, T=T[16])$
 $h_{\text{bar_CO2}} = \text{enthalpy}(\text{CO2}, T=T[16])$
 $h_{\text{bar_N2}} = \text{enthalpy}(\text{N2}, T=T[16])$
 $h[16] = (y_{\text{CH4}} * h_{\text{bar_CH4}}) + (y_{\text{C2H6}} * h_{\text{bar_C2H6}}) + (y_{\text{C3H8}} * h_{\text{bar_C3H8}}) + (y_{\text{C4H10}} * h_{\text{bar_C4H10}}) + (y_{\text{C5H12}} * h_{\text{bar_C5H12}}) + (y_{\text{C6H14}} * h_{\text{bar_C6H14}}) + (y_{\text{CO2}} * h_{\text{bar_CO2}}) + (y_{\text{N2}} * h_{\text{bar_N2}})$

$s_{\text{bar_CH4}} = \text{entropy}(\text{CH4}, T=T[16], P=P[16])$

$s_{\text{bar_C2H6}} = \text{entropy}(\text{C2H6}, T=T[16], P=P[16])$
 $s_{\text{bar_C3H8}} = \text{entropy}(\text{C3H8}, T=T[16], P=P[16])$
 $s_{\text{bar_C4H10}} = \text{entropy}(\text{C4H10}, T=T[16], P=P[16])$
 $s_{\text{bar_C5H12}} = \text{entropy}(\text{C5H12}, T=T[16], P=P[16])$
 $s_{\text{bar_C6H14}} = \text{entropy}(\text{C6H14}, T=T[16], P=P[16])$
 $s_{\text{bar_CO2}} = \text{entropy}(\text{CO2}, T=T[16], P=P[16])$
 $s_{\text{bar_N2}} = \text{entropy}(\text{N2}, T=T[16], P=P[16])$
 $s[16] = (y_{\text{CH4}} * s_{\text{bar_CH4}}) + (y_{\text{C2H6}} * s_{\text{bar_C2H6}}) + (y_{\text{C3H8}} * s_{\text{bar_C3H8}}) + (y_{\text{C4H10}} * s_{\text{bar_C4H10}}) + (y_{\text{C5H12}} * s_{\text{bar_C5H12}}) + (y_{\text{C6H14}} * s_{\text{bar_C6H14}}) + (y_{\text{CO2}} * s_{\text{bar_CO2}}) + (y_{\text{N2}} * s_{\text{bar_N2}})$

"Salida Cámara de Combustión"

$h_{\text{bar_CO2}}[13] = \text{enthalpy}(\text{CO2}, T=T[13])$
 $h_{\text{bar_H2O}}[13] = \text{enthalpy}(\text{H2O}, T=T[13])$
 $h_{\text{bar_N2}}[13] = \text{enthalpy}(\text{N2}, T=T[13])$
 $h_{\text{bar_O2}}[13] = \text{enthalpy}(\text{O2}, T=T[13])$
 $h[13] = (y_{\text{N2_gc}} * h_{\text{bar_N2}}[13]) + (y_{\text{O2_gc}} * h_{\text{bar_O2}}[13]) + (y_{\text{CO2_gc}} * h_{\text{bar_CO2}}[13]) + (y_{\text{H2O_gc}} * h_{\text{bar_H2O}}[13])$

$s_{\text{bar_CO2}}[13] = \text{entropy}(\text{CO2}, T=T[13], P=P[13])$
 $s_{\text{bar_H2O}}[13] = \text{entropy}(\text{H2O}, T=T[13], P=P[13])$
 $s_{\text{bar_N2}}[13] = \text{entropy}(\text{N2}, T=T[13], P=P[13])$
 $s_{\text{bar_O2}}[13] = \text{entropy}(\text{O2}, T=T[13], P=P[13])$
 $s[13] = (y_{\text{CO2_gc}} * s_{\text{bar_CO2}}[13]) + (y_{\text{H2O_gc}} * s_{\text{bar_H2O}}[13]) + (y_{\text{N2_gc}} * s_{\text{bar_N2}}[13]) + (y_{\text{O2_gc}} * s_{\text{bar_O2}}[13])$

"Salida Turbina de Gas"

$h_{\text{bar_N2}}[14] = \text{enthalpy}(\text{N2}, T=T[14])$
 $h_{\text{bar_O2}}[14] = \text{enthalpy}(\text{O2}, T=T[14])$
 $h_{\text{bar_CO2}}[14] = \text{enthalpy}(\text{CO2}, T=T[14])$
 $h_{\text{bar_H2O}}[14] = \text{enthalpy}(\text{H2O}, T=T[14])$

$h[14] = (y_{\text{N2_gc}} * h_{\text{bar_N2}}[14]) + (y_{\text{O2_gc}} * h_{\text{bar_O2}}[14]) + (y_{\text{CO2_gc}} * h_{\text{bar_CO2}}[14]) + (y_{\text{H2O_gc}} * h_{\text{bar_H2O}}[14])$

$s_{\text{bar_N2}}[14] = \text{entropy}(\text{N2}, T=T[14], P=P[14])$
 $s_{\text{bar_O2}}[14] = \text{entropy}(\text{O2}, T=T[14], P=P[14])$
 $s_{\text{bar_CO2}}[14] = \text{entropy}(\text{CO2}, T=T[14], P=P[14])$
 $s_{\text{bar_H2O}}[14] = \text{entropy}(\text{H2O}, T=T[14], P=P[14])$

$s[14] = (y_{\text{N2_gc}} * s_{\text{bar_N2}}[14]) + (y_{\text{O2_gc}} * s_{\text{bar_O2}}[14]) + (y_{\text{CO2_gc}} * s_{\text{bar_CO2}}[14]) + (y_{\text{H2O_gc}} * s_{\text{bar_H2O}}[14])$

$s_{\text{bar_N2}}[13] = s_{\text{bar_N2}}[14]$
 $s_{\text{bar_O2}}[13] = s_{\text{bar_O2}}[14]$
 $s_{\text{bar_CO2}}[13] = s_{\text{bar_CO2}}[14]$
 $s_{\text{bar_H2O}}[13] = s_{\text{bar_H2O}}[14]$

$h_{\text{s_bar_N2}}[14] = \text{enthalpy}(\text{N2}, s=s_{\text{bar_N2}}[13], P=P[14])$
 $h_{\text{s_bar_O2}}[14] = \text{enthalpy}(\text{O2}, s=s_{\text{bar_O2}}[13], P=P[14])$
 $h_{\text{s_bar_CO2}}[14] = \text{enthalpy}(\text{CO2}, s=s_{\text{bar_CO2}}[13], P=P[14])$
 $h_{\text{s_bar_H2O}}[14] = \text{enthalpy}(\text{H2O}, s=s_{\text{bar_H2O}}[13], P=P[14])$

$h_{\text{s}}[14] = (y_{\text{N2_gc}} * h_{\text{s_bar_N2}}[14]) + (y_{\text{O2_gc}} * h_{\text{s_bar_O2}}[14]) + (y_{\text{CO2_gc}} * h_{\text{s_bar_CO2}}[14]) + (y_{\text{H2O_gc}} * h_{\text{s_bar_H2O}}[14])$

"Salida de gases de Combustión"

$$h_{\text{bar_CO2}}[15]=\text{enthalpy}(\text{CO2},T=T[15])$$

$$h_{\text{bar_H2O}}[15]=\text{enthalpy}(\text{H2O},T=T[15])$$

$$h_{\text{bar_N2}}[15]=\text{enthalpy}(\text{N2},T=T[15])$$

$$h_{\text{bar_O2}}[15]=\text{enthalpy}(\text{O2},T=T[15])$$

$$h[15]=(y_{\text{CO2_gc}}*h_{\text{bar_CO2}}[15])+(y_{\text{H2O_gc}}*h_{\text{bar_H2O}}[15])+(y_{\text{N2_gc}}*h_{\text{bar_N2}}[15])+(y_{\text{O2_gc}}*h_{\text{bar_O2}}[15])$$

$$s_{\text{bar_CO2}}[15]=\text{entropy}(\text{CO2},T=T[15],P=P[15])$$

$$s_{\text{bar_H2O}}[15]=\text{entropy}(\text{H2O},T=T[15],P=P[15])$$

$$s_{\text{bar_N2}}[15]=\text{entropy}(\text{N2},T=T[15],P=P[15])$$

$$s_{\text{bar_O2}}[15]=\text{entropy}(\text{O2},T=T[15],P=P[15])$$

$$s[15]=(y_{\text{CO2_gc}}*s_{\text{bar_CO2}}[15])+(y_{\text{H2O_gc}}*s_{\text{bar_H2O}}[15])+(y_{\text{N2_gc}}*s_{\text{bar_N2}}[15])+(y_{\text{O2_gc}}*s_{\text{bar_O2}}[15])$$

" BALANCE DE MASA"

$$m_{\text{dot}}[13]=m_{\text{dot}}[11]+m_{\text{dot}}[16] \text{ "balance de masa cámara de combustión"}$$

$$m_{\text{dot}}[15]=m_{\text{dot}}[14] \text{ "balance de masa recuperador de calor"}$$

"BALANCE DE ENERGÍA"

"Compresor"

$$\eta_{\text{CA}}=(h_{\text{s}}[12]-h[11])/(h[12]-h[11])$$

$$W_{\text{dot_CA}}=(m_{\text{dot}}[11]/MW_{\text{aire}})*(h[12]-h[11])$$

"Cámara de combustión"

$$Q_{\text{CC}}=((MW_{\text{aire}}+MW_{\text{f}})/(m_{\text{dot}}[13]))*(h[13]-(h[12]+h[16]))$$

"Turbina de Gas"

$$W_{\text{dot_TG}}=((m_{\text{dot}}[13])/(MW_{\text{gc}}))*(h[13]-h[14])$$

$$W_{\text{dot_TG_iso}}=((m_{\text{dot}}[13])/(MW_{\text{gc}}))*(h[13]-h_{\text{s}}[14])$$

$$\eta_{\text{TG}}=(h[13]-h[14])/(h[13]-h_{\text{s}}[14])$$

"Recuperador de calor"

$$Q_{\text{RC}}=m_{\text{dot}}[13]*c_p*(T[14]-T[15])$$

"eficiencia del ciclo"

$$\eta_{\text{CICLO}}=((m_{\text{dot}}[13]/MW_{\text{gc}})*(h[13]-h[14])-(m_{\text{dot}}[11]/MW_{\text{aire}})*(h[12]-h[11]))/(m_{\text{dot}}[16]*\text{PCI})$$

"BALANCE DE ENTROPÍA"

"Compresor"

$$s_{\text{dot_gen_CA}}=(m_{\text{dot}}[11]/MW_{\text{aire}})*(s[12]-s[11])$$

"Cámara de Combustión"

$$s_dot_gen_CC=(m_dot[11])/(MW_aire)*(s[13]-s[12])$$

"Turbina de Gas"

$$s_dot_gen_TG=((m_dot[13])/(MW_gc))*(s[14]-s[13])$$

"Recuperador de calor"

$$s_dot_gen_RC=(m_dot[13])/(MW_gc)*(s[15]-s[14])+(m_agua*(s[19]-s[20]))$$

"BALANCE EXERGÉTICO"

$$T[0]=T[11]$$

$$P[0]=P[11]$$

$$h[11]=h[0]$$

$$s[0]=s[11]$$

"Punto 11"

$$A_dot_f[11]= (m_dot[11]/MW_aire) *(h[11]-h[0])-(T[0]*(s[11]-s[0]))$$

"Punto2"

$$A_dot_f[12]= (m_dot[11]/MW_aire) *(h[12]-h[0])-(T[0]*(s[12]-s[0]))$$

"Fracción de vapor de agua en los productos"

$$x_g=y_CO2_gc+y_N2_gc+y_O2_gc$$

$$p_v=P_sat$$

$$P_sat=p_sat(Water, T=T[11])$$

$$n_v=(x_g*p_v)/(P[15]-p_v)$$

$$n_l=y_H2O_gc-n_v$$

$$h_ref=enthalpy_formation(H2O)$$

$$s_l=69.948$$

$$h_0_gc=(y_N2_gc*h_bar_N2_a)+(y_O2_gc*h_bar_O2)+(y_CO2_gc*h_bar_CO2_a)+(n_v*h_bar_H2O)+(h_ref*n_l)$$

$$s_0_gc=(y_N2_gc*s_bar_N2_a)+(y_O2_gc*s_bar_O2)+(y_CO2_gc*s_bar_CO2_a)+(n_v*s_bar_H2O)+(s_l*n_l)$$

"punto 13"

$$A_dot_f[13]= (m_dot[13]/MW_gc) *(h[13]-h_0_gc)-(T[0]*(s[13]-s_0_gc))$$

"punto 14"

$$A_dot_f[14]= (m_dot[13]/MW_gc) *(h[14]-h_0_gc)-(T[0]*(s[14]-s_0_gc))$$

"Punto 15"

$$A_dot_f[15]= (m_dot[13]/MW_gc) *(h[15]-h_0_gc)-(T[0]*(s[15]-s_0_gc))$$

"Punto 6"

$$A_{\text{dot}}f[16]=(m_{\text{dot}}[16]/MW_f)*(R*T[11]*\ln(P[16]/P[11]))$$

"Exergía Química"

$$A_{\text{dot}}q[11]=0$$

$$A_{\text{dot}}q[12]=0$$

"Combustible"

$$a_q_{\text{CO2}}=14175$$

$$a_q_{\text{N2}}=639$$

"gases de combustión"

$$a_q_{\text{H2O}_g}=8636$$

$$a_q_{\text{H2O}_l}=45$$

$$a_q_{\text{O2}}=3951$$

"Exergía química del combustible"

$$a_q[16]=PCI*1.06$$

$$A_{\text{dot}}q[16]=(m_{\text{dot}}[16])*a_q[16]$$

"Salida de cámara de combustión"

$$x_t=y_{\text{CO2}_g}+y_{\text{N2}_g}+y_{\text{O2}_g}+n_v$$

$$x_{\text{N2}}=(y_{\text{N2}_g}*1)/x_t$$

$$x_{\text{CO2}}=(y_{\text{CO2}_g}*1)/x_t$$

$$x_{\text{O2}}=(y_{\text{O2}_g}*1)/x_t$$

$$x_{\text{H2O}_g}=(n_v*1)/x_t$$

$$x_g_l=x_{\text{N2}}+x_{\text{CO2}}+x_{\text{O2}}+x_{\text{H2O}_g}$$

R=8.314 "Constante universal de los gases"

$$a_q_g=((x_{\text{CO2}}*a_q_{\text{CO2}})+(x_{\text{N2}}*a_q_{\text{N2}})+(x_{\text{O2}}*a_q_{\text{O2}})& \\ + (x_{\text{H2O}_g}*a_q_{\text{H2O}_g})+(R*T[0]*((x_{\text{CO2}}*\ln(x_{\text{CO2}}))+(x_{\text{N2}}*\ln(x_{\text{N2}}))& \\ + (x_{\text{O2}}*\ln(x_{\text{O2}}))+(x_{\text{H2O}_g}*\ln(x_{\text{H2O}_g}))))))$$

$$a_q_l=(n_l*a_q_{\text{H2O}_l})$$

$$a_q[13]=(a_q_g*x_t)+a_q_l$$

$$A_{\text{dot}}q[13]=(m_{\text{dot}}[13]/MW_g)*a_q[13]$$

$$A_{\text{dot}}q[14]=A_{\text{dot}}q[13]$$

$$A_{\text{dot}}q[15]=A_{\text{dot}}q[13]$$

$$A_{\text{dot}}[11]=(A_{\text{dot}}f[11]+A_{\text{dot}}q[11])$$

$$A_{\text{dot}}[12]=(A_{\text{dot}}f[12]+A_{\text{dot}}q[12])$$

$$A_{\text{dot}}[13]=(A_{\text{dot}}f[13]+A_{\text{dot}}q[13])$$

$$A_{\text{dot}}[14]=(A_{\text{dot}}f[14]-A_{\text{dot}}q[14])$$

$$A_{\text{dot}}[15]=(A_{\text{dot}}f[15]+A_{\text{dot}}q[15])$$

$$A_{\text{dot}}[16]=(A_{\text{dot}}f[16]+A_{\text{dot}}q[16])$$

"Compresor de Aire"

$$A_{\text{dot}}[17]=(m_{\text{dot}}[11]/MW_{\text{aire}})*(h[12]-h[11])$$

$$A_P_CA=A_dot[12]-A_dot[11]$$

$$eta_exe_CA=A_P_CA/A_dot[17]$$

"Cámara de Combustión"

$$A_P_CC=A_dot[13]$$

$$A_R_CC=A_dot[16]+A_dot[12]$$

$$eta_exe_CC=A_P_CC/A_R_CC$$

"Turbina de gas"

$$A_dot[18]=W_dot_TG$$

$$A_R_TG=A_dot[13]-A_dot[14]$$

$$A_P_TG=W_dot_TG$$

$$eta_exe_TG=A_P_TG/A_R_TG$$

"Recuperador de calor"

$$A_R_RC=A_dot[14]-A_dot[15]$$

$$A_P_RC=66721$$

$$eta_exe_RC=A_P_RC/A_R_RC$$

"Eficiencia del ciclo"

$$eta_exe_ciclo=(W_dot_TG-W_dot_CA)/(A_dot[16])$$

"CICLO DE VAPOR"

$$T[9]=\text{converttemp}(C,K,506.66[C])$$

$$P[9]=7.296$$

$$m_dot[9]=49.265$$

$$T[19]=\text{converttemp}(C,K,506.66[C])$$

$$P[19]=7.296$$

$$m_dot[19]=49.265$$

$$T[21]=\text{converttemp}(C,K,506.66[C])$$

$$P[21]=7.296$$

$$m_dot[21]=98.53$$

$$T[22]=\text{converttemp}(C,K,120.5[C])$$

$$P[22]=0.2$$

$$m_dot[22]=12.91$$

$$T[31]=\text{converttemp}(C,K,120.5[C])$$

$$P[31]=0.2$$

$$T[34]=\text{converttemp}(C,K,120.5[C])$$

$$P[34]=0.2$$

$$T[24]=\text{converttemp}(C,K,42[C])$$

$$h[24]=2325.56$$

$$P[24]=0.00821$$

$$T[25]=\text{converttemp}(C,K,27.44[C])$$

$$P[25]=0.15$$

$$T[26]=\text{converttemp}(C,K,37.52[C])$$

$$P[26]=0.09$$

$$P[27]=P[24]$$

$$T[27]=T[24]$$

$$T[29]=\text{converttemp}(C,K,42.1[C])$$

$$P[29]=1.337$$

$$T[30]=\text{converttemp}(C,K,42.1[C])$$

P[30]=1.337
 T[32]= **converttemp**(C,K,121.1[C])
 P[32]=0.4142
 T[35]= **converttemp**(C,K,121.1[C])
 P[35]=0.4142

P[10]=P[9]
 T[10]=**converttemp**(C,K,122.1[C])
 P[20]=P[19]
 T[20]=**converttemp**(C,K,122.1[C])

T[0]=**converttemp**(C,K,22.2[C])
 P[0]=0.07922

"Punto 9"

h[9]=**enthalpy**(*Water*,T=T[9],P=P[9])
 s[9]=**entropy**(*Water*,T=T[9],P=P[9])

"Punto 19"

h[19]=**enthalpy**(*Water*,T=T[19],P=P[19])
 s[19]=**entropy**(*Water*,T=T[19],P=P[19])

"Punto 21"

h[21]=**enthalpy**(*Water*,T=T[21],P=P[21])
 s[21]=**entropy**(*Water*,T=T[21],P=P[21])

"Punto 22"

h[22]=**enthalpy**(*Water*,T=T[22],P=P[22])
 s[22]=**entropy**(*Water*,T=T[22],P=P[22])
 s_s[22]=s[21]
 h_s[22]=**enthalpy**(*Water*,s=s_s[22],P=P[22])

"Punto 24"

x[24]=**quality**(*Water*,T=T[24],h=h[24])
 s[24]=**entropy**(*Water*,T=T[24],x=x[24])
 s_s[24]=s[21]
 h_s[24]=**enthalpy**(*Water*,s=s_s[24],P=P[24])

"Punto 25"

h[25]=**enthalpy**(*Water*,T=T[25],P=P[25])
 s[25]=**entropy**(*Water*,T=T[25],P=P[25])

"Punto 26"

h[26]=**enthalpy**(*Water*,T=T[26],P=P[26])
 s[26]=**entropy**(*Water*,T=T[26],P=P[26])

"punto 27"

x[27]=0
 h[27]=**enthalpy**(*Water*,x=x[27],P=P[27])
 s[27]=**entropy**(*Water*,x=x[27],P=P[27])

"punto 29"

h[29]=**enthalpy**(*Water*,T=T[29],P=P[29])
 s[29]=**entropy**(*Water*,T=T[29],P=P[29])
 s_s[29]=s[27]
 h_s[29]=**enthalpy**(*Water*,s=s_s[29],P=P[29])

"punto 30"

$h[30]=\text{enthalpy}(\text{Water},T=T[29],P=P[29])$
 $s[30]=\text{entropy}(\text{Water},T=T[29],P=P[29])$
 $s_s[30]=s[27]$
 $h_s[30]=\text{enthalpy}(\text{Water},s=s_s[30],P=P[30])$

"punto 31"

$h[31]=\text{enthalpy}(\text{Water},T=T[31],P=P[31])$
 $s[31]=\text{entropy}(\text{Water},T=T[31],P=P[31])$

"punto 32"

$h[32]=\text{enthalpy}(\text{Water},T=T[32],P=P[32])$
 $s[32]=\text{entropy}(\text{Water},T=T[32],P=P[32])$

"punto 34"

$h[34]=\text{enthalpy}(\text{Water},T=T[34],P=P[34])$
 $s[34]=\text{entropy}(\text{Water},T=T[34],P=P[34])$

"punto 35"

$h[35]=\text{enthalpy}(\text{Water},T=T[35],P=P[35])$
 $s[35]=\text{entropy}(\text{Water},T=T[35],P=P[35])$

"Punto 10"

$h[10]=\text{enthalpy}(\text{Water},T=T[10],P=P[10])$
 $s[10]=\text{entropy}(\text{Water},T=T[10],P=P[10])$
 $s_s[10]=s[32]$
 $h_s[10]=\text{enthalpy}(\text{Water},s=s_s[10],P=P[10])$

"Punto 20"

$h[20]=\text{enthalpy}(\text{Water},T=T[20],P=P[20])$
 $s[20]=\text{entropy}(\text{Water},T=T[20],P=P[20])$
 $s_s[20]=s[35]$
 $h_s[20]=\text{enthalpy}(\text{Water},s=s_s[20],P=P[20])$

"BALANCE DE MASA"

$m_dot[24]=m_dot[21]-m_dot[22]$
 $m_dot[24]=m_dot[27]$
 $m_dot[25]=4368$
 $m_dot[29]=(0.5)*m_dot[24]$
 $m_dot[30]=(0.5)*m_dot[24]$
 $m_dot[31]=(0.5)*m_dot[22]$
 $m_dot[34]=(0.5)*m_dot[22]$
 $m_dot[32]=m_dot[31]+m_dot[30]$
 $m_dot[35]=m_dot[34]+m_dot[29]$

"BALANCE DE ENERGÍA"

"Turbina de Vapor"

$W_dot_TV=(m_dot[21]*h[21])-(m_dot[22]*h[22]+m_dot[24]*h[24])$
 $W_dot_TV_iso=(m_dot[21]*h[21])-(m_dot[22]*h_s[22]+m_dot[24]*h_s[24])$

$\eta_{TV}=W_dot_TV/W_dot_TV_iso$

"Condensador"

$$Q_{\text{dot}_C} = m_{\text{dot}[24]} \cdot (h[24] - h[27])$$

"Bomba de Agua de Condensado"

$$W_{\text{dot}_BAC} = (m_{\text{dot}[27]} \cdot (h[29] - h[27])) / \eta_{BAC}$$

$$\eta_{BAC} = (h_s[29] - h[27]) / (h[29] - h[27])$$

"Bomba de Agua de Alimentación"

$$W_{\text{dot}_BAA1} = (m_{\text{dot}[32]} \cdot (h[10] - h[32])) / \eta_{BAA1}$$

$$\eta_{BAA1} = (h_s[10] - h[32]) / (h[10] - h[32])$$

$$W_{\text{dot}_BAA2} = (m_{\text{dot}[35]} \cdot (h[20] - h[35])) / \eta_{BAA2}$$

$$\eta_{BAA2} = (h_s[20] - h[35]) / (h[20] - h[35])$$

"Balance de Segunda Ley"

"Turbina de Vapor"

$$S_{\text{dot}_{\text{gen}_{TV}}} = (m_{\text{dot}[24]} \cdot s[24] + m_{\text{dot}[22]} \cdot s[22]) - m_{\text{dot}[21]} \cdot s[21]$$

"Condensador"

$$S_{\text{dot}_{\text{gen}_C}} = m_{\text{dot}[24]} \cdot (s[27] - s[24]) + m_{\text{dot}[25]} \cdot (s[26] - s[25])$$

"Bomba de agua de Condensado"

$$S_{\text{dot}_{\text{gen}_BAC}} = m_{\text{dot}[27]} \cdot (s[29] - s[27])$$

"Deaerador"

$$S_{\text{dot}_{\text{gen}_{D1}}} = m_{\text{dot}[32]} \cdot ((s[31] + s[30]) - s[32])$$

$$S_{\text{dot}_{\text{gen}_{D2}}} = m_{\text{dot}[35]} \cdot ((s[34] + s[29]) - s[35])$$

"Bomba de agua de Alimentación"

$$S_{\text{dot}_{\text{gen}_BAA1}} = m_{\text{dot}[32]} \cdot (s[10] - s[32])$$

$$S_{\text{dot}_{\text{gen}_BAA2}} = m_{\text{dot}[35]} \cdot (s[20] - s[35])$$

"BALANCE EXERGÉTICO"

$$h[0] = \text{enthalpy}(\text{Water}, T=T[0], P=P[0])$$

$$s[0] = \text{entropy}(\text{Water}, T=T[0], P=P[0])$$

$$a[9] = h[9] - h[0] - T[0] \cdot (s[9] - s[0])$$

$$a[10] = h[10] - h[0] - T[0] \cdot (s[10] - s[0])$$

$$a[19] = h[19] - h[0] - T[0] \cdot (s[19] - s[0])$$

$$a[20] = h[20] - h[0] - T[0] \cdot (s[20] - s[0])$$

$$a[21] = h[21] - h[0] - T[0] \cdot (s[21] - s[0])$$

$$a[22] = h[22] - h[0] - T[0] \cdot (s[22] - s[0])$$

$$a[24] = h[24] - h[0] - T[0] \cdot (s[24] - s[0])$$

$$a[25] = h[25] - h[0] - T[0] \cdot (s[25] - s[0])$$

$$a[26] = h[26] - h[0] - T[0] \cdot (s[26] - s[0])$$

$$a[27] = h[27] - h[0] - T[0] \cdot (s[27] - s[0])$$

$$a[29] = h[29] - h[0] - T[0] \cdot (s[29] - s[0])$$

$$a[30] = h[30] - h[0] - T[0] \cdot (s[30] - s[0])$$

$$\begin{aligned} a[31] &= h[31] - h[0] - T[0] * (s[31] - s[0]) \\ a[32] &= h[32] - h[0] - T[0] * (s[32] - s[0]) \\ a[34] &= h[34] - h[0] - T[0] * (s[34] - s[0]) \\ a[35] &= h[35] - h[0] - T[0] * (s[35] - s[0]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_dot[9] &= m_dot[9] * a[9] \\ A_dot[10] &= m_dot[19] * a[10] \\ A_dot[19] &= m_dot[19] * a[19] \\ A_dot[20] &= m_dot[19] * a[20] \\ A_dot[21] &= m_dot[21] * a[21] \\ A_dot[22] &= m_dot[22] * a[22] \\ A_dot[23] &= W_dot_TV \\ A_dot[24] &= m_dot[24] * a[24] \\ A_dot[25] &= m_dot[25] * a[25] \\ A_dot[26] &= m_dot[25] * a[26] \\ A_dot[27] &= m_dot[27] * a[27] \\ A_dot[28] &= W_dot_BAC \\ A_dot[29] &= m_dot[29] * a[29] \\ A_dot[30] &= m_dot[30] * a[30] \\ A_dot[31] &= m_dot[31] * a[31] \\ A_dot[32] &= m_dot[32] * a[32] \\ A_dot[33] &= W_dot_BAA1 \\ A_dot[34] &= m_dot[34] * a[34] \\ A_dot[35] &= m_dot[35] * a[35] \\ A_dot[36] &= W_dot_BAA2 \end{aligned}$$

"Turbina de Vapor"

$$\begin{aligned} A_P_TV &= W_dot_TV \\ A_R_TV &= A_dot[21] - A_dot[22] - A_dot[24] \\ eta_exe_TV &= A_P_TV / A_R_TV \end{aligned}$$

"Condensador"

$$\begin{aligned} A_P_C &= A_dot[26] - A_dot[25] \\ A_R_C &= A_dot[24] - A_dot[27] \\ eta_exe_C &= A_P_C / A_R_C \end{aligned}$$

"Bomba Agua de condensado"

$$\begin{aligned} A_P_BAC &= A_dot[29] + A_dot[30] - A_dot[27] \\ A_R_BAC &= W_dot_BAC \\ eta_exe_BAC &= (A_P_BAC / A_R_BAC) \end{aligned}$$

"Deaerator1"

$$\begin{aligned} A_P_D1 &= A_dot[32] \\ A_R_D1 &= A_dot[31] + A_dot[30] \\ eta_exe_D1 &= A_P_D1 / A_R_D1 \end{aligned}$$

"Deaerator2"

$$\begin{aligned} A_P_D2 &= A_dot[35] \\ A_R_D2 &= A_dot[34] + A_dot[29] \\ eta_exe_D2 &= A_P_D2 / A_R_D2 \end{aligned}$$

"Bomba de agua de alimentación"

$$A_P_BAA1 = A_dot[10] - A_dot[32]$$

A_R_BAA1=W_dot_BAA1
eta_exe_BAA1=(A_P_BAA1/A_R_BAA1)

"Bomba de agua de alimentación2"
A_P_BAA2=A_dot[20]-A_dot[35]
A_R_BAA2=W_dot_BAA2
eta_exe_BAA2=(A_P_BAA2/A_R_BAA2)

"Recuperador de Calor1"
A_P_RC1=(A_dot[9]-A_dot[10])

"Recuperador de Calor2"
A_P_RC2=(A_dot[19]-A_dot[20])

"Exergia Destruida"

"Turbina de Vapor"
A_dot_D_TV=A_dot[21]-A_dot[22]-A_dot[24]-A_dot[23]

"Condensador"

A_dot_D_C=(A_dot[24]-A_dot[27])+(A_dot[26]-A_dot[25])+Q_dot_C*(1-T[0]/T[27])

"Bomba de Agua de Condensado"

A_dot_D_BAC=A_dot[28]-((A_dot[29]+A_dot[30])-A_dot[27])

"Deareador"

A_dot_D_D_1=A_dot[31]+A_dot[29]-A_dot[32]
A_dot_D_D_2=A_dot[30]+A_dot[34]-A_dot[35]

"Bomba de Agua de Alimentación"

A_dot_D_BAA_1=A_dot[33]-(A_dot[10]-A_dot[32])

A_dot_D_BAA_2=A_dot[36]-(A_dot[20]-A_dot[35]) "Ciclo de Vapor"

"BALANCE DE IMPACTO AMBIENTAL"

"COMBUSTIBLE"

y_CH4=0.89908 [-]	"fracción molar de metano"
y_C2H6=0.05 [-]	"fracción molar de etano"
y_C3H8=0.00304 [-]	"fracción molar de Propano"
y_C4H10=0.00007 [-]	"fracción molar de butano"
y_C5H12=0.00002 [-]	"fracción molar de pentano"
y_C6H14=0.000013 [-]	"fracción molar de hexano"
y_CO2=0.00055 [-]	"fracción molar de dióxido de carbono"
y_N2=0.04695 [-]	"fracción molar de nitrógeno"

"AIRE"

y_N2_a=0.7748 [-]	"fracción molar de nitrógeno"
y_O2=0.2059 [-]	"fracción molar de oxígeno"
y_CO2_a=0.0003 [-]	"fracción molar de dióxido de carbono"

y_H2O=0.019 [-] "fracción molar de agua"

"GASES DE COMBUSTIÓN 1"

y_N2_gc_1=0.752 "fracción molar de Nitrógeno"
 y_O2_gc_1=0.1409 "fracción molar de Oxígeno"
 y_CO2_gc_1=0.02974 "fracción molar de Dióxido de Carbono"
 y_H2O_gc_1=0.07734 "fracción molar de Agua"
 y_SO2_gc_1=0 "fracción molar dióxido de azufre"
 y_NO2_gc_1=0 "fracción molar dióxido de nitrógeno"

"GASES DE COMBUSTIÓN 2"

y_N2_gc_2=0.7515 "fracción molar de Nitrógeno"
 y_O2_gc_2=0.1402 "fracción molar de Oxígeno"
 y_CO2_gc_2=0.03006 "fracción molar de Dióxido de Carbono"
 y_H2O_gc_2=0.07797 "fracción molar de Agua"
 y_SO2_gc_2=0 "fracción molar dióxido de azufre"
 y_NO2_gc_2=0 "fracción molar dióxido de nitrógeno"

W_dot_TV= 103228
 W_dot_TG_1= 171909
 W_dot_TG_2=170664
 W_dot_BAA_1= 446.6
 W_dot_BAA_2=446.6
 W_dot_BAC=132.2
 W_dot_CA_1=105840
 W_dot_CA_2=104240
 m_dot[6]=4.8658
 m_dot[16]=4.8415

CO2_e=(CO2)+700*(SO2)+1000*(NOx)
 CO2=y_CO2_gc_1*molarmass(CO2)+y_CO2_gc_2*molarmass(CO2)
 SO2=y_SO2_gc_1*molarmass(SO2)+y_SO2_gc_2*molarmass(SO2)
 NOx=y_NO2_gc_1*molarmass(NO2)+NO2_gc_2*molarmass(NO2)
 NOx=0
 PCI=45936

H=CO2_e*1000/PCI

eta_ciclo=((W_dot_TG_1+W_dot_TG_2+W_dot_TV)-
 (W_dot_BAA_1+W_dot_BAA_2+W_dot_BAC+W_dot_CA_1+W_dot_CA_2))
 /((m_dot[6]*PCI)+(m_dot[16]*PCI))

eta_eco=((0.204*eta_ciclo)/(eta_ciclo+H))*ln(135-H)^0.5
 eta_exe=((W_dot_TG_1+W_dot_TG_2+W_dot_TV)-
 (W_dot_BAA_1+W_dot_BAA_2+W_dot_BAC+W_dot_CA_1+W_dot_CA_2))/((m_dot[6]*PCI*1.06)+(m_dot[16]*PCI*1.06))

"BALANCE TERMEOECONÓMICO"

A_dot[1]=0
 A_dot[2]=104.782
 A_dot[3]=327.707
 A_dot[4]=152.702
 A_dot[5]=53.487

$A_dot[6]=238.228$
 $A_dot[7]=105.840$
 $A_dot[8]=171.909$
 $A_dot[9]=69.937$
 $A_dot[10]=3.216$
 $A_dot[11]=0$
 $A_dot[12]=103.152$
 $A_dot[13]=325.474$
 $A_dot[14]=151.570$
 $A_dot[15]=55.601$
 $A_dot[16]=238.209$
 $A_dot[17]=104.240$
 $A_dot[18]=170.664$
 $A_dot[19]=69.937$
 $A_dot[20]=3.216$
 $A_dot[21]=139.874$
 $A_dot[22]=7.814$
 $A_dot[23]=103.228$
 $A_dot[24]=11.785$
 $A_dot[25]=1.149$
 $A_dot[26]=7.065$
 $A_dot[27]=0.2217$
 $A_dot[28]=0.1322$
 $A_dot[29]=0.1688$
 $A_dot[30]=0.1688$
 $A_dot[31]=3.907$
 $A_dot[32]=2.835$
 $A_dot[33]=0.4466$
 $A_dot[34]=3.907$
 $A_dot[35]=2.835$
 $A_dot[36]=0.4466$
 $A_dot[37]=11.56$

$s[9]=6.796$
 $s[10]=1.544$
 $s[19]=6.796$
 $s[20]=1.544$
 $s[21]=6.796$
 $s[22]=7.129$
 $s[24]=7.42$
 $s[27]=0.599$
 $s[29]=0.5997$
 $s[30]=0.5997$
 $s[31]=7.129$
 $s[32]=1.539$
 $m_dot[9]=49.27$
 $m_dot[21]=98.53$
 $m_dot[22]=12.91$
 $m_dot[24]=85.62$
 $m_dot[29]=42.81$
 $m_dot[31]=6.455$

$RC_P=(m_dot[9]*s[9]-m_dot[9]*s[10])/(m_dot[24]*s[24]-m_dot[24]*s[27])$
 $TV_P=((m_dot[24]*s[24])+(m_dot[22]*s[22])-(m_dot[21]*s[21]))/(m_dot[24]*s[24]-m_dot[24]*s[27])$
 $BAC_P=((s[29]*m_dot[9])+(s[30]*m_dot[29])-(s[27]*m_dot[24]))/(m_dot[24]*s[24]-m_dot[24]*s[27])$
 $D_P=(m_dot[9]*s[32]-(m_dot[31]*s[31]+m_dot[29]*s[29]))/(m_dot[24]*s[24]-m_dot[24]*s[27])$
 $BAA_P=(m_dot[9]*s[10]-m_dot[9]*s[32])/(m_dot[24]*s[24]-m_dot[24]*s[27])$

"Costo Exergético Unitario"

"CICLO DE GAS 1"

$k[7]*A_dot[7]=k[2]*A_dot[2]-k[1]*A_dot[1]$ "Compresor"
 $k[2]*A_dot[2]+k[6]*A_dot[6]=k[3]*A_dot[3]-k[5]*A_dot[5]$ "Cámara de Combustión"
 $k[3]*A_dot[3]-k[4]*A_dot[4]=k[8]*A_dot[8]$ "Turbina de gas"
 $k[4]*A_dot[4]-k[5]*A_dot[5]=k[9]*A_dot[9]-k[10]*A_dot[10]-(RC_P*A_dot[37]*k[37])$
 "Recuperador de Calor"

"CICLO DE GAS 2"

$k[17]*A_dot[17]=k[12]*A_dot[12]-k[11]*A_dot[11]$ "Compresor"
 $k[12]*A_dot[12]+k[16]*A_dot[16]=k[13]*A_dot[13]-k[15]*A_dot[15]$ "Cámara de Combustión"
 $k[13]*A_dot[13]-k[14]*A_dot[14]=k[18]*A_dot[18]$ "Turbina de gas"
 $k[14]*A_dot[14]-k[15]*A_dot[15]=k[19]*A_dot[19]-k[20]*A_dot[20]-(RC_P*A_dot[37]*k[37])$
 "Recuperador de Calor"

"CICLO DE VAPOR"

$k[9]*A_dot[9]+k[19]*A_dot[19]=k[21]*A_dot[21]$
 $k[21]*A_dot[21]-k[22]*A_dot[22]-k[24]*A_dot[24]=k[23]*A_dot[23]-(TV_P*A_dot[37]*k[37])$ "Turbina de Vapor"
 $k[24]*A_dot[24]-k[27]*A_dot[27]=k[37]*A_dot[37]$ "Condensador"
 $k[29]*A_dot[29]+k[30]*A_dot[30]-k[27]*A_dot[27]=k[28]*A_dot[28]-(BAC_P*A_dot[37]*k[37])$ "Bomba de agua de Condensado"
 $k[30]*A_dot[30]+k[31]*A_dot[31]=k[32]*A_dot[32]-(D_P*A_dot[37]*k[37])$ "Deareador1"
 $k[29]*A_dot[29]+k[34]*A_dot[34]=k[35]*A_dot[35]-(D_P*A_dot[37]*k[37])$ "Deareador2"
 $k[10]*A_dot[10]-k[32]*A_dot[32]=k[33]*A_dot[33]-(BAA_P*A_dot[37]*k[37])$ "Bomba de agua de alimentación1"
 $k[20]*A_dot[20]-k[35]*A_dot[35]=k[36]*A_dot[36]-(BAA_P*A_dot[37]*k[37])$ "Bomba de agua de alimentación2"

$k[1]=k[6]$
 $k[6]=k[11]$
 $k[11]=k[16]$
 $k[16]=1$

$k[3]=k[4]$
 $k[5]=k[4]$
 $k[7]=k[8]$
 $k[13]=k[14]$
 $k[14]=k[15]$
 $k[17]=k[18]$

$k[21]=k[22]$
 $k[22]=k[24]$
 $k[24]=k[27]$
 $k[22]=k[31]$
 $k[31]=k[34]$

$k[23]=k[28]$

k[28]=k[33]
 k[33]=k[36]
 k[29]=k[30]

"CONSUMO EXERGÉTICO"

B_dot[1]=k[1]*A_dot[1]
 B_dot[2]=k[2]*A_dot[2]
 B_dot[3]=k[3]*A_dot[3]
 B_dot[4]=k[4]*A_dot[4]
 B_dot[5]=k[5]*A_dot[5]
 B_dot[6]=k[6]*A_dot[6]
 B_dot[7]=k[7]*A_dot[7]
 B_dot[8]=k[8]*A_dot[8]
 B_dot[9]=k[9]*A_dot[9]
 B_dot[10]=k[10]*A_dot[10]
 B_dot[11]=k[11]*A_dot[11]
 B_dot[12]=k[12]*A_dot[12]
 B_dot[13]=k[13]*A_dot[13]
 B_dot[14]=k[14]*A_dot[14]
 B_dot[15]=k[15]*A_dot[15]
 B_dot[16]=k[16]*A_dot[16]
 B_dot[17]=k[17]*A_dot[17]
 B_dot[18]=k[18]*A_dot[18]
 B_dot[19]=k[19]*A_dot[19]
 B_dot[20]=k[20]*A_dot[20]
 B_dot[21]=k[21]*A_dot[21]
 B_dot[22]=k[22]*A_dot[22]
 B_dot[23]=k[23]*A_dot[23]
 B_dot[24]=k[24]*A_dot[24]
 B_dot[27]=k[27]*A_dot[27]
 B_dot[28]=k[28]*A_dot[28]
 B_dot[29]=k[29]*A_dot[29]
 B_dot[30]=k[30]*A_dot[30]
 B_dot[31]=k[31]*A_dot[31]
 B_dot[32]=k[32]*A_dot[32]
 B_dot[33]=k[33]*A_dot[33]
 B_dot[34]=k[34]*A_dot[34]
 B_dot[35]=k[35]*A_dot[35]
 B_dot[36]=k[36]*A_dot[36]
 B_dot[37]=k[37]*A_dot[37]

"BALANCE EXERGOECONÓMICO"

"CICLO DE GAS 1"

A_dot[1]=0
 A_dot[2]=104.782/1000
 A_dot[3]=327.707/1000
 A_dot[4]=152.702/1000
 A_dot[5]=53.487/1000
 A_dot[6]=238.228/1000
 A_dot[7]=105.840/1000
 A_dot[8]=171.909/1000
 A_dot[9]=69.937/1000

$$A_dot[10]=3.216/1000$$

"CICLO DE GAS 2"

$$A_dot[11]=0/1000$$

$$A_dot[12]=103.152/1000$$

$$A_dot[13]=325.474/1000$$

$$A_dot[14]=151.570/1000$$

$$A_dot[15]=55.601/1000$$

$$A_dot[16]=238.209/1000$$

$$A_dot[17]=104.240/1000$$

$$A_dot[18]=170.664/1000$$

$$A_dot[19]=69.937/1000$$

$$A_dot[20]=3.216/1000$$

"CICLO DE VAPOR"

$$A_dot[21]=139.874/1000$$

$$A_dot[22]=7.814/1000$$

$$A_dot[23]=103.228/1000$$

$$A_dot[24]=11.785/1000$$

$$A_dot[25]=1.149/1000$$

$$A_dot[26]=7.328/1000$$

$$A_dot[27]=0.2217/1000$$

$$A_dot[28]=0.1322/1000$$

$$A_dot[29]=0.1688/1000$$

$$A_dot[30]=0.1688/1000$$

$$A_dot[31]=3.907/1000$$

$$A_dot[32]=2.835/1000$$

$$A_dot[33]=0.4466/1000$$

$$A_dot[34]=3.907/1000$$

$$A_dot[35]=2.835/1000$$

$$A_dot[36]=0.4466/1000$$

$$A_dot[37]=11.57/1000$$

"Análisis Exergoeconómico"

"Costo Exergoeconómico Unitario"

"Ciclo de gas1"

$$c[1]*A_dot[1]+c[7]*A_dot[7]+Z_dot_CA_1=c[2]*A_dot[2]$$

"Compresor de aire"

$$c[2]*A_dot[2]+C_dot[6]+Z_dot_CC_1=c[3]*A_dot[3]$$

"Cámara de Combustión"

$$c[3]*A_dot[3]-c[4]*A_dot[4]+Z_dot_TG_1=c[8]*A_dot[8]$$

"Turbina de gas"

$$c[4]*A_dot[4]+c[10]*A_dot[10]+Z_dot_RC_1=c[9]*A_dot[9]+c[5]*A_dot[5]$$

"Recuperador de Calor"

$$c[1]=0$$

$$c[3]=c[4]$$

$$c[5]=c[4]$$

$$c[7]=c[8]$$

$$c[6]=3.94$$

"Ciclo de gas 2"

$$c[17]*A_dot[17]+c[11]*A_dot[11]+Z_dot_CA_2=c[12]*A_dot[12]$$

"Compresor de aire"

$$c[12]*A_dot[12]+C_dot[16]+Z_dot_CC_2=c[13]*A_dot[13]$$

"Cámara de Combustión"

$$c[13]*A_dot[13]-c[14]*A_dot[14]+Z_dot_TG_2=c[18]*A_dot[18]$$

"Turbina de gas"

$$c[14]*A_dot[14]+c[20]*A_dot[20]+Z_dot_RC_2= c[19]*A_dot[19]+c[15]*A_dot[15]$$

"Recuperador de Calor"

$$c[11]=0$$

$$c[13]=c[14]$$

$$c[15]=c[14]$$

$$c[17]=c[18]$$

$$c[16]= 3.94$$

"Ciclo de Vapor"

$$c[21]*A_dot[21]=c[9]*A_dot[9]+c[19]*A_dot[19]$$

$$c[21]*A_dot[21]- c[22]*A_dot[22] - c[24]*A_dot[24] +Z_dot_TV = c[23]*A_dot[23]$$

"Turbina de Vapor"

$$c[25]*A_dot[25]+c[24]*A_dot[24]+Z_dot_C=c[26]*A_dot[26]+c[27]*A_dot[27]$$

"Condensador"

$$c[28]*A_dot[28]+Z_dot_BAC=c[29]*A_dot[29]+c[30]*A_dot[30]-c[27]*A_dot[27]$$

"Bomba Agua de Condensado"

$$c[31]*A_dot[31]+c[29]*A_dot[29]+Z_dot_D_1=c[32]*A_dot[32]$$

"Deareador1"

$$c[34]*A_dot[34]+c[30]*A_dot[30]+Z_dot_D_2=c[35]*A_dot[35]$$

"Deareador2"

$$c[33]*A_dot[33]+Z_dot_BAA_1=c[10]*A_dot[10]-c[32]*A_dot[32]$$

"Bomba de agua de alimentación1"

$$c[36]*A_dot[36]+Z_dot_BAA_2=c[20]*A_dot[20]-c[35]*A_dot[35]$$

"Bomba de agua de alimentación 2"

$$c[25]=0$$

$$c[21]=c[22]$$

$$c[22]=c[24]$$

$$c[24]=c[27]$$

$$c[29]=c[30]$$

$$c[23]=c[28]$$

$$c[28]=c[33]$$

$$c[33]=c[36]$$

$$c[31]=c[34]$$

"Modelo Económico"

$$Z_CA_1=((71.1*m_dot[1])/(0.92-eta_CA_1))*(P[2]/P[1])*ln(P[2]/P[1])$$

$$Z_CA_2=((71.1*m_dot[11])/(0.92-eta_CA_2))*(P[12]/P[11])*ln(P[12]/P[11])$$

$$Z_CC_1=((46.08*m_dot[1])/(0.995-(P[3]/P[2])))*(1+exp(0.018*T[3]-26.4))$$

$$Z_CC_2=((46.08*m_dot[11])/(0.995-(P[13]/P[12])))*(1+exp(0.018*T[13]-26.4))$$

$$Z_TG_1=((479.34*m_dot[3])/(0.92-eta_TG_1))*ln(P[3]/P[4])*(1+exp(0.036*T[3]-54.4))$$

$$Z_TG_2=((479.34*m_dot[13])/(0.92-eta_TG_2))*ln(P[13]/P[14])*(1+exp(0.036*T[13]-54.4))$$

$$Z_RC_1=4745*(Q_RC_1/(log10(T[9]-T[10])))^0.8+11820*m_dot[10]+658*m_dot[3]$$

$$Z_RC_2=4745*(Q_RC_2/(log10(T[19]-T[20])))^0.8+11820*m_dot[20]+658*m_dot[13]$$

$$Z_TV=3880.5*W_dot_TV^0.7*(1+(0.05/(1-eta_TV))^3)*(1+5*exp((T[21]-866)/10.42))$$

$$Z_C=1773*m_dot[24]$$

$$Z_D_1=145315*m_dot[31]^0.7$$

$$Z_D_2=145315*m_dot[34]^0.7$$

$$Z_BAC=705.48*W_dot_BAC^0.71*(1+0.2/(1-eta_BAC))$$

$$Z_BAA_1=705.48*W_dot_BAA_1^0.71*(1+0.2/(1-eta_BAA_1))$$

$$Z_{BAA_2}=705.48*W_{dot_BAA_2}^{0.71}*(1+0.2/(1-\eta_{BAA_2}))$$

"CICLO DE GAS 1"

"Compresor de aire1"

$$\eta_{CA_1}=0.8013$$

$$P[1]=0.7891$$

$$P[2]=10.29$$

$$m_{dot}[1]=262.60$$

"Cámara de Combustión 1"

$$P[3]=9.775$$

$$T[3]=\text{converttemp}(C,K,1044.13[C])$$

"Turbina de Gas 1"

$$m_{dot}[3]=267.44$$

$$\eta_{TG_1}=0.887$$

$$P[4]=0.8113$$

"Recuperador de Calor 1"

$$Q_{RC_1}=97001$$

$$T[4]=\text{converttemp}(C,K,517.25[C])$$

$$T[5]=\text{converttemp}(C,K,158.8[C])$$

$$m_{dot}[10]=49.27$$

$$T[10]=\text{converttemp}(C,K,122.1[C])$$

$$T[9]=\text{converttemp}(C,K,506.66[C])$$

"CICLO DE GAS 2"

"Compresor de aire 2"

$$\eta_{CA_2}=0.7949$$

$$P[11]=0.7922$$

$$P[12]=10.22$$

$$m_{dot}[11]=259.70$$

"Cámara de Combustión 2 "

$$P[13]=9.709$$

$$T[13]=\text{converttemp}(C,K,1041.17[C])$$

"Turbina de Gas 2"

$$m_{dot}[13]=264.541$$

$$\eta_{TG_2}=0.8937$$

$$P[14]=0.8106$$

"Recuperador de Calor 2"

$$Q_{RC_2}=97001$$

$$T[14]=\text{converttemp}(C,K,512.2[C])$$

$$T[15]=\text{converttemp}(C,K,160.6[C])$$

$$m_{dot}[20]=49.27$$

$$T[20]=\text{converttemp}(C,K,122.1[C])$$

$T[19]=\text{converttemp}(C,K,506.66[C])$

"Turbina de Vapor"

$W_dot_TV=A_dot[23]*1000000$

$\eta_{TV}=0.8479$

$T[21]=\text{converttemp}(C,K,506.66[C])$

$m_dot[21]=98.54$

$m_dot[22]=12.92$

"Condensador"

$m_dot[24]=85.62$

"Deaerator1"

$m_dot[31]=6.455$

"Deaerator2"

$m_dot[34]=6.455$

"Bomba de agua de Condensado"

$W_dot_BAC=132.2$

$\eta_{BAC}=0.8678$

"Bomba de Agua de Alimentación 1"

$W_dot_BAA_1=A_dot[33]*1000000$

$\eta_{BAA_1}=0.8268$

"Bomba de Agua de Alimentación 2"

$W_dot_BAA_2=A_dot[36]*1000000$

$\eta_{BAA_2}=0.8268$

$CRF=(i*(1+i)^n)/((1+i)^n-1)$

$n=20$

$i=0.10$

$Z_dot_CA_1=(Z_CA_1*CRF*1.06)/(O*3600)$

$Z_dot_CA_2=(Z_CA_2*CRF*1.06)/(O*3600)$

$Z_dot_CC_1=(Z_CC_1*CRF*1.06)/(O*3600)$

$Z_dot_CC_2=(Z_CC_2*CRF*1.06)/(O*3600)$

$Z_dot_TG_1=(Z_TG_1*CRF*1.06)/(O*3600)$

$Z_dot_TG_2=(Z_TG_2*CRF*1.06)/(O*3600)$

$Z_dot_RC_1=(Z_RC_1*CRF*1.06)/(O*3600)$

$Z_dot_RC_2=(Z_RC_2*CRF*1.06)/(O*3600)$

$Z_dot_TV=(Z_TV*CRF*1.06)/(O*3600)$

$Z_dot_C=(Z_C*CRF*1.06)/(O*3600)$

$Z_dot_BAC=(Z_BAC*CRF*1.06)/(O*3600)$

$Z_dot_BAA_1=(Z_BAA_1*CRF*1.06)/(O*3600)$

$Z_dot_BAA_2=(Z_BAA_2*CRF*1.06)/(O*3600)$

$Z_dot_D_1=(Z_D_1*CRF*1.06)/(O*3600)$

$Z_dot_D_2=(Z_D_2*CRF*1.06)/(O*3600)$

$O=7446$

$C_dot[6]=(c[6]*m_dot[6]*PCI)/1000000$

$C_dot[16]=(c[16]*m_dot[16]*PCI)/1000000$

$m_dot[6]=4.8415$

$m_dot[16]=4.8658$

PCI=45936

"Balance de Costos Exergoeconómicos"

$$\begin{aligned}
 C_{\text{dot}}[1] &= (c[1] * A_{\text{dot}}[1]) \\
 C_{\text{dot}}[2] &= (c[2] * A_{\text{dot}}[2]) \\
 C_{\text{dot}}[3] &= (c[3] * A_{\text{dot}}[3]) \\
 C_{\text{dot}}[4] &= (c[4] * A_{\text{dot}}[4]) \\
 C_{\text{dot}}[5] &= (c[5] * A_{\text{dot}}[5]) \\
 C_{\text{dot}}[7] &= (c[7] * A_{\text{dot}}[7]) \\
 C_{\text{dot}}[8] &= (c[8] * A_{\text{dot}}[8]) \\
 C_{\text{dot}}[9] &= (c[9] * A_{\text{dot}}[9]) \\
 C_{\text{dot}}[10] &= (c[10] * A_{\text{dot}}[10]) \\
 C_{\text{dot}}[11] &= (c[11] * A_{\text{dot}}[11]) \\
 C_{\text{dot}}[12] &= (c[12] * A_{\text{dot}}[12]) \\
 C_{\text{dot}}[13] &= (c[13] * A_{\text{dot}}[13]) \\
 C_{\text{dot}}[14] &= (c[14] * A_{\text{dot}}[14]) \\
 C_{\text{dot}}[15] &= (c[15] * A_{\text{dot}}[15]) \\
 C_{\text{dot}}[17] &= (c[17] * A_{\text{dot}}[17]) \\
 C_{\text{dot}}[18] &= (c[18] * A_{\text{dot}}[18]) \\
 C_{\text{dot}}[19] &= (c[19] * A_{\text{dot}}[19]) \\
 C_{\text{dot}}[20] &= (c[20] * A_{\text{dot}}[20]) \\
 C_{\text{dot}}[21] &= (c[21] * A_{\text{dot}}[21]) \\
 C_{\text{dot}}[22] &= (c[22] * A_{\text{dot}}[22]) \\
 C_{\text{dot}}[23] &= (c[23] * A_{\text{dot}}[23]) \\
 C_{\text{dot}}[24] &= (c[24] * A_{\text{dot}}[24]) \\
 C_{\text{dot}}[25] &= (c[25] * A_{\text{dot}}[25]) \\
 C_{\text{dot}}[26] &= (c[26] * A_{\text{dot}}[26]) \\
 C_{\text{dot}}[27] &= (c[27] * A_{\text{dot}}[27]) \\
 C_{\text{dot}}[28] &= (c[28] * A_{\text{dot}}[28]) \\
 C_{\text{dot}}[29] &= (c[29] * A_{\text{dot}}[29]) \\
 C_{\text{dot}}[30] &= (c[30] * A_{\text{dot}}[30]) \\
 C_{\text{dot}}[31] &= (c[31] * A_{\text{dot}}[31]) \\
 C_{\text{dot}}[32] &= (c[32] * A_{\text{dot}}[32]) \\
 C_{\text{dot}}[33] &= (c[33] * A_{\text{dot}}[33]) \\
 C_{\text{dot}}[34] &= (c[34] * A_{\text{dot}}[34]) \\
 C_{\text{dot}}[35] &= (c[35] * A_{\text{dot}}[35]) \\
 C_{\text{dot}}[36] &= (c[36] * A_{\text{dot}}[36]) \\
 C_{\text{dot}}[31] &= (m_{\text{dot}}[31] / m_{\text{dot}}[22]) * C_{\text{dot}}[22]
 \end{aligned}$$

"COSTO PROMEDIO POR UNIDAD DE EXERGÍA DEL PRODUCTO"

$$\begin{aligned}
 c_{\text{P_CA_1}} &= (C_{\text{dot}}[2] / A_{\text{dot}}[2]) \\
 c_{\text{P_CA_2}} &= (C_{\text{dot}}[12] / A_{\text{dot}}[12]) \\
 c_{\text{P_CC_1}} &= (C_{\text{dot}}[3] / A_{\text{dot}}[3]) \\
 c_{\text{P_CC_2}} &= (C_{\text{dot}}[13] / A_{\text{dot}}[13]) \\
 c_{\text{P_TG_1}} &= (C_{\text{dot}}[8]) / (A_{\text{dot}}[8]) \\
 c_{\text{P_TG_2}} &= (C_{\text{dot}}[18]) / (A_{\text{dot}}[18]) \\
 c_{\text{P_RC_1}} &= (C_{\text{dot}}[9] - C_{\text{dot}}[10]) / (A_{\text{dot}}[9] - A_{\text{dot}}[10]) \\
 c_{\text{P_RC_2}} &= (C_{\text{dot}}[19] - C_{\text{dot}}[20]) / (A_{\text{dot}}[19] - A_{\text{dot}}[20]) \\
 c_{\text{P_TV}} &= (C_{\text{dot}}[23]) / (A_{\text{dot}}[23]) \\
 c_{\text{P_C}} &= (C_{\text{dot}}[26] - C_{\text{dot}}[25]) / (A_{\text{dot}}[26] - A_{\text{dot}}[25]) \\
 c_{\text{P_BAC}} &= (C_{\text{dot}}[29] + C_{\text{dot}}[30] - C_{\text{dot}}[27]) / (A_{\text{dot}}[29] + A_{\text{dot}}[30] - A_{\text{dot}}[27]) \\
 c_{\text{P_D_1}} &= (C_{\text{dot}}[32]) / (A_{\text{dot}}[32]) \\
 c_{\text{P_D_2}} &= (C_{\text{dot}}[35]) / (A_{\text{dot}}[35])
 \end{aligned}$$

$$c_P_BAA_1=(C_dot[10]-C_dot[32])/(A_dot[10]-A_dot[32])$$

$$c_P_BAA_2=(C_dot[20]-C_dot[35])/(A_dot[20]-A_dot[35])$$

"COSTO PROMEDIO POR UNIDAD DE EXERGÍA DEL RECURSO"

$$c_R_CA_1=(C_dot[7]/A_dot[7])$$

$$c_R_CA_2=(C_dot[17]/A_dot[17])$$

$$c_R_CC_1=(C_dot[2]+C_dot[6])/(A_dot[2]+A_dot[6])$$

$$c_R_CC_2=(C_dot[12]+C_dot[16])/(A_dot[12]+A_dot[16])$$

$$c_R_TG_1=(C_dot[3]-C_dot[4])/(A_dot[3]-A_dot[4])$$

$$c_R_TG_2=(C_dot[13]-C_dot[14])/(A_dot[13]-A_dot[14])$$

$$c_R_RC_1=(C_dot[4]-C_dot[5])/(A_dot[4]-A_dot[5])$$

$$c_R_RC_2=(C_dot[14]-C_dot[15])/(A_dot[14]-A_dot[15])$$

$$c_R_TV=(C_dot[21]-C_dot[22]-C_dot[24])/(A_dot[21]-A_dot[22]-A_dot[24])$$

$$c_R_C=(C_dot[24]-C_dot[27])/(A_dot[24]-A_dot[27])$$

$$c_R_BAC=(C_dot[28])/(A_dot[28])$$

$$c_R_D_1=(C_dot[31]+C_dot[29])/(A_dot[31]+A_dot[29])$$

$$c_R_D_2=(C_dot[34]+C_dot[30])/(A_dot[34]+A_dot[30])$$

$$c_R_BAA_1=(C_dot[33])/(A_dot[33])$$

$$c_R_BAA_2=(C_dot[36])/(A_dot[36])$$

"COSTO DE LA DESTRUCCIÓN DE EXERGÍA"

$$A_dot_D_CA_1=(A_dot[7])-(A_dot[2]-A_dot[1])$$

$$A_dot_D_CA_2=(A_dot[17])-(A_dot[12]-A_dot[11])$$

$$A_dot_D_CC_1=(A_dot[2]+A_dot[6])-(A_dot[3])$$

$$A_dot_D_CC_2=(A_dot[12]+A_dot[16])-(A_dot[3])$$

$$A_dot_D_TG_1=(A_dot[3]-A_dot[4])-A_dot[8]$$

$$A_dot_D_TG_2=(A_dot[13]-A_dot[14])-A_dot[18]$$

$$A_dot_D_RC_1=(A_dot[4]-A_dot[5])-(A_dot[9]-A_dot[10])$$

$$A_dot_D_RC_2=(A_dot[14]-A_dot[15])-(A_dot[19]-A_dot[20])$$

$$A_dot_D_TV=(A_dot[21]-A_dot[22]-A_dot[23])-(A_dot[24])$$

$$A_dot_D_C=(A_dot[24]-A_dot[27])-(A_dot[26]-A_dot[25])+A_dot[37]$$

$$A_dot_D_BAC=(A_dot[28])-(A_dot[29]+A_dot[30]-A_dot[27])$$

$$A_dot_D_D_1=(A_dot[31]+A_dot[29])-(A_dot[32])$$

$$A_dot_D_D_2=(A_dot[34]+A_dot[30])-(A_dot[35])$$

$$A_dot_D_BAA_1=(A_dot[33])-(A_dot[10]-A_dot[32])$$

$$A_dot_D_BAA_2=(A_dot[36])-(A_dot[20]-A_dot[35])$$

$$C_dot_D_CA_1=(c_r_CA_1)*(A_dot_D_CA_1)$$

$$C_dot_D_CA_2=(c_r_CA_2)*(A_dot_D_CA_2)$$

$$C_dot_D_CC_1=(c_r_CC_1)*(A_dot_D_CC_1)$$

$$C_dot_D_CC_2=(c_r_CC_2)*(A_dot_D_CC_2)$$

$$C_dot_D_TG_1=(c_r_TG_1)*(A_dot_D_TG_1)$$

$$C_dot_D_TG_2=(c_r_TG_2)*(A_dot_D_TG_2)$$

$$C_dot_D_RC_1=(c_r_RC_1)*(A_dot_D_RC_1)$$

$$C_dot_D_RC_2=(c_r_RC_2)*(A_dot_D_RC_2)$$

$$C_dot_D_TV=(c_r_TV)*(A_dot_D_TV)$$

$$C_dot_D_C=(c_r_C)*(A_dot_D_C)$$

$$C_dot_D_BAC=(c_r_BAC)*(A_dot_D_BAC)$$

$$C_dot_D_D_1=(c_r_D_1)*(A_dot_D_D_1)$$

$$C_dot_D_D_2=(c_r_D_2)*(A_dot_D_D_2)$$

$$C_dot_D_BAA_1=(c_r_BAA_1)*(A_dot_D_BAA_1)$$

$$C_dot_D_BAA_2=(c_r_BAA_2)*(A_dot_D_BAA_2)$$

"FACTOR EXERGOECONÓMICO"

$$f_CA_1=(Z_dot_CA_1)/(Z_dot_CA_1+C_dot_D_CA_1)$$

$$f_CA_2=(Z_dot_CA_2)/(Z_dot_CA_2+C_dot_D_CA_2)$$

$$f_CC_1=(Z_dot_CC_1)/(Z_dot_CC_1+C_dot_D_CC_1)$$

$$f_CC_2=(Z_dot_CC_2)/(Z_dot_CC_2+C_dot_D_CC_2)$$

$$f_TG_1=(Z_dot_TG_1)/(Z_dot_TG_1+C_dot_D_TG_1)$$

$$f_TG_2=(Z_dot_TG_2)/(Z_dot_TG_2+C_dot_D_TG_2)$$

$$f_RC_1=(Z_dot_RC_1)/(Z_dot_RC_1+C_dot_D_RC_1)$$

$$f_RC_2=(Z_dot_RC_2)/(Z_dot_RC_2+C_dot_D_RC_2)$$

$$f_TV=(Z_dot_TV)/(Z_dot_TV+C_dot_D_TV)$$

$$f_C=(Z_dot_C)/(Z_dot_C+C_dot_D_C)$$

$$f_BAC=(Z_dot_BAC)/(Z_dot_BAC+C_dot_D_BAC)$$

$$f_D_1=(Z_dot_D_1)/(Z_dot_D_1+C_dot_D_D_1)$$

$$f_D_2=(Z_dot_D_2)/(Z_dot_D_2+C_dot_D_D_2)$$

$$f_BAA_1=(Z_dot_BAA_1)/(Z_dot_BAA_1+C_dot_D_BAA_1)$$

$$f_BAA_2=(Z_dot_BAA_2)/(Z_dot_BAA_2+C_dot_D_BAA_2)$$

"COSTO RELATIVO"

$$r_CA_1=(c_P_CA_1-c_R_CA_1)/(c_R_CA_1)$$

$$r_CA_2=(c_P_CA_2-c_R_CA_2)/(c_R_CA_2)$$

$$r_CC_1=(c_P_CC_1-c_R_CC_1)/(c_R_CC_1)$$

$$r_CC_2=(c_P_CC_2-c_R_CC_2)/(c_R_CC_2)$$

$$r_TG_1=(c_P_TG_1-c_R_TG_1)/(c_R_TG_1)$$

$$r_TG_2=(c_P_TG_2-c_R_TG_2)/(c_R_TG_2)$$

$$r_RC_1=(c_P_RC_1-c_R_RC_1)/(c_R_RC_1)$$

$$r_RC_2=(c_P_RC_2-c_R_RC_2)/(c_R_RC_2)$$

$$r_TV=(c_P_TV-c_R_TV)/(c_R_TV)$$

$$r_C=(c_P_C-c_R_C)/(c_R_C)$$

$$r_BAC=(c_P_BAC-c_R_BAC)/(c_R_BAC)$$

$$r_D_1=(c_P_D_1-c_R_D_1)/(c_R_D_1)$$

$$r_D_2=(c_P_D_2-c_R_D_2)/(c_R_D_2)$$

$$r_BAA_1=(c_P_BAA_1-c_R_BAA_1)/(c_R_BAA_1)$$

$$r_BAA_2=(c_P_BAA_2-c_R_BAA_2)/(c_R_BAA_2)$$

$$C_dot_T=C_dot[6]+C_dot[16]+Z_dot_CA_1+Z_dot_CA_2+Z_dot_CC_1+Z_dot_CC_2+Z_dot_TG_1& \\ +Z_dot_TG_2+Z_dot_RC_1+Z_dot_RC_2+Z_dot_TV+Z_dot_C+Z_dot_BAC& \\ +Z_dot_D_1+Z_dot_D_2+Z_dot_BAA_1+Z_dot_BAA_2$$

"OPTIMIZACIÓN EXERGOECONÓMICA"

$$\text{function } f = f_objetivo4(x)$$

$$a=(4.153*4.841*(45936/1000000));$$

$b=(4.153*4.865*(45936/1000000));$
 $c=((((71.10*262.2)/(0.90-x(1)))^x(2)*\log(x(2))*0.12455)/(26805600);$
 $d=((((71.10*259.7)/(0.90-x(3)))^x(4)*\log(x(4))*0.12455)/(26805600);$
 $e=((((46.08*262.2)/(0.995*(9.709/10.22)))^{1+\exp(0.018*x(5)-26.4)}*0.12455)/(26805600);$
 $g=((((46.08*259.2)/(0.995*(9.775/10.29)))^{1+\exp(0.018*x(6)-26.4)}*0.12455)/(26805600);$
 $h=((((479.34*267.4)/(0.92-x(7)))^{\log(9.775/0.8113)}*(1+\exp(0.036*x(5)-54.4)))^0.12455)/(26805600);$
 $i=((((479.34*264.5)/(0.92-x(8)))^{\log(9.709/0.132)}*(1+\exp(0.036*x(6)-54.4)))^0.12455)/(26805600);$
 $j=((4745*((97001/2.7215)^{0.8})+(11820*49.27)+(658*267.44)))^0.12455/(26805600);$
 $k=((4745*((97001/2.7231)^{0.8})+(11820*49.27)+(658*264.44)))^0.12455/(26805600);$
 $l=(3880.5*((103228)^{0.7}*(1+(0.05/(1-x(9)))^3)*(1+5*\exp((x(10)-866)/10.42))))^0.12455/(26805600);$
 $m=(1773*85.62*0.12455)/(26805600);$
 $n=(1705.48*(132.2)^{0.71}*(1+(0.2/(1-x(11))))))^0.12455/(26805600);$
 $o=(145315*(12.91)^{0.7*0.12455})/(26805600);$
 $p=(145315*(12.91)^{0.7*0.12455})/(26805600);$
 $q=(1705.48*(446.6)^{0.71}*(1+(0.2/(1-x(12))))))^0.1175*1.06/(26805600);$
 $r=(1705.48*(446.6)^{0.71}*(1+(0.2/(1-x(13))))))^0.1175*1.06/(26805600);$
 $f=(a+b+c+d+e+g+h+i+j+k+i+j+k+l+m+n+o+p+q+r);$