



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MINATITLÁN

TESIS

**“ANÁLISIS TERMOECONÓMICO AL CICLO DE POTENCIA DE LA
UNIDAD 3 DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA VALLE DE MÉXICO”**

EN LA OPCION DEL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA ENERGÉTICA

PRESENTA

JOSÉ ANTONIO CHÁZARO MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. ROBERTO RAMÍREZ MESA



MINATITLÁN, VER. OCTUBRE DE 2010.

DEDICATORIA

DEDICATORIA

Por su Apoyo y Confianza

Todo mi Respeto y Admiración

A mi madre y padre

Por Sueños y Esperanza

Para Futuras Metas

A mis hijos

Por su Paciencia,

Comprensión y su Cariño

A mi esposa

Gracias

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

Cuando uno desarrolla una tesis de maestría se auxilia en las teorías, ideas y técnicas que ha ido aprendiendo durante su formación para poder así profundizar en el estudio de aspectos poco conocidos. Es difícil determinar cuánto hay realmente de aportación personal en el resultado final del trabajo. Sin embargo lo más genuinamente propio es el esfuerzo y dedicación invertidos en la realización de esta tesis. Pero incluso ese esfuerzo y dedicación son compartidos por todas aquellas personas que me han apoyado durante estos años. Es por eso que deseo agradecer a:

Especialmente al Dr. Roberto Ramírez Mesa por la disposición, confianza, dedicación y valiosas aportaciones en la elaboración de este trabajo.

Al Ingeniero Manuel Pérez Topete por su asesoría, colaboración y apoyo en el desarrollo de esta tesis. Al personal de la Central Termoeléctrica Valle de México por todas las facilidades prestadas para la realización de la tesis.

A todos los sinodales, por su paciente revisión y comentarios para la mejora de este trabajo.

A todos los profesores que tuve a lo largo de esta maestría, de los que aprendí no solo el conocimiento, sino también otros valores que hacen grande al ser humano.

A mis amigos y compañeros de la Maestría en Ingeniería Energética.

RESUMEN

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio termoeconómico del ciclo de potencia de la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica Valle de México, de la “Comisión Federal de Electricidad” y forma parte de la Subgerencia Regional de Generación Termoeléctrica Central de México.

Durante la aplicación del análisis termoeconómico, se obtuvo la exergía, el fuel (F), el producto (P), el costo exergético unitario y las irreversibilidades totales del sistema. También se calcularon los costos exergéticos del fuel y el producto; los costos termoeconómicos del fuel (π_F), el producto (π_P), y el costo termoeconómico unitario del fuel (c_{F^*}) y el producto (c_{P^*}), de las principales corrientes de masa, calor y trabajo de la planta de estudio. Además para efecto del análisis, se calculo el costo de operación, tanto exergético como termoeconómico, que es un parámetro que se define como el costo que un equipo del sistema requiere para su funcionamiento.

Mediante la comparación termoeconómica usando los datos de diseño con los datos de operación, se detectaron los equipos que están impactando en la eficiencia de la Unidad 3 y así recomendar acciones correctivas para la mejor producción de potencia mecánica, evitando el despilfarro de recursos energéticos iniciales.

Los resultados finales de este trabajo muestran una detección de perdidas por la disfunción de los equipos en la Unidad 3, con un aumento en su costo de operación al comparar los resultados de diseño con los datos de operación.

ABSTRACT

ABSTRACT

In the present work is a study thermoeconomic power cycle the Unit 3 of the Power Plant Valle of Mexico Thermoelectric, the "Commission Federal de Electricidad" and is part of the Regional Deputy Manager Central Thermal Power Generation in Mexico.

During the implementation of thermoeconomic analysis, we obtained the exergy, fuel (F), the product (P), the exergetic unit cost and total system irreversibility. We also calculated the exergetic cost of fuel and the product, the costs of fuel thermoeconomic (π_F), the product (π_P), and the cost per unit of fuel thermoeconomic (c_{F^*}) and the product (c_{P^*}), from the mainstream of mass, heat and work study plant. Also for purposes of analysis, we calculate the cost of operating both as thermoeconomic exergy, a parameter that is defined as the cost of system equipment required for operation.

By comparing thermoeconomic of design data with operational data, there were teams that are impacting on the efficiency of the Unit 3 and so recommend corrective actions to the best mechanical power output, avoiding wastage of energy resources early.

The final results of this study show a missed detection by the dysfunction of the teams in Unit 3, with an increase in operating cost when comparing the design results with operational data.

ÍNDICE

ÍNDICE

CONTENIDO	Página
DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
INTRODUCCION	1
CAPITULO I. GENERALIDADES DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA VALLE DE MÉXICO	
1.1 Antecedentes	3
1.1.1 Misión y Objetivos de la CTVM	3
1.2 Localización de la Planta	3
1.3 Descripción de la Planta	4
1.3.1 Descripción del Ciclo de Potencia	5
CAPITULO II. FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS EXERGÉTICO	
2.1 Primera Ley de la Termodinámica	9
2.2 Segunda Ley de la Termodinámica	13
2.3 Exergía	14
2.4 Exergía del Trabajo, Calor y Masa	16
2.5 Balances Exergéticos	17
2.6 Perdida de Exergía	19
2.7 Eficiencia Energética y Exergética	20
CAPITULO III. ANALISIS TERMOECONOMICO	
3.1 Exergía y Economía	23
3.2 Proceso de Formación de Costos Exergéticos	25
3.3 Teoría del Costo Exergético	30
3.3.1 Estructura Productiva	31
3.3.2 Reglas de Asignación de Costos Exergéticos	32
3.3.3 Componentes Disipativos	34

3.4	Costos Termoeconómicos	34
3.5	Metodología de Aplicación del Análisis Termoeconómico	35
CAPITULO IV. METODOLOGIA DEL ANALISIS TERMoeCONÓMICO		
AL CICLO DE POTENCIA		
4.1	Análisis Térmico al Ciclo de Potencia	37
4.1.1	Descripción de las Corrientes de Energía	37
4.1.2	Determinación de Potencias y Calores	41
4.2	Análisis Exergético al Ciclo de Potencia	46
4.2.1	Calculo de Exergías	46
4.3	Análisis de Costos Exergéticos	53
4.3.1	Costos Exergéticos del Ciclo de Potencia	56
4.4	Análisis de Costos Termoeconómicos	70
4.4.1	Costos Termoeconómicos en el Ciclo de Potencia	71
CAPITULO V. ANALISIS DE RESULTADOS		
5.1	Evaluación del Análisis Exergético	82
5.2	Valoración de Costos Exergéticos	86
5.3	Evaluación Termoeconómica	90
5.4	Comparación de Condiciones de Diseño y Operación	94
CONCLUSIONES		101
RECOMENDACIONES		102
BIBLIOGRAFIA		104
ANEXO A Análisis termoeconómico de la Unidad 3 de la Central termoeléctrica valle de México a condiciones de diseño		106
ANEXO B Programa de Computo para el Análisis Termoeconómico de la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica Valle de México		115
INDICE DE TABLAS Y FIGURAS		
Tabla 1.1	Histórico de Operación Comercial	5
Tabla 1.2	Nomenclatura de Equipos de la Unidad 3	7
Tabla 2.1	Formas de Exergía	16
Tabla 4.1	Descripción de las Corrientes del Ciclo de Potencia	39

Tabla 4.2	Descripción de las Propiedades de las Corrientes a las Condiciones de Operación al 100 % de Carga	40
Tabla 4.3	Corrientes Exergéticas Involucradas en la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica	48
Tabla 4.4	Exergía de cada Corriente del Ciclo de Potencia	50
Tabla 4.5	Definición fuel-producto para cada Equipo de la Unidad 3	54
Tabla 4.6	Valores Obtenidos de la Definición fuel-producto	55
Tabla 4.7	Equipos que Contribuyen a la Formación del Residuo	64
Tabla 4.8	Costos Exergéticos en las Corrientes de la Unidad 3	66
Tabla 4.9	Costos Exergéticos para cada Equipo de la Estructura Productiva en la Unidad 3	67
Tabla 4.10	Costos Exergéticos de fuel y producto para cada Equipo de la Estructura Productiva de la Unidad 3	68
Tabla 4.11	Costos de Operación Exergético de cada Equipo de la Unidad 3	69
Tabla. 4.12	Costos Termoeconómicos en las Corrientes de la Unidad 3	78
Tabla 4.13	Costos Termoeconómicos para cada Equipo de la Unidad 3	79
Tabla 4.14	Costos Termoeconómicos de fuel y producto para cada Equipo de la Unidad 3	80
Tabla 4.15	Costos de Operación Termoeconómicos para cada Equipo de la Unidad 3	81
Tabla 5.1	Comparación del Costo de Operación Exergético por Equipo	96
Tabla 5.2	Comparación del Costo Local y de Generación de Residuo	98
Tabla 5.3	Comparación del Costo de Operación Termoeconómico	99
Figura 1.1	Central Termoeléctrica Valle de México	4
Figura 1.2	Diagrama de Flujo del Ciclo de Potencia de la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica del Valle de México	6
Figura 2.1	Volumen de control: Sistema industrial Abierto Objeto del Análisis Termodinámico	10
Figura 2.2	Esquema de una Central Básica de Generación de Potencia	13

Figura 2.3	Sistema Abierto que Intercambia Calor con los Alrededores y con otro Depósito	19
Figura 3.1	Sistema Secuencial. Fuel-Producto	27
Figura 4.1	Diagrama Esquemático de la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica Valle de México	38
Figura 4.2	Diagrama H-s del ciclo de potencia de la Unidad 3 a una Operación del 100% de carga	41
Figura 4.3	Estructura productiva de la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica Valle de México	48
Figura 5.1	Diagrama de Exergías en la Unidad 3 al 100% de Carga	84
Figura 5.2	Consumo Exergético de los Equipos	85
Figura 5.3	Eficiencia Exergética de los Equipos	85
Figura 5.4	Exergía y Costo Exergético de las Corrientes	88
Figura 5.5	Costo Exergético Unitario de las Corrientes	88
Figura 5.6	Costo Exergético (fuel-producto) de los Equipos	89
Figura 5.7	Costo Exergético Unitario por Equipo	89
Figura 5.8	Costo de Operación Exergético de los Equipos	90
Figura 5.9	Costo Termoeconómico de cada Corriente	92
Figura 5.10	Costo Termoeconómico Unitario de cada Corriente	92
Figura 5.11	Costo Termoeconómico por Equipos	93
Figura 5.12	Costo Termoeconómico Unitario de los Equipos	93
Figura 5.13	Costo de Operación Termoeconómico de los Equipos	94

NOMENCLATURA

A	Matriz de costos	k, k_{ex}	Consumo exergético
B	Exergía [kW]	k^*	Costo exergético unitario
B_w	Exergía del trabajo	L	Exergía de perdidas
B_h	Exergía del calor	\dot{m}	Flujo másico [kg/hr]
B_m	Exergía de la materia	\dot{m}_{gas}	Flujo de gas natural [kg/hr]
B_{in}	Exergía inercial	P	producto (Exergía utilidad [kW])
B_s	Exergía sustancial	PCS	Poder calorífico superior de gas natural [kJ/kg]
B_g	Exergía potencial	P_{ex}	Pérdidas totales de exergía
B_v	Exergía cinética	Pot_{GE}	Potencia de la turbina de vapor obtenida en el generador eléctrico [kW]
B_{fis}	Exergía física	Pot_{b1}	Potencia eléctrica a bombas de condensado [kW]
B_q	Exergía química	Pot_{b2}	Potencia eléctrica a bombas de agua de alimentación [kW]
B^*	Costo exergético [kW]	Pot_{CR}	Potencia neta entregada por el ciclo [kW]
COE	Costo de operación exergético [kW]	Pot_{AGV}	Potencia empleada por los equipos auxiliares del generador de vapor [kW]
COT	Costos de operación termoeconómico [\$/GJ]	Pot_{U3}	Potencia neta de la unidad 3 [kW]
c	Costo termoeconómico unitario [\$/GJ]	P^*	Costo exergético de producto [kW]
c_p	Calor específico a presión constante	P_c^*	Costo exergético del residuo (calor desechado al ambiente)
\dot{B}	Flujo de energía	p	Presión [kg/cm ² abs]
E_{fl}	Perdidas de Exergía por efluentes	p_{atm}	Presión atmosférica [mm Hg]
B_{gas}	Exergía del gas natural [kJ/kg]	Q	Calor

e_f	Flujo de energía específica	Q_c	Exergía del calor desechado en el condensador [kW]
F	fuel (Exergía empleada) [kW]	\dot{W}_{b2}	Potencia empleada en las bombas de agua de alimentación [kW]
F^*	Costo exergético del fuel [kW]	X	Calidad del agua
g_c	Constante de gravedad	X	Costo exergético local [kW]
H	Entalpía	X'	Costo termoeconómico local [\$/hr]
h	Entalpía específica [kJ/kg]	Y	Costo exergético de generación de residuo (calor desechado al ambiente) [kW]
I	Perdidas de Exergía por irreversibilidad [kW]	Y^*	Vector de costos exergéticos de entrada
I_t	Irreversibilidad total en la Unidad 3 [kW]	Y'	Costo termoeconómico de generación de residuo (calor desechado al ambiente) [\$/hr]
I_{tc}	Irreversibilidad total del ciclo Rankine [kW]	Z	Costos de producción no energéticos (amortización, operación y mantenimiento) [\$/hr]
\dot{Q}	Flujo de calor [kW]	Z	Vector de costos de producción no energéticos (amortización, operación y mantenimiento)
\dot{Q}_{COND}	Calor desechado en el condensador [kW]		
\dot{Q}_{gas}	Calor agregado por el gas natural [kW]		
\dot{Q}_{GV}	Calor ganado por el agua que atraviesa el generador de vapor [kW]		
R	Exergía de los residuos		
R^*	Costo exergético de los residuos		
S	Entropía		
\dot{S}_{gen}	Generación de entropía		
s	Entropía específica [kJ/kg]		

T	Temperatura [°C]
T_{BS}	Temperatura de bulbo seco [°C]
T_{BH}	Temperatura de bulbo húmedo [°C]
U	Energía interna
u	Energía interna específica
V	Volumen
\bar{V}	Velocidad media del flujo
v	Volumen específico
W	Trabajo
\dot{W}	Potencia
\dot{W}_{max}	Potencia máxima
\dot{W}_{A-I}	Potencia mecánica en turbina de vapor en la sección de alta e intermedia presión [kW]
\dot{W}_{TBP}	Potencia mecánica en turbina de vapor en la sección de baja presión [kW]
\dot{W}_{TV}	Potencia mecánica total por la turbina [kW]

Símbolos Griegos

β	Proporción imputada como recurso en los equipos que generan el residuo P_C^*
ϕ	Humedad relativa
η_{CR}	Eficiencia térmica del ciclo Rankine
η_{U3}	Eficiencia térmica de la Unidad 3
ψ	Rendimiento exergético, o eficiencia
ψ_{CR}	Eficiencia exergética del ciclo Rankine
ψ_{U3}	Eficiencia exergética de la Unidad 3

μ_i	Potencial químico
Π	Vector de costos termoeconómicos
π	Costos termoeconómicos [\$/hr]
π_{Qc}	Costo termoeconómico del residuo (calor desechado al ambiente) [\$/hr]
θ	Factor de Carnot
ω	Relación de humedad o humedad específica [kg _{agua} /kg _{aire seco}]

Subíndices:

e	Entrada
F	fuel
i	(en $T_i, p_i, h_i, s_i, \dot{m}_i$)
P	Producto
s	Salida
VC	Volumen de control
0	Punto de referencia o estado muerto (condiciones ambientales)

Abreviaciones:

b_1	Bombas de extracción de condensado
b_2	Bombas de agua de alimentación
B_{if1}	Bifurcación de flujos a calentador de alta presión C6 y al recalentador
B_{if2}	Bifurcación de flujos al condensador de vapor de sello y al eyector de vapor
B_{if3}	Bifurcación de flujos al calentador de alta presión C4 y para atemperación
B_{if4}	Bifurcación de flujos al eyector de vapor y como vapor principal a la turbina de vapor
$C1$	Calentador de baja presión No. 1
$C2$	Calentador de baja presión No. 2

<i>C3</i>	Deaereador
<i>C4</i>	Calentador de alta presión No. 1
<i>C5</i>	Calentador de alta presión No. 2
<i>C6</i>	Calentador de alta presión No. 3
<i>Cond</i>	Condensador
<i>CVS</i>	Condensador de vapor de sellos
<i>EV</i>	Eyector de vapor
<i>GE</i>	Generador eléctrico
<i>GV</i>	Generador de vapor
<i>SE</i>	Sistema de enfriamiento
<i>TAP</i>	Turbina de vapor de alta presión
<i>TBP</i>	Turbina de baja presión
<i>TIP</i>	Turbina de intermedia presión
<i>U</i>	Unión de flujos del condensador de vapor de sellos y al eyector de vapor

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La importancia del desarrollo de sistemas térmicos que hagan un uso efectivo de los recursos energéticos no renovables, como petróleo, gas natural y carbón, es evidente. Aproximadamente el 71% de la generación eléctrica de México se obtiene de las centrales termoeléctricas convencionales y de ciclo combinado. El resto lo cubren las hidroeléctricas, geotérmicas y nuclear, según fuente del Centro Nacional de Control de Energía de la C.F.E. Esto representa una constante preocupación en el sector energético por mantener su parque termoeléctrico en condiciones óptimas de eficiencia y funcionalidad.

El propósito de este trabajo es realizar un análisis termoeconómico a la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica Valle de México, con el fin de comparar las condiciones de diseño y de operación y así recomendar modificaciones operacionales, técnicas y económicamente viables que permitan mejorar su operación.

Durante los últimos años la industria y el sector eléctrico han visto como la energía ha pasado a representar un capítulo importante en la estructura de costos. Debido al incremento de los precios se han tenido que afrontar retos para disminuir los costos por energía eléctrica, y al mismo tiempo la reducción de la contaminación. La eficiencia energética empleada adecuadamente en grandes empresas no solo reduce sus gastos por energía y que al mismo tiempo se previene la contaminación, sino que se obtiene una mejora en la productividad.

Anteriormente el criterio para diseñar las plantas de potencia y sus sistemas auxiliares estaba basado en lograr la mayor producción de energía eléctrica posible y el mayor grado de confiabilidad, dejando en segundo término la protección al ambiente, el ahorro de recursos no renovables y la eficiencia en la producción.

Para su desarrollo, esta tesis se encuentra integrada por cinco capítulos, como a continuación se mencionan:

En el capítulo I “Generalidades de la Central Termoeléctrica Valle de México” se realiza una breve introducción de la planta, así como una descripción del proceso de la Unidad 3.

En el capítulo II “Fundamentos del Análisis Exergético” se describe brevemente el concepto de exergía, desde sus fundamentos hasta su aplicación como función de estado, de transferencia y como eficiencia de proceso.

En el capítulo III “Análisis Termoeconómico”, como parte de la metodología de análisis y diagnóstico de sistemas energéticos. Se presentan desde los antecedentes de la termoeconomía hasta las bases y aplicaciones de la teoría del costo exergético.

En el capítulo IV “Metodología del Análisis Termoeconómico al Ciclo de Potencia”, se aplica el análisis térmico, exergético y termoeconómico al caso estudio, a las condiciones de operaciones actuales al 100% de carga. Dentro del análisis termoeconómico se obtienen tanto los costos exergéticos como los costos termoeconómicos necesarios para poder evaluar el sistema.

En el capítulo V “Análisis de Resultados, Conclusiones y Recomendaciones”, se analizan e interpretan los resultados obtenidos en el capítulo anterior. Además se comparan los costos de operación exergéticos y termoeconómicos surgidos a las condiciones actuales con los generados en diseño al 100% de carga.

El valor principal de este trabajo consiste en la aplicación práctica de la teoría de los costos exergético y termoeconómico. Con este trabajo se espera demostrar que aun cuando la termoeconomía se presenta como un tema complejo y algo abstracto su aplicación es práctica, concreta y rentable. El valor principal de este trabajo es su aplicación práctica en la Central Termoeléctrica Valle de México.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LA CENTRAL TERMOELECTRICA VALLE DE MEXICO

En este capítulo se realiza una breve descripción de la Central termoeléctrica Valle de México, así como el ciclo de generación de potencia de la Unidad 3 que se analiza en este trabajo.

1.1 Antecedentes

La Central Termoeléctrica Valle de México, pertenece a la Comisión Federal de Electricidad y forma parte de la Subgerencia Regional de Generación Termoeléctrica Central, perteneciente a la Gerencia Regional de Producción Central. Esta Central es una de las principales fuentes de generación de energía del país y forma parte del “SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL”, integrándose a este con las líneas de transmisión de 230KV por medio de las líneas CAPITAL 1 y 2, MEXICO 1 y 2, ORIENTE 1 y 2, ECATEPEC 1 y 2, MAZATEPEC E IXTAPAN, así como, las líneas de transmisión TEXCOCO Y LA MANGA.

1.1.1 Misión y Objetivos de la CTVM

La misión de la Central Termoeléctrica Valle de México (CTVM) es, “proporcionar al Sistema Interconectado Nacional la energía eléctrica requerida, para coadyuvar al desarrollo del país. Administrando los medios de generación con Calidad, Seguridad, Oportunidad y Costo Mínimo; propiciando el desarrollo integral de sus colaboradores, respetando y preservando el entorno ecológico”.

Los objetivos estratégicos son los siguientes:

- Mejorar la eficiencia del proceso.
- Optimizar la administración de los recursos humanos.

1.2 Localización de la Planta

Se encuentra ubicada en el norte de la Ciudad de México en el Km 38.0 de la carretera transmetropolitana, tramo San Bernardino-Guadalupe Victoria, en el

municipio de Acolman, Estado de México; sobre una superficie de 24.6 hectáreas y a una altura de 2,283 metros sobre el nivel del mar. Sus coordenadas geográficas son 19°37'02' latitud Norte y 98°58'51' longitud Oeste.

1.3 Descripción de la Planta

La central tiene una capacidad instalada de 1,115.5 MW formada por siete unidades generadoras. La unidad 1 con una capacidad de 150MW, fue la primer unidad que se instalo en el país con ciclo Rankine regenerativo y un recalentamiento intermedio de vapor; las unidades 2 y 3, son de la capacidad de 158 MW cada una y la unidad 4 de 300MW, que se constituyo como la primer unidad generadora con esta capacidad instalada en el país. Las unidades 5, 6 y 7 son turbinas de gas de 116.5 MW cada una y están conectadas con la unidad 4, integrando en conjunto el Ciclo Hibrido, el cual es el primer y único ciclo termodinámico aplicado a una Central en América latina, además de ser ciclo de muy poca aplicación alrededor del mundo. En la figura 1.1 se muestra la Central Termoeléctrica Valle de México.



Figura 1.1 Central Termoeléctrica Valle de México

La tabla 1.1 muestra las fechas de inicio de la operación comercial de las unidades de la Central Termoeléctrica Valle de México.

Tabla 1.1 Histórico de operación comercial

Unidad	Fecha inicio operación comercial
1	15 de Abril 1963
2	12 Febrero 1971
3	01 Diciembre 1970
4	3 Febrero 1974
5	27 Abril 2002
6	27 Mayo 2002
7	27 Mayo 2002

1.3.1 Descripción del Ciclo de Potencia

La unidad 3, que es el **caso de estudio**, tiene un ciclo Rankine regenerativo con recalentamiento intermedio del vapor. Los equipos principales de dicha Unidad son: un generador de vapor Mitsubishi Heavy Industries LTD (economizador, generador de vapor, sobrecalentador, recalentador) que alimenta con su vapor de escape a un turbogenerador Hitachi de tipo acción-reacción entregando una potencia de 158 MW en condiciones de diseño (la turbina con etapas de alta, media y baja presión); condensador; bombas de condensado; ciclo de agua de alimentación con todos sus accesorios tales como condensador de vapor de sellos, eyector, calentadores de alta y baja presión, deareador, y bombas de agua de alimentación; y de todos los accesorios, derivaciones y válvulas de control.

La figura 1.2 muestra la unidad 3 de la central termoeléctrica con el equipo principal del ciclo térmico.

Tabla 1.2 Nomenclatura de Equipos de la Unidad 3

Equipo	Nomenclatura
1.- Generador de Vapor	GV
2.- Turbina de vapor con secciones de Alta e Intermedia Presión	TAP y TPI
3.- Turbina de Baja Presión	TBP
4.- Sistema de Enfriamiento	SE
5.- Bombas de Condensado	b1
6.- Condensador de Vapor de Sellos	CVS
7.- Eyector de Vapor	EV
8.- Calentador de Baja Presión	C1
9.- Calentador de Baja Presión	C2
10.- Deareador o Desgasificador	C3
11.- Bombas de Agua de Alimentación	b2
12.- Calentador de Alta Presión	C4
13.- Calentador de Alta Presión	C5
14.- Calentador de Alta Presión	C6
15.- Generador Eléctrico	GE
16.- Bifurcación a C6 y al Recalentador	Bif1
17.- Bifurcación al CVS y al Eyector	Bif2
18.- Unión de las corrientes del CVS y Eyector	U
19.- Bifurcación a C4 y Atemperación	Bif3
20.- Bifurcación a Eyector y Vapor Principal	Bif4

A continuación se describe la forma en que se desarrolla el proceso:

En el ciclo de potencia de la Unidad 3, el vapor procedente del generador de vapor se expande primero por la sección de alta presión de la turbina de vapor. A la salida de esta, parte del vapor es enviado a un calentador de alta presión y lo demás se expande en la sección de media presión de la turbina. En esta sección sufre de tres extracciones de vapor hacia los calentadores de alta presión y al deareador, mientras que el vapor restante es dirigido a la sección de baja presión con dos extracciones a los calentadores de baja presión. El vapor de escape de la turbina de vapor entra al condensador donde intercambia calor con agua de enfriamiento (agua de circulación) llegando así a condensarse. A continuación, el líquido es succionado y descargado por las bombas de condensado, pasando luego por dos calentadores

de baja presión y al deareador, para posteriormente atravesar las bombas de agua de alimentación y los tres calentadores de alta presión. Finalmente el líquido entra al generador de vapor cerrándose el ciclo de potencia. El vapor a su paso por la turbina de vapor en sus tres secciones (alta, intermedia y baja presión) genera potencia eléctrica.

El sistema de enfriamiento es uno de los sistemas más importantes en una Central Termoeléctrica, ya que este proporciona el agua para el enfriamiento y condensación del vapor. Este enfriamiento es requerido por diferentes equipos, teniendo la particularidad de ser agua negra tratada, la cual proviene de la planta de tratamiento de aguas negras localizada aproximadamente a 5 kilómetros de la Central, siendo transportada por tubería y sistema de bombeo llegando hasta las piletas de las torres de enfriamiento.

En este sistema, el vapor que escapa de la turbina de vapor fluye sobre la parte exterior de los tubos del condensador, condensándose y transfiriendo calor al agua de enfriamiento a través de los tubos, es decir, cediendo el calor latente del vapor a calor sensible del agua de circulación.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II. ANÁLISIS EXERGÉTICO

En este capítulo se presenta el concepto de exergía, desde sus fundamentos hasta su aplicación como función de estado, de transferencia y como eficiencia de proceso. Se comienza con los conceptos básicos de la primera y segunda ley de la termodinámica y su aplicación en los procesos, enfocándose posteriormente con la introducción del concepto de exergía y sus aplicaciones.

2.1 Primera Ley de la Termodinámica

En las operaciones unitarias que se llevan a cabo en las centrales termoeléctricas se utilizan grandes cantidades de energía en forma de calor y/o trabajo, y es de considerable interés conocer el consumo de energía en cada operación o proceso y el grado de aprovechamiento de esta para tener los elementos técnicos que permitan hacer propuestas encaminadas a reducir el consumo de energía.

Durante la interacción entre un sistema y sus alrededores, la cantidad de energía ganada por el sistema debe ser exactamente igual a la energía perdida por su entorno o la acumulada en su propio volumen (balance de energía) [1]. De esta manera se introduce como La Primera Ley de la Termodinámica o el principio de conservación de la energía que establece que la energía no puede crearse ni destruirse; solo puede transformarse.

Considerando un sistema abierto en general con e entradas y s salidas de flujo como el que aparece en forma esquemática en la figura 2.1

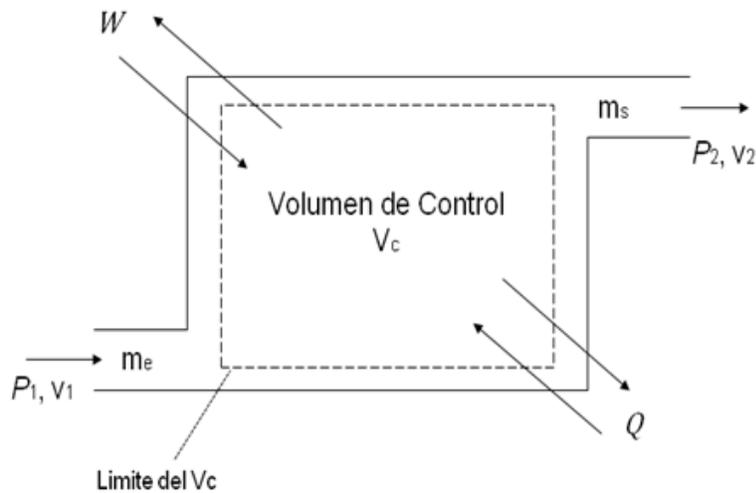


Figura 2.1 Volumen de control: Sistema industrial abierto objeto del análisis termodinámico

El balance de energía en este sistema puede escribirse analíticamente como sigue:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{E}_e - \sum_s \dot{E}_s = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{VC}$$

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m}_e e_e - \sum_s \dot{m}_s e_s = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{VC} \quad (2.1)$$

con $\left(\frac{\partial E}{\partial t} \right)_{VC}$ como la razón de cambio de la energía contenida en el sistema.

La energía específica puede escribirse de la siguiente manera

$$e_f = u + \frac{\bar{v}^2}{2} + g_c \quad (2.2)$$

Con la definición de entalpía como $h = u + pv$, velocidad media \bar{v} , y altura z , que se evalúan a las condiciones de entrada o salida del sistema.

- Balance de Energía

Sustituyendo (2.2) en (2.1) se tiene:

$$\dot{Q} - \dot{W}_t + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{\bar{v}^2}{2} + g_c z_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{\bar{v}^2}{2} + g_c z_s \right) = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{VC} \quad (2.3)$$

La ecuación anterior constituye un balance general de energía valido para cualquier sistema.

- Balance de Masa

Normalmente, la ecuación (2.3) va acompañada con el principio de conservación de materia, la cual establece que la materia no se crea ni se destruye, y se expresa como:

$$\sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s = \left(\frac{dm}{dt} \right)_{VC} \quad (2.4)$$

con $\left(\frac{dm}{dt} \right)_{VC}$ como la razón de cambio de la masa dentro del sistema.

Los conceptos de calor, trabajo y entalpia están involucrados en los balances de energía (análisis térmicos), por lo que se explican a continuación:

Calor (Q): es una forma de energía que se transfiere entre dos sistemas (o un sistema y sus alrededores) debido a una diferencia de temperaturas. Puede originarse por conducción, convección o radiación. Por lo tanto, no existe transferencia de calor entre dos sistemas que se encuentran a la misma temperatura. La transferencia de calor siempre se lleva a cabo de mayor a menor temperatura [2]. Un proceso durante el cual no hay transferencia térmica se denomina adiabático.

Trabajo (W = W_t + δpν) al igual que el calor es una interacción de energía entre un sistema y sus alrededores. El Trabajo se define como trabajo técnico (W_t), mas trabajo de flujo (δpν). Los cuales se entienden como la transferencia de energía asociada con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia, y el cambio

volumétrico de un sistema respecto a su entorno a determinada presión de un sistema, respectivamente [2].

La transferencia de calor y trabajo tienen similitudes como:

- 1.- Ambos se reconocen cuando cruzan las fronteras del sistema.
- 2.- Ambos se asocian con un proceso no con un estado.
- 3.- Los sistemas poseen energía, pero no transferencia de calor o trabajo.
- 4.- Ambos son funciones de la trayectoria (sus magnitudes dependen de la trayectoria seguida durante un proceso, así como de los estados extremos).
- 5.- Ambos ocurren solamente cuando las variables de estado (T, p) no son iguales en el sistema y sus alrededores, respectivamente.

Entalpia: es una combinación de propiedades que se realiza por simplicidad y conveniencia, y es definida mediante la relación siguiente [3]:

$$H = U + pV \quad (2.5)$$

$$h = u + pv \quad (2.6)$$

donde:

- U es la energía interna, que es la suma de todas las formas de energía microscópicas de un sistema. Se relaciona con la estructura y el grado de actividad molecular, y puede verse como la suma de las energías cinética y potencial de las moléculas.
- pV (producto de la presión por el volumen) este término se conoce como trabajo de flujo o energía de flujo, que es la energía requerida para empujar la masa dentro o fuera del volumen de control en sistemas abiertos.

2.2 Segunda Ley de la Termodinámica

Esta ley de la termodinámica establece que los procesos ocurren en cierta dirección y que la energía tiene cantidad así como calidad. Un proceso no es posible a menos que satisfaga tanto la Primera como la Segunda Ley de la termodinámica [1].

En la figura 2.2 se muestra una planta de potencia, en la que cierta cantidad de calor se suministra al generador de vapor mientras la turbina realiza trabajo. Al mismo tiempo, otra cantidad de calor se disipa al ambiente en el condensador, para transformar en condensado el vapor húmedo que descarga la turbina. Esta pérdida de calor en el condensador no es justificable aparentemente, pues se eliminara el condensador, se podría obtener, tal vez un ahorro sustancial en la energía suministrada al generador de vapor. Un balance de energía, indica que la potencia desarrollada por la turbina sería idénticamente igual al flujo de calor añadido en el generador de vapor, y la eficiencia térmica de 100%. Todos los intentos realizados en esta dirección han resultados inútiles.

Sin embargo, el enunciado de Kelvin-Plank de la Segunda Ley de la Termodinámica expresa que ninguna maquina térmica puede tener una eficiencia térmica del 100%, o para que una planta de potencia opere, el fluido de trabajo debe intercambiar calor con el ambiente así como con el generador de vapor.

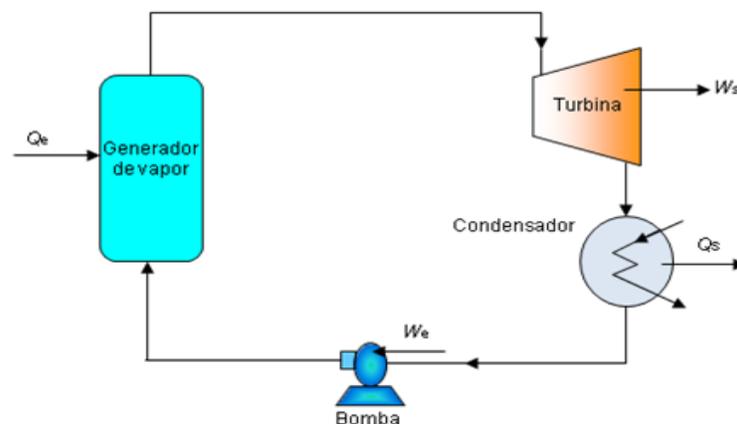


Figura 2.2 Esquema de una Central Básica de Generación de Potencia

Entropía

En la Segunda Ley de la Termodinámica se postula a la entropía, S , como una función de estado que permite describir el sentido en que ocurren los procesos y la manera como se emplea la energía en los mismos [4].

Considerando la figura 2.1 resulta el balance de entropía para un sistema abierto

$$\left(\frac{ds}{dt}\right)_{VC} \geq \sum_e \dot{m}_e S_e - \sum_s \dot{m}_s S_s + \frac{\dot{Q}}{T_0} \quad (2.7)$$

- Balance de entropía

El balance de entropía para un sistema abierto en régimen estacionario es:

$$\sum_s \dot{m}_s S_s - \sum_e \dot{m}_e S_e = \frac{\dot{Q}}{T_0} + \dot{S}_{gen} \quad (2.8)$$

donde \dot{m} es el flujo másico, s son las entropías, \dot{Q} es el calor transferido a la temperatura T_0 y \dot{S}_{gen} es la entropía generada, e son entradas y s salidas.

En la medida en la que se genera entropía, se está desaprovechando el potencial energético de los cuerpos y, por consiguiente, la eficiencia del uso de la energía disminuye [5]. La entropía se genera por causa de las irreversibilidades termodinámicas inherentes al proceso.

2.3 Exergía

El método de análisis de exergía está basado en la Segunda Ley de la termodinámica y en el concepto de entropía. Los conceptos básicos de exergía se remontan a los estudios de Carnot en 1824 y Clausius en 1865. Sin embargo, no fue hasta finales del siglo XIX, cuando independientemente Gibbs en los EE.UU. y Maxwell en Inglaterra, propusieron las primeras definiciones de exergía (también llamada disponibilidad, energía procesable, trabajo disponible o capacidad de trabajo).

El análisis exergético está relacionado con la producción irreversible de entropía en los sistemas, según lo descrito por Tolman y Fine (1948), y usado por Bejan (1975) para análisis de equipo criogénico e intercambiadores de calor. La idea de minimizar la producción irreversible de entropía conlleva a la de reducir las pérdidas de exergía en los sistemas para mejorar su eficiencia y conservar las fuentes de energía.

Las bases de la exergía parten de la Primera y Segunda Ley de la Termodinámica. La premisa que lleva al concepto de exergía se da en el hecho de que “siempre existe la oportunidad de producir trabajo entre dos sistemas cuando hay algún desequilibrio termodinámico entre ellos (ya sea térmico, mecánico, químico, etc.)”, para definir los dos sistemas se declaran como:

- 1) El sistema de análisis.
- 2) El sistema teórico ideal que satisface el equilibrio termodinámico, también conocido como ambiente de referencia.

Bajo la definición de los dos sistemas, la exergía se puede definir como: “El máximo trabajo teórico que puede obtenerse de la interacción mutua de ambos sistemas hasta alcanzar el equilibrio termodinámico” Para que la exergía sea extraída de una fuente de energía, depende del estado de sus alrededores [6].

2.4 Exergía del Trabajo, Calor y Masa

La exergía, de la misma manera que la energía, tiene dos formas fundamentales de manifestarse: la primera asociada a la transferencia de energía que no está acompañada por un flujo de materia, y la segunda asociada al contenido de exergía transportada por los flujos de masa. En el primer caso la exergía es una función de transferencia (resultante de una energía en tránsito) y las maneras para efectuar esa transferencia son las asociadas al trabajo, B_w y al calor, B_h . En el segundo caso, la exergía es una propiedad de la materia, B_m . En la tabla 2.1 se muestran las diferentes formas de la exergía [7].

Tabla 2.1 Formas de Exergía.

Función de Transferencia	Ecuación
Exergía del Trabajo	$B_w = W$
Exergía del Calor	$B_h = Q\theta = Q(1 - T_0/T)$
Función de Estado	
Exergía de la Materia (E_m)	
- Exergía Inercial:	$B_{in} = B_g + B_v$
a) Exergía Potencial	$B_g = g_c(z - z_0)$
b) Exergía Cinética	$B_v = 1/2 (\bar{V}^2 - \bar{V}_0^2)$
- Exergía Sustancial:	$B_s = B_f + B_q$
a) Exergía Física	$B_f = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$
b) Exergía Química	$B_q = \sum_{k=1}^n N_k(u_{k0} - u^0k)$

- Exergía del Trabajo

La definición de trabajo se menciona con la Primera Ley de la Termodinámica, como el trabajo técnico que se intercambia durante el proceso. Así que ahora se puede interpretar dicho término como la capacidad de producir trabajo que se ha transformado. Si $\delta W > 0$, es que el sistema realiza trabajo contra el exterior y por ello, el trabajo intercambiado con el ambiente.

$$B_w = W$$

- Exergía del Calor

De manera contraria a la exergía del trabajo, cuyo valor es igual a la cantidad de trabajo, la exergía del calor es diferente de la cantidad de calor. Esta exergía es igual a la cantidad máxima de trabajo que puede obtenerse a partir de una cantidad dada de calor, Q , mediante una maquina reversible operando entre una fuente de calor a una temperatura T constante y un sumidero de calor a una temperatura T_0 constante:

$$B_h = Q\theta = Q(1 - T_0/T) \quad (2.9)$$

Donde θ se denomina como el factor de Carnot. La forma de exergía B_h es útil no solo para analizar transferencias de calor en materiales, sino también para analizar la variación en el contenido de calor de la materia.

- Exergía de la Materia

La exergía de la materia tiene dos contribuciones:

- 1) Exergía inercial, B_{in} , que se asocia con la cantidad de materia independiente de su composición y estado, y se conforma por la exergía cinética, B_v , resultante de la velocidad, y la exergía potencial, B_g , resultante de la posición de la materia con respecto al campo gravitacional de la tierra.
- 2) Exergía sustancial, B_s , y depende de su composición y estado; esta exergía puede dividirse en dos componentes: la exergía física, B_f , debida al alejamiento en temperatura y presión con respecto a los alrededores, y la exergía química, B_q , debida al alejamiento en composición con respecto a los alrededores.

La exergía de la materia es entonces la suma de todas estas contribuciones (ver tabla 2.1):

$$B_m = B_{in} + B_s \quad (2.10)$$

$$B_m = (B_g + B_v) + (B_f + B_q) \quad (2.11)$$

2.5 Balances Exergéticos

Como combinación de los balances de masa, energía y entropía, se puede hacer un análisis que informa de la calidad de las energías intercambiadas y de la capacidad de los sistemas para realizar trabajo útil; sea T_0 la temperatura ambiente cuando se realiza el proceso en un sistema abierto, combinando los balances de energía y de entropía de la siguiente forma:

$$[\textit{Balance de Exergía}] = [\textit{Balance de Energía}] - T_0[\textit{Balance de Entropía}]$$

Considerando la figura 2.3 de un sistema abierto, estos balances se expresan:

Balance de Energía o por Primera Ley:

$$\sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{\bar{v}_e^2}{2} + g_c z_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{\bar{v}_s^2}{2} + g_c z_s \right) + \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} = 0 \quad (2.12)$$

Balance de Entropía o por Segunda Ley:

$$0 = \sum_e \dot{m}_e s_e - \sum_s \dot{m}_s s_s + \left(\sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_i} - \frac{\dot{Q}_0}{T_0} \right) + \dot{S}_{gen} \quad (2.13)$$

Multiplicando la ecuación (2.13) por la temperatura ambiente, restándole el producto obtenido a la ecuación (2.12), y despejando el trabajo se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{W} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{\bar{v}_e^2}{2} + g_c z_e - T_0 s_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{\bar{v}_s^2}{2} + g_c z_s - T_0 s_s \right) + \sum_i \dot{Q}_i \left(1 - \right. \\ \left. T_0/T_i \right) - T_0 \dot{S}_{gen} + \frac{\delta}{\delta t} (E - T_0 S)_{VC} \end{aligned} \quad (2.14)$$

El trabajo útil máximo se obtiene cuando se iguala a cero el término de generación de entropía, $\dot{S}_{gen} = 0$ (trabajo reversible).

En el caso de condiciones de flujo estacionario, el trabajo útil máximo se escribe como:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{max} = \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{\bar{v}_e^2}{2} + g_c z_e - T_0 s_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{\bar{v}_s^2}{2} + g_c z_s - T_0 s_s \right) + \sum_i \dot{Q}_i \left(1 - \right. \\ \left. T_0/T_i \right) \end{aligned} \quad (2.15)$$

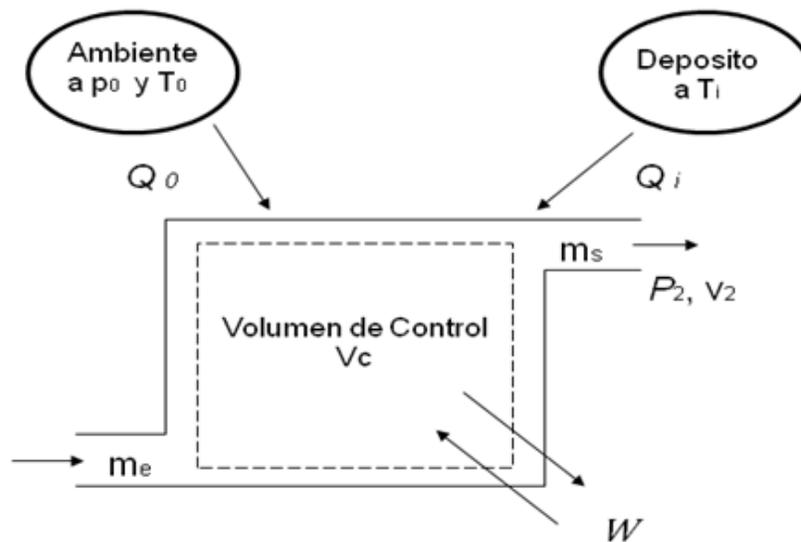


Figura 2.3 Sistema abierto que intercambia calor con los alrededores y con otro depósito

Sustituyendo las formas de exergía descritas en la tabla 2.1 en esta ecuación, el balance exergético para sistemas abiertos es:

$$\dot{B}_w = \sum_e \dot{m}_e (B_f + B_v + B_g)_e - \sum_s \dot{m}_s (B_f + B_v + B_g)_s + \sum_i \dot{B}_{hi}$$

$$\sum_i \dot{B}_{hi} = \sum_e \dot{m}_e (B_f + B_v + B_g)_e - \sum_s \dot{m}_s (B_f + B_v + B_g)_s \quad (2.16)$$

2.6 Pérdida de Exergía

Si todos los procesos de intercambio de calor y trabajo del sistema fueran reversibles, el balance de exergía en condiciones estacionarias sería conservativo. Ya que, al no existir disipaciones, este balance informaría que las capacidades de realizar trabajo se han aumentado o disminuido en una cantidad que corresponde al trabajo técnico intercambiado con el exterior. La base del análisis exergético son las pérdidas de exergía.

Estas pérdidas en un sistema pueden dividirse en dos:

- ❖ Las primeras son las que resultan de la irreversibilidad de los procesos que se efectúan en el interior del sistema.
- ❖ Y por otro lado las que resultan de una descarga de exergía al medio ambiente conocidas como pérdidas efluentes de exergía [8].

Esta situación es la ideal e inexistente, ya que la realidad muestra que parte, o todas las capacidades de producir trabajo, exergía, se disipan debido a la existencia de procesos irreversibles. Así que debe existir un término en el balance de exergía que de cuenta de la situación.

La diferencia entre la exergía total que entra al sistema y la exergía total que sale se denomina pérdidas de exergía por irreversibilidad y están relacionadas con la temperatura del ambiente de referencia.

$$I = \sum B_{entrada} - \sum B_{salida} = T_0 \Delta S = T_0 S_{gen} \quad (2.17)$$

Las pérdidas efluentes de exergía son simplemente la suma de todas las corrientes de exergía que son arrojada al medio ambiente:

$$Efl = \sum B_{arrojadas\ al\ ambiente} \quad (2.18)$$

Las pérdidas totales de exergía, en cualquier sistema son iguales a la suma de la destrucción de exergía por irreversibilidades internas y por las pérdidas de exergía por los efluentes hacia el medio ambiente:

$$P_{ex} = I + Efl \quad (2.19)$$

2.7 Eficiencia Térmica y Exergética

Eficiencia Térmica

La eficiencia térmica es una medida del funcionamiento de una máquina térmica, definida como el cociente de la energía que deseamos obtener de dicha

maquina y la energía que se debe transferir para su funcionamiento [1]. La eficiencia o rendimiento, en general, puede expresarse en términos de la salida deseada y de la entrada requerida como:

$$Eficiencia = \frac{salida\ deseada}{entrada\ necesaria} \quad (2.20)$$

En maquinas térmicas la salida deseada es la salida de trabajo neto, y la entrada necesaria es la cantidad de calor suministrado al fluido de trabajo. En ese caso la eficiencia térmica puede expresarse como (ver figura 2.2)

$$Eficiencia\ termica = \frac{salida\ de\ trabajo\ neto}{entrada\ de\ trabajo\ neto}$$

$$\eta_t = \frac{W_{neto,sal}}{Q_e} \quad (2.21)$$

como $W_{neto,sal} = Q_e - Q_s$ se tiene

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_s}{Q_e} \quad (2.22)$$

Eficiencia Exergética

La eficiencia exergética, es el parámetro que relaciona la exergía que sale del sistema con la exergía que entra al sistema:

$$\psi = \frac{\sum B_{salida}}{\sum B_{entrada}} \quad (2.23)$$

donde:

$\sum B_{salida} = \sum B_{entrada} - 1$, entonces la ec. (2.23) puede expresarse en términos de irreversibilidad y exergía de entrada.

$$\psi = 1 - \frac{I}{\sum B_{entrada}} \quad (2.24)$$

De esta manera, la eficiencia exergética mide la fracción de la exergía total que entra al sistema y que no se pierde por los efectos de las pérdidas de los procesos que se efectúan en el sistema. Si el proceso fuera ideal, es decir sin pérdidas de exergía (o sin irreversibilidades totales), la eficiencia exergética sería el 100%.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III. ANÁLISIS TERMEOCONÓMICO

En este capítulo se presenta la conexión entre la exergía y la economía, han dado como resultado la disciplina conocida como termoeconomía, la cual permite comparar de una manera racional las distintas posibilidades de funcionamiento de una instalación y con ello adoptar decisiones de ahorro y mejora bien fundamentadas. Una de las metodologías más difundidas dentro de la termoeconomía es la “Teoría del Costo Exergético” [8]. En esta teoría se exponen los fundamentos que permiten analizar el proceso de costos y la forma de asignación de los mismos.

3.1 Exergía y Economía

La termoeconomía es un concepto que combina el análisis exergético con la ingeniería económica, para evaluar y optimizar el diseño y funcionamiento de los sistemas térmicos. La principal característica de un análisis termoeconómico es la asignación de costos a la exergía que contiene una corriente de energía.

Los pasos para evaluar un estudio termoeconómico se puede plantear de esta manera:

1. Un análisis termodinámico que permita calcular la exergía de cada uno de los flujos.
2. Un análisis de costos exergéticos del sistema; y
3. Un análisis económico en base a los costos termoeconómicos del sistema.

Los objetivos de un análisis termoeconómico son:

- Identificar el lugar, magnitud y fuente de las pérdidas exergéticas en un sistema térmico.
- Calcular el costo asociado con las pérdidas exergéticas.
- Estimar los costos de producción.
- Facilitar los estudios de optimización

- Asistir en la toma de decisiones concernientes a la operación, mantenimiento y asignación de fondos de investigación.
- Comparar alternativas técnicas.

Antecedentes

La termoeconomía, termino propuesto por los autores M. Tribus y R. B. Evans en 1962, nace formalmente como nueva disciplina en la segunda mitad de la década de los 50 y primera mitad de los 60 mientras estudiaban los procesos de desalinización, desarrollando la idea de asignar costos a las corrientes de exergía, y formulando balances de costos a los componentes del sistema energético.

Las primeras propuestas de asignación de costos a los productos de una instalación, a partir de criterios físicos, fueron hechas por J. H. Keenan en 1932, que calculo el costo del vapor y del trabajo producido en una planta de cogeneración en base a su exergía, y por M. Bénédict que en 1949 determino los costos imputables a las irreversibilidades de una planta de separación de aire y los utilizo como criterio para obtener el diseño optimo. Sin embargo, el desarrollo importante de estas metodologías de análisis termoeconómico tiene lugar en las dos últimas décadas (R. A. Gaggioli, 1987, G. Tsatsaronis, 1987). Como dato significativo de esto se tiene que, cada vez con más frecuencia, los análisis exergético (Moran, 1988, Bejan, 1988, Sala, 1988, Gyftopoulos, 1991) y termoeconómico (Valero, 1990, Szargut, 1988, Kotas, 1985) de los sistemas térmicos entran a formar parte de los libros de texto y material didáctico de los estudios de ingeniería.

El valor de los análisis de exergía y termoeconómicos en la evaluación de sistemas energéticos son generalmente reconocidos actualmente. Es importante señalar que estos análisis no reemplazan sino complementan y realzan los análisis de energía e ingeniería económica convencional.

3.2. Proceso de Formación de Costos Exergéticos

El procedimiento de fabricar un producto, a partir de un conjunto de equipos y otros productos se conoce como proceso industrial o proceso productivo. En la mayoría de los casos estos procesos no solo se obtienen productos sino también residuos y subproductos. Es necesario, por lo tanto, una valoración energética de los procesos y los productos [9] [10].

Una valoración adecuada requiere prestar atención a las pérdidas en el proceso. Si el proceso fuera totalmente eficiente no existirían pérdidas y todas las transformaciones de un producto en otro, serían reversibles.

El concepto de *fuel* (F) y *producto* (P) se introduce por Frangopoulos en 1989, donde se considera que en cualquier sistema o subsistema, hay *exergía de fuel* o *recurso* (F) y *producto* (P); sin embargo, las definiciones son subjetivas y dependen del analista para su correcta asignación. Dicho análisis sirve para crear una estructura productiva del sistema.

En un proceso productivo para identificar el costo de una corriente (sea producto, recurso o residuo de un proceso) se introduce el concepto del **costo exergético**, que se denotará por B^* , y se define como “la cantidad de exergía de *fuel* (F) iniciales para producir un producto (P)” [12]. Por su parte, se define **el costo exergético unitario** k^* como la relación entre el costo exergético y la exergía en un punto del proceso productivo.

$$B^* = B + \sum_{\text{proceso}} I$$

$$k^* = \frac{B^*}{B} \geq 1 \quad (3.1)$$

Una vez que se han definido las condiciones exergéticas de todos los flujos en el sistema, se puede encontrar su costo exergético [11], B^* , que equivale a la cantidad de exergía necesaria para obtener un producto funcional. La definición de costo exergético unitario se expresa como:

$$k = \frac{B^*}{B} \quad (3.2)$$

Dado que B^* es una magnitud expresada en términos de exergía, se conoce como costo exergético que equivale a la cantidad de exergía necesaria para obtener un producto funcional, para fines de notación se utiliza en cada proceso productivo la siguiente nomenclatura: F (fuel o recurso); P (Producto); R, L (Residuo, Pérdida o Subproducto).

A su vez, los costos exergético se denotan como F^*, P^* y $R^* (L^*)$, respectivamente. Y los costos exergéticos unitarios como: k_F^*, k_P^* y k_R^* , respectivamente.

Consumo Exergético de un Proceso

El consumo exergético unitario de un proceso es inversamente proporcional a la eficiencia exergética (fracción de recursos requeridos que se convierte en el producto deseado).

El consumo exergético unitario de un proceso se expresa como:

$$\frac{1}{\psi} = k_{ex} = \frac{\text{Recurso utilizado para obtenerlo}}{\text{Unidades de producto obtenido}} = \frac{F(\text{unidades de exergia})}{P(\text{unidades de exergia})} \quad (3.3)$$

Si se analiza en un proceso simple y se miden los recursos y productos en términos de exergía, la eficiencia exergética, ψ , es la inversa del consumo exergético de recursos, k_{ex} (o k).

Proceso de formación de costos exergéticos

Desafortunadamente, la falta de datos exergéticos es un serio inconveniente de este análisis. Buscar que irreversibilidades son el origen del costo de un producto, no es tan fácil como realizar balances de exergía; se necesita además un análisis más a fondo del proceso que se nombra como “proceso de formación de costos”. Su estudio es un paso adicional al análisis exergético convencional al que se llama “contabilidad de costos exergéticos” y es el pilar del análisis termoeconómico. Si se supone, a modo de ejemplo, un sistema formado por dos componentes, con eficiencia definidas y unidos de forma secuencial, como la figura 3.1.

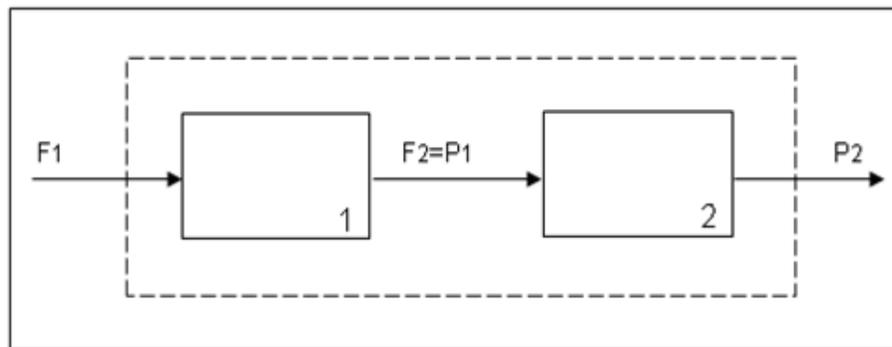


Figura 3.1 Sistema secuencial. Todos los procesos están encadenados, el recurso que se utiliza en un proceso, ha sido producto de algún otro proceso que este a su vez ha consumido recursos que son productos de productos anteriores.

En términos de costos exergéticos (F^* , P^*) se tendrá:

$$F_1^* = F_1 \qquad P_1^* = F_1 = P_1 + I_1$$

$$F_2^* = P_1^* = F_2 + I_1 \qquad P_2^* = F_2^* = P_2 + I_1 + I_2 \qquad (3.4)$$

Como puede verse en estas relaciones, el costo exergético de un producto es igual a su exergía más la suma de irreversibilidades acumuladas a lo largo del proceso. Para producir, P_2 , producto del sistemas, es necesario consumir F_2 recursos, así el consumo exergético unitario de la componente 2 es:

$$k_2 = F_2/P_2 ;$$

pero F_2 es a su vez producto del equipo 1, por lo que $F_2 = P_1$. Y para producir P_1 han sido necesarios F_1 recursos, que son también los recursos totales que llegan al sistema.

De la misma manera, cada componente del sistema tiene dos costos exergéticos en la unidad asociados: uno para el fuel $k_F^* = \frac{F^*}{F}$ y el otro para el producto $k_P^* = \frac{P^*}{P}$

Siempre el costo exergético unitario ($k^* > 1$) es mayor o igual que la unidad, y este va creciendo conforme la estructura de producción de un determinado flujo es más compleja e ineficiente. Por lo tanto el costo exergético unitario es una medida de la ineficiencia de un proceso entre más pequeña sea, resulta mejor, también indica el consumo de combustible que ha sido requerido para producir una unidad de exergía.

Así, el costo exergético de cada producto se puede expresar como su exergía mas la suma de las irreversibilidades acumuladas a lo largo de su proceso de producción, y por otro lado, el costo exergético unitario de los productos de los componentes de un sistema puede expresarse como función de los consumos exergéticos unitarios de cada componente individual.

Se ha visto que para determinar el costo es necesario definir los límites del sistema. Todos los flujos que entren al sistema tendrán que tener previamente definido su costo. El costo de los flujos que entran a un sistema serán productos de algún otro sistema anterior. En algún momento de esta cadena regresiva se encuentra con los recursos naturales y a su vez la única base de partida para valorar un recurso natural es por medio de su propia exergía.

$$F_{inicial}^* = B$$

Residuos

A la vez que se obtienen productos funcionales, se generan residuos. Es algo inevitable en todo proceso productivo. En los procesos de combustión ocurren transformaciones de energía química en energía mecánica, esto no solo tiene baja eficiencia, sino que además imponen la obtención de flujos adicionales, en principio no deseados. Estos residuos vuelven a un sumidero aun activos, generando más entropía, y además se requiere eliminar, para lo cual se tiene que consumir más recursos para rebajar su potencial intensivo, enfriándolos, expandiéndolos, dispersándolos, etc.

Se pueden considerar tres tipos de residuos según su procedencia:

- ❖ **Perdidas (L):** Flujos que no tienen alguna utilidad y son eliminados sin producir daños, o necesitar más recursos externos, incluyendo inversiones en equipamiento, su costo se representa como L^* .
- ❖ **Residuos (R):** Flujos que no tienen alguna utilidad, pero que su existencia produciría daños en la instalación o en el entorno, y por lo tanto es necesario un consumo adicional de recursos energéticos y económicos, para que dichos flujos eliminados o convertidos en flujos de pérdidas, cuyo costo se denotara por R^* . Este costo puede formarse en el propio equipo en el que se produce el flujo, pero también a lo largo de una cadena de flujos y equipos del proceso de producción que generan el residuo. Por ejemplo, en el caso de los gases generados en la cámara de combustión del generador de vapor ya que afectan a todo el proceso de intercambio de calor: sobrecalentador, precalentadores de aire, economizador, etc.
- ❖ **Subproductos:** Flujos adicionales obtenidos, que a veces son inútiles desde un punto de vista productivo, pero pueden ser reutilizados produciendo beneficios, que repercutan en el costo del producto final. Ejemplos de este tipo de flujos se tienen en el calor disipado en el condensador de un ciclo Rankine que puede ser utilizado para calefacción, o las cenizas de la combustión para la fabricación

de cemento. En tal caso se genera un costo de residuo $R^* < 0$, equivalente a la cantidad de combustible ahorrado.

3.3 Teoría del Costo Exergético

De acuerdo a la teoría económica, la contabilidad de costos tienen la función de recoger, medir y organizar la información sobre lo que cuestan las cosas. Los costos implican pérdidas de recursos y por tanto las personas y empresas intentan optimizar los costos de sus productos o servicios. Las empresas utilizan los datos de la contabilidad de costos para la toma de decisiones, control y evaluación además de estimar los costos de las diferentes alternativas. Pero, los principales problemas en la contabilidad de costos aparecen cuando por la complejidad o desconocimiento del proceso no se sabe asignar costos a los objetivos de producción [13].

En el caso de la contabilidad de costos exergéticos la problemática es similar. Debe proporcionar un método racional para la asignación de costos de los productos en términos de recursos naturales y su impacto en el medio ambiente. Debe ser algo más que una técnica para el ahorro de energía y ayudar al diagnóstico, optimización y la síntesis de sistemas energéticos complejos.

El problema fundamental de la asignación de costos exergéticos es el modo de obtención del costo de todos los flujos que interrelacionan los equipos que componen un sistema. Para construir una teoría de costos es necesario definir tres condiciones básicas:

1.- La definición de los límites del sistema y de los costos de los recursos de entrada al sistema son siempre relativos al sistema bajo estudio. Por ello la información sobre los costos de los recursos energéticos y económicos puestos a disposición del sistema, y dentro de los límites del análisis, deben ser conocidos.

2.- Fijar el nivel de agregación más adecuado para el análisis del sistema. Un problema fundamental es que dependiendo del nivel de agregación seleccionado para analizar el sistema se obtienen distintos valores de los costos. De hecho, si no se dispone de más información sobre el sistema que la defina por su nivel de

agregación no se puede pedir al conjunto de los costos obtenidos más información de la que se ha introducido.

3.- Uno de los indicadores de la calidad de los componentes del sistema es la eficiencia, donde se localizan las irreversibilidades. Eficiencia e irreversibilidad deben estar relacionadas entre sí y con el resto de variables técnicas y económicas que las afectan.

3.3.1 Estructura Productiva

En general todo sistema térmico tiene un proceso definido: obtener una serie de productos, para lo cual debe consumir un conjunto de recursos. Por ejemplo, el objetivo de una central termoeléctrica es producir energía eléctrica, y para ello es necesario utilizar un combustible: carbón, combustóleo, gas natural, etc. [15].

Para definir una estructura productiva se debe determinar el nivel de agregación de un sistema (o volumen de control) a través de una colección de subsistemas que constituyen el sistema entero. Cada uno y cada nivel agregado tienen una matriz de incidencia asociada que lo define totalmente. Para definir este propósito, se debe indicar en cada componente o subsistema que flujo o combinación de flujos constituye: el producto (P), el fuel (F), y finalmente los flujos de pérdidas (L).

Para obtener la definición Fuel-Producto que mejor represente la función productiva de un componente, es necesario examinar simultáneamente las transformaciones energéticas que tienen lugar en ellos. La definición $F - P$, para cada componente, debe cumplir ciertas condiciones, que pueden resumirse en:

- Todos los flujos que entran o salen de un componente, deben estar presentes en la definición $F - P$ una y solo una vez, bien como fuel, producto o pérdida.
- Cada flujo o combinación de flujos que constituyen el fuel, producto y pérdidas de cada componente debe tener un valor de su función exergía mayor o igual que cero.

- El balance de exergía de cada componente debe poderse escribirse en la forma:

$$P = F - I - L$$

$$I = F - P - L > 0 \quad (3.5)$$

con I como la irreversibilidad del componente y F, P, L en términos de exergía.

3.3.2 Reglas de Asignación de Costos Exergéticos

Puesto que los procesos reales son irreversibles: [16], y además ocurren pérdidas, se puede englobar a las irreversibilidades totales I_T como la suma de las pérdidas más la irreversibilidades internas, de esta manera:

$$F - P = I_T > 0 \quad (3.6)$$

Resultara que la exergía necesaria para obtener un producto será siempre mayor o igual que la exergía contenida en el.

Con las ideas expuestas, la Teoría del Costo Exergético se basa en las proposiciones FP que son reglas de asignación de costos, enunciadas a continuación:

P1: El costo exergético de los flujos depende de los costos de los fuel de entrada al sistema. En ausencia de asignaciones externas, el costo de los flujos de entrada al sistema es igual a su exergía, o en otras palabras, su costo exergético unitario es uno.

$$k^* = 1$$

P2: El costo del producto de cada componente del sistema es igual a la suma del costo exergético de los flujos que constituyen el fuel, de dicho componente:

$$F^* = P^*$$

En consecuencia todos los costos generados en el proceso productivo deben ser incluidos en el costo final de los productos. En ausencia de asignaciones externas el costo de los flujos de pérdidas es nulo.

P3: Si el producto de una componente está formado por varios flujos de la misma calidad termodinámica, todos ellos tienen el mismo costo exergético unitario. Esta proposición se basa en el hecho de que si en un equipo se identifican varios productos, se supone que su proceso de formación ha sido el mismo, tienen el mismo costo exergético unitario y por lo tanto se asigna su costo exergético proporcional a la exergía que contienen. Este conjunto de reglas de asignación de costos se conocen como proposiciones FP.

P4: El costo exergético de los flujos de salida al sistema que representen un residuo final y deberán tener costo unitario igual a cero (excepto en el caso de que se requiera de trabajo para su remoción)

$$k^* = 0$$

P5: El costo exergético de los flujos que sean fuel no exhaustados de salida de un subsistema, deberán tener un costo unitario promedio de los costos de los Fuel's de entrada

$$k_{salida}^* = \frac{k_a^* B_a + k_b^* B_b + \dots}{B_a + B_b + \dots}$$

3.3.3 Componentes Disipativos

Los sistemas pueden contener unidades o equipos que se caracterizan por la ausencia de un producto definido que pueda ser medido en término de exergía. Sin embargo su presencia es esencial para la operación de una planta, tanto desde un punto de vista físico, como es el caso del condensador de un ciclo de vapor, de los ventiladores de tiro inducido de una caldera, como desde el punto de vista legal, precipitadores electrostáticos o equipos de desulfuración en el caso de calderas de carbón.

La utilidad de dichos componentes se basa en la interacción con otros componentes del sistema para obtener productos comunes. La presencia de este tipo de componentes hace necesario ampliar la regla de asignación de costos. No hay reglas generales para el tratamiento de los componentes disipativos, aunque en general deben ser tratados como residuos y el costo de las irreversibilidades asociadas con su operación debe ser imputada como recurso de los componentes de la planta que entran en su proceso de formación [16].

3.4 Costos Termoeconómicos

El costo termoeconómico (Π)[14] de un flujo físico de un sistema, es la cantidad de unidades monetarias que son requeridas para producir dicho flujo. Como el costo, se da en las unidades monetarias por ejemplo (*GJ o MMBTU*), de cada unidad de exergía expedida para producir ese flujo.

La formación del costo económico de los flujos internos y productos finales está relacionada tanto con la eficiencia termodinámica del proceso como por el costo de amortización y mantenimiento de los equipos del sistema.

Entonces, se puede considerar el costo termoeconómico de un flujo como la suma de dos contribuciones.

1°.- Costo monetario de la exergía de entrada a la planta para producir dicho flujo y que es por definición su costo exergético La que procede del costo monetario de la exergía de los recursos de la planta.

2°.- Engloba el resto de los costos originados en el proceso productivo (Z) asociado a su obtención: capital, amortización, operación, mantenimiento, etc. escribiéndose de la siguiente manera:

$$\sum \pi_P = \sum \pi_F + Z \quad (3.7)$$

y de forma matricial como:

$$\Pi_P = \Pi_F + Z \quad (3.8)$$

donde: π_P y π_F son los costos termoeconómicos de producto y fuel, respectivamente en \$/hr; Z es el costo de factores no energéticos (amortización, operación y mantenimiento), en \$/hr; Π_P y Π_F son los vectores de costos termoeconómicos de producto y recurso, respectivamente; y Z es el vector de costos de factores no energéticos.

3.5 Metodología de Aplicación del Análisis Termoeconómico

Los procedimientos seguidos para la evaluación termoeconómica son descritos de la siguiente manera:

- 1) Como parte inicial de un análisis termoeconómico se deben conocer los diagramas de flujos y las propiedades termodinámicas (T, p, h, s y X) de cada corriente energética principal en un sistema así como los flujos másicos, las potencias y calores relacionados con su operación, para esto, los datos de diseño y sus datos de operación pueden ser los parámetros más recomendados. Adicionalmente, se deben conocer las condiciones ambientales para el aire y el agua (T_0, p_0, h_0 y s_0) necesarias en la realización del análisis exergético.

- 2) Con la anterior información se aplica el análisis exergético a las principales corrientes de masa, potencia y calor que interrelacionan a los equipos componentes del sistema. En donde para obtener la exergía de las corrientes másicas se emplea la exergía física B_f , mientras en las corrientes de calor desechado y suministrado se utiliza la exergía del calor B_h y para las potencias la exergía del trabajo B_w (ver tabla 2.1). Además se encuentran los parámetros de irreversibilidad I , eficiencia exergética ψ y consumo exergético k_{ex} que indican la calidad de los equipos del sistema.
- 3) Posteriormente se realiza el análisis de costos exergéticos donde se aplican las proposiciones FP a cada equipo con la finalidad de encontrar los costos exergéticos de las corrientes, los costos exergéticos unitarios y el costo de operación exergético por equipo.
- 4) Los resultados son evaluados económicamente con el análisis de costos termoeconómicos. Aquí se calculan los costos termoeconómicos de cada corriente, los costos termoeconómicos unitarios y el costo de operación termoeconómico por equipo.
- 5) Finalmente se analizan comparativamente los valores obtenidos a partir de las condiciones de diseño con los obtenidos a partir de las condiciones de operación, para detectar las pérdidas y oportunidades de ahorro energético. Los parámetros de análisis son las variaciones en costos exergéticos (ΔB^*), en costos termoeconómicos ($\Delta \pi$), en costos de operación exergético (ΔCO) y en costos de operación termoeconómicos ($\Delta CO'$).

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS TERMoeCONÓMICO AL CICLO DE POTENCIA

En este capítulo se muestran los diagramas de flujo y se aplica el análisis térmico, exergético y termoeconómico al ciclo de potencia de la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica Valle de México, a las condiciones de operación actuales al 100 % de carga. Dentro del análisis termoeconómico se obtienen tanto los costos exergéticos como los costos termoeconómicos necesarios para poder evaluar el sistema.

4.1 Análisis Térmico al Ciclo de Potencia

En la figura 4.1 se observa el diagrama esquemático de la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica que es utilizado en el presente trabajo, en el cual se indican los equipos y líneas principales que lo conforman, mientras que en la tabla 4.1 se describe cada una de las corrientes involucradas en el proceso de generación de potencia de esta figura.

4.1.1 Descripción de las Corrientes de Energía

En la tabla 4.2 se muestran las condiciones actuales de operación del ciclo de potencia a una carga del 100%, además en las figuras 4.2 se aprecia el diagrama T-s de la Unidad 3 en esta carga.

El objeto de realizar el estudio de la unidad 3 al 100% de carga es detectar las pérdidas por las disfunciones de los equipos con la máxima producción de potencia y evitando el derroche de los recursos energéticos iniciales (gas natural).

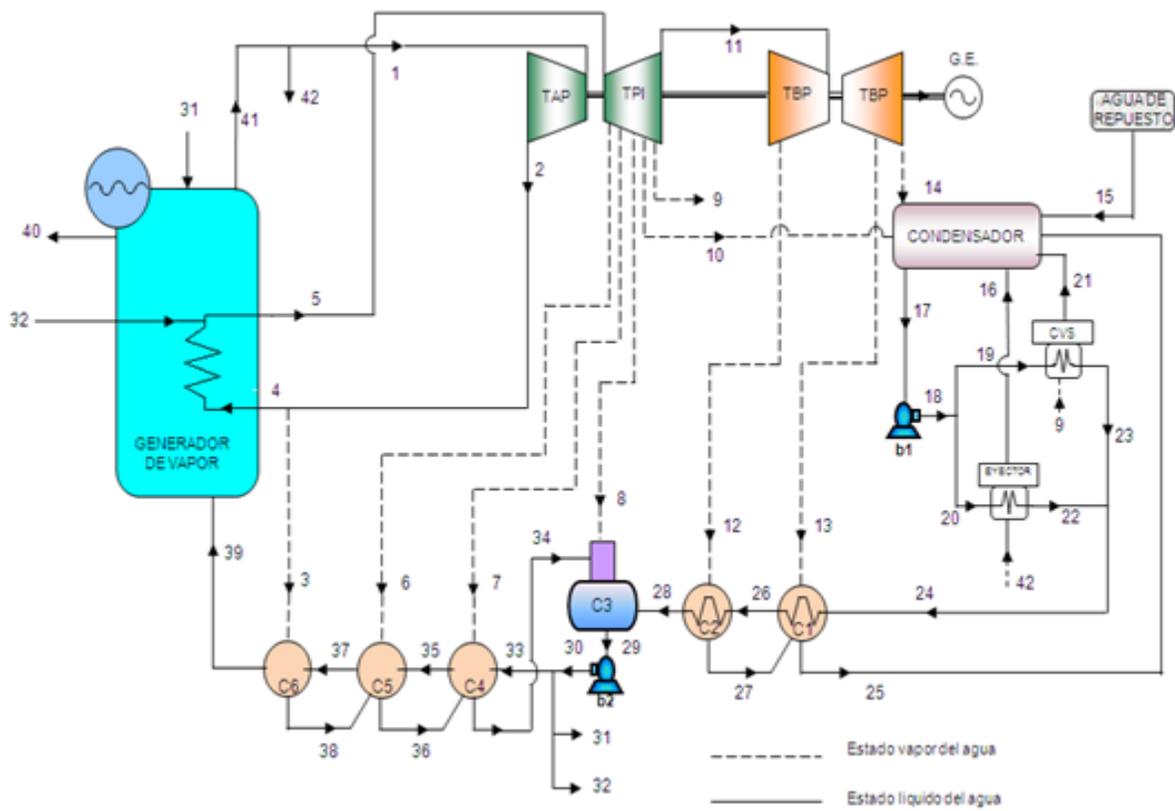


Figura 4.1 Diagrama esquemático de la Unidad 3 de la Central Termoelectrica Valle de México

Las propiedades termodinámicas del ciclo de potencia de la Unidad 3 fueron calculadas mediante el uso del programa TPX de propiedades termodinámicas de Excel (Thermodynamic Properties for Excel).

Tabla 4.1 Descripción de las corrientes del ciclo de potencia

Corriente	Descripción de la corriente
1	Vapor principal, que entra a la TAP
2	Vapor de salida en la TAP hacia el G.V. (recalentador y a calentador de A.P. C6)
3	Vapor hacia el calentador de alta presión C6
4	Vapor recalentado frío
5	Vapor recalentado caliente
8	Tercera extracción de vapor en la TPI hacia el deaerador C3
9	Vapor hacia el CVS
10	Vapor auxiliar hacia el condensador
11	Vapor de la TPI a la TBP
12	Primera extracción de vapor de la TBP al calentador de B.P. C2
13	Segunda extracción de vapor de la TBP al calentador de B.P. C1
14	Vapor de escape de la TBP
15	Agua de repuesto del ciclo de potencia
16	Agua que sale del eyector al condensador
17	Succión de las bombas de condensado (b1)
18	Descarga de las bombas de condensado (b1)
19	Agua de condensado que entra al CVS
20	Agua de condensado que entra al eyector
21	Agua que sale del CVS al condensador
22	Agua de condensado que sale del eyector
23	Agua de condensado que sale del CVS
24	Agua de condensado que entra al calentador de B.P. C1
25	Dren de C1 al condensador
26	Agua de condensado que sale del calentador de B.P. C1
27	Dren de C2 a C1
28	Agua de condensado que llega al deaerador C3
29	Succión de las bombas de agua de alimentación (b2)
30	Descarga de las bombas de agua de alimentación (b2)
31	Atemperación en el sobrecalentador del G.V.
32	Atemperación en el recalentador del G.V.
33	Agua de alimentación que entra al calentador de A.P. C4
34	Dren de C4 a C3
35	Agua de alimentación que entra al calentador de A.P. C5
36	Dren de C5 a C4
37	Agua de alimentación que entra al calentador de A.P. C6
38	Dren de C6 a C5
39	Agua de alimentación que sale del calentador de A.P. C6
40	Vapor auxiliar
41	Vapor que sale del G.V.
42	Vapor a eyectores

Tabla 4.2 Descripción de las propiedades de las corrientes a las condiciones de operación al 100 % de carga.

Corriente	$T(^{\circ}\text{C})$	$p(\text{bar})$	$h(\text{KJ/Kg})$	$s(\text{KJ/Kg } ^{\circ}\text{C})$	$m (\text{Kg/hr})$	x
1	540.10	121.40	3453.093	6.614	469641	1
2	363.20	31.43	3143.204	6.767	451360	1
3	363.20	31.43	3143.204	6.767	20452	1
4	363.2	31.43	3143.204	6.767	430908	1
5	527.80	28.24	3520.824	7.343	444243	1
6	449.00	14.21	3362.991	7.447	20051	1
7	376.70	7.64	3218.529	7.519	14369	1
8	262.70	3.27	2992.575	7.525	22360	1
9	168.48	0.29	2817.367	8.275	635	1
10	--	--	--	--	477	--
11	210.80	2.91	2888.096	7.372	404632	1
12	165.00	1.31	2804.072	7.553	11597	1
13	121.00	0.80	2720.552	7.576	22316	1
14	50.77	0.13	2415.096	7.513	370719	1
15	34.00	0.05	142.484	0.492	2500	0
16	38.76	29.7	164.995	0.555	340	0
17	50.77	0.128	212.517	0.714	408584	0
18	53.53	14.60	225.293	0.748	408584	0
19	53.53	14.60	225.293	0.748	245150	0
20	53.53	14.60	225.293	0.748	163434	0
21	68.44	0.29	286.429	0.936	635	0
22	55.1	14.60	231.849	0.768	163434	0
23	55.1	14.60	231.849	0.768	245150	0
24	55.10	14.60	231.849	0.768	408584	0
25	63.03	11.68	264.737	0.868	33913	0
26	88.36	11.68	370.855	1.173	408584	0
27	104.00	8.76	436.472	1.351	11597	0
28	104.38	8.76	438.055	1.355	408584	0
29	139.73	5.83	588.104	1.736	485816	0
30	143.19	138.56	611.517	1.758	485816	0
31	143.19	138.56	611.517	1.758	48500	0
32	143.19	138.56	611.517	1.758	13335	0
33	143.19	138.56	611.517	1.758	423981	0
34	169.80	137.86	725.580	2.024	54872	0
35	164.28	137.86	701.771	1.970	423981	0
36	183.70	137.17	785.940	2.158	40503	0
37	193.47	137.17	828.774	2.251	423981	0
38	207.80	136.47	892.261	2.385	20452	0
39	217.85	136.47	937.355	2.478	423981	0
40	--	--	--	--	2500	--
41	540.1	121.4	3453.093	6.614	469981	1
42	437.50	29.70	3316.260	7.049	340	1

Donde x es la calidad del agua con $x = 0$ es líquido saturado y $x = 1$ es vapor saturado; $0 \leq x \leq 1$ está en la región de saturación.

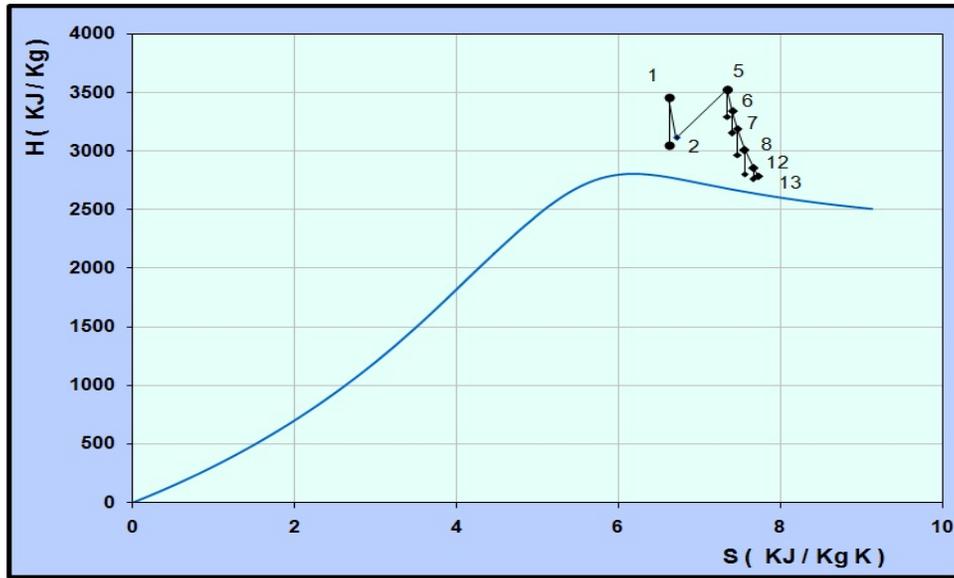


Figura 4.2 Diagrama H-s del ciclo de potencia de la Unidad 3 a una operación del 100% de carga. El proceso de 1 a 2 representa la expansión del vapor en la TAP, el proceso de 2 a 5 el recalentamiento del vapor en el generador de vapor, el proceso de 5 a 13 la expansión del vapor en la TPI y TBP.

4.1.2 Determinación de Potencias y Calores en el Ciclo de Vapor

Los calores y potencias durante la fase de operación del ciclo de potencia de la Unidad 3 al 100% de carga, son calculadas en base a la Primera Ley de la termodinámica (balances de energía).

- El calor agregado por la combustión del gas natural dentro del generador de vapor se determina con:

$$\dot{Q}_{gas} = \dot{m}_{gas}PCS \tag{4.1}$$

donde:

$\dot{m}_{gas} = 32\ 745.41\ Kg/hr$ es el flujo de gas natural que entra al generador de vapor y;

$PCS = 54\ 141.443\ KJ/Kg$ es el Poder Calorífico Superior del gas natural

entonces:

$$\dot{Q}_{gas} =$$

$492\ 467.71\ KW$ – El calor ganado por el agua en el generador de vapor

$$\dot{Q}_{GV} = \dot{m}_{41} h_{41} + \dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_{39} h_{39} - \dot{m}_{31} h_{31} - \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_{32} h_{432} \quad (4.2)$$

$$\dot{Q}_{GV} = 388\ 145.63\ KW$$

- El calor desechado por el agua en el condensador hacia el agua de enfriamiento o circulación

$$\dot{Q}_{COND} =$$

$$\dot{m}_{14} h_{14} + \dot{m}_{15} h_{15} + \dot{m}_{25} h_{25} + \dot{m}_{21} h_{21} + \dot{m}_{16} h_{16} - \dot{m}_{17} h_{17} \quad (4.3)$$

$$\dot{Q}_{COND} = 227\ 239.69\ KW$$

- La potencia generada por la turbina de vapor en la sección de alta y presión intermedia (TAP y TPI)

$$\dot{W}_{A-I} =$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_9 h_9 - \dot{m}_{11} h_{11} \quad (4.4)$$

$$\dot{W}_{A-I} = 115\ 583.86\ KW$$

- La potencia generada por la turbina de vapor en la sección de baja presión (TBP)

$$\dot{W}_{TBP} = \dot{m}_{11}(h_{11} - h_{12}) + (\dot{m}_{11} - \dot{m}_{12})(h_{12} - h_{13}) + (\dot{m}_{11} - \dot{m}_{12} - \dot{m}_{13})(h_{13} - h_{14}) \quad (4.5)$$

$$\dot{W}_{TBP} = 50\,017.61 \text{ KW}$$

- La potencia total generada por la turbina de vapor (TAP, TPI y TBP)

$$\dot{W}_{TV} = \dot{W}_{A-I} + \dot{W}_{TBP} \quad (4.6)$$

$$\dot{W}_{TV} = 165\,601.47 \text{ KW}$$

- La potencia empleada por las bombas de extracción de condensado (b1)

-

$$\dot{W}_{b1} = \dot{m}_{17}(h_{18} - h_{17}) \quad (4.7)$$

$$\dot{W}_{b1} = 1\,450.01 \text{ KW}$$

- La potencia empleada en las bombas de agua de alimentación (b2)

$$\dot{W}_{b2} = \dot{m}_{29}(h_{30} - h_{29}) \quad (4.8)$$

$$\dot{W}_{b2} = 3\,159.51 \text{ KW}$$

- La potencia de la turbina de vapor obtenida en el generador eléctrico (con una eficiencia del 99% de este)

$$Pot_{GE} = 0.99\dot{W}_{TV} \quad (4.9)$$

$$Pot_{GE} = 163\,945.45 \text{ KW}$$

- La potencia suministrada por el generador eléctrico a las bombas de condensado (con una eficiencia del 84.5% de estas)

$$Pot_{b1} = \frac{\dot{W}_{b1}}{0.845} \quad (4.10)$$

$$Pot_{b1} = 1\,715.98\text{ KW}$$

- La potencia suministrada por el generador eléctrico a las bombas de agua de alimentación (con una eficiencia del 79.5 %)

$$Pot_{b2} = \frac{\dot{W}_{b2}}{0.795} \quad (4.11)$$

$$Pot_{b2} = 3\,974.23\text{ KW}$$

- La potencia neta entregada por el ciclo de potencia es (no por toda la unidad 3)

$$Pot_{CR} = Pot_{GE} - Pot_{b1} - Pot_{b2} \quad (4.12)$$

$$Pot_{CR} = 158\,255.25\text{ KW}$$

- La potencia empleada por los equipos auxiliares del generador de vapor (Ventiladores de tiro inducido, Ventiladores de recirculación de gases y Precalentadores regenerativos de aire)

$$Pot_{AGV} = 2\,757\text{ KW}$$

- El calor rechazado al ambiente por la torre de enfriamiento es:

$$\dot{Q}_{TE} = \dot{m}_{se2}h_{se2} - (\dot{m}_{se2} - \dot{m}_{se5})h_{se6} \quad (4.13)$$

$$\dot{Q}_{TE} = 236\,239.44\text{ KW}$$

- La potencia empleada por las bombas de agua de circulación (A y B)

$$\dot{W}_{BAC} = \dot{m}_{se7}(h_{se7} - h_{se6}) \quad (4.14)$$

$$\dot{W}_{BAC} = 3\,825.62\text{ KW}$$

- La potencia suministrada por el generador eléctrico a las bombas de agua de circulación (con una eficiencia de 85%)

$$Pot_{BAC} = \frac{\dot{W}_{BAC}}{0.85} \quad (4.15)$$

$$Pot_{BAC} = 4\,501\text{ KW}$$

- La potencia consumida por los ventiladores de la torre de enfriamiento es:

$$Pot_{Vent} = 931.4\text{ HP} = 694.82\text{ KW}$$

- La potencia empleada por las bombas de recirculación de esferas (sistema de limpieza del condensador)

$$Pot_{BCE} = 1.492\text{ KW}$$

- La potencia empleada por las bombas de dosificación de químicos (H_2SO_4 y Cloro)

$$Pot_{BDQ} = 1.492\text{ KW}$$

- Por lo tanto, la potencia neta entregada por la unidad 3 es:

$$Pot_{U3} = Pot_{CR} - Pot_{AGV} - Pot_{BAC} - Pot_{Vent} - Pot_{BCE} - Pot_{BDQ} \quad (4.16)$$

$$Pot_{U3} = 150\,300\text{ KW}$$

- siendo la eficiencia térmica del ciclo de potencia:

$$\eta_{Rankine} = \frac{Pot_{CR}}{\dot{Q}_{gas}} \quad (4.17)$$

$$\eta_{Rankine} = 32.14 \%$$

- y la eficiencia térmica de la Unidad 3

$$\eta_{U3} = \frac{Pot_{U3}}{\dot{Q}_{gas}} \quad (4.18)$$

$$\eta_{U3} = 30.52 \%$$

4.2 Análisis Exergético

Como primer paso del análisis exergético, dentro del análisis termoeconómico, se establece la estructura productiva de la Unidad 3 (ver figura 4.1), donde se observan los equipos y los flujos de exergía que los interrelacionan, además de que se definen los límites, el nivel de agregación y el propósito de cada equipo. La tabla 4.1 explica cada una de las corrientes de exergía que intervienen en esta estructura productiva.

4.2.1 Cálculo de Exergías

El análisis exergético del ciclo de potencia se realiza considerando las condiciones de operación actual al 100% de carga, descritas anteriormente en la tabla 4.2. Con los conceptos que definen el cálculo de las exergías tanto para calor, trabajo o materia (ver tabla 2.1), se puede caracterizar exergéticamente las condiciones de operación de la central termoeléctrica.

De las condiciones termodinámicas de la tabla 4.2 (P, T, \dot{m}) se puede llegar a los valores de la exergía física de cada corriente del ciclo Rankine, que se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$B_{fi} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (4.19)$$

donde los términos $(h - h_0)$ y $(s - s_0)$ son las variaciones de entalpia y entropía de cada corriente (tomados de la tabla 4.2); h_0 , s_0 y T_0 son la entalpia, entropía y temperatura en el ambiente para el agua.

Las condiciones ambientales de la central termoeléctrica son las siguientes:

- Presión atmosférica media (p_{atm}) $p_o = p_{atm} = 582.37 \text{ mmHg} = 0.77571 \text{ bar}$
- Temperatura de bulbo seco (T_{BS}) $T_o = T_{BS} = 24.83 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura de bulbo húmedo (T_{BH}) $T_{BH} = 12.21 \text{ }^\circ\text{C}$

Por otro lado, para hallar la potencia exergética (en unidades de kW) se realiza el siguiente procedimiento:

$$B = \dot{m}_i B_{fi} \quad (4.20)$$

donde \dot{m}_i es el flujo másico de cada corriente en Kg/seg (obtenido de la tabla 4.2)

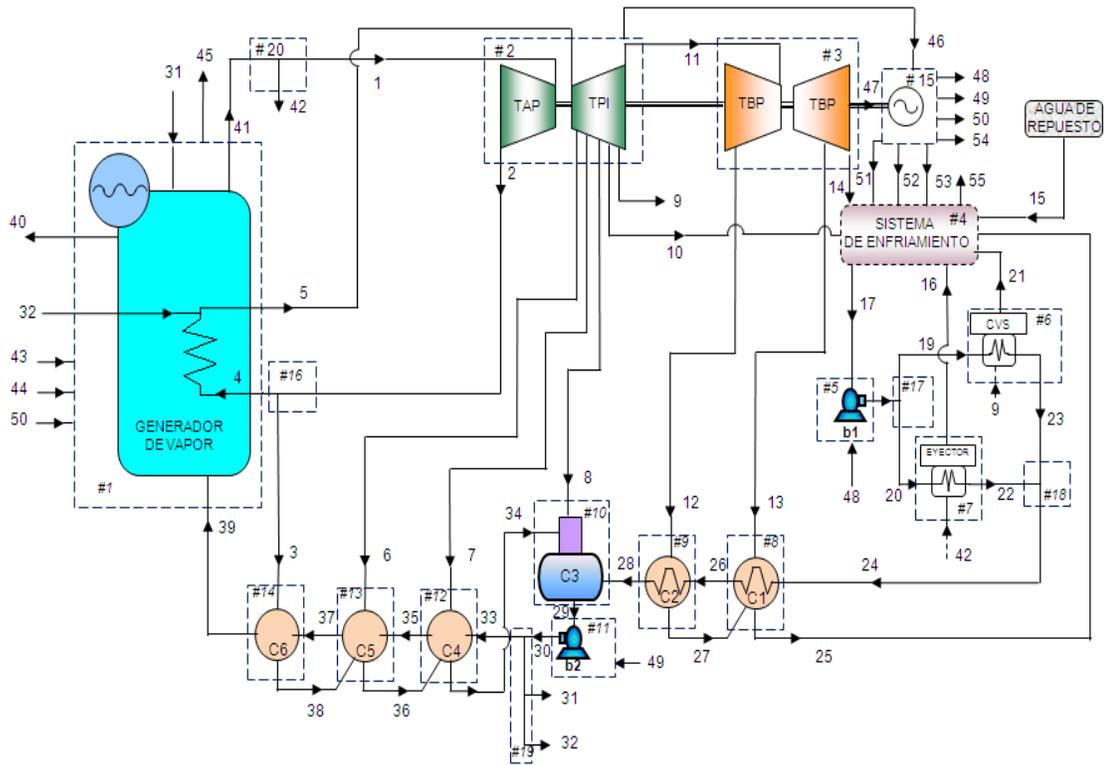


Figura 4.3 Estructura productiva de la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica Valle de México. Los equipos, las uniones y las bifurcaciones son los elementos que constituyen la estructura productiva del sistema térmico. Las corrientes de exergía relacionan estos elementos ya sea como recurso o producto.

Tabla 4.3 Corrientes exergéticas involucradas en la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica

Corriente	Descripción de la corriente
1 a 42	Exergías de los estados del agua en el ciclo de potencia
43	Exergía del gas natural que entra al generador de vapor como combustible
44	Exergía del aire requerido para la combustión del gas natural en el generador de vapor
45	Exergía de las pérdidas en el generador de vapor
46	Potencia (Exergía) generada en TAP y TPI
47	Potencia (Exergía) generada en TBP
48	Potencia (Exergía) empleada por b1
49	Potencia (Exergía) empleada por b2
50	Potencia (Exergía) empleada por los equipos auxiliares del generador de vapor
51	Potencia (Exergía) empleada por las bombas de agua de circulación del sistema de enfriamiento.
52	Potencia (Exergía) consumida por los ventiladores de la torre de enfriamiento
53	Potencia (Exergía) empleada por bombas del sistema de limpieza del condensador y de químicos
54	Potencia (Exergía) neta generada por la unidad 3
55	Exergía del calor desechado al ambiente por el sistema de enfriamiento

En la tabla 4.4 se permite ver el resultado de los valores de las exergías para cada corriente del ciclo de potencia.

Las corrientes de exergía relacionadas a los calores y las potencias empleadas en la Unidad 3 son:

- La exergía del calor agregado por el combustible (gas natural) en el generador de vapor

$$B_{43} = \dot{m}_{gas} B_{gas} \quad (4.21)$$

con la exergía del gas natural que es $B_{gas} = 50\,621.85 \text{ KJ/Kg}$ [17]

$$B_{43} = 460\,453.68 \text{ kW}$$

- La exergía del aire requerido para la combustión que entra al generador de vapor

$$B_{44} = (h_{44} - h_0) - T_0(s_{44} - s_0) \text{ con } h_{44} = h_0 \text{ y } s_{44} = s_0, \text{ entonces}$$

$B_{44} = 0$ (Debido a que el estado del aire se encuentra a las condiciones del ambiente)

- La exergía de las pérdidas en el generador de vapor

$$B_{45} = \text{Exergía del combustible} - \text{Exergía aprovechada por el agua}$$

$$B_{45} = B_{43} - \{(B_{41} - B_{39} - B_{31}) + (B_5 - B_4 - B_{32})\} \quad (4.22)$$

$$B_{45} = 262\,318.77 \text{ kW}$$

Tabla 4.4 Exergía de cada corriente del ciclo de potencia

Corriente	Entalpia h (kJ/Kg)	Entropía s (kJ/Kg K)	Flujo Másico m (kg/hr)	Exergía B (kJ/Kg)	Exergía B (kW)
1	3453.093	6.614	469641	1486.646	193941.590
2	3143.204	6.767	451360	1131.360	141847.369
3	3143.204	6.767	20452	1131.360	6427.380
4	3143.204	6.767	430908	1131.360	135419.989
5	3520.824	7.343	444243	1337.331	165027.800
6	3362.991	7.447	20051	1148.409	6396.321
7	3218.529	7.519	14369	982.537	3921.689
8	2992.575	7.525	22360	754.818	4688.257
9	2817.367	8.275	635	355.960	62.787
10	--	--	477	--	
11	2888.096	7.372	404632	695.954	78223.681
12	2804.072	7.553	11597	558.029	1797.630
13	2720.552	7.576	22316	467.448	2897.657
14	2415.096	7.513	370719	180.763	18614.523
15	142.484	0.492	2500	0.505	0.351
16	164.995	0.555	340	4.215	0.398
17	212.517	0.714	408584	4.393	498.584
18	225.293	0.748	408584	6.809	772.737
19	225.293	0.748	245150	6.809	463.642
20	225.293	0.748	163434	6.809	309.095
21	286.429	0.936	635	12.117	2.137
22	231.849	0.768	163434	7.399	335.892
23	231.849	0.768	245150	7.399	503.838
24	231.849	0.768	408584	7.399	839.730
25	264.737	0.868	33913	10.520	99.104
26	370.855	1.173	408584	25.956	2945.869
27	436.472	1.351	11597	38.380	123.636
28	438.055	1.355	408584	38.713	4393.733
29	588.104	1.736	485816	75.330	10165.638
30	611.517	1.758	485816	92.188	12440.706
31	611.517	1.758	48500	92.188	1241.981
32	611.517	1.758	13335	92.188	341.481
33	611.517	1.758	423981	92.188	10857.244
34	725.580	2.024	54872	127.071	1936.852
35	701.771	1.970	423981	119.315	14052.050
36	785.940	2.158	40503	147.400	1658.376
37	828.774	2.251	423981	162.591	19148.700
38	892.261	2.385	20452	186.097	1057.235
39	937.355	2.478	423981	203.540	23971.437
40	--	--	2500	--	
41	3453.093	6.614	469981	1486.646	194081.996
42	3316.260	7.049	340	1220.280	115.249

Mientras que por la definición de la exergía del trabajo se obtienen:

- Potencia generada en la sección de alta y media presión de la turbina de vapor (TAP y TPI)

$$B_{46} = W_{A-I} = 115\,583.86 \text{ kW}$$

- Potencia generada en la sección de baja presión de la turbina de vapor (TBP)

$$B_{47} = W_{TBP} = 50\,017.61 \text{ kW}$$

- Potencia empleada por las bombas de extracción de condensado (b1)

$$B_{48} = Pot_{b1} = 1\,715.98 \text{ kW}$$

- Potencia empleada en las bombas de agua de alimentación (b2)

$$B_{49} = Pot_{b2} = 3\,974.23 \text{ kW}$$

- Potencia empleada por los equipos auxiliares del generador de vapor

$$B_{50} = Pot_{AGV} = 2\,757.00 \text{ kW}$$

- Potencia empleada por las bombas de agua de circulación

$$B_{51} = Pot_{BAC} = 4\,500.73 \text{ kW}$$

- Potencia consumida por los ventiladores de la torre de enfriamiento

$$B_{52} = Pot_{vent} = 694.824 \text{ kW}$$

- Potencia empleada por las bombas de recirculación de esferas y bombas de dosificación de químicos

$$B_{53} = Pot_{BCE} + Pot_{BDQ} \quad (4.23)$$

$$B_{53} = 2.984 \text{ kW}$$

- Potencia neta generada por la unidad 3

$$B_{54} = Pot_{U3} = 150 \text{ 300 KW}$$

Además,

- La exergía del calor desechado al ambiente por el sistema de enfriamiento

$$B_h = Q(1 - T_o/T)$$

$$B_{55} = \dot{Q}_{TE}(1 - T_o/T) \quad (4.24)$$

$$B_{55} = 11 \text{ 073.36 kW}$$

Por lo tanto, la eficiencia exergética del ciclo de potencia se busca con:

$$\psi_{CR} = \frac{\text{Potencia neta del ciclo Rankine}}{\text{exergía del Gas Natural}} = \frac{Pot_{CR}}{E_{43}} \quad (4.25)$$

$$\psi_{CR} = 37.20\%$$

y la eficiencia exergética de la unidad

$$\psi_{U3} = \frac{\text{Potencia entregada por la unidad 3}}{\text{exergía del Gas Natural}} = \quad (4.26)$$

$$\psi_{U3} = 32.64\%$$

4.3 Análisis de Costos Exergéticos

Como siguiente paso después de haber establecido la estructura productiva de la Unidad 3, es obtener los costos exergéticos aplicando las reglas de asignación de costos (proposiciones *FP* descritas en el capítulo anterior) para cada equipo de la estructura productiva.

En este análisis se propone que el sistema de enfriamiento se considera como un equipo disipativo, ya que no tiene un producto definido, por lo cual se hace necesario ampliar la regla de asignación de costos. Por lo que este debe ser tratado como residuo y el costo de las irreversibilidades asociadas con su operación debe ser imputada como fuel de los equipos que entran en su proceso de formación. En este caso el residuo generado en el sistema de enfriamiento es el calor desechado al ambiente.

En la tabla 4.5 y 4.6 se aprecian el fuel y producto, las irreversibilidades, el consumo exergético y la eficiencia exergética para cada equipo del ciclo de potencia de la Unidad 3 de la Central termoeléctrica (con referencia a la figura 4.1 y tabla 4.1).

Tabla 4.5 Definición fuel-producto para cada equipo de la Unidad 3.

Equipo	<i>F</i> (fuel)	<i>P</i> (producto)
1.-Generador de Vapor (GV)	$B_{43} + B_{44} + B_{50}$	$(B_{41} - B_{39} - B_{31} - B_{40}) + (B_5 - B_4 - B_{32})$
2.-Turbina de Alta y Media Presión (TAP y TPI)	$(B_1 - B_2) + (B_5 - B_6 - B_7 - B_8 - B_9 - B_{10} - B_{11})$	B_{46}
3.-Turbina de Baja Presión (TBP)	$B_{11} - B_{12} - B_{13} - B_{14}$	B_{47}
4.-Sistema de Enfriamiento (SE)	$B_{14} + B_{15} + B_{21} + B_{25} + B_{16} + B_{10} + B_{51} + B_{52} + B_{53}$	$B_{17} + B_{55}$
5.-Bombas de Condensado (b1)	B_{48}	$B_{18} - B_{17}$
6.-Condensador de Vapor de Sellos (CVS)	$B_9 - B_{21}$	$B_{23} - B_{19}$
7.-Eyector de Vapor (EV)	$B_{42} - B_{16}$	$B_{22} - B_{20}$
8.-Calentador de Baja Presión C1	$B_{13} + B_{27} - B_{25}$	$B_{26} - B_{24}$
9.-Calentador de Baja Presión C2	$B_{12} - B_{27}$	$B_{28} - B_{26}$
10.-Deaereador C3	$B_8 + B_{34} + B_{28}$	B_{29}
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	B_{49}	$B_{30} - B_{29}$
12.-Calentador de Alta Presión C4	$B_7 + B_{36} - B_{34}$	$B_{35} - B_{33}$
13.-Calentador de Alta Presión C5	$B_6 + B_{38} - B_{36}$	$B_{37} - B_{35}$
14.-Calentador de Alta Presión C6	$B_3 - B_{38}$	$B_{39} - B_{37}$
15.-Generador Eléctrico (GE)	$B_{46} + B_{47}$	$B_{48} + B_{49} + B_{50} + B_{51} + B_{52} + B_{53} + B_{54}$
16.-Bifurcacion a C6 y al Recalentador (Bif1)	B_2	$B_3 + B_4$
17.-Bifurcacion al CVS y al Eyector (Bif2)	B_{18}	$B_{19} + B_{20}$
18.-Union de las corrientes del CVS y Eyector (U)	$B_{22} + B_{23}$	B_{24}
19.-Bifurcacion a C4 y Atemperación (Bif3)	B_{30}	$B_{31} + B_{32} + B_{33}$
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal (Bif4)	B_{41}	$B_1 + B_{42}$

Tabla 4.6 Valores obtenidos de la definición fuel-producto

Equipo	F (kW)	P (kW)	I ($F - P$)	$k_{ex} =$ F / P	$\psi =$ P / F
Generador de Vapor (GV)	463210.68	198134.909	265075.77	2.34	42.77
Turbina de alta y media presión (TAP y TPI)	123829.286	115583.86	8245.42	1.07	93.34
Turbina de baja presión (TBP)	54913.871	50017.61	4896.26	1.10	91.08
Sistema de enfriamiento	23915.047	11571.949	12343.10	2.07	48.39
Bombas de condensado (b1)	1715.98	274.153	1441.83	6.26	15.98
Condensador de vapor de sello (CVS)	60.650	40.196	20.45	1.51	66.27
Eyector de vapor (EV)	114.851	26.797	88.05	4.29	23.33
Calentador de baja presión C1	2922.189	2106.139	816.05	1.39	72.07
Calentador de baja presión C2	1673.993	1447.865	226.13	1.16	86.49
Deaerador C3	11018.842	10165.638	853.20	1.08	92.26
Bombas de agua de alimentación (b2)	3974.23	2275.068	1699.16	1.75	57.25
Calentador de alta presión C4	3643.213	3194.805	448.41	1.14	87.69
Calentador de alta presión C5	5795.180	5096.650	698.53	1.14	87.95
Calentador de alta presión C6	5370.145	4822.737	547.41	1.11	89.81
Generador Eléctrico (GE)	165601.47	163945.74	1655.73	1.01	99.00
Bifurcación a C6 y al recalentador (Bif1)	141847.369	141847.369	0.00	-	-
Bifurcación al CVS y al eyector(Bif2)	772.737	772.737	0.00	-	-
Unión de las corrientes del CVS y eyector (U)	839.730	839.730	0.00	-	-
Bifurcación a C4 y Atemperación (Bif3)	12440.706	12440.706	0.00	-	-
Bifurcación a eyector y vapor principal (Bif4)	194081.996	194056.839	25.16	-	-
Irreversibilidad Total (I_t) =			299080.66		

Nota: I es la irreversibilidad en kW, k_{ex} es el consumo exergético y ψ es la eficiencia exergética en %.

4.3.1 Costos Exergéticos del Ciclo de Potencia

Aplicando las reglas de asignación se muestran las ecuaciones obtenidas por las proposiciones *FP* que sirven para encontrar los costos exergéticos de las principales corrientes de masa, calor y potencia de la estructura productiva de la Unidad 3. (ver tabla 4.1)

Equipo No. 1: Generador de vapor

Con la proposición P2 y considerando la imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento (calor desechado al ambiente) se obtiene:

$$\beta_1 P_c^* + B_{39}^* + B_{43}^* + B_{44}^* + B_{31}^* + B_{32}^* + B_4^* + B_{50}^* - B_{40}^* - B_{45}^* - B_{41}^* - B_5^* = \quad (4.27)$$

De la proposición P4

$$B_{45}^* = 0 \quad (4.28)$$

Por la proposición P1 se tiene

$$B_{43}^* = B_{43} \quad (4.29)$$

$$B_{44}^* = B_{44} \quad (4.30)$$

Con la proposición P2 indica también que el costo de los flujos de pérdidas es nulo

$$B_{40}^* = 0 \quad (4.31)$$

Equipo No. 2: Turbina de vapor de alta y media presión.

Las proposiciones FP aplicadas son:

- Proposiciones P2 con imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento

$$\beta_2 P_c^* + B_1^* + B_5^* - B_{46}^* - B_2^* - B_6^* - B_7^* - B_8^* - B_9^* - B_{10}^* - B_{11}^* = 0 \quad (4.32)$$

- Proposición P5

$$\frac{B_1^*}{B_1} = \frac{B_2^*}{B_2} \quad \text{despejando} \quad B_1^* - \frac{B_1}{B_2} B_2^* = 0 \quad (4.33)$$

$$\frac{B_5^*}{B_5} = \frac{B_6^*}{B_6} \quad \text{despejando} \quad B_5^* - \frac{B_5}{B_6} B_6^* = 0 \quad (4.34)$$

$$\frac{B_5^*}{B_5} = \frac{B_7^*}{B_7} \quad \text{despejando} \quad B_5^* - \frac{B_5}{B_6} B_6^* = 0 \quad (4.35)$$

$$\frac{B_5^*}{B_5} = \frac{B_8^*}{B_8} \quad \text{despejando} \quad B_5^* - \frac{B_5}{B_8} B_8^* = 0 \quad (4.36)$$

$$\frac{B_5^*}{B_5} = \frac{B_{11}^*}{B_{11}} \quad \text{despejando} \quad B_5^* - \frac{B_5}{B_{11}} B_{11}^* = 0 \quad (4.37)$$

$$\frac{B_1^*}{B_1} = \frac{B_9^*}{B_9} \quad \text{despejando} \quad B_1^* - \frac{B_1}{B_9} B_9^* = 0 \quad (4.38)$$

Equipo No. 3: Turbina de vapor de baja presión.

- Proposición P2 con imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento

$$\beta_3 P_c^* + B_{11}^* - B_{12}^* - B_{13}^* - B_{14}^* - B_{47}^* = 0 \quad (4.39)$$

- Proposición P5

$$\frac{B_{11}^*}{B_{11}} = \frac{B_{12}^*}{B_{12}} \quad \text{despejando} \quad B_{11}^* - \frac{B_{11}}{B_{12}} B_{12}^* = 0 \quad (4.40)$$

$$\frac{B_{11}^*}{B_{11}} = \frac{B_{13}^*}{B_{13}} \quad \text{despejando} \quad B_{11}^* - \frac{B_{11}}{B_{13}} B_{13}^* = 0 \quad (4.41)$$

$$\frac{B_{11}^*}{B_{11}} = \frac{B_{14}^*}{B_{14}} \quad \text{despejando} \quad B_{11}^* - \frac{B_{11}}{B_{14}} B_{14}^* = 0 \quad (4.42)$$

- Proposición P3

$$\frac{B_{46}^*}{B_{46}} = \frac{B_{47}^*}{B_{47}} \quad \text{despejando} \quad B_{46}^* - \frac{B_{46}}{B_{47}} B_{47}^* = 0 \quad (4.43)$$

Equipo No. 4: Sistema de enfriamiento.

- Proposición P2 con imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento

$$\beta_4 P_c^* + B_{14}^* + B_{10}^* + B_{15}^* + B_{25}^* + B_{21}^* + B_{16}^* + B_{51}^* + B_{52}^* + B_{53}^* - B_{17}^* - B_{55}^* = \quad (4.44)$$

- Proposición P1

$$B_{15}^* = B_{15} \quad (4.45)$$

$$B_{17}^* = B_{17} \quad (4.46)$$

El residuo formado en el sistema de enfriamiento es el calor desechado al ambiente como se describe:

$$B_{55}^* = P_c^* \quad \text{despejando} \quad B_{55}^* - P_c^* = 0 \quad (4.47)$$

Equipo No. 5: Bombas de condensado

- Proposición P2 con imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento

$$\beta_5 P_c^* + B_{17}^* + B_{48}^* - B_{18}^* = 0 \quad (4.48)$$

Equipo No. 6: Condensador de vapor de sellos.

- Proposición P2 con imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento

$$\beta_6 P_c^* + B_9^* + B_{19}^* - B_{21}^* - B_{23}^* = 0 \quad (4.49)$$

- Proposición P5

$$\frac{B_9^*}{B_9} = \frac{B_{21}^*}{B_{21}} \quad \text{despejando} \quad B_9^* - \frac{B_9}{B_{21}} B_{21}^* = 0 \quad (4.50)$$

Equipo No. 7: Eyector de vapor

- Proposición P2 con imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento

$$\beta_7 P_c^* + B_{20}^* + B_{42}^* - B_{16}^* - B_{22}^* = 0 \quad (4.51)$$

- Proposición P5

$$\frac{B_{42}^*}{B_{42}} = \frac{B_{16}^*}{B_{16}} \quad \text{despejando} \quad B_{16}^* - \frac{B_{16}}{B_{42}} B_{42}^* = 0 \quad (4.52)$$

Equipo No. 8: Calentador de baja presión C1

- Proposición P2 con imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento

$$\beta_8 P_c^* + B_{24}^* + B_{13}^* + B_{27}^* - B_{25}^* - B_{26}^* = 0 \quad (4.53)$$

- Proposición P5

$$\frac{B_{13}^* + B_{27}^*}{B_{13} + B_{27}} = \frac{B_{25}^*}{B_{25}} \quad \text{despejando} \quad B_{13}^* + B_{27}^* - \frac{(B_{13} + B_{27})}{B_{25}} B_{25}^* = 0 \quad (4.54)$$

Equipo No. 9: Calentador de baja presión C2

- Proposición P2 con imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento

$$\beta_9 P_c^* + B_{26}^* + B_{12}^* - B_{27}^* - B_{28}^* = 0 \quad (4.55)$$

- Proposición P5

$$\frac{B_{12}^*}{B_{12}} = \frac{B_{27}^*}{B_{27}} \quad \text{despejando} \quad B_{12}^* - \frac{B_{12}}{B_{27}} B_{27}^* = 0 \quad (4.56)$$

Equipo No. 10: Deaerador C3

- Proposición P2 con imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento

$$\beta_{10} P_c^* + B_{28}^* + B_8^* + B_{34}^* - B_{29}^* = 0 \quad (4.57)$$

Equipo No. 11: Bombas de agua de alimentación.

- Proposición P2 con imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento

$$\beta_{11} P_c^* + B_{29}^* + B_{49}^* - B_{30}^* = 0 \quad (4.58)$$

Equipo No. 12: Calentador de alta presión C4.

- Proposición P2 con imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento

$$\beta_{12} P_c^* + B_{33}^* + B_7^* + B_{36}^* - B_{34}^* - B_{35}^* = 0 \quad (4.59)$$

- Proposición P5

$$\frac{B_7^* + B_{36}^*}{B_7 + B_{36}} = \frac{B_{34}^*}{B_{34}} \quad \text{despejando} \quad B_7^* + B_{36}^* - \frac{(B_7 + B_{36})}{B_{34}} B_{34}^* = 0 \quad (4.60)$$

Equipo No. 13: Calentador de alta presión C5.

- Proposición P2 con imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento

$$\beta_{13} P_c^* + B_{35}^* + B_6^* + B_{38}^* - B_{36}^* - B_{37}^* = 0 \quad (4.61)$$

- Proposición P5

$$\frac{B_6^* + B_{38}^*}{B_6 + B_{38}} = \frac{B_{36}^*}{B_{36}} \quad \text{despejando} \quad B_6^* + B_{38}^* - \frac{(B_6 + B_{38})}{B_{36}} B_{36}^* = 0 \quad (4.62)$$

Equipo No. 14: Calentador de alta presión C6.

- Proposición P2 con imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento

$$\beta_{14} P_c^* + B_3^* + B_{37}^* - B_{38}^* - B_{39}^* = 0 \quad (4.63)$$

- Proposición P5

$$\frac{B_3^*}{B_3} = \frac{B_{38}^*}{B_{38}} \quad \text{despejando} \quad B_3^* - \frac{B_3}{B_{38}} B_{38}^* = 0 \quad (4.64)$$

Equipo No. 15: Generador eléctrico.

- Proposición P2

$$B_{46}^* + B_{47}^* - B_{48}^* - B_{49}^* - B_{50}^* - B_{51}^* - B_{52}^* - B_{53}^* - B_{54}^* = 0 \quad (4.65)$$

- Proposición P3

$$\frac{B_{48}^*}{B_{48}} = \frac{B_{49}^*}{B_{49}} \quad \text{despejando} \quad B_{48}^* - \frac{B_{48}}{B_{49}} B_{49}^* = 0 \quad (4.66)$$

$$\frac{B_{48}^*}{B_{48}} = \frac{B_{50}^*}{B_{50}} \quad \text{despejando} \quad B_{48}^* - \frac{B_{48}}{B_{50}} B_{50}^* = 0 \quad (4.67)$$

$$\frac{B_{48}^*}{B_{48}} = \frac{B_{51}^*}{B_{51}} \quad \text{despejando} \quad B_{48}^* - \frac{B_{48}}{B_{51}} B_{51}^* = 0 \quad (4.68)$$

$$\frac{B_{48}^*}{B_{48}} = \frac{B_{52}^*}{B_{52}} \quad \text{despejando} \quad B_{48}^* - \frac{B_{48}}{B_{52}} B_{52}^* = 0 \quad (4.69)$$

$$\frac{B_{48}^*}{B_{48}} = \frac{B_{53}^*}{B_{53}} \quad \text{despejando} \quad B_{48}^* - \frac{B_{48}}{B_{53}} B_{53}^* = 0 \quad (4.70)$$

$$\frac{B_{48}^*}{B_{48}} = \frac{B_{54}^*}{B_{54}} \quad \text{despejando} \quad B_{48}^* - \frac{B_{48}}{B_{54}} B_{54}^* = 0 \quad (4.71)$$

Equipo No. 16: Bifurcación a C6 y al recalentador.

- Proposición P2

$$B_2^* - B_3^* - B_4^* = 0 \quad (4.72)$$

- Proposición P3

$$\frac{B_3^*}{B_3} = \frac{B_4^*}{B_4} \quad \text{despejando} \quad B_3^* - \frac{B_3}{B_4} B_4^* = 0 \quad (4.73)$$

Equipo No. 17: Bifurcación al CVS y al eyector de vapor

- Proposición P2

$$B_{18}^* - B_{19}^* - B_{20}^* = 0 \quad (4.74)$$

- Proposición P3

$$\frac{B_{19}^*}{B_{19}} = \frac{B_{20}^*}{B_{40}} \quad \text{despejando} \quad B_{19}^* - \frac{B_{19}}{B_{20}} B_{20}^* = 0 \quad (4.75)$$

Equipo No. 18: Unión de las corrientes del CVS y eyector.

- Proposición P2

$$B_{22}^* + B_{23}^* - B_{24}^* = 0 \quad (4.76)$$

Equipo No. 19: Bifurcación a C4 y atemperación.

- Proposición P2

$$B_{30}^* - B_{31}^* - B_{32}^* - B_{33}^* = 0 \quad (4.77)$$

- Proposición P3

$$\frac{B_{31}^*}{B_{31}} = \frac{B_{32}^*}{B_{32}} \quad \text{despejando} \quad B_{31}^* - \frac{B_{31}}{B_{32}} B_{32}^* = 0 \quad (4.78)$$

$$\frac{B_{31}^*}{B_{31}} = \frac{B_{33}^*}{B_{33}} \quad \text{despejando} \quad B_{31}^* - \frac{B_{31}}{B_{33}} B_{33}^* = 0 \quad (4.79)$$

Equipo No. 20: Bifurcación a eyector y vapor principal.

- Proposición P2 con imputación por formación del residuo en el sistema de enfriamiento

$$\beta_{15} P_c^* + B_{41}^* - B_1^* - B_{42}^* = 0 \quad (4.80)$$

- Proposición P3

$$\frac{B_1^*}{B_1} = \frac{B_{42}^*}{B_{42}} \quad \text{despejando} \quad B_1^* - \frac{B_1}{B_{42}} B_{42}^* = 0 \quad (4.81)$$

donde β_i es la proporción imputada como fuel en los equipos que generan el residuo P^*_c en el sistema de enfriamiento (calor desechado al ambiente) y cuyos valores se resumen en la tabla 4.7 referida a la figura 4.1

Tabla 4.7 Equipos que contribuyen a la formación del residuo.

Equipo	<i>F</i> (kW)	<i>P</i> (kW)	<i>I = F - P</i>	$\beta = I / I_{tc}$
1.-Generador de Vapor (GV)	463210.68	198134.91	265075.77	0.8912
2.-Turbina de Alta y Media Presión (TAP y TPI)	123829.29	115583.86	8245.42	0.0277
3.-Turbina de Baja Presión (TBP)	54913.87	50017.61	4896.26	0.0165
4.-Sistema de enfriamiento (SE)	23915.05	11571.95	12343.10	0.0415
5.-Bombas de Condensado (b1)	1715.98	274.15	1441.83	0.0048
6.-Condensador de Vapor de Sellos (CVS)	60.65	40.20	20.45	0.0001
7.-Eyector de Vapor (EV)	114.85	26.80	88.05	0.0003
8.-Calentador de Baja Presión C1	2922.19	2106.14	816.05	0.0027
9.-Calentador de Baja Presión C2	1673.99	1447.86	226.13	0.00076
10.-Deaereador C3	11018.84	10165.64	853.20	0.0029
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	3974.23	2275.07	1699.16	0.0057
12.-Calentador de Alta Presión C4	3643.21	3194.81	448.41	0.0015
13.-Calentador de Alta Presión C5	5795.18	5096.65	698.53	0.0023
14.-Calentador de Alta Presión C6	5370.15	4822.74	547.41	0.0018
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal (Bif4)	194082.00	194056.84	25.16	0.0001
Irreversibilidad total (<i>I_{tc}</i>) =			2974254.932	1.00

El análisis genera un sistema de 56 ecuaciones con 56 incógnitas que puede representarse vectorialmente como:

$$[A] [B^*] = [Y^*] \tag{4.82}$$

donde:

A es la matriz de costos;

B^* es el vector de costos exergéticos; y

Y^* es el vector de costos exergéticos de entrada.

En la tabla 4.8 se muestra la solución de este sistema de ecuaciones que se obtuvo por el método de matriz inversa (ver figura 4.1, tabla 4.1, y Anexo B)

La comprobación de los resultados obtenidos en la tabla 4.8 se verifica en que el costo exergético del producto final es igual al costo exergético del combustible (gas natural):

$$B_{43} \approx B_{54} = 460\,453 \text{ kW}$$

Tabla 4.8 Costos exergeticos en las corrientes de la Unidad 3

Corriente	Exergía <i>B</i> (kW)	Costo Exergetico <i>B</i> * (kW)	Costo Exergetico Unitario <i>k</i> *
1	193941.590	565663.364	2.916
2	141847.369	413721.780	2.916
3	6427.380	18746.539	2.916
4	135419.988	394975.241	2.916
5	165027.800	452480.003	2.741
6	6396.320	17537.695	2.741
7	3921.689	10752.648	2.741
8	4688.256	12854.455	2.741
9	62.787	183.130	2.916
10	-	-	-
11	78223.681	214476.903	2.741
12	1797.629	4928.814	2.741
13	2897.656	7944.914	2.741
14	18614.523	51038.064	2.741
15	0.350	0.350	1.00
16	0.398	1.161	2.916
17	498.584	498.584	1.00
18	772.736	6093.179	7.885
19	463.642	3655.907	7.885
20	309.094	2437.271	7.885
21	2.137	6.233	2.916
22	335.892	2792.868	8.314
23	503.837	3837.592	7.616
24	839.729	6630.460	7.895
25	99.103	271.727	2.741
26	2945.868	14833.698	5.035
27	123.636	338.991	2.741
28	4393.733	19476.463	4.432
29	10165.637	37855.491	3.723
30	12440.705	50428.621	4.053
31	1241.981	5034.391	4.053
32	341.480	1384.198	4.053
33	10857.244	44010.030	4.053
34	1936.851	5324.814	2.749
35	14052.049	54130.976	3.852
36	1658.375	4588.127	2.766
37	19148.699	70327.692	3.672
38	1057.235	3083.604	2.916
39	23971.436	86118.789	3.592
40	-	-	-
41	194081.995	565993.616	2.916
42	115.248	336.142	2.916
43	460453.675	460453.675	1.00
44	0	0	-
45	262318.766	0	0
46	115583.863	350547.221	3.032
47	50017.610	151711.449	3.033
48	1715.982	5257.025	3.063
49	3974.228	12175.312	3.063
50	2757	8446.252	3.063
51	4501	13788.270	3.063
52	694.824	2128.640	3.063
53	2.984	9.141	3.063
54	15030	460454.026	3.063
55	11073.364	69634.844	6.288

Los costos exergéticos por equipo se muestran a continuación en las tablas 4.9 y 4.10 (referidas a la figura 4.1 y tabla 4.1):

Tabla 4.9 Costos exergéticos para cada equipo de la estructura productiva en la Unidad 3.

Equipo	F^* (fuel)	P^* (producto)
1.-Generador de Vapor (GV)	$B_{43}^* + B_{44}^* + B_{50}^*$	$(B_{41}^* - B_{39}^* - B_{31}^* - B_{40}^*) + (B_5^* - B_4^* - B_{32}^*)$
2.-Turbina de Alta y Media Presión (TAP y TPI)	$(B_1^* - B_2^*) + (B_5^* - B_6^* - B_7^* - B_8^* - B_9^* - B_{10}^* - B_{11}^*)$	B_{46}^*
3.-Turbina de Baja Presión (TBP)	$B_{11}^* - B_{12}^* - B_{13}^* - B_{14}^*$	B_{47}^*
4.-Sistema de Enfriamiento (SE)	$B_{14}^* + B_{15}^* + B_{21}^* + B_{25}^* + B_{16}^* + B_{10}^* + B_{51}^* + B_{17}^* + B_{55}^*$	$B_{17}^* + B_{55}^*$
5.-Bombas de Condensado (b1)	B_{48}^*	$B_{18}^* - B_{17}^*$
6.-Condensador de Vapor de Sellos (CVS)	$B_9^* - B_{21}^*$	$B_{23}^* - B_{19}^*$
7.-Eyector de Vapor (EV)	$B_{42}^* - B_{16}^*$	$B_{22}^* - B_{20}^*$
8.-Calentador de Baja Presión C1	$B_{13}^* + B_{27}^* - B_{25}^*$	$B_{26}^* - B_{24}^*$
9.-Calentador de Baja Presión C2	$B_{12}^* - B_{27}^*$	$B_{28}^* - B_{26}^*$
10.-Deaereador C3	$B_8^* + B_{34}^* + B_{28}^*$	B_{29}^*
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	B_{49}^*	$B_{30}^* - B_{29}^*$
12.-Calentador de Alta Presión C4	$B_7^* + B_{36}^* - B_{34}^*$	$B_{35}^* - B_{33}^*$
13.-Calentador de Alta Presión C5	$B_6^* + B_{38}^* - B_{36}^*$	$B_{37}^* - B_{35}^*$
14.-Calentador de Alta Presión C6	$B_3^* - B_{38}^*$	$B_{39}^* - B_{37}^*$
15.-Generador Eléctrico (GE)	$B_{46}^* + B_{47}^*$	$B_{48}^* + B_{40}^* + B_{50}^* + B_{51}^* + B_{52}^* + B_{53}^* + B_{54}^*$
16.-Bifurcacion a C6 y al Recalentador (Bif1)	B_2^*	$B_3^* + B_4^*$
17.-Bifurcacion al CVS y al Eyector (Bif2)	B_{18}^*	$B_{19}^* + B_{20}^*$
18.-Union de las corrientes del CVS y Eyector (U)	$B_{22}^* + B_{23}^*$	B_{24}^*
19.-Bifurcacion a C4 y Atemperación (Bif3)	B_{30}^*	$B_{31}^* + B_{32}^* + B_{33}^*$
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal (Bif4)	B_{41}^*	$B_1^* + B_{42}^*$

Tabla 4.10 Costos exergéticos de fuel y producto para cada equipo de la estructura productiva de la Unidad 3

Equipo	F^* (kW)	P^* (kW)	$k_F^* = F^*/F$	$k_P^* = P^*/P$
1.-Generador de Vapor (GV)	468899.928	530960.999	1.012	2.680
2.-Turbina de Alta y Media Presión (TAP y TPI)	348616.755	350547.221	2.815	3.033
3.-Turbina de Baja Presión (TBP)	150565.109	151711.450	2.742	3.033
4.-Sistema de enfriamiento (SE)	67237.357	70133.429	2.812	6.061
5.-Bombas de Condensado (b1)	5257.026	5594.595	3.064	20.407
6.-Condensador de Vapor de Sellos (CVS)	176.896	181.685	2.917	4.520
7.-Eyector de Vapor (EV)	334.981	355.596	2.917	13.270
8.-Calentador de Baja Presión C1	8012.179	8203.237	2.742	3.895
9.-Calentador de Baja Presión C2	4589.823	4642.766	2.742	3.207
10.-Deaereador C3	37655.734	37855.491	3.417	3.724
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	12175.313	12573.130	3.064	5.526
12.-Calentador de Alta Presión C4	10015.961	10120.945	2.749	3.168
13.-Calentador de Alta Presión C5	16033.172	16196.716	2.767	3.178
14.-Calentador de Alta Presión C6	15662.935	15791.097	2.917	3.274
15.-Generador Eléctrico (GE)	502258.671	502258.671	3.033	3.064
16.-Bifurcacion a C6 y al Recalentador (Bif1)	413721.780	413721.780	2.917	2.917
17.-Bifurcacion al CVS y al Eyector (Bif2)	6093.179	6093.179	7.885	7.885
18.-Union de las corrientes del CVS y Eyector (U)	6630.461	6630.461	7.896	7.896
19.-Bifurcacion a C4 y Atemperación (Bif3)	50428.621	50428.621	4.054	4.054
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal (Bif4)	565993.616	565999.506	2.916	2.917

Costos de Operación Exergético

Para efecto del análisis que se está realizando se introduce el término llamado “costo de operación y/o producción CO ”, que se define como el costo que el equipo requiere para su funcionamiento, y puede expresarse de la siguiente manera:

$$CO = k_F^* \times I + \beta P_C^* \quad (4.83)$$

donde:

$k_F^* \times I$ es la parte de costo local por equipo, y

βP_C^* es el costo de generación de residuo (calor desechado al ambiente).

Aplicando este concepto se obtiene la tabla 4.11 referida a la figura 4.1, tabla 4.6 (tomando F y P) que es la irreversibilidad, tabla 4.10 (se toma k_F^*), tabla 4.7 (se utiliza β) y el valor $P_C^* = B_{55}^* = 69\,634.844\text{ Kw}$

Tabla 4.11 Costos de operación exergético para cada equipo de la Unidad 3

Equipo	X (kW)	Y (kW)	CO(kW)
1.-Generador de Vapor (GV)	268331.484	62061.071	330392.555
2.-Turbina de Alta y Media Presión (TAP y	23213.349	1930.466	25143.815
3.-Turbina de Baja Presión (TBP)	13424.770	1146.341	14571.111
4.-Sistema de enfriamiento (SE)	34702.726	2889.838	37592.564
5.-Bombas de Condensado (b1)	4417.140	337.569	4754.710
6.-Condensador de Vapor de Sellos (CVS)	59.658	4.789	64.447
7.-Eyector de Vapor (EV)	256.822	20.616	277.438
8.-Calentador de Baja Presión C1	2237.481	191.058	2428.539
9.-Calentador de Baja Presión C2	620.008	52.943	672.951
10.-Deaareador C3	2915.736	199.757	3115.494
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	5205.491	397.817	5603.308
12.-Calentador de Alta Presión C4	1232.767	104.984	1337.751
13.-Calentador de Alta Presión C5	1932.580	163.544	2096.123
14.-Calentador de Alta Presión C6	1596.610	128.162	1724.772
15.-Generador Eléctrico (GE)	5021.720	0.000	5021.720
16.-Bifurcacion a C6 y al Recalentador	0.000	0.000	0.000
17.-Bifurcacion al CVS y al Eyector (Bif2)	0.000	0.000	0.000
18.-Union de las corrientes del CVS y	0.000	0.000	0.000
19.-Bifurcacion a C4 y Atemperación (Bif3)	0.000	0.000	0.000
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal	73.364	5.890	79.254

X es el costo de operación local y Y es el costo de generación de residuo (calor desechado al ambiente)

4.4 Análisis de Costos Termoeconómicos del Ciclo de Potencia

Los valores de los costos termoeconómicos para la Unidad 3 se encuentran resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$[A] [\Pi] = [Z] \rightarrow [\Pi] = [A^{-1}] [Z] \quad (4.84)$$

donde:

- A es la matriz de costos que fue encontrada previamente a razón de que en este análisis se utilizan las mismas reglas de asignación (proposiciones FP) del análisis de costos exergéticos;

- Π es el vector de costos termoeconómicos; y

- Z es el vector de costos de factores de producción no energéticos (amortización, mantenimiento, operación, etc.) y de recursos externos (combustible):
 $Z^T = (Z_i + c_i \times B_i)$ con $i = 1, 2, \dots, 56$.

Existe un hecho de singular importancia que se da en buena parte de las plantas térmicas convencionales (no nucleares), y ello es que el combustible es el factor que más contribuye a formar el costo de los distintos productos (del orden del 80 al 90%). Esta razón junto a la dificultad de estimar con precisión los costos de factores no energéticos, permite reflexionar sobre la importancia de conocer la aportación del combustible [16]. Por lo que en este caso se considera lo siguiente:

$$Z_i = 0 \text{ en } i = 1, 2, \dots, 56$$

$c_i \times B_i = 0$ en $1, 2, \dots, 56$ a excepción de cuando $i = 43$ que es el costo del gas natural.

Por lo tanto:

$$Z^T = (0, 0, \dots, c_{43} \times B_{43}, 0, 0, \dots, 0) \quad (4.85)$$

4.4.1 Costos Termoeconómicos en el Ciclo de Potencia

Teniendo un valor del combustible en la Central Termoeléctrica Valle de México de **9.55 USD/MMBTU** [17] que multiplicado por su exergía se encuentra el dato que se necesita para resolver el sistema de ecuaciones.

Aplicando al análisis termoeconómico a los equipos del ciclo de potencia:

- 1) De la reglas de asignación (proposiciones *FP*) del análisis termoeconómico se obtienen las mismas ecuaciones que en el análisis de costos exergéticos, pero ahora en términos de costo termoeconómico:

Equipo No. 1: Generador de vapor

$$\beta_1 \pi_c^* + \pi_{39}^* + \pi_{43}^* + \pi_{44}^* + \pi_{31}^* + \pi_{32}^* + \pi_4^* + \pi_{50}^* - \pi_{40}^* - \pi_{45}^* - \pi_{41}^* - \pi_5^* = 0 \quad (4.86)$$

$$\pi_{45}^* = 0 \quad (4.87)$$

$$\pi_{43}^* = c_{43} B_{43}; c_{43} = \text{costo}_{GN} \quad (4.88)$$

$$\pi_{44}^* = c_{44} B_{44}; c_{44} = 0 \quad (4.89)$$

$$\pi_{40}^* = c_{40} B_{40}; c_{40} = 0$$

Equipo No. 2: Turbina de vapor de alta y media presión.

$$\beta_2 \pi_c^* + \pi_1^* + \pi_5^* - \pi_{46}^* - \pi_2^* - \pi_6^* - \pi_7^* - \pi_8^* - \pi_9^* - \pi_{10}^* - \pi_{11}^* = 0 \quad (4.90)$$

$$\frac{\pi_1^*}{B_1} = \frac{\pi_2^*}{B_2} \quad \text{despejando} \quad \pi_1^* - \frac{B_1}{B_2} \pi_2^* = 0 \quad (4.91)$$

$$\frac{\pi_5^*}{B_5} = \frac{\pi_6^*}{B_6} \quad \text{despejando} \quad \pi_5^* - \frac{B_5}{B_6} \pi_6^* = 0 \quad (4.92)$$

$$\frac{\pi_5^*}{B_5} = \frac{\pi_7^*}{B_7} \quad \text{despejando} \quad \pi_5^* - \frac{B_5}{B_6} \pi_6^* = 0 \quad (4.93)$$

$$\frac{\pi_5^*}{B_5} = \frac{\pi_8^*}{B_8} \quad \text{despejando} \quad \pi_5^* - \frac{B_5}{B_8} \pi_8^* = 0 \quad (4.94)$$

$$\frac{\pi_5^*}{B_5} = \frac{\pi_{11}^*}{B_{11}} \quad \text{despejando} \quad \pi_5^* - \frac{B_5}{B_{11}} \pi_{11}^* = 0 \quad (4.95)$$

$$\frac{\pi_1^*}{B_1} = \frac{\pi_9^*}{B_9} \quad \text{despejando} \quad \pi_1^* - \frac{B_1}{B_9} \pi_9^* = 0 \quad (4.96)$$

Equipo No. 3: Turbina de vapor de baja presión.

$$\beta_3 \pi_c^* + \pi_{11}^* - \pi_{12}^* - \pi_{13}^* - \pi_{14}^* - \pi_{47}^* = 0 \quad (4.97)$$

$$\frac{\pi_{11}^*}{B_{11}} = \frac{\pi_{12}^*}{B_{12}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{11}^* - \frac{B_{11}}{B_{12}} \pi_{12}^* = 0 \quad (4.98)$$

$$\frac{\pi_{11}^*}{B_{11}} = \frac{\pi_{13}^*}{B_{13}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{11}^* - \frac{B_{11}}{B_{13}} \pi_{13}^* = 0 \quad (4.99)$$

$$\frac{\pi_{11}^*}{B_{11}} = \frac{\pi_{14}^*}{B_{14}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{11}^* - \frac{B_{11}}{B_{14}} \pi_{14}^* = 0 \quad (4.100)$$

$$\frac{\pi_{46}^*}{B_{46}} = \frac{\pi_{47}^*}{B_{47}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{46}^* - \frac{B_{46}}{B_{47}} \pi_{47}^* = 0 \quad (4.101)$$

Equipo No. 4: Sistema de enfriamiento.

$$\beta_4 \pi_c^* + \pi_{14}^* + \pi_{10}^* + \pi_{15}^* + \pi_{25}^* + \pi_{21}^* + \pi_{16}^* + \pi_{51}^* + \pi_{52}^* + \pi_{53}^* - \pi_{17}^* - \pi_{55}^* = 0 \quad (4.102)$$

$$\pi_{15}^* = B_{15} \quad (4.103)$$

$$\pi_{17}^* = B_{17} \quad (4.104)$$

$$\pi_{55}^* = \pi_c^* \quad \text{despejando} \quad \pi_{55}^* - \pi_c^* = 0 \quad (4.105)$$

Equipo No. 5: Bombas de condensado

$$\beta_5 \pi_c^* + \pi_{17}^* + \pi_{48}^* - \pi_{18}^* = 0 \quad (4.106)$$

Equipo No. 6: Condensador de vapor de sellos.

$$\beta_6 \pi_c^* + \pi_9^* + \pi_{19}^* - \pi_{21}^* - \pi_{23}^* = 0 \quad (4.107)$$

$$\frac{\pi_9^*}{B_9} = \frac{\pi_{21}^*}{B_{21}} \quad \text{despejando} \quad \pi_9^* - \frac{B_9}{B_{21}} \pi_{21}^* = 0 \quad (4.108)$$

Equipo No. 7: Eyector de vapor

$$\beta_7 \pi_c^* + \pi_{20}^* + \pi_{42}^* - \pi_{16}^* - \pi_{22}^* = 0 \quad (4.109)$$

$$\frac{\pi_{42}^*}{B_{42}} = \frac{\pi_{16}^*}{B_{16}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{16}^* - \frac{B_{16}}{B_{42}} \pi_{42}^* = 0 \quad (4.110)$$

Equipo No. 8: Calentador de baja presión C1

$$\beta_8 \pi_c^* + \pi_{24}^* + \pi_{13}^* + \pi_{27}^* - \pi_{25}^* - \pi_{26}^* = 0 \quad (4.111)$$

$$\frac{\pi_{13}^* + \pi_{27}^*}{B_{13} + B_{27}} = \frac{\pi_{25}^*}{B_{25}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{13}^* + \pi_{27}^* - \frac{(B_{13} + B_{27})}{B_{25}} \pi_{25}^* = 0 \quad (4.112)$$

Equipo No. 9: Calentador de baja presión C2

$$\beta_9 \pi_c^* + \pi_{26}^* + \pi_{12}^* - \pi_{27}^* - \pi_{28}^* = 0 \quad (4.113)$$

$$\frac{\pi_{12}^*}{B_{12}} = \frac{\pi_{27}^*}{B_{27}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{12}^* - \frac{B_{12}}{B_{27}} \pi_{27}^* = 0 \quad (4.114)$$

Equipo No. 10: Deaerador C3

$$\beta_{10} \pi_c^* + \pi_{28}^* + \pi_8^* + \pi_{34}^* - \pi_{29}^* = 0 \quad (4.115)$$

Equipo No. 11: Bombas de agua de alimentación.

$$\beta_{11} \pi_c^* + \pi_{29}^* + \pi_{49}^* - \pi_{30}^* = 0 \quad (4.116)$$

Equipo No. 12: Calentador de alta presión C4.

$$\beta_{12} \pi_c^* + \pi_{33}^* + \pi_7^* + \pi_{36}^* - \pi_{34}^* - \pi_{35}^* = 0 \quad (4.117)$$

$$\frac{\pi_7^* + \pi_{36}^*}{B_7 + B_{36}} = \frac{\pi_{34}^*}{B_{34}} \quad \text{despejando} \quad \pi_7^* + \pi_{36}^* - \frac{(B_7 + B_{36})}{B_{34}} \pi_{34}^* = 0 \quad (4.118)$$

Equipo No. 13: Calentador de alta presión C5.

$$\beta_{13}\pi_c^* + \pi_{35}^* + \pi_6^* + \pi_{38}^* - \pi_{36}^* - \pi_{37}^* = 0 \quad (4.119)$$

$$\frac{\pi_6^* + \pi_{38}^*}{B_6 + B_{38}} = \frac{\pi_{36}^*}{B_{36}} \quad \text{despejando} \quad \pi_6^* + \pi_{38}^* - \frac{(B_6 + B_{38})}{B_{36}} \pi_{36}^* = 0 \quad (4.120)$$

Equipo No. 14: Calentador de alta presión C6.

$$\beta_{14}\pi_c^* + \pi_3^* + \pi_{37}^* - \pi_{38}^* - \pi_{39}^* = 0 \quad (4.121)$$

$$\frac{\pi_3^*}{B_3} = \frac{\pi_{38}^*}{B_{38}} \quad \text{despejando} \quad \pi_3^* - \frac{B_3}{B_{38}} \pi_{38}^* = 0 \quad (4.122)$$

Equipo No. 15: Generador eléctrico.

$$\pi_{46}^* + \pi_{47}^* - \pi_{48}^* - \pi_{49}^* - \pi_{50}^* - \pi_{51}^* - \pi_{52}^* - \pi_{53}^* - \pi_{54}^* = 0 \quad (4.123)$$

$$\frac{\pi_{48}^*}{B_{48}} = \frac{\pi_{49}^*}{B_{49}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{48}^* - \frac{B_{48}}{B_{49}} \pi_{49}^* = 0 \quad (4.124)$$

$$\frac{\pi_{48}^*}{B_{48}} = \frac{\pi_{50}^*}{B_{50}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{48}^* - \frac{B_{48}}{B_{50}} \pi_{50}^* = 0 \quad (4.125)$$

$$\frac{\pi_{48}^*}{B_{48}} = \frac{\pi_{51}^*}{B_{51}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{48}^* - \frac{B_{48}}{B_{51}} \pi_{51}^* = 0 \quad (4.126)$$

$$\frac{\pi_{48}^*}{B_{48}} = \frac{\pi_{52}^*}{B_{52}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{48}^* - \frac{B_{48}}{B_{52}} \pi_{52}^* = 0 \quad (4.127)$$

$$\frac{\pi_{48}^*}{B_{48}} = \frac{\pi_{53}^*}{B_{53}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{48}^* - \frac{B_{48}}{B_{53}} \pi_{53}^* = 0 \quad (4.128)$$

$$\frac{\pi_{48}^*}{B_{48}} = \frac{\pi_{54}^*}{B_{54}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{48}^* - \frac{B_{48}}{B_{54}} \pi_{54}^* = 0 \quad (4.129)$$

Equipo No. 16: Bifurcación a C6 y al recalentador.

$$\pi_2^* - \pi_3^* - \pi_4^* = 0 \quad (4.130)$$

$$\frac{\pi_3^*}{B_3} = \frac{\pi_4^*}{B_4} \quad \text{despejando} \quad \pi_3^* - \frac{B_3}{B_4} \pi_4^* = 0 \quad (4.131)$$

Equipo No. 17: Bifurcación al CVS y al eyector de vapor

$$\pi_{18}^* - \pi_{19}^* - \pi_{20}^* = 0 \quad (4.132)$$

$$\frac{\pi_{19}^*}{B_{19}} = \frac{\pi_{20}^*}{B_{20}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{19}^* - \frac{B_{19}}{B_{20}} \pi_{20}^* = 0 \quad (4.133)$$

Equipo No. 18: Unión de las corrientes del CVS y eyector.

$$\pi_{22}^* + \pi_{23}^* - \pi_{24}^* = 0 \quad (4.134)$$

Equipo No. 19: Bifurcación a C4 y atemperación.

$$\pi_{30}^* - \pi_{31}^* - \pi_{32}^* - \pi_{33}^* = 0 \quad (4.135)$$

$$\frac{\pi_{31}^*}{B_{31}} = \frac{\pi_{32}^*}{B_{32}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{31}^* - \frac{B_{31}}{B_{32}} \pi_{32}^* = 0 \quad (4.136)$$

$$\frac{\pi_{31}^*}{B_{31}} = \frac{\pi_{33}^*}{B_{33}} \quad \text{despejando} \quad \pi_{31}^* - \frac{B_{31}}{B_{33}} \pi_{33}^* = 0 \quad (4.137)$$

Equipo No. 20: Bifurcación a eyector y vapor principal.

$$\beta_{15} \pi_c^* + \pi_{41}^* - \pi_1^* - \pi_{42}^* = 0 \quad (4.138)$$

$$\frac{\pi_1^*}{B_1} = \frac{\pi_{42}^*}{B_{42}} \quad \text{despejando} \quad \pi_1^* - \frac{B_1}{B_{42}} \pi_{42}^* = 0 \quad (4.139)$$

Los valores solución del sistema de ecuaciones (56x56) se encuentran en la tabla 4.12 (en relación a la figura y tabla 4.1 respectivamente).

Tabla. 4.12 Costos termoeconómicos en las corrientes de la estructura productiva

Corriente	Exergía B (kW)	Costo Termoeconómico π (\$/hr)	Costo Termoeconómico Unitario $c = \pi / B$ (\$/GJ)
1	193941.590	221408.893	317.119
2	141847.369	161936.741	317.119
3	6427.380	7337.669	317.119
4	135419.989	154599.072	317.119
5	165027.800	177101.006	298.100
6	6396.321	6864.267	298.100
7	3921.689	4208.595	298.100
8	4688.257	5031.243	298.100
9	62.787	71.680	317.119
10	-	-	-
11	78223.681	83946.418	298.100
12	1797.630	1929.142	298.100
13	2897.657	3109.645	298.100
14	18614.523	19976.336	298.100
15	0.351	0	0
16	0.398	0.455	317.119
17	498.584	0	0
18	772.737	2190.833	787.545
19	463.642	1314.500	787.545
20	309.095	876.333	787.545
21	2.137	2.440	317.119
22	335.892	1015.579	839.869
23	503.838	1385.628	763.929
24	839.730	2401.207	794.305
25	99.104	106.354	298.100
26	2945.869	5612.519	529.227
27	123.636	132.681	298.100
28	4393.733	7429.856	469.726
29	10165.638	14624.009	399.604
30	12440.706	19546.575	436.439
31	1241.981	1951.374	436.439
32	341.481	536.527	436.439
33	10857.244	17058.673	436.439
34	1936.852	2084.140	298.901
35	14052.050	21020.332	415.525
36	1658.376	1795.806	300.797
37	19148.700	27360.250	396.897
38	1057.235	1206.968	317.119
39	23971.437	33541.490	388.674
40	-	-	-
41	194081.996	221538.141	317.074
42	115.249	131.571	317.119
43	460453.676	180232.228	108.729
44	0.000	0	-
45	262318.767	0	0
46	115583.863	137212.193	329.756
47	50017.610	59383.328	329.791
48	1715.982	2057.720	333.097
49	3974.228	4765.696	333.097
50	2757.000	3306.056	333.097
51	4500.725	5397.044	333.097
52	694.824	833.199	333.097
53	2.984	3.578	333.097
54	150300.000	180232.228	333.097
55	11073.364	27458.949	688.814

Tabla 4.13 Costos termoeconómicos para cada equipo de la Unidad 3.

Equipo	F (fuel)	P (producto)
1.-Generador de Vapor (GV)	$\pi_{43} + \pi_{44} + \pi_{50}$	$(\pi_{41} - \pi_{39} - \pi_{31} - \pi_{40}) + (\pi_5 - \pi_4 - \pi_{32})$
2.-Turbina de Alta y Media Presión (TAP y TPI)	$(\pi_1 - \pi_2) + (\pi_5 - \pi_6 - \pi_7 - \pi_8 - \pi_9 - \pi_{10} - \pi_{11})$	π_{46}
3.-Turbina de Baja Presión (TBP)	$\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{13} - \pi_{14}$	π_{47}
4.-Sistema de Enfriamiento (SE)	$\pi_{14} + \pi_{15} + \pi_{21} + \pi_{25} + \pi_{16} + \pi_{10} + \pi_{51} + \pi_{52} + \pi_{53}$	$\pi_{17} + \pi_{55}$
5.-Bombas de Condensado (b1)	π_{48}	$\pi_{18} - \pi_{17}$
6.-Condensador de Vapor de Sellos (CVS)	$\pi_9 - \pi_{21}$	$\pi_{23} - \pi_{19}$
7.-Eyector de Vapor (EV)	$\pi_{42} - \pi_{16}$	$\pi_{22} - \pi_{20}$
8.-Calentador de Baja Presión C1	$\pi_{13} + \pi_{27} - \pi_{25}$	$\pi_{26} - \pi_{24}$
9.-Calentador de Baja Presión C2	$\pi_{12} - \pi_{27}$	$\pi_{28} - \pi_{26}$
10.-Deaerador C3	$\pi_8 + \pi_{34} + \pi_{28}$	π_{29}
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	π_{49}	$\pi_{30} - \pi_{29}$
12.-Calentador de Alta Presión C4	$\pi_7 + \pi_{36} - \pi_{34}$	$\pi_{35} - \pi_{33}$
13.-Calentador de Alta Presión C5	$\pi_6 + \pi_{38} - \pi_{36}$	$\pi_{37} - \pi_{35}$
14.-Calentador de Alta Presión C6	$\pi_3 - \pi_{38}$	$\pi_{39} - \pi_{37}$
15.-Generador Eléctrico (GE)	$\pi_{46} + \pi_{47}$	$\pi_{48} + \pi_{49} + \pi_{50} + \pi_{51} + \pi_{52} + \pi_{53} + \pi_{54}$
16.-Bifurcacion a C6 y al Recalentador (Bif1)	π_2	$\pi_3 + \pi_4$
17.-Bifurcacion al CVS y al Eyector (Bif2)	π_{18}	$\pi_{19} + \pi_{20}$
18.-Union de las corrientes del CVS y Eyector (U)	$\pi_{22} + \pi_{23}$	π_{24}
19.-Bifurcacion a C4 y Atemperación (Bif3)	π_{30}	$\pi_{31} + \pi_{32} + \pi_{33}$
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal (Bif4)	π_{41}	$\pi_1 + \pi_{42}$

Tabla 4.14 Costos termoeconómicos de fuel y producto para cada equipo de la Unidad 3

Equipo	π_F (\$/hr)	π_P (\$/hr)	$c_F = \pi_F / F$ (\$/GJ)	$c_P = \pi_P / F$ (\$/GJ)
1.-Generador de Vapor (GV)	183538.284	208010.685	110.064	291.623
2.-Turbina de Alta y Media Presión (TAP y TPI)	136450.957	137212.193	306.091	329.756
3.-Turbina de Baja Presión (TBP)	58931.294	59383.328	298.100	329.791
4.-Sistema de Enfriamiento (SE)	26316.966	27458.949	305.677	659.136
5.-Bombas de Condensado (b1)	2057.720	2190.833	333.097	2219.801
6.-Condensador de Vapor de Sellos (CVS)	69.240	71.128	317.119	491.539
7.-Eyector de Vapor (EV)	131.116	139.246	317.119	1443.410
8.-Calentador de Baja Presión C1	3135.973	3211.312	298.100	423.539
9.-Calentador de Baja Presión C2	1796.460	1817.337	298.100	348.662
10.-Deaereador C3	14545.239	14624.009	366.676	399.604
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	4765.696	4922.566	333.097	601.028
12.-Calentador de Alta Presión C4	3920.261	3961.659	298.901	344.453
13.-Calentador de Alta Presión C5	6275.429	6339.918	300.797	345.538
14.-Calentador de Alta Presión C6	6130.701	6181.239	317.119	356.024
15.-Generador Eléctrico (GE)	196595.521	196595.521	329.767	333.097
16.-Bifurcacion a C6 y al Recalentador (Bif1)	161936.741	161936.741	317.119	317.119
17.-Bifurcacion al CVS y al Eyector (Bif2)	2190.833	2190.833	787.545	787.545
18.-Union de las corrientes del CVS y Eyector (U)	2401.207	2401.207	794.305	794.305
19.-Bifurcacion a C4 y Atemperación (Bif3)	19546.575	19546.575	436.439	436.439
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal (Bif4)	221538.141	221540.464	317.074	317.119

c_F y c_P son los costos termoeconómicos unitarios del fuel y producto en \$/GJ

Costos de Operación Termoeconómicos

A diferencia del costo de operación exergético ahora el costo de operación termoeconómico (CO') se encuentra en unidades monetarias, y se expresa:

$$CO' = c_F \times I + \beta \pi_c \tag{4.140}$$

donde:

$c_F \times I$ es la parte del costo local por equipo.

$\beta \pi_c$ es el costo de generación de residuo (calor desechado al ambiente) con.

$$\pi_c = \pi_{55} = 27\,458.949 \text{ \$/hr}$$

Con esto se obtiene la tabla 4.13 basada a la figura 4.1, tabla 4.6 (con F y P), tabla 4.14 (con c_F) y tabla 4.7 (con β).

Tabla 4.15 Costos de operación termoeconómicos para cada equipo de la Unidad 3

Equipo	X' (\$/hr)	Y' (\$/hr)	CO' (\$/hr)
1.-Generador de Vapor (GV)	105031.153	24472.400	129503.553
2.-Turbina de Alta y Media Presión (TAP y TPI)	9085.862	761.236	9847.098
3.-Turbina de Baja Presión (TBP)	5254.465	452.034	5706.499
4.-Sistema de enfriamiento (SE)	13582.783	1139.543	14722.327
5.-Bombas de Condensado (b1)	1728.970	133.113	1862.083
6.-Condensador de Vapor de Sellos (CVS)	23.351	1.888	25.240
7.-Eyector de Vapor (EV)	100.524	8.129	108.653
8.-Calentador de Baja Presión C1	875.752	75.340	951.091
9.-Calentador de Baja Presión C2	242.672	20.877	263.548
10.-Deaerador C3	1126.258	78.770	1205.028
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	2037.548	156.870	2194.418
12.-Calentador de Alta Presión C4	482.507	41.398	523.905
13.-Calentador de Alta Presión C5	756.417	64.490	820.907
14.-Calentador de Alta Presión C6	624.936	50.538	675.474
15.-Generador Eléctrico (GE)	1965.616	0	1965.616
16.-Bifurcacion a C6 y al Recalentador (Bif1)	0	0	0
17.-Bifurcacion al CVS y al Eyector (Bif2)	0	0	0
18.-Union de las corrientes del CVS y Eyector (U)	0	0	0
19.-Bifurcacion a C4 y Atemperación (Bif3)	0	0	0
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal (Bif4)	28.716	2.323	31.038

X' es el costo de operación local y Y' es el costo de generación de residuo (calor desechado al ambiente)

CAPITULO V

CAPITULO V. ANALISIS DE RESULTADOS

La aplicación del diagnóstico a plantas complejas puede ser una herramienta muy útil para la gestión, la ingeniería de planta, y los departamentos de operación y mantenimiento. En la parte final de este trabajo se discuten los resultados obtenidos en el capítulo 4 del análisis exergético, análisis de costos exergéticos y termoeconómicos. Además se comparan los costos exergéticos y termoeconómicos surgidos a las condiciones actuales de operación con los de diseño ambos al 100% de carga. A partir de la comparación se tendrá una idea y una valoración de donde ocurren las desviaciones de operación y las áreas de oportunidad de la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica.

5.1 Evaluación del Análisis Exergético

En la figura 5.1, 5.2 y 5.3 se muestran los resultados del análisis exergético obtenidos con datos de operación actual al 100 % de carga en referencia a la figura 4.1, tabla 4.1 y con la tabla 1.2 que describe la nomenclatura empleada. Encontrándose las siguientes observaciones:

- Del calor desechado al ambiente por el sistema de enfriamiento ($\dot{Q}_{TE} = 236\,244.99\text{ kW}$), solo $B_{55} = 11\,073.36\text{ kW}$ representan pérdidas de exergía (oportunidades de generación de potencia) y estas pérdidas son por desecho al medio ambiente.
- De la exergía añadida por el combustible (gas natural) en el generador de vapor ($B_{43} = 460\,453.675\text{ kW}$) solamente es aprovechado el $\psi_{U3} = 37.20\%$ con la potencia neta entregada por la Unidad 3 (con $B_{54} = \text{Pot}_{U3} = 150\,300\text{ kW}$)
- La mayoría de las pérdidas de exergía son por las irreversibilidades de los equipos de la Unidad 3 $I_t = 299\,080.66\text{ kW}$, solo la exergía del calor desechado al ambiente es una pérdida por efluente ($E_{fl} = B_{55} = 11\,073.36\text{ kW}$)
- El equipo que tiene más pérdidas exergéticas es el generador de vapor con ($I = 265\,075.77\text{ kW}$), debida a su irreversibilidad. En segundo lugar se encuentra la turbina de vapor en sus tres secciones ($I = 13\,141.68\text{ kW}$). Las

más bajas pérdidas se encuentra en el eyector de vapor con ($I = 88.05 \text{ kW}$) y en el condensador de vapor de sellos ($I = 20.45 \text{ kW}$), también provocadas por irreversibilidad.

- Los equipos con mayor consumo exergético unitario son las bombas de condensado ($k_{ex} = 6.26 \text{ kW}$), el eyector de vapor ($k_{ex} = 4.29 \text{ kW}$) y el generador de vapor con $k_{ex} = 2.34 \text{ kW}$ por lo que sus eficiencias exergéticas son las más bajas con $\psi = 15.98 \%$ para la bomba de condensado, $\psi = 23.33 \%$ para el eyector de vapor y $\psi = 42.77 \%$ para el generador de vapor.
- Dentro del ciclo Rankine los equipos que tienen una mejor eficiencia exergética son: el generador eléctrico (con $\psi = 99.00 \%$), la turbina de vapor en sus tres secciones (en TAP y TPI con $\psi = 93.34 \%$ y en TBP con $\psi = 91.08 \%$); el deaerador C3 ($\psi = 92.32 \%$) y el calentador de alta presión C4 ($\psi = 87.69 \%$).

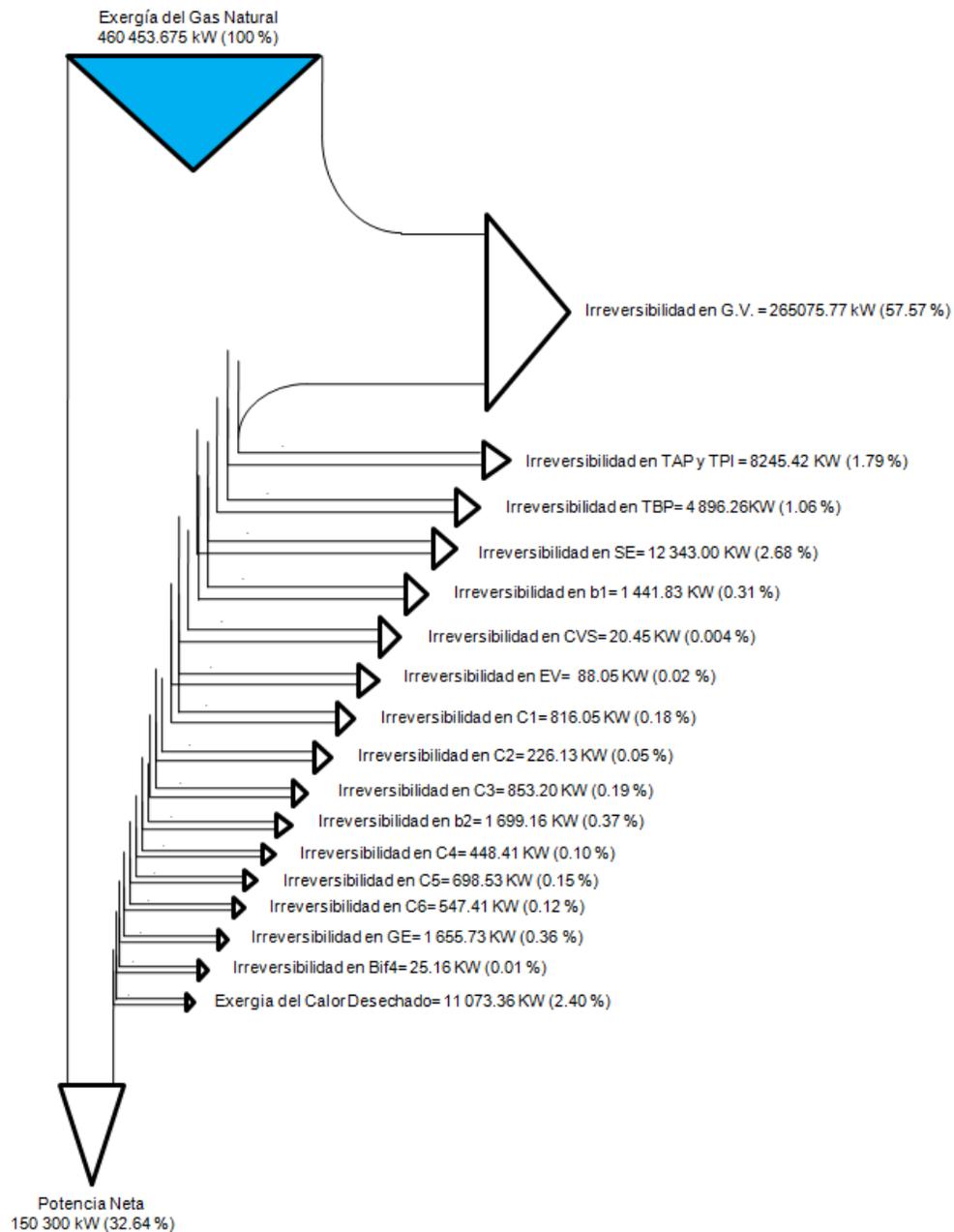


Figura 5.1 Diagrama de exergías en la Unidad 3 al 100% de carga. De la exergía del gas natural que entra a la Unidad 3 solamente se aprovecha como la potencia neta, mientras que en los equipos las pérdidas de exergía son debido a irreversibilidades dentro de estos y la exergía del calor desechado al ambiente son las pérdidas por efluente.

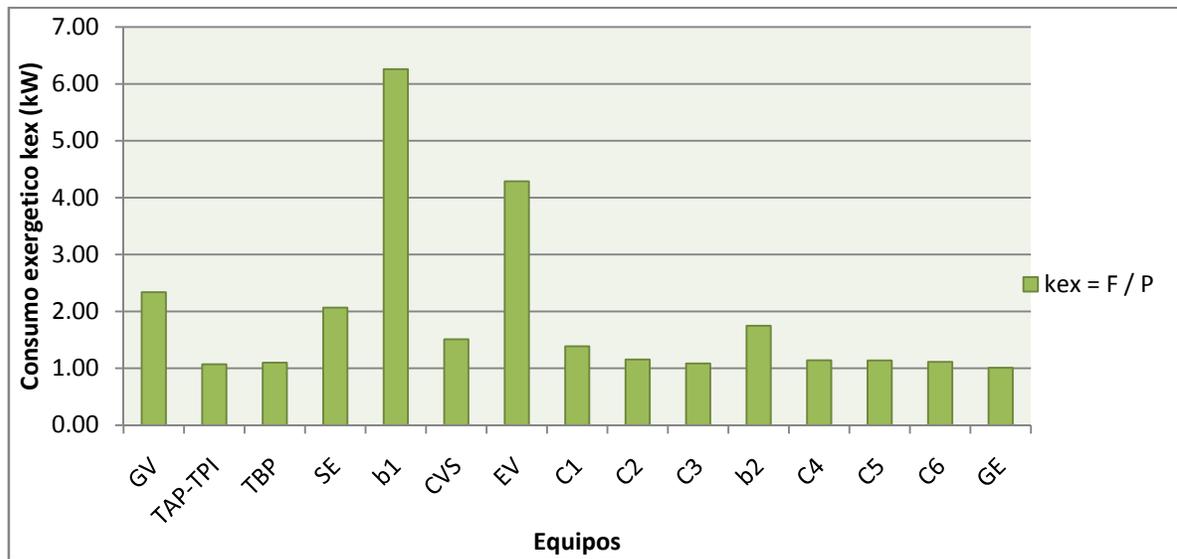


Figura 5.2 Consumo exergetico de los equipos.

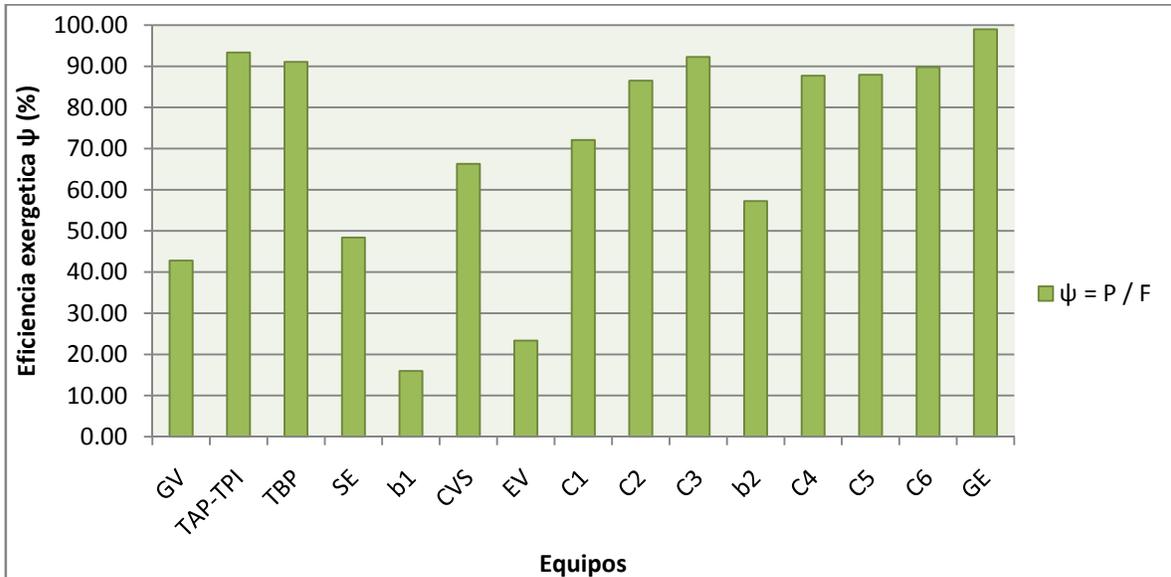


Figura 5.3 Eficiencia exergetica de los equipos.

5.2 Valoración de Costos Exergéticos

Los resultados obtenidos en el análisis de costos exergéticos de la Unidad 3 con una operación actual al 100 % de carga se resumen en las figuras 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8 (relacionadas a la figura 4.1, la tabla 4.1 y la tabla 5.1), con los siguientes puntos sobresalientes:

- Se cumple que los costos exergéticos son mayores a sus exergías en las corrientes ($B^* > B$), debido a las irreversibilidades acumuladas durante el proceso de generación de potencia. La corriente 43 es una excepción ya que es la entrada de gas natural al generador de vapor donde son iguales, porque es el recurso de entrada inicial al sistema, es decir, no tiene irreversibilidades acumuladas.
- El costo exergético de la potencia neta entregada ($B_{54}^* = 460\,451.82\text{ kW}$) es igual al costo exergético del gas natural ($B_{43}^* = 460\,451.82\text{ kW}$), satisfaciéndose la proposición P2 (en $F^* = P^*$). Por otro lado, el residuo (calor desechado al ambiente) siendo otra salida del sistema tiene un valor de $B_{55}^* = 69\,633.88\text{ kW}$.
- Las corrientes con los costos exergéticos más elevados son el vapor principal ($B_{41}^* = 566\,739.82\text{ kW}$ y $B_1^* = 566\,409.13\text{ kW}$) y el vapor recalentado caliente ($B_5^* = 452\,256.98\text{ kW}$), causado principalmente por las irreversibilidades acumuladas durante su paso por el generador de vapor.
- Los costos exergéticos unitarios de las corrientes a la salida de las bombas de condensado b1 son los más elevados ($k_{18}^* = k_{19}^* = k_{20}^* = 7.88$; $k_{22}^* = 8.31$, $k_{23}^* = 7.61$ y $k_{24}^* = 7.89$), esta situación es normal ya que la corriente al llegar a esta zona ha pasado por procesos donde se le ha extraído la potencia en la turbina de vapor y el residuo (calor desechado al ambiente), lo que provoca que la corriente disminuya su contenido de exergía y aumente su costo exergético ($k^* = B^*/B$).
- Desde que el combustible entra (gas natural) hasta alcanzar el producto deseado (potencia neta) y el residuo, el costo exergético unitario sufre aumentos a través de los procesos del ciclo de potencia. El costo exergético

unitario del calor desechado al ambiente ($k_{55}^* = 6.28$) es mayor al de la potencia neta entregada ($k_{54}^* = 3.06$), indicando que es más eficiente la obtención de potencia que la generación del residuo (calor desechado al ambiente)

- El generador eléctrico además de las bifurcaciones y uniones (Bif1, Bif2, Bif3 y U) siguen la proposición P2 ($F^* = P^*$). Los demás equipos presentan una diferencia entre costo exergético de recurso y producto, ya que son los que generan el residuo.
- Los equipos donde se encuentran los más altos costos exergético de recurso y producto son el generador de vapor (con $F^* = 468\,899.89\text{ kW}$ y $P^* = 530\,960.10\text{ kW}$) y el generador eléctrico (con $F^* = P^* = 502\,256.26\text{ kW}$). En el generador de vapor es debido a las irreversibilidades acumuladas en los procesos que suceden dentro de este y son grandes. Mientras que en el generador eléctrico al ser el lugar donde se obtiene el producto deseado (potencia neta), contiene las irreversibilidades acumuladas de los procesos del ciclo de potencia.
- Se cumple que los costos exergéticos unitarios de producto son mayores a los costos exergéticos de recurso ($k_F^* < k_P^*$), lo que indica que cuando una corriente atraviesa un proceso o equipo, su costo exergético unitario va incrementándose.
- Los equipos que tienen una diferencia entre costos exergéticos unitarios de recursos y producto mayores son las bombas de condensado (con $k_P^* - k_F^* = 17.35$) y el eyector de vapor EV (con $k_P^* - k_F^* = 10.38$). La diferencia señala la mala eficiencia de producción que tienen estos equipos.
- Los costos de operación local son más grandes que los costos de generación de residuo ($X > Y$).
- El equipo que tiene los más grandes costos de operación es el generador de vapor GV ($CO = 330\,391.68\text{ kW}$) también es el que genera mayor costo local ($X = 268\,331.46\text{ kW}$) y costo de generación de residuo ($Y = 62\,060.22\text{ kW}$). Por las irreversibilidades dentro de este equipo más que por su costo exergético unitario de recurso o a su costo de generación de residuo.

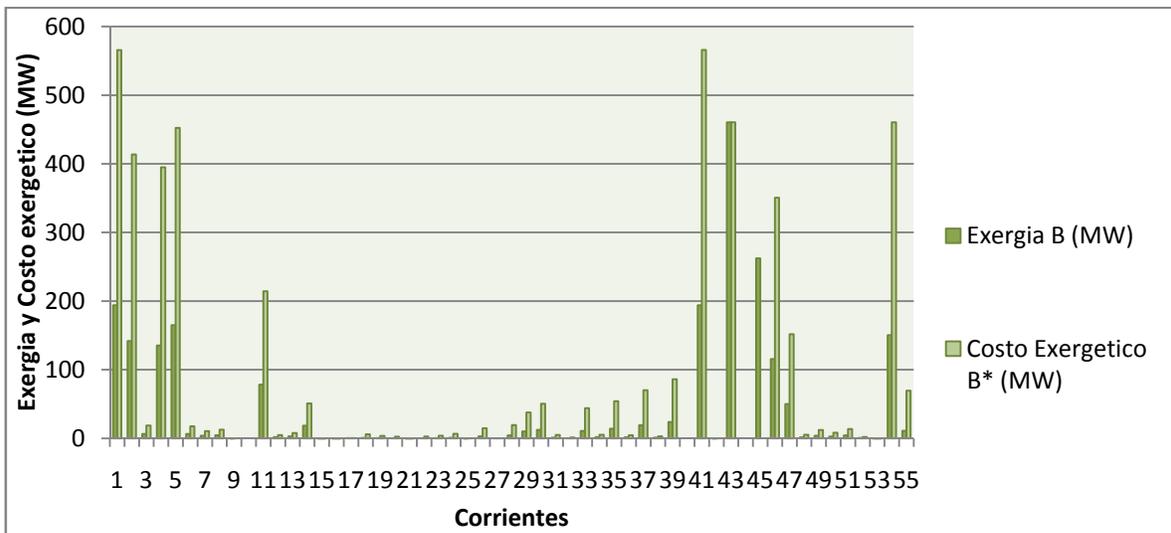


Figura 5.4 Exergía y costo exergetico de las corrientes

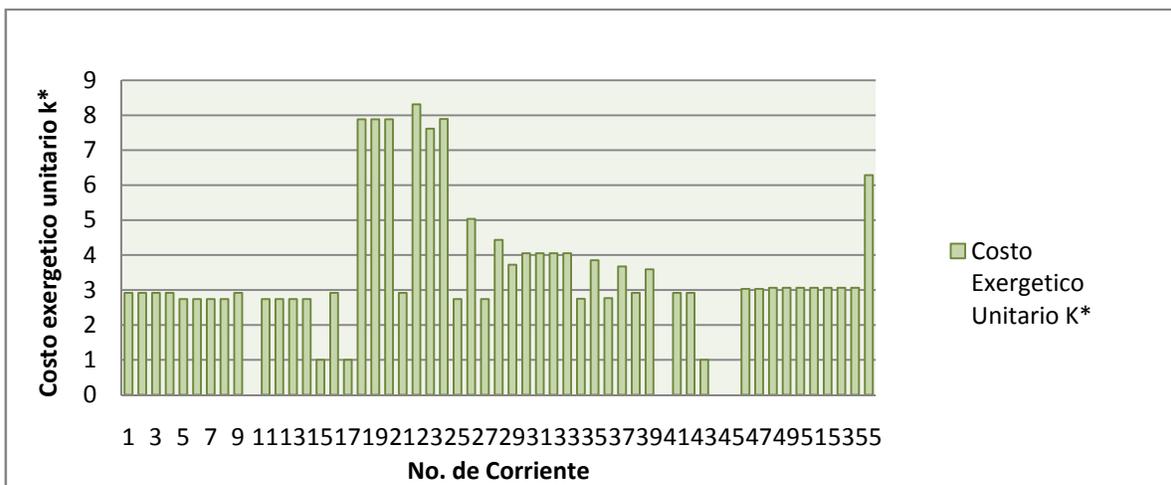


Figura 5.5 Costo exergetico unitario de las corrientes.

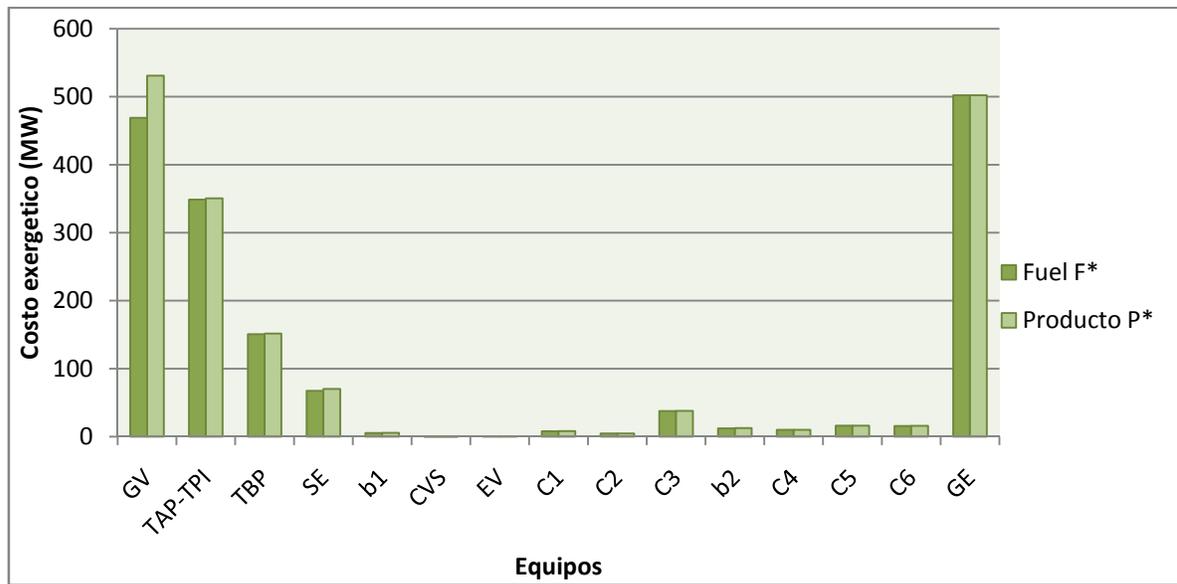


Figura 5.6 Costo exergético (fuel-producto) de los equipos.

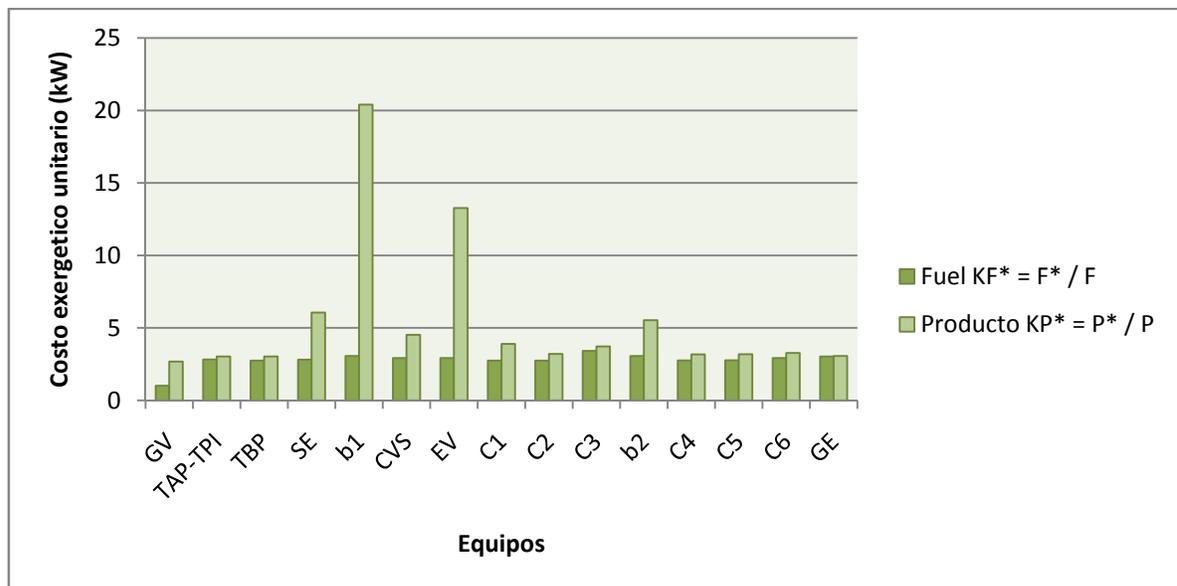


Figura 5.7 Costo exergético unitario por equipo.

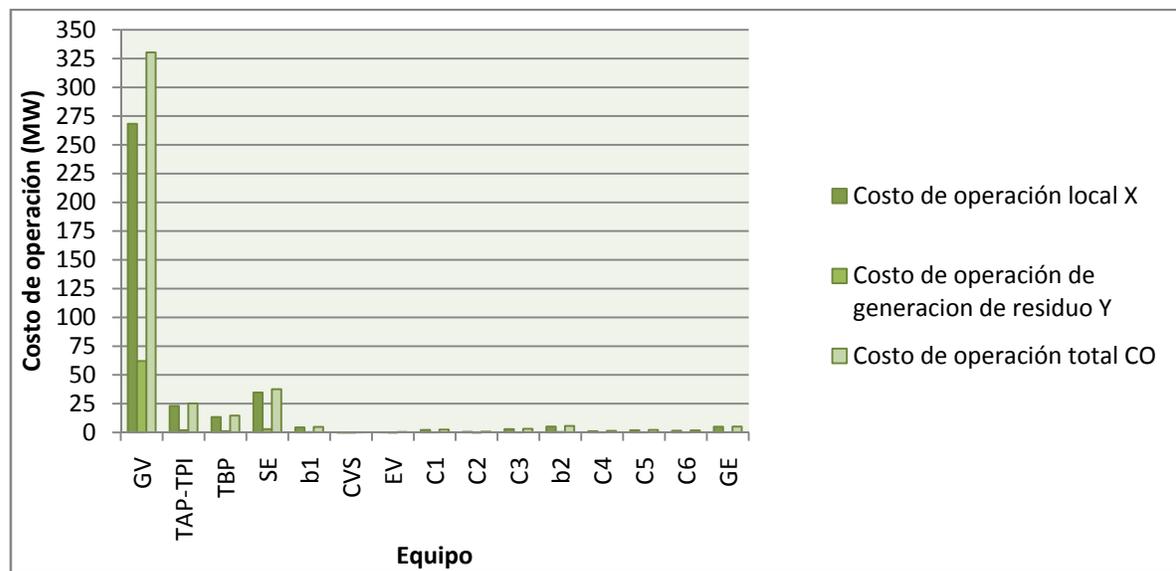


Figura 5.8 Costo de operación exergetico de los equipos.

5.3 Evaluación Termoeconómica

Mediante el análisis termoeconómico se obtiene la magnitud de los costos exergeticos en unidades monetarias, por lo que los puntos sobresalientes del análisis de costos exergeticos son parecidos pero ahora traduciéndose su impacto en unidades monetarias como costo termoeconómico. Entonces, del análisis termoeconómico se obtienen las figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13 con los siguientes resultados:

- Al igual que en los costos exergeticos, el costo termoeconómico de la potencia neta entregada por el sistema es igual al costo termoeconómico del combustible como gas natural ($\pi_{43} = \pi_{54} = 180\,232.228 \$/hr$), cumpliéndose ($\pi_F = \pi_P$). El costo termoeconómico del residuo (calor desechado al ambiente es $\pi_{55} = 27\,458.949 \$/hr$
- Las corrientes con los costos termoeconómicos más altos son: el vapor principal (1 y 41) $\pi_1 = 221\,408.893 \$/hr$, $\pi_{41} = 221\,538.141 \$/hr$ y el vapor recalentado $\pi_5 = 177\,101.006 \$/hr$, como sucedía con los costos exergeticos.

- De igual manera que los costos exergéticos unitarios de las corrientes, los costos termoeconómicos unitarios más elevados se encuentran en las corrientes a la salida de las bombas de condensado b1 ($c_{18} = c_{19} = c_{20} = 787.545 \$/GJ$, $c_{22} = 839.869 \$/GJ$, $c_{23} = 763.929 \$/GJ$, $c_{24} = 794.305 \$/GJ$).
- El costo termoeconómico unitario de la potencia neta entregada es $c_{54} = 333.097 \$/GJ$ y del residuo (calor desechado al ambiente) es $c_{55} = 688.814 \$/GJ$.
- Al igual que en los costos exergéticos, el generador eléctrico además de las bifurcaciones y uniones (Bif1, Bif2, Bif3 y U) cumplen en que $\pi_F = \pi_P$, y los demás tienen una diferencia que representa que generan residuo.
- En el generador eléctrico y en el generador de vapor son los equipos en donde se encuentran los costos termoeconómicos de fuel y producto más altos con ($\pi_F = \pi_P = 196\,595.521 \$/hr$) y ($\pi_F = 183\,538.284 \$/hr$; $\pi_P = 208\,010.685 \$/hr$) respectivamente.
- Los equipos que contienen una mayor diferencia entre costos termoeconómicos de recurso y producto son las bombas de condensado b1 ($c_P - c_F = 1857.736 \$/GJ$) y el eyector de vapor EV ($c_P - c_F = 1126.291 \$/GJ$).
- En cuanto a los costo de operación termoeconómico, son mayores los costos locales que los costos de generación de residuo ($X' > Y'$).
- El costo de operación termoeconómico mas alto se encuentra en el generador de vapor GV ($CO' = 129\,503.553 \$/hr$) además de costo local ($X' = 105\,031.153 \$/hr$) y de su costo de generación de residuo ($Y' = 24\,472.40 \$/hr$).

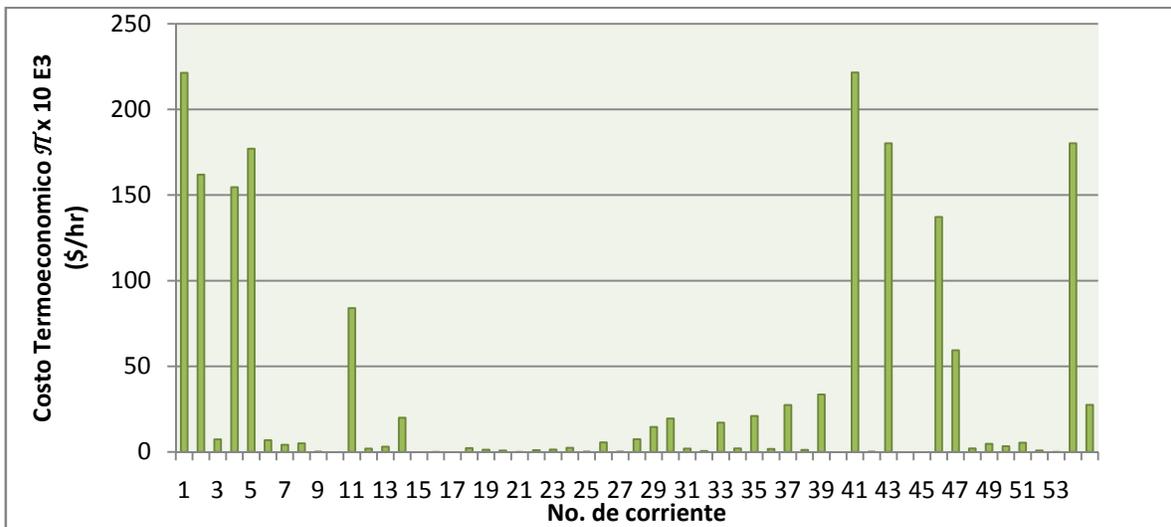


Figura 5.9 Costo termoeconómico de cada corriente.

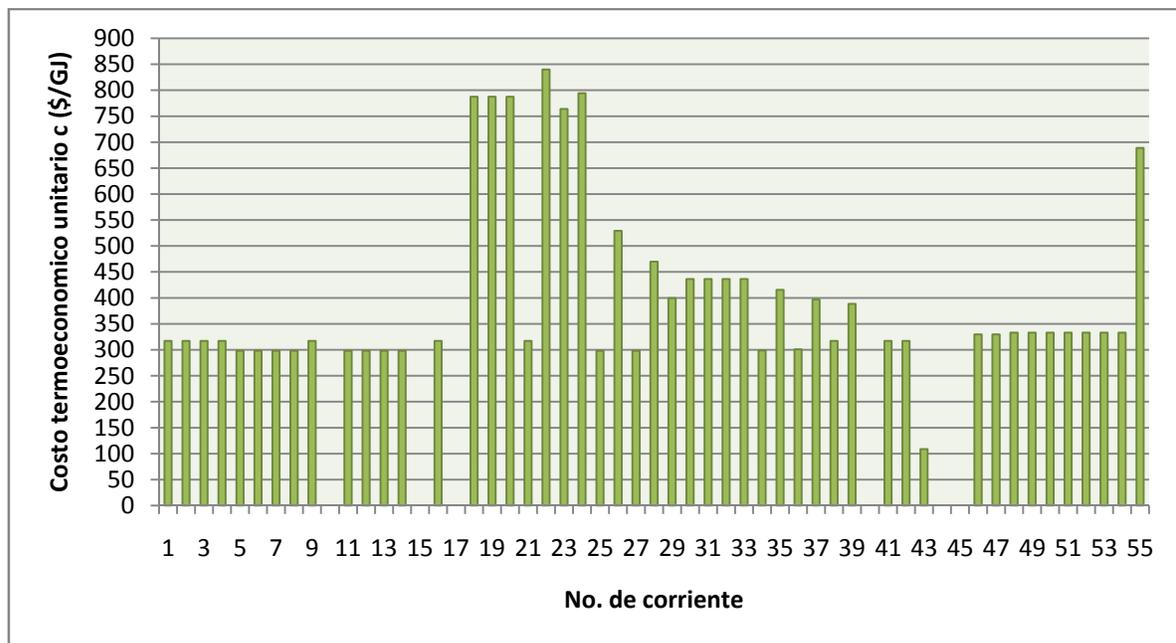


Figura 5.10 Costo termoeconómico unitario de cada corriente

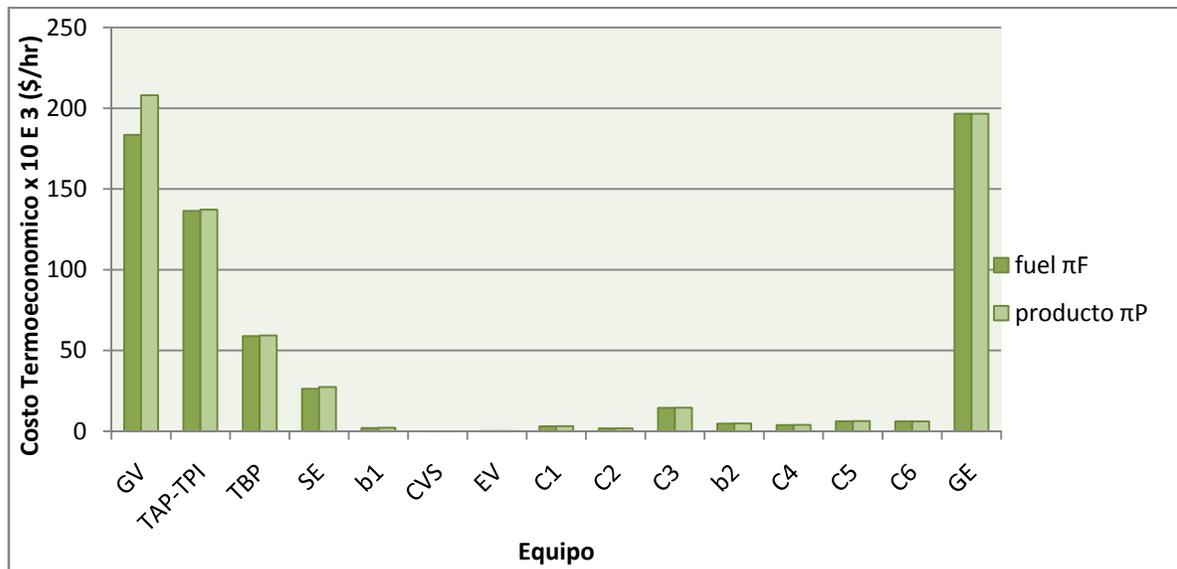


Figura 5.11 Costo termoeconómico por equipos

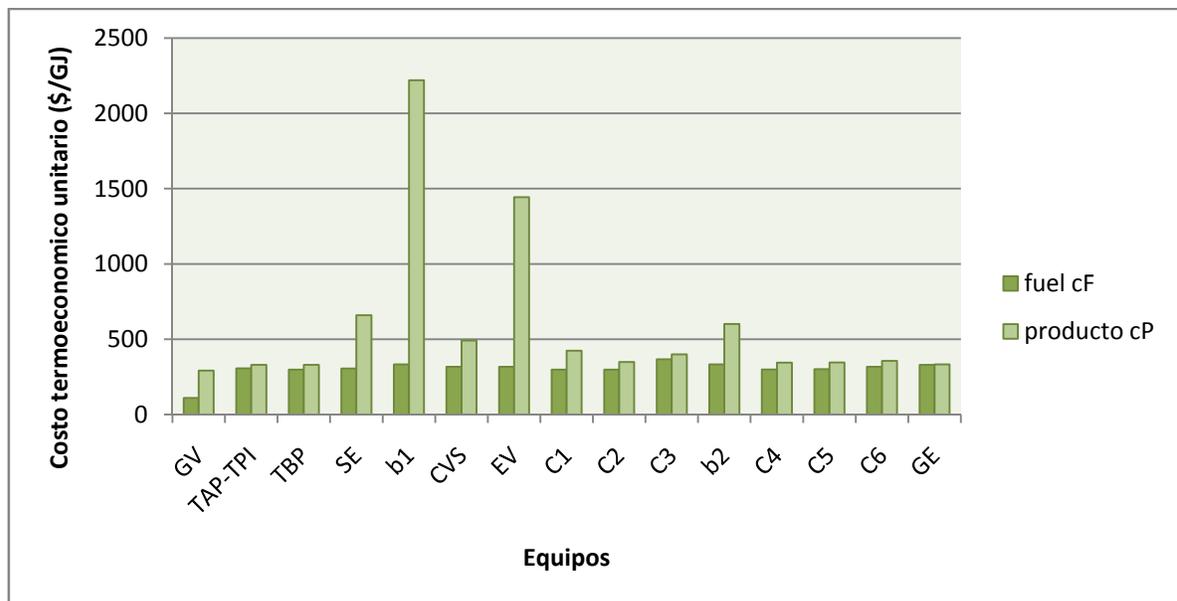


Figura 5.12 Costo termoeconómico unitario de los equipos.

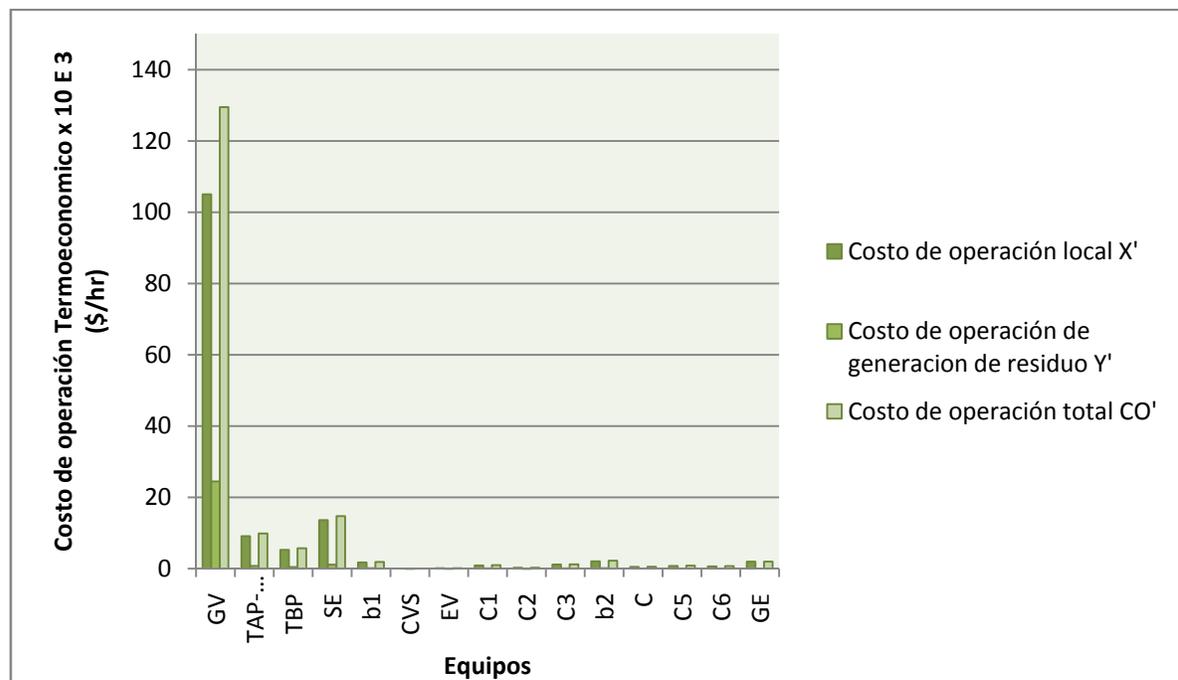


Figura 5.13 Costo de operación termoeconómico de los equipos

5.4 Comparación de Condiciones de Diseño y Operación

El análisis termoeconómico asume una situación de referencia, que corresponde con el sistema operando en las condiciones en los que fue diseñado. Por este motivo, con el objeto de evaluar las condiciones de operación actuales, se comparan los costos de operación tanto exergéticos como termoeconómicos de estas con las resultantes a las condiciones de diseño. La detección de una disfunción en los equipos ocurre cuando los costos de operación aumentan con respecto a su diseño. Los costos de operación de diseño fueron calculados con los datos del balance térmico al 100% de carga [18], cuyo desarrollo en hoja de cálculo está en el Anexo A (fue llevado a cabo por el programa de cómputo en EXCEL y TPX, que emplea la metodología seguida en el capítulo 4)

Los equipos que conforman la Unidad 3 presentan una diferencia de costos de operación exergético entre diseño y operación actual como se muestra en las tablas 5.1 y 5.2 (en relación a la figura 4.1 y a la tabla 4.1), además esta diferencia se traduce en unidades monetarias por medio del costos de operación termoeconómico observado en las tablas 5.3 y 5.4 Con estas tablas sobresalen los siguientes puntos:

- El costo de operación exergético total de la Unidad 3 en condiciones actuales a plena carga incrementa con respecto a diseño en la cantidad de $\Delta CO_T = 101\,053.631\text{ kW}$ indicando un deterioro en el funcionamiento de la Unidad 3 (disfunción), y representa perdidas en unidades monetarias como $\Delta CO'_T = 13\,117.94\text{ \$/hr}$ (incremento del costo de operación termoeconómico total).
- Los equipos aparentemente deteriorados que incrementaron significativamente su costo de operación exergético son: el generador de vapor (con $\Delta CO = 84\,149.276\text{ kW}$); la turbina de vapor en su sección alta-media presión TAP-TPI (con $\Delta CO = 14\,159.073\text{ kW}$), y en la sección de baja presión TBP (con $\Delta CO = 3\,336.339\text{ kW}$); las bombas de condensado b1 (con $\Delta CO = 3\,355.479\text{ kW}$); y las bombas de agua de alimentación b2 (con $\Delta CO = 2\,698.744\text{ kW}$).
- Estos incrementos son indicativos de una disfunción presente en cada uno de los equipos involucrados. Las pérdidas ocasionadas por estas disfunciones se representan en unidades monetarias con el costo de operación termoeconómico, siendo para los equipos: el generador de vapor de $\Delta CO' = 33\,077.294\text{ \$/hr}$; la turbina de vapor en su sección de alta-media presión TAP-TPI de $\Delta CO' = 5\,546.625\text{ \$/hr}$ y en su sección de baja presión TBP de $\Delta CO' = 1\,308.134\text{ \$/hr}$; las bombas de condensado b1 de $\Delta CO' = 1\,314.172\text{ \$/hr}$; las bombas de agua de alimentación b2 de $\Delta CO' = 1\,057.305\text{ \$/hr}$.
- Los incrementos en los costos de operación termoeconómico en el generador de vapor, turbina de vapor, bombas de condensado y bombas de agua de alimentación tienen que ver más por el aumento en sus costos de operación local que por sus costos de generación de residuo (calor desechado al ambiente).

Tabla 5.1 Comparación del costo de operación exergético por equipo

Equipo	Diseño	Operación	Comparación
	CO (kW)	CO (kW)	Δ CO (kW)
1.-Generador de Vapor (GV)	246243.279	330392.555	-84149.276
2.-Turbina de Alta y Media Presión (TAP y TPI)	10984.742	25143.815	-14159.073
3.-Turbina de Baja Presión (TBP)	11234.773	14571.111	-3336.339
4.-Sistema de enfriamiento (SE)	28801.886	37592.564	-8790.678
5.-Bombas de Condensado (b1)	1399.545	4754.710	-3355.164
6.-Condensador de Vapor de Sellos (CVS)	104.535	64.447	40.088
7.-Eyector de Vapor (EV)	277.786	277.438	0.348
8.-Calentador de Baja Presión C1	3226.372	2428.539	797.833
9.-Calentador de Baja Presión C2	394.048	672.951	-278.903
10.-Deaareador C3	2655.280	3115.494	-460.213
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	2904.564	5603.308	-2698.744
12.-Calentador de Alta Presión C4	1360.399	1337.751	22.648
13.-Calentador de Alta Presión C5	1258.489	2096.123	-837.634
14.-Calentador de Alta Presión C6	2088.126	1724.772	363.353
15.-Generador Eléctrico (GE)	20819.552	5021.720	15797.832
16.-Bifurcacion a C6 y al Recalentador (Bif1)	0.000	0.000	0.000
17.-Bifurcacion al CVS y al Eyector (Bif2)	0.000	0.000	0.000
18.-Union de las corrientes del CVS y Eyector	0.000	0.000	0.000
19.-Bifurcacion a C4 y Atemperación (Bif3)	0.000	0.000	0.000
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal	69.545	79.254	-9.709
Total	333822.921	434876.553	-101053.631

Nota: El signo negativo significa que los costos de operación aumentan (disfunción), el signo positivo en la disminución de los costos (mejor funcionamiento) y el cero en que no hay cambio alguno.

Las disfunciones en la Unidad 3 se prueban por los siguientes aspectos:

- En el costo del gas natural (corriente 43) que aumenta en $\Delta B_{43}^* = 62\,059.715\text{ kW}$, señalando la existencia de un mayor consumo del gas. Este incremento se traduce en costo termoeconómico como $\Delta \pi_{43} = 24\,291.610\text{ \$/hr}$.
- Por el costo exergético de la potencia neta (corriente 54) que asciende en $\Delta B_{54}^* = 62\,059.679\text{ kW}$, indicativo también de más consumo de gas natural, y el costo termoeconómico del incremento es $\Delta \pi_{54} = 24\,291.610\text{ \$/hr}$.
- Con el costo exergético del residuo (calor desechado al ambiente) que aumenta en la cantidad de $\Delta B_{55}^* = 33\,114.114\text{ kW}$, cuyo costo termoeconómico es $\Delta \pi_{55} = 13\,117.940\text{ \$/hr}$.

Tabla 5.2 Comparación del costo local y de generación de residuo (del costo de operación exergetico).

Equipo	Diseño		Operación		Comparación	
	X (kW)	Y (kW)	X (kW)	Y (kW)	ΔX (kW)	ΔY (kW)
Generador de Vapor	213702.901	32540.378	268331.484	62061.071	-54628.583	-29520.692
Turbina de Alta y Media Presión	10330.751	653.992	23213.349	1930.466	-12882.599	-1276.474
Turbina de Baja Presión	10526.796	707.977	13424.770	1146.341	-2897.974	-438.364
Sistema de enfriamiento	27088.929	1712.957	34702.726	2889.838	-7613.797	-1176.881
Bombas de Condensado	1322.576	76.970	4417.140	337.569	-3094.565	-260.600
Condensador de Vapor de Sellos	98.741	5.794	59.658	4.789	+39.082	+1.005
Eyector de Vapor	262.389	15.397	256.822	20.616	+5.567	-5.218
Calentador de Baja Presión	3023.058	203.315	2237.481	191.058	+785.577	+12.256
Calentador de Baja Presión	369.216	24.832	620.008	52.943	-250.792	-28.111
Deaerador	2517.049	138.231	2915.736	199.757	-398.687	-61.526
Bombas de Agua de Alimentación	2744.824	159.740	5205.491	397.817	-2460.667	-238.077
Calentador de Alta Presión C4	1275.496	84.903	1232.767	104.984	+42.729	-20.081
Calentador de Alta Presión C5	1181.840	76.649	1932.580	163.544	-750.740	-86.894
Calentador de Alta Presión C6	1972.386	115.740	1596.610	128.162	+375.776	-12.422
Generador Eléctrico	20819.552	0.000	5021.720	0.000	+15797.832	0.000
Bifurcación a C6 y al Recalentador (Bif1)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Bifurcación al CVS y al Eyector (Bif2)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Unión de las corrientes del CVS y Eyector (U)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Bifurcación a C4 y Atemperación (Bif3)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Bifurcación a Eyector y Vapor Principal (Bif4)	65.689	3.855	73.364	5.890	-7.674	-2.035
Total	297302.191	36520.730	365241.708	69634.845	-67939.517	-33114.114

Nota: El signo negativo significa que los costos de operación aumentan (disfunción), el signo positivo en la disminución de los costos (mejor funcionamiento) y el cero en que no hay cambio alguno.

Tabla 5.3 Comparación del costo de operación termoeconómico.

Equipo	Diseño	Operación	Comparación
	CO' (\$/hr)	CO' (\$/hr)	Δ CO' (\$/hr)
1.-Generador de Vapor (GV)	96426.260	129503.553	-33077.294
2.-Turbina de Alta y Media Presión (TAP y TPI)	4300.473	9847.098	-5546.625
3.-Turbina de Baja Presión (TBP)	4398.365	5706.499	-1308.134
4.-Sistema de enfriamiento (SE)	11275.649	14722.327	-3446.678
5.-Bombas de Condensado (b1)	547.911	1862.083	-1314.172
6.-Condensador de Vapor de Sellos (CVS)	40.925	25.240	+15.685
7.-Eyector de Vapor (EV)	108.752	108.653	+0.098
8.-Calentador de Baja Presión C1	1263.111	951.091	+312.019
9.-Calentador de Baja Presión C2	154.268	263.548	-109.280
10.-Deaareador C3	1035.741	1205.028	-169.287
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	1137.114	2194.418	-1057.305
12.-Calentador de Alta Presion C4	532.590	523.905	+8.685
13.-Calentador de Alta Presión C5	492.693	820.907	-328.214
14.-Calentador de Alta Presión C6	817.490	675.474	+142.015
15.-Generador Eléctrico (GE)	8149.247	1965.616	+6183.631
16.-Bifurcacion a C6 y al Recalentador (Bif1)	0.000	0.000	0.000
17.-Bifurcacion al CVS y al Eyector (Bif2)	0.000	0.000	0.000
18.-Union de las corrientes del CVS y Eyector (U)	0.000	0.000	0.000
19.-Bifurcacion a C4 y Atemperación (Bif3)	0.000	0.000	0.000
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal (Bif4)	27.226	31.038	-3.812
Total	130707.812	170406.479	-39698.667

Nota: El signo negativo significa que los costos de operación aumentan (disfunción), el signo positivo en la disminución de los costos (mejor funcionamiento) y el cero en que no hay cambio alguno.

Tabla 5.4 Comparación del costo local y de generación de residuo (del costo de operación termoeconómico).

Equipo	Diseño		Operación		Comparación	
	X' (\$ / hr)	Y' (\$ / hr)	X' (\$ / hr)	Y' (\$ / hr)	$\Delta X'$ (\$ / hr)	$\Delta Y'$ (\$ / hr)
1.-Generador de Vapor	83648.261	12777.999	105031.153	24472.400	-21382.892	-11694.401
2.-Turbina de Alta y Media Presión	4043.663	256.810	9085.862	761.236	-5042.199	-504.426
3.-Turbina de Baja Presión	4120.355	278.009	5254.465	452.034	-1134.110	-174.025
4.-Sistema de enfriamiento	10603.003	672.646	13582.783	1139.543	-2979.781	-466.897
5.-Bombas de Condensado	517.686	30.225	1728.970	133.113	-1211.283	-102.888
6.-Condensador de Vapor de Sellos	38.650	2.275	23.351	1.888	15.298	0.387
7.-Eyector de Vapor	102.706	6.046	100.524	8.129	2.182	-2.083
8.-Calentador de Baja Presión C1	1183.273	79.838	875.752	75.340	307.521	4.498
9.-Calentador de Baja Presión C2	144.517	9.751	242.672	20.877	-98.155	-11.126
10.-Deaerador C3	981.460	54.281	1126.258	78.770	-144.798	-24.489
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	1074.387	62.727	2037.548	156.870	-963.161	-94.143
12.-Calentador de Alta Presión C4	499.250	33.340	482.507	41.398	16.744	-8.058
13.-Calentador de Alta Presión C5	462.594	30.099	756.417	64.490	-293.823	-34.391
14.-Calentador de Alta Presión C6	772.041	45.449	624.936	50.538	147.104	-5.089
15.-Generador Eléctrico (GE)	8149.247	0.000	1965.616	0.000	6183.631	0.000
16.-Bifurcacion a C6 y al Recalentador (Bif1)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17.-Bifurcacion al CVS y al Eyector (Bif2)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18.-Union de las corrientes del CVS y Eyector (U)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19.-Bifurcacion a C4 y Atemperación (Bif3)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal (Bif4)	25.713	1.514	28.716	2.323	-3.003	-0.809
Total	116366.804	14341.009	142947.530	27458.949	-26580.726	-13117.940

Nota: El signo negativo significa que los costos de operación aumentan (disfunción), el signo positivo en la disminución de los costos (mejor funcionamiento) y el cero en que no hay cambio alguno.

CONCLUSIONES

La metodología de aplicación del análisis termoeconómico desarrollada en este trabajo ha permitido demostrar, de una manera sencilla y objetiva, los pasos necesarios para realizar la evaluación de la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica Valle de México.

El análisis termoeconómico no sustituye al análisis energético (o térmico) sino que lo complementa. Con el análisis térmico no es posible detectar los equipos que provocan la degradación de la energía en un sistema, debido a que solo distingue las transformaciones de energía. Por otro lado, en el análisis exergético, como parte de la termoeconomía, si es posible detectar las degradaciones de la energía (destrucción o pérdida de exergía).

En el caso de estudio, con el análisis térmico la energía perdida o sea la que no se transforma en potencia eléctrica se encuentra localizada básicamente en el calor perdido en el generador de vapor y en el calor desechado al ambiente. Por el contrario es en el análisis exergético donde se observa que la capacidad de producir trabajo o potencia (exergía) se va perdiendo a lo largo de la instalación, principalmente en equipos que no suponían pérdidas de energía si implican degradación de la misma.

También con el análisis exergético fue posible identificar y cuantificar correctamente las pérdidas por irreversibilidades ocasionadas por la producción de entropía al interior de los equipos, así como las pérdidas producidas por el desalojo de corrientes al ambiente (efluentes), siendo en este caso solo el calor desechado al ambiente. Las pérdidas en conjunto representan las pérdidas totales de exergía en el sistema.

Por otra parte, con el análisis de costos exergéticos y termoeconómicos, como parte de la termoeconomía, fue posible conocer el impacto de las pérdidas exergéticas en términos de costos. Además, se identificaron los equipos del ciclo de potencia (ciclo

Rankine) que generan el residuo (calor desechado al ambiente) con el costo que representan.

En general, el análisis termoeconómico, con los parámetros de eficiencia exergética, costo exergético, costo termoeconómico y costo de operación (tanto exergético como termoeconómico), ayuda a puntualizar en que equipos o procesos de un sistema se pueden tomar acciones correctivas y lograr un mejor aprovechamiento de la energía con conveniencias tanto técnicas como económicas.

RECOMENDACIONES

- ✓ El análisis termoeconómico requiere de la obtención de datos de operación perfectamente leídos y validados, implicando más y mejor instrumentación.
- ✓ Las posibles acciones de corrección deben considerar el factor de vida útil de los equipos de la Unidad 3 por su antigüedad. También deben tener en cuenta que las condiciones ambientales, que afectan el comportamiento de los equipos, no son modificables a voluntad.
- ✓ Al ser el generador de vapor, la turbina de vapor, las bombas de condensado y las bombas de agua de alimentación los equipos que presentan las mayores disfunciones, debidas a los aumentos en su costo de operación actual con respecto a diseño, se les debe poner especial atención en su funcionamiento y darles buen mantenimiento principalmente en el generador de vapor por repercutir más en la disfunción de la Unidad 3.

Propuestas Operativas a la Unidad 3

- ❖ Una acción correctiva sería incrementar las temperaturas del vapor principal T_1 y del vapor recalentado caliente T_5 (con menos atemperación) en relación a la operación actual, con esto se provocaría el descenso en la disfunción de la Unidad 3 por la disminución de su costo de operación actual principalmente en el generador de vapor.

- ❖ Otra posible opción correctiva sería disminuir la presión de vacío en el condensador o sea la presión del vapor de escape de la turbina de vapor p_{14} de la operación actual, con lo que se lograría un mejor desempeño de la Unidad 3 debido a la reducción de su disfunción, es decir que su costo de operación termoeconómico actual disminuye, representado mas por su generador de vapor.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Moran Michel J.- Shapiro Howard .N., “Fundamentos de Termodinámica Técnica”,. Ed. Reverte S.A 1996
- [2] Cengel Yunus A. y Boles, Michel A. “Termodinámica”, 4ta. Edición; McGraw-Hill. México 2003
- [3] Richards E. Donald y Wark, K. Jr. “Termodinámica”. 6ta. Edición. McGraw-Hill. México, 2000.
- [4] Szargut, Jan “International progress in second law analysis”, Energy, Vol. 5, Pergamon Press Ltd, p. 709-718, 1980.
- [5] Bejan, Adrian. “Entropy Generation Minimization”. CRC Press. New York. 1996
- [6] Gómez J. Luis, Monleón Manuel; “Análisis Exergético”; Reverte, S.A.; Barcelona, 1990
- [7] Rivero R.R.; “El análisis de Exergía”; Instituto Mexicano de Ing. Químicos Vol. II; México, 1994
- [8] Lozano M. A. y Valero A.; “Theory of the Exergetic Cost”; Energy vol. 187; Spain, 1993
- [9] Valero A.; “Thermoeconomic Bass for Energy”; Saving Energy; Spain 1995
- [10] Torres C.; “Structural Theory and Thermoeconomic”; Roccedin of Ecos 99; Japan, 1998
- [11] Tsatsaronis G., Winhold M.; “Exergoeconomic Analysis and Evaluation of Energy Conservation Plants”; Energy, Vol 10, No. 1; Spain, 1989
- [12] Valero A., Lozano M.A.; “Sobre el Proceso de Información del Costo Exergético”; Internal report, E.T.S.I.I.Z.; University of Zaragoza; Zaragoza, Spain, 1985
- [13] Tsatsaronis G., “Thermoeconomic Analysis and Optimization of Energy Systems”. Prog. Energy Combust. Sci. 1993, Vol. 19 pp. 227-257.
- [14] Valero A., Lozano M. A; y Muñoz, M. A “General Theory of Exergy Saving II: On the Thermoeconomic cost “. SME, WAM-1986, AES vol. 2.3, pp 9-15.
- [15] Valero A. y Torres, C. “Algebraic Thermodynamic Analysis of Energy Systems”. ASME, Approaches to the Design and Optimization of Thermal System-1988, AES vol. 7, pp. 13-23.

[16] Torres C. y Valero, A. “Curso de Doctorado (Termoeconomía). Dpto. Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza, España, 2000.

[17] Comisión Nacional de Ahorro de Energía, CONUE, 2009

[18] Lozano M. A. Valero A.; Determinación de la exergía para sustancias de interés industrial; Depto. de Termodinámica y Fisicoquímica; E.T.S.I.I.Z., Universidad de Zaragoza, España, 1990

[19] Comisión Federal de Electricidad (CFE). Prontuario de la C.T.E. Valle de México. México, 2003.

[20] Kotas T.J. The Exergy Method of Termal Plant Analisis. Butterworths. Inglaterra, 1995.

ANEXO A

Análisis Termoeconómico de la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica
Valle de México a

Condiciones de Diseño

Los resultados del análisis termoeconómico de la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica Valle de México a las condiciones de diseño realizado con la hoja de cálculo de Excel (Anexo B), se resumen en las siguientes tablas:

A) Análisis térmico. La tabla A.1 está relacionada a la figura 4.1 y a la tabla 4.1.

Tabla A.1 Descripción de las propiedades del ciclo de potencia en condiciones de diseño

Corriente	$T(^{\circ}\text{C})$	$p(\text{bar})$	$h(\text{KJ/Kg})$	$s(\text{KJ/Kg } ^{\circ}\text{C})$	$m (\text{Kg/hr})$	x
1	537.70	125.13	3442.710	6.589	472808.76	1
2	351.50	33.04	3112.038	6.696	456028.53	1
3	351.50	33.04	3112.038	6.696	38112.83	1
4	351.5	33.04	3112.038	6.696	417915.70	1
5	537.70	29.71	3541.646	7.346	417915.70	1
6	438.10	13.92	3339.795	7.424	17085.00	1
7	364.80	8.04	3192.753	7.456	19675.80	1
8	261.60	3.49	2989.619	7.489	22168.30	1
9	164.08	0.29	2808.842	8.256	635.00	1
10	--	--	--	--	969.13	--
11	198.60	2.93	2863.030	7.317	374162.70	1
12	162.80	1.27	2799.936	7.557	9072.75	1
13	118.33	0.78	2715.453	7.575	29691.00	1
14	39.62	0.07	2319.348	7.452	335398.95	1
15	34.00	0.05	142.484	0.492	4727.87	0
16	41.75	29.7	177.455	0.594	340.20	0
17	39.62	0.0722	165.965	0.567	380834.90	0
18	40.60	13.73	171.255	0.580	380834.90	0
19	40.6	14.60	171.255	0.580	228500.94	0
20	40.6	13.73	171.255	0.580	152333.96	0
21	68.44	0.29	286.429	0.936	635.00	0
22	42.28	13.73	178.265	0.602	152333.96	0
23	42.28	13.73	178.265	0.602	228500.94	0
24	42.28	13.73	178.265	0.602	380834.90	0
25	47.83	10.79	201.170	0.675	38763.75	0
26	90.33	10.79	379.087	1.196	380834.90	0
27	96.00	7.85	402.690	1.261	9072.75	0
28	103.95	7.85	436.197	1.351	380834.90	0
29	138.91	4.90	584.531	1.728	477876.83	0
30	141.20	137.29	602.969	1.738	477876.83	0
31	141.20	137.29	602.969	1.738	17826.50	0
32	141.20	137.29	602.969	1.738	0.00	0
33	141.20	137.29	602.969	1.738	460050.33	0
34	146.83	137.02	626.923	1.795	74873.63	0
35	170.39	137.02	728.072	2.030	460050.33	0
36	176.60	136.74	754.989	2.090	55197.83	0
37	194.36	136.74	832.674	2.259	460050.33	0
38	200.30	136.47	858.914	2.315	38112.83	0
39	235.81	136.47	1019.334	2.642	460050.33	0
40	--	--	--	--	4727.87	--
41	537.7	125.13	3442.710	6.589	473148.96	1
42	437.50	29.70	3316.260	7.049	340.20	1

B) Análisis exergético. La tabla A.2 y A. 3 están referidas a la figura 4.1

Tabla A.2 Exergía de cada corriente del ciclo de potencia en condiciones de diseño

Corriente	Entalpia h (kJ/Kg)	Entropía s (kJ/Kg °C)	Flujo Másico m (kg/hr)	Exergía B (kJ/Kg)	Exergía B (kW)
1	3442.710	6.589	472808.76	1472.465	193387.341
2	3112.038	6.696	456028.53	1109.776	140580.436
3	3112.038	6.696	38112.83	1109.776	11749.086
4	3112.038	6.696	417915.70	1109.776	128831.350
5	3541.646	7.346	417915.70	1344.479	156077.487
6	3339.795	7.424	17085.00	1119.097	5311.050
7	3192.753	7.456	19675.80	962.580	5260.980
8	2989.619	7.489	22168.30	749.486	4615.228
9	2808.842	8.256	635.00	338.720	59.746
10	--	--	969.13	--	0
11	2863.030	7.317	374162.70	674.400	70093.161
12	2799.936	7.557	9072.75	539.378	1359.344
13	2715.453	7.575	29691.00	449.630	3708.320
14	2319.348	7.452	335398.95	90.237	8407.047
15	142.484	0.492	4727.87	0.295	0.388
16	177.455	0.594	340.20	4.429	0.419
17	165.965	0.567	380834.90	1.065	112.646
18	171.255	0.580	380834.90	2.609	275.978
19	171.255	0.580	228500.94	2.619	166.246
20	171.255	0.580	152333.96	2.609	110.391
21	286.429	0.936	635.00	11.090	1.956
22	178.265	0.602	152333.96	2.938	124.317
23	178.265	0.602	228500.94	2.938	186.475
24	178.265	0.602	380834.90	2.938	310.792
25	201.170	0.675	38763.75	3.981	42.866
26	379.087	1.196	380834.90	25.840	2733.536
27	402.690	1.261	9072.75	29.874	75.290
28	436.197	1.351	380834.90	36.456	3856.619
29	584.531	1.728	477876.83	71.781	9528.483
30	602.969	1.738	477876.83	87.172	11571.557
31	602.969	1.738	17826.50	87.172	431.660
32	602.969	1.738	0.00	87.172	0.000
33	602.969	1.738	460050.33	87.172	11139.897
34	626.923	1.795	74873.63	93.889	1952.728
35	728.072	2.030	460050.33	124.784	15946.422
36	754.989	2.090	55197.83	133.614	2048.661
37	832.674	2.259	460050.33	160.509	20511.779
38	858.914	2.315	38112.83	170.008	1799.852
39	1019.334	2.642	460050.33	232.493	29710.721
40	--	--	4727.87	--	0
41	3442.710	6.589	473148.96	1472.465	193526.489
42	3316.260	7.049	340.20	1208.004	114.156

Tabla A.3 Definición fuel-producto en diseño de la Unidad 3

Equipo	F (kW)	P (kW)	I ($F - P$)	$kex =$ F / P	$\psi =$ P / F
Generador de Vapor (GV)	401574.96	190630.24	210944.71	2.11	47.47
Turbina de alta y media presión (TAP y TPI)	123544.23	119304.69	4239.53	1.04	96.57
Turbina de baja presión (TBP)	56618.45	52028.96	4589.50	1.09	91.89
Sistema de enfriamiento	14312.52	3208.19	11104.33	4.46	22.42
Bombas de condensado (b1)	662.29	163.33	498.96	4.05	24.66
Condensador de vapor de sello (CVS)	57.79	20.23	37.56	2.86	35.01
Eyector de vapor (EV)	113.74	13.93	99.81	8.17	12.24
Calentador de baja presión C1	3740.74	2422.74	1318.00	1.54	64.77
Calentador de baja presión C2	1284.05	1123.08	160.97	1.14	87.46
Deaerador C3	10424.57	9528.48	896.09	1.09	91.40
Bombas de agua de alimentación (b2)	3078.60	2043.07	1035.52	1.51	66.36
Calentador de alta presión C4	5356.91	4806.53	550.39	1.11	89.73
Calentador de alta presión C5	5062.24	4565.36	496.88	1.11	90.18
Calentador de alta presión C6	9949.23	9198.94	750.29	1.08	92.46
Generador Eléctrico (GE)	171333.65	163081.74	8251.91	1.05	95.18
Bifurcación a C6 y al recalentador (Bif1)	140580.44	140580.44	0.00	-	-
Bifurcación al CVS y al eyector(Bif2)	275.98	275.98	0.00	-	-
Unión de las corrientes del CVS y eyector (U)	310.79	310.79	0.00	-	-
Bifurcación a C4 y Atemperación (Bif3)	11571.56	11571.56	0.00	-	-
Bifurcación a eyector y vapor principal (Bif4)	193526.49	193501.50	24.99	-	-
Irreversibilidad Total (I_t) =			244999.46		
Eficiencia Exergética del Ciclo Rankine				43.95	
Eficiencia Exergética de la Unidad 3				37.73	

Nota: I es la irreversibilidad en kW, kex es el consumo exergético y ψ es la eficiencia exergética en %

C) Análisis de costos exergéticos. Las tablas A. 4, A.5 y A.6 están basadas en la figura 4.3 y a la tabla 4.3.

Tabla A.4 Costos exergeticos en las corrientes de la Unidad 3 en diseño

Corriente	Exergía B (kW)	Costo Exergetico B* (kW)	Costo Exergetico Unitario k*
1	193387.341	508381.532	2.629
2	140580.436	369561.405	2.629
3	11749.086	30886.293	2.629
4	128831.350	338675.112	2.629
5	156077.487	357990.511	2.294
6	5311.050	12181.805	2.294
7	5260.980	12066.961	2.294
8	4615.228	10585.817	2.294
9	59.746	157.063	2.629
10	-	-	-
11	70093.161	160770.697	2.294
12	1359.344	3117.888	2.294
13	3708.320	8505.668	2.294
14	8407.047	19283.005	2.294
15	0.388	0.388	1.000
16	0.419	1.100	2.629
17	112.646	112.646	1.000
18	275.978	1945.129	7.048
19	166.246	1168.930	7.031
20	110.391	776.199	7.031
21	1.956	5.142	2.629
22	124.317	1090.593	8.773
23	186.475	1326.645	7.114
24	310.792	2417.238	7.778
25	42.866	98.320	2.294
26	2733.536	11200.590	4.097
27	75.290	172.690	2.294
28	3856.619	14170.620	3.674
29	9528.483	29420.013	3.088
30	11571.557	37740.075	3.261
31	431.660	1357.210	3.144
32	0.000	0.000	--
33	11139.897	35025.655	3.144
34	1952.728	4525.344	2.317
35	15946.422	47524.923	2.980
36	2048.661	4872.747	2.379
37	20511.779	59642.127	2.908
38	1799.852	4731.498	2.629
39	29710.721	85912.663	2.892
40	-	-	-
41	193526.489	508677.774	2.628
42	114.156	300.097	2.629
43	398393.960	398393.960	1.000
44	0.000	0	-
45	207763.715	0	0
46	119304.693	301702.286	2.529
47	52028.955	130572.113	2.510
48	662.293	1755.513	2.651
49	3078.599	8160.322	2.651
50	3181.000	8431.753	2.651
51	5162.037	13682.811	2.651
52	694.824	1841.744	2.651
53	2.984	7.910	2.651
54	150300.000	398394.347	2.651
55	3095.542	36520.730	11.798

Tabla A.5 Costos exergeticos de fuel y producto de la Unidad 3 en diseño

Equipo	F^* (kW)	P^* (kW)	$k_F^* = F^*/F$	$k_P^* = P^*/P$
1.-Generador de Vapor (GV)	468899.928	530960.999	1.012	2.680
2.-Turbina de Alta y Media Presión (TAP y TPI)	348616.755	350547.221	2.815	3.033
3.-Turbina de Baja Presión (TBP)	150565.109	151711.450	2.742	3.033
4.-Sistema de enfriamiento (SE)	67237.357	70133.429	2.812	6.061
5.-Bombas de Condensado (b1)	5257.026	5594.595	3.064	20.407
6.-Condensador de Vapor de Sellos (CVS)	176.896	181.685	2.917	4.520
7.-Eyector de Vapor (EV)	334.981	355.596	2.917	13.270
8.-Calentador de Baja Presión C1	8012.179	8203.237	2.742	3.895
9.-Calentador de Baja Presión C2	4589.823	4642.766	2.742	3.207
10.-Deaereador C3	37655.734	37855.491	3.417	3.724
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	12175.313	12573.130	3.064	5.526
12.-Calentador de Alta Presión C4	10015.961	10120.945	2.749	3.168
13.-Calentador de Alta Presión C5	16033.172	16196.716	2.767	3.178
14.-Calentador de Alta Presión C6	15662.935	15791.097	2.917	3.274
15.-Generador Eléctrico (GE)	502258.671	502258.671	3.033	3.064
16.-Bifurcacion a C6 y al Recalentador (Bif1)	413721.780	413721.780	2.917	2.917
17.-Bifurcacion al CVS y al Eyector (Bif2)	6093.179	6093.179	7.885	7.885
18.-Union de las corrientes del CVS y Eyector (U)	6630.461	6630.461	7.896	7.896
19.-Bifurcacion a C4 y Atemperación (Bif3)	50428.621	50428.621	4.054	4.054
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal (Bif4)	565993.616	565999.506	2.916	2.917

k_F^* y k_P^* son los costos exergeticos unitarios del recurso y producto respectivamente

Tabla A.6 Costos de operación exergético de la Unidad 3 en diseño

Equipo	X (kW)	Y (kW)	CO(kW)
1.-Generador de Vapor (GV)	213702.901	32540.378	246243.279
2.-Turbina de Alta y Media Presión (TAP y TPI)	10330.751	653.992	10984.742
3.-Turbina de Baja Presión (TBP)	10526.796	707.977	11234.773
4.-Sistema de enfriamiento (SE)	27088.929	1712.957	28801.886
5.-Bombas de Condensado (b1)	1322.576	76.970	1399.545
6.-Condensador de Vapor de Sellos (CVS)	98.741	5.794	104.535
7.-Eyector de Vapor (EV)	262.389	15.397	277.786
8.-Calentador de Baja Presión C1	3023.058	203.315	3226.372
9.-Calentador de Baja Presión C2	369.216	24.832	394.048
10.-Deaereador C3	2517.049	138.231	2655.280
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	2744.824	159.740	2904.564
12.-Calentador de Alta Presión C4	1275.496	84.903	1360.399
13.-Calentador de Alta Presión C5	1181.840	76.649	1258.489
14.-Calentador de Alta Presión C6	1972.386	115.740	2088.126
15.-Generador Eléctrico (GE)	20819.552	0	20819.552
16.-Bifurcacion a C6 y al Recalentador (Bif1)	0	0	0
17.-Bifurcacion al CVS y al Eyector (Bif2)	0	0	0
18.-Union de las corrientes del CVS y Eyector (U)	0	0	0
19.-Bifurcacion a C4 y Atemperación (Bif3)	0	0	0
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal (Bif4)	65.689	3.855	69.545

D) Análisis de costos termoeconómicos. Las tablas A.7, A.8 y A.9 están basadas a la figura 4.3 y la tabla 4.3

Tabla A.7 Costos termoeconómicos en las corrientes de la Unidad 3 en diseño

Corriente	Exergía B (kW)	Costo Termoeconómico (\$/hr)	Costo Termoeconómico Unitario $c = \pi / B$ (\$/GJ)
1	193387.341	198993.174	285.830
2	140580.436	144655.524	285.830
3	11749.086	12089.663	285.830
4	128831.350	132565.861	285.830
5	156077.487	140123.181	249.383
6	5311.050	4768.152	249.383
7	5260.980	4723.201	249.383
8	4615.228	4143.457	249.383
9	59.746	61.478	285.830
10	-	-	-
11	70093.161	62928.208	249.383
12	1359.344	1220.391	249.383
13	3708.320	3329.254	249.383
14	8407.047	7547.675	249.383
15	0.388	0	0
16	0.419	0.431	285.830
17	112.646	0	0
18	275.978	717.372	722.051
19	166.246	431.107	720.331
20	110.391	286.266	720.331
21	1.956	2.013	285.830
22	124.317	409.347	914.659
23	186.475	492.847	734.157
24	310.792	902.194	806.358
25	42.866	38.484	249.383
26	2733.536	4340.395	441.064
27	75.290	67.594	249.383
28	3856.619	5502.944	396.356
29	9528.483	11471.977	334.435
30	11571.557	14728.840	353.569
31	431.660	529.679	340.854
32	0.000	0.000	--
33	11139.897	13669.482	340.854
34	1952.728	1771.295	251.969
35	15946.422	18562.010	323.340
36	2048.661	1907.283	258.608
37	20511.779	23305.004	315.605
38	1799.852	1852.026	285.830
39	29710.721	33588.090	314.029
40	-	-	-
41	193526.489	199109.126	285.791
42	114.156	117.466	285.830
43	398393.960	155940.619	108.729
44	0	0	-
45	207763.715	0	0
46	119304.693	118093.144	274.957
47	52028.955	51108.898	272.866
48	662.293	687.148	288.203
49	3078.599	3194.136	288.203
50	3181.000	3300.380	288.203
51	5162.037	5355.764	288.203
52	694.824	720.901	288.203
53	2.984	3.096	288.203
54	150300	155940.619	288.203
55	3095.542	14341.009	1286.887

Tabla A.8 Costos termoeconómicos de fuel y producto de la Unidad 3 en diseño

Equipo	π_F (\$/hr)	π_P (\$/hr)	$c_F = \pi_F / F$ (\$/GJ)	$c_P = \pi_P / F$ (\$/GJ)
1.-Generador de Vapor (GV)	159240.998	172548.676	110.150	251.430
2.-Turbina de Alta y Media Presión (TAP y TPI)	117836.334	118093.144	264.944	274.957
3.-Turbina de Baja Presión (TBP)	50830.889	51108.898	249.383	272.866
4.-Sistema de Enfriamiento (SE)	13666.350	14341.009	265.237	1241.702
5.-Bombas de Condensado (b1)	687.148	717.372	288.203	1220.032
6.-Condensador de Vapor de Sellos (CVS)	59.465	61.741	285.830	847.782
7.-Eyector de Vapor (EV)	117.035	123.081	285.830	2455.146
8.-Calentador de Baja Presión C1	3358.363	3438.201	249.383	394.204
9.-Calentador de Baja Presión C2	1152.798	1162.548	249.383	287.539
10.-Deaerador C3	11417.696	11471.977	304.241	334.435
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	3194.136	3256.863	288.203	442.805
12.-Calentador de Alta Presión C4	4859.189	4892.528	251.969	282.748
13.-Calentador de Alta Presión C5	4712.895	4742.994	258.608	288.586
14.-Calentador de Alta Presión C6	10237.637	10283.086	285.830	310.515
15.-Generador Eléctrico (GE)	169202.042	169202.042	274.322	288.203
16.-Bifurcacion a C6 y al Recalentador (Bif1)	144655.524	144655.524	285.830	285.830
17.-Bifurcacion al CVS y al Eyector (Bif2)	717.372	717.372	722.051	722.051
18.-Union de las corrientes del CVS y Eyector (U)	902.194	902.194	806.358	806.358
19.-Bifurcacion a C4 y Atemperación (Bif3)	14728.840	14199.161	353.569	340.854
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal (Bif4)	199109.126	199110.640	285.791	285.830

c_F y c_P son los costos termoeconomicos unitarios del fuel y producto en \$/GJ

Tabla A.9 Costos de operación termoeconómicos de la Unidad 3 en diseño

Equipo	X' (\$/hr)	Y' (\$/hr)	CO' (\$/hr)
1.-Generador de Vapor (GV)	83648.261	12777.999	96426.260
2.-Turbina de Alta y Media Presión (TAP y TPI)	4043.663	256.810	4300.473
3.-Turbina de Baja Presión (TBP)	4120.355	278.009	4398.365
4.-Sistema de enfriamiento (SE)	10603.003	672.646	11275.649
5.-Bombas de Condensado (b1)	517.686	30.225	547.911
6.-Condensador de Vapor de Sellos (CVS)	38.650	2.275	40.925
7.-Eyector de Vapor (EV)	102.706	6.046	108.752
8.-Calentador de Baja Presión C1	1183.273	79.838	1263.111
9.-Calentador de Baja Presión C2	144.517	9.751	154.268
10.-Deaerador C3	981.460	54.281	1035.741
11.-Bombas de Agua de Alimentación (b2)	1074.387	62.727	1137.114
12.-Calentador de Alta Presión C4	499.250	33.340	532.590
13.-Calentador de Alta Presión C5	462.594	30.099	492.693
14.-Calentador de Alta Presión C6	772.041	45.449	817.490
15.-Generador Eléctrico (GE)	8149.247	0	8149.247
16.-Bifurcacion a C6 y al Recalentador (Bif1)	0	0	0
17.-Bifurcacion al CVS y al Eyector (Bif2)	0	0	0
18.-Union de las corrientes del CVS y Eyector (U)	0	0	0
19.-Bifurcacion a C4 y Atemperación (Bif3)	0	0	0
20.-Bifurcacion a Eyector y Vapor Principal (Bif4)	25.713	1.514	27.226

X' es el costo de operación local y Y' es el costo de generación de residuo en el sistema de enfriamiento

ANEXO B

Programa de Computo para el Análisis Termoeconómico de la Unidad 3
de la Central Termoeléctrica Valle de México

A continuación se presenta el desarrollo del programa de cómputo que nos ayuda a la aplicación de la metodología del análisis termoeconómico de la Unidad 3 del ciclo de potencia de la Central Termoeléctrica Valle de México.

El programa de cómputo se elaboró en EXCEL con el auxilio del simulador TPX de propiedades termodinámicas de Excel (Thermodynamic Properties for Excel); a la estructura productiva del caso estudio.

El programa elaborado en una hoja de cálculo de EXCEL utiliza 44 hojas. El propósito y contenido de cada una de las hojas utilizadas para la Unidad 3, se presenta en la tabla B1 así como las figuras B1 a B15 que ilustran el uso del programa.

Tabla B1 Desarrollo y contenido del programa

Hoja	Nombre de la Hoja y Función que Desempeña	Figura
Menú	Esta hoja muestra la información contenida en todo el programa.	B1
Datos	En esta hoja se introducen los datos (Equipos, Condiciones ambientales, costo del combustible, etc.) con las condiciones de operación de la Unidad 3	B2
AT	Es en esta hoja donde se desarrolla todo el análisis térmico de la Unidad 3	B3
AE	Es en esta hoja donde se lleva a cabo el cálculo de las exergías, de las irreversibilidades, eficiencias exergéticas, fuel (F), producto (P) y consumo exergético de la Unidad 3.	B4
CE	En esta hoja de cálculo se resuelve la matriz de costos exergético de la estructura productiva de la Unidad 3.	B5
CTE	En esta hoja de cálculo se resuelve la matriz de costos termoeconómicos de la estructura productiva de la Unidad 3.	B6
COE	En esta hoja se resuelve los costos de operación por equipo de la Unidad 3	
COT	En esta hoja se resuelve los costos de operación por equipo de la Unidad 3	
RT, RG y RF	Muestra cada una de las tablas, gráficas y figuras desarrolladas durante los cálculos	

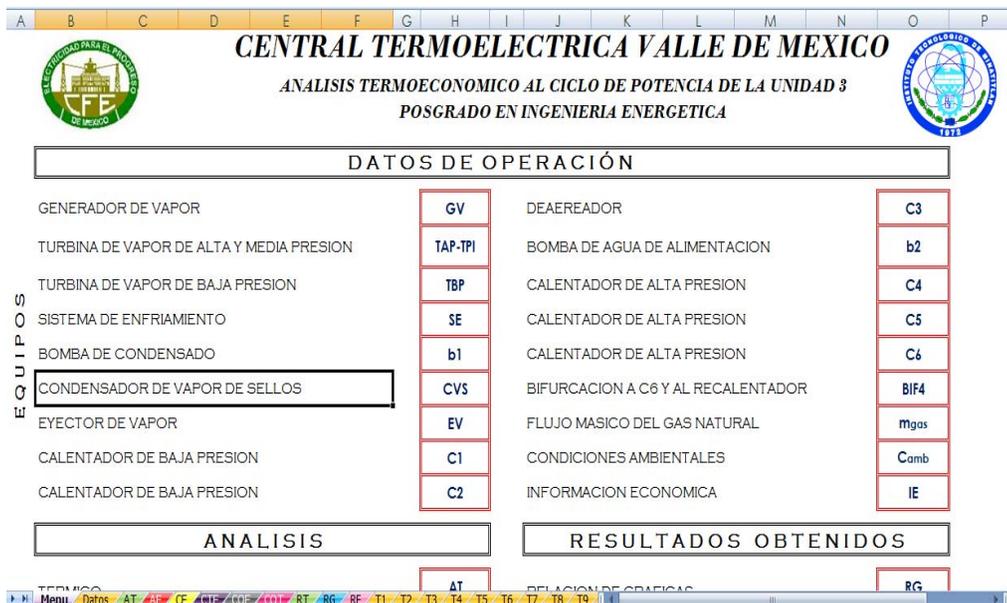


Figura B1 Hoja: Menú, del archivo: SIMULACION CTE U3 OPERACION

CONDICIONES DE OPERACION AL 100 % DE CARGA				
1. GENERADOR DE VAPOR				
Corriente	Descripción	Temperatura (°C)	Presion (bar)	Flujo (Kg/hr)
4	Vapor recalentado frío			430908.00
5	Vapor recalentado caliente	527.80	28.24	
31	Atemperación en el sobrecalentador			48500.00
32	Atemperación en el recalentador			13335.00
39	Agua de alimentación que sale del calentador de A.P. C6		136.47	
40	Vapor auxiliar			2500.00
2. TURBINA DE VAPOR DE ALTA Y MEDIA PRESION				
Corriente	Descripción	Temperatura (°C)	Presion (bar)	Flujo (Kg/hr)
1	Vapor principal que entra a la TAP	540.10	121.40	469641.00
6	1ra. extracción en la TPI hacia el calentador de A.P. C5	449.00	14.21	
7	2da. extracción de vapor en la TPI hacia el calentador de	376.70	7.64	
8	3ra. extracción de vapor en la TPI hacia el deaereador C3	262.70	3.27	
9	Vapor hacia el CVS			635.00
10	Vapor auxiliar hacia el condensador			477.00
11	Vapor de la TPI a la TBP	210.80	2.91	

Figura B2 Hoja: Datos, del archivo: SIMULACION CTE U3 OPERACIÓN

ANALISIS TERMICO DE LA UNIDAD 3

BALANCE DE MASA EN EL CICLO DE VAPOR

7	m30 = m29		m33 = m30-m31-m32			
8	m30 =	485816	Kg/hr	m33 =	423981	Kg/hr
10	m37 = m35		m39 = m37			
11	m37 =	423981	Kg/hr	m39 =	423981	Kg/hr
13	m6 = m36+m37 -m35- m38		m7 =m34+m35-m33-m36			
14	m6 =	20051	Kg/hr	m7 =	14369	Kg/hr
16	m24 = m18		m26 = m24			
17	m24 =	408584	Kg/hr	m26 =	408584	Kg/hr
19	m8 = m29-m28-m34		m5 = m4+m32			
20	m8 =	22360	Kg/hr	m5 =	444243	Kg/hr
22	m11 = m1+m5-m2-m6-m7-m8-m9-m10		m12 = m27+m28-m26			
23	m11 =	404632	Kg/hr	m12 =	11597	Kg/hr

Figura B3 Hoja: AT, del archivo: SIMULACION CTE U3 OPERACIÓN

****CALCULO DE LAS IREVERSIBILIDADES Y EFICIENCIA EXERGETICAS**

Valores obtenidos de la definicion Recurso-Producto

No	EQUIPO	fuel F (kW)	producto P (kW)	Irreversibilidad I= F - P	Consumo exergetico kex = F / P	Eficiencia exergetica ψ= P/F
1	Generador de Vapor (GV)	463210.68	198134.909	265075.77	2.34	42.77
2	Turbina de alta y media presion (TAP y TPI)	123829.286	115583.86	8245.42	1.07	93.34
3	Turbina de baja presion (TBP)	54913.871	50017.61	4896.26	1.10	91.08
4	Sistema de enfriamiento	23915.047	11571.949	12343.10	2.07	48.39
5	Bombas de condensado (b1)	1715.98	274.153	1441.83	6.26	15.98
6	Condensador de vapor de sello (CVS)	60.650	40.196	20.45	1.51	66.27
7	Eyector de vapor (EV)	114.851	26.797	88.05	4.29	23.33
8	Calentador de baja presion C1	2922.189	2106.139	816.05	1.39	72.07
9	Calentador de baja presion C2	1673.993	1447.885	226.13	1.16	86.49
10	Deaerador C3	11018.842	10165.638	853.20	1.08	92.26
11	Bombas de agua de alimentacion (b2)	3974.23	2275.068	1699.16	1.75	57.25
12	Calentador de alta presion C4	3643.213	3194.805	448.41	1.14	87.69
13	Calentador de alta presion C5	5795.180	5096.650	698.53	1.14	87.95
14	Calentador de alta presion C6	5370.145	4822.737	547.41	1.11	89.81
15	Generador Electrico (GE)	165601.47	163945.74	1655.73	1.01	99.00
16	Bifurcacion a C6 y al recalentador (Bif1)	141847.369	141847.369	0.00	-	-
17	Bifurcacion al CVS y al eyector (Bif2)	772.737	772.737	0.00	-	-
18	Union de las corrientes del CVS y eyector (U)	839.730	839.730	0.00	-	-
19	Bifurcacion a C4 y Atemperacion (Bif3)	12440.706	12440.706	0.00	-	-
20	Bifurcacion a eyector y vapor principal (Bif4)	194081.996	194056.839	25.16	-	-

Figura B4 Hoja: AE, del archivo: SIMULACION CTE U3 OPERACIÓN

La figura B5 muestra solo parte de la Hoja: CE, esta es parte de la matriz de costos exergeticos, además contiene los valores obtenidos de cada una de las corrientes y de los equipos de los costos exergeticos.

ANALISIS COSTOS EXERGETICOS A LA UNIDAD 3																														
MATRIZ DE COSTOS EXERGETICOS																														
Pc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0.8912	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0277	1	-1	0	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	-1.37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	-26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	-42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	-35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	###	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.01646	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.04150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	-1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura B5 Hoja: CE, del archivo: SIMULACION CTE U3 OPERACIÓN

A continuación vemos los cálculos de los costos termoeconómicos tanto de corriente como de cada uno de los equipos de la Unidad 3 (ver figura B6)

ANALISIS COSTOS TERMOECONOMICOS A LA UNIDAD 3																														
MATRIZ DE COSTOS TERMOECONOMICOS																														
Pc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	0.8912	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0.0277	1	-1	0	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	-1.37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	1	-26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	1	0	-42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	1	0	0	-35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	1	0	0	0	0	0	0	###	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0.01646	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0.04150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	-1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura B6 Hoja: CTE, del archivo: SIMULACION CTE U3 OPERACIÓN