



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

## POSGRADO DE INGENIERÍA

### Balance de energía y exergía en el área de fuerza de una Refinería

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**ESPECIALISTA EN AHORRO Y USO EFICIENTE  
DE LA ENERGÍA**

P R E S E N T A:

Ing. Juana Isabel Girón Cruz

DIRECTOR DE TRABAJO:

M.I. Augusto Sánchez Cifuentes



Ciudad Universitaria, Cd. De México, 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



## Contenido

1. Objetivo general.....	4
Alcance:.....	4
2. Introducción .....	5
La energía en la industria de la Refinación .....	6
3. Descripción del caso de estudio .....	9
4. Metodología .....	11
5. Propiedades termodinámicas.....	13
6. Balance de masa.....	16
7. Balance de Energía .....	19
8. Balance de exergía .....	24
9. Análisis Exergoeconómico .....	28
10. Conclusiones.....	36
11. Anexos .....	37
Balance de exergía .....	39
12. Bibliografía.....	42



## Índice de Figuras

Figura 1.	Esquema de cogeneración basado en turbinas de vapor .....	6
Figura 2.	Capacidad de refinación y consumo neto de energía eléctrica y vapor .....	7
Figura 3.	Fuentes de suministro de Energía Eléctrica .....	8
Figura 4.	Diagrama de bloques Suministro de energía .....	9
Figura 5.	Diagrama Simplificado del área de fuerza de la Refinería .....	10
Figura 6.	Construcción de la matriz de incidencia .....	12
Figura 7.	Modelo del área de fuerza de la Refinería .....	14
Figura 8.	Diagrama del Balance de masa .....	18
Figura 9.	Balance de energía .....	21
Figura 10.	Fuerza norte de la Refinería .....	22
Figura 11.	Fuerza sur de la Refinería.....	23
Figura 12.	Balance de exergía .....	26

## Índice de Tablas

Tabla 1.	Propiedades termodinámicas de las corrientes del proceso .....	15
Tabla 2.	Flujos másicos .....	16
Tabla 3.	Flujos de energía.....	19
Tabla 4.	Exergía de los flujos .....	24
Tabla 5.	Exergía destruida .....	27
Tabla 1.	Costo exergético de corrientes .....	31
Tabla 2.	Costos exergéticos .....	32
Tabla 3.	Costos variables flujos.....	34
Tabla 4.	Costo exergoeconómico.....	35



## 1. Objetivo general

- Realizar un análisis energético de la casa de fuerza de una Refinería mediante la elaboración de balances de materia, energía y exergía, para evaluar su desempeño energético y conocer el estado operativo actual del sistema.

### **Alcance:**

- a. Elaborar el modelo energético actual del área de fuerza de una Refinería
- b. Recopilar información referente a la operación actual de los sistemas de generación de vapor y energía eléctrica del caso de estudio.
- c. Elaborar los balances de masa, energía y exergía
- d. Realizar un análisis exoergoeconómico
- e. Realizar un análisis de estado energético actual del área de fuerza de la Refinería y detectar áreas de mejora.



## 2. Introducción

Se conoce como sistema de refinación al conjunto de procesos que se aplican al petróleo crudo con la finalidad de separar sus componentes útiles y adecuar sus características a las necesidades de la sociedad, en cuanto a productos terminados.

La industria del refinado del petróleo es consumidora intensiva de energía para garantizar todos los servicios requeridos para sus operaciones por medio de las diferentes transformaciones simples o complejas, la energía se requiere tanto en forma de combustible, directamente aplicado en los numerosos hornos y calderas que la integran, como en forma de energía eléctrica, utilizada esencialmente para accionamiento de motores y en menor medida, aunque en cantidades nada despreciables en el alumbrado de las plantas (Martínez, 1998).

El incremento en el volumen de producción de petrolíferos de alta demanda, como la gasolina, eleva el uso de energía y, en consecuencia, las emisiones de CO<sub>2</sub> en las refinerías de petróleo. En México, el escenario de demanda de gasolinas para los próximos 20 años considerando una tendencia histórica en el crecimiento vehicular aumentará el consumo de este combustible en casi 55% (Granados Hernández Elías, 2015).

Los esquemas de turbinas de vapor que actualmente se encuentran instalados en las distintas refinerías del Sistema Nacional de Refinación aprovechan combustibles de baja calidad y tienen la desventaja de que su eficiencia es baja, además de que requieren de sistemas que retiren los contaminantes (óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas) de los gases de combustión de escape.

Reducir las emisiones de las refinerías a la atmósfera y mejorar su gestión de residuos, además de llevar a cabo un uso eficiente de la energía son actualmente tareas importantes para las instalaciones de procesamiento de crudo, ya que en año 2012 PEMEX actualizó su Programa Estratégico Tecnológico, en donde se establecen las estrategias de los organismos que lo componen, en el caso del Sistema de Refinación, debe llevar a cabo un uso eficiente de la energía además de llevar a cabo una integración ambiental.

PEMEX tiene un proceso de evaluación y optimización de operaciones para la mejora continua y llevar a cabo el uso eficiente de sus recursos. Entre los principales objetivos están por llevarse a cabo es la de elaborar balances consolidados de materia y energía para su análisis y buscar la factibilidad técnica económica para mejorar el suministro de los servicios principales como el vapor, energía eléctrica y agua de forma eficiente, cumpliendo con la normatividad.

### La energía en la industria de la Refinación

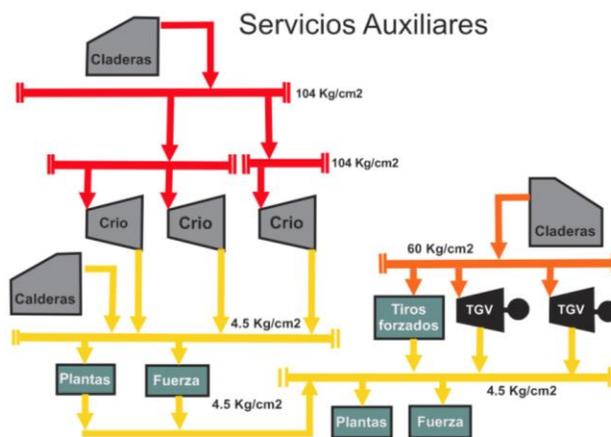
El petróleo crudo es la materia prima principal, en el año 2014 se produjeron 2,429 Mbd 4% menos respecto al año anterior, suministrado por el organismo Pemex Exploración y Producción.

Los insumos adicionales que se requieren para los distintos procesos y sistemas que componen un sistema de refinación son:

- Gas natural.
- Energía eléctrica
- Agua.
- Químicos y aditivos

En un estudio realizado en PEMEX, se determinó que el costo por energía en una refinería es de aproximadamente 39% del costo total de operación de la misma (PEMEX, 2010).

Actualmente, el Sistema Nacional de Refinación está interesado en construir plantas de cogeneración con la finalidad para satisfacer los requerimientos de vapor y energía eléctrica dentro de las refinerías, en donde a partir de calderas convencionales se vapor y el excedente de este vapor se utiliza para la generación de electricidad como se muestra en la Figura 1 que es un ejemplo del esquema de generación de vapor para el accionamiento de compresores y turbogeneradores.



**Figura 1. Esquema de cogeneración basado en turbinas de vapor**

En la Figura 2 se muestra la capacidad de producción de las seis refinerías (promedio de los años 2014 y 2015) que componen el Sistema Nacional de Refinación del país, además se hace una connotación en la cantidad de vapor y la energía que producen para abastecer su demanda.

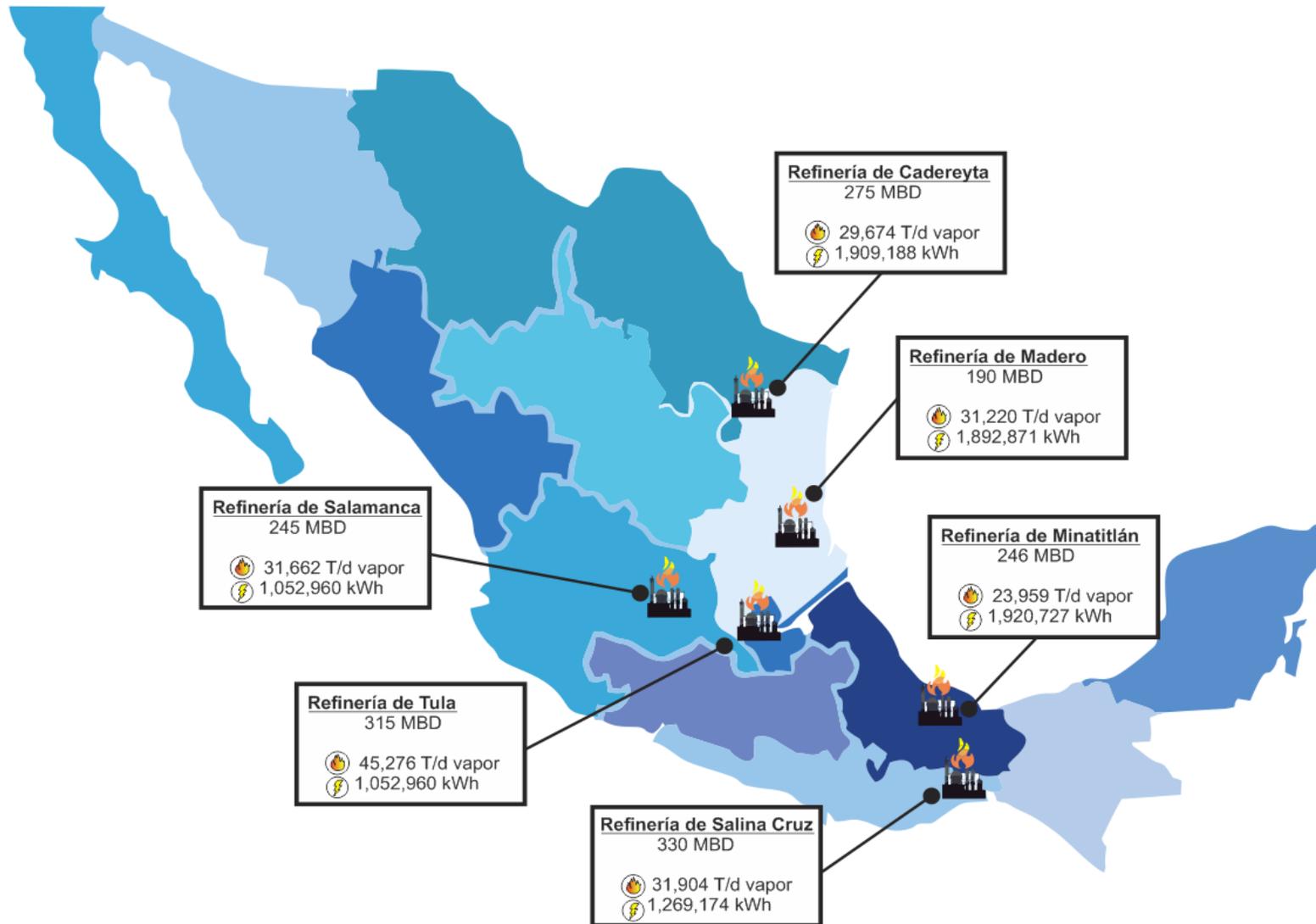
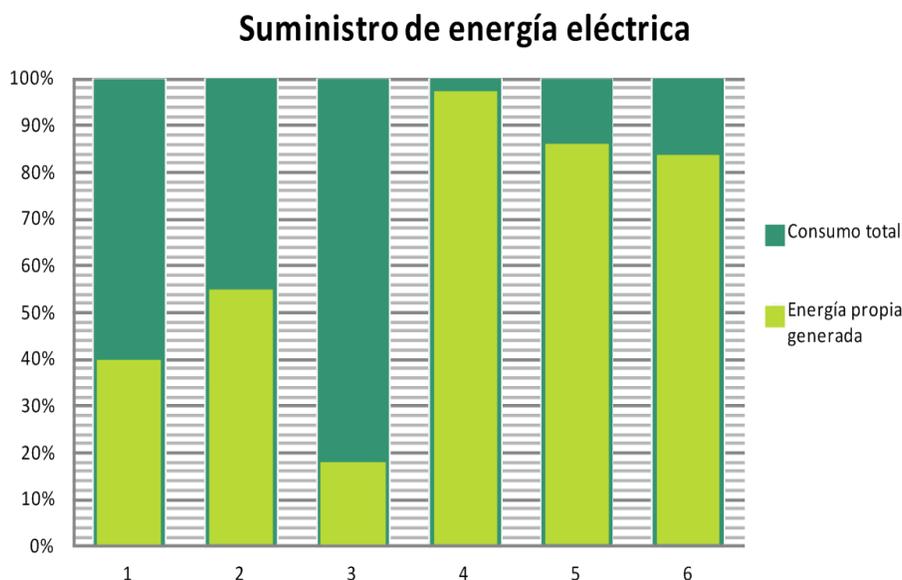


Figura 2. Capacidad de refinación y consumo neto de energía eléctrica y vapor



En la figura 2 se muestra el porcentaje de la energía eléctrica generada en las refinerías para autoabastecer el consumo requerido por los sistemas de procesamiento.

1. Refinería “Héctor R. Lara Sosa”
2. Refinería “Francisco I. Madero”
3. Refinería “Gral. Lázaro Cárdenas”
4. Refinería “Ing. Antonio M. Amor”
5. Refinería “Antonio Dovalí Jaime”
6. Refinería “Miguel Hidalgo”



Consumo de energía eléctrica. Promedio mensual (enero 2014-septiembre 2015). PEMEX

**Figura 3. Fuentes de suministro de Energía Eléctrica**

Se observa que las refinerías que cubren el mayor porcentaje de su demanda por la energía propia generada son la Refinería de Salamanca (4), de Salina Cruz (5) y Tula (6) con un 97%, 86% y 84% respectivamente como se muestra en la Figura 2.

Todas las refinerías tienen interconexión a la red eléctrica nacional para ser abastecidas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en caso de que tengan un excedente de energía eléctrica o haya una demanda que no pueda ser cubierta por la misma refinería.

La refinería del caso de estudio tiene una capacidad de generación eléctrica de 140MW, su capacidad actual es de 95MW y tiene un promedio de demanda de 64MW (PEMEX REFINACIÓN, 2008) por lo que se encuentra a un 67% de su capacidad de diseño.

### 3. Descripción del caso de estudio

La Refinería del caso de estudio es autosuficiente en la generación de energía eléctrica y vapor para el suministro a sus procesos. Este sistema de generación energía eléctrica y vapor (Figura 4) se encuentran localizados en dos áreas de la refinería que se conocen como Termoeléctrica norte y Termoeléctrica sur.

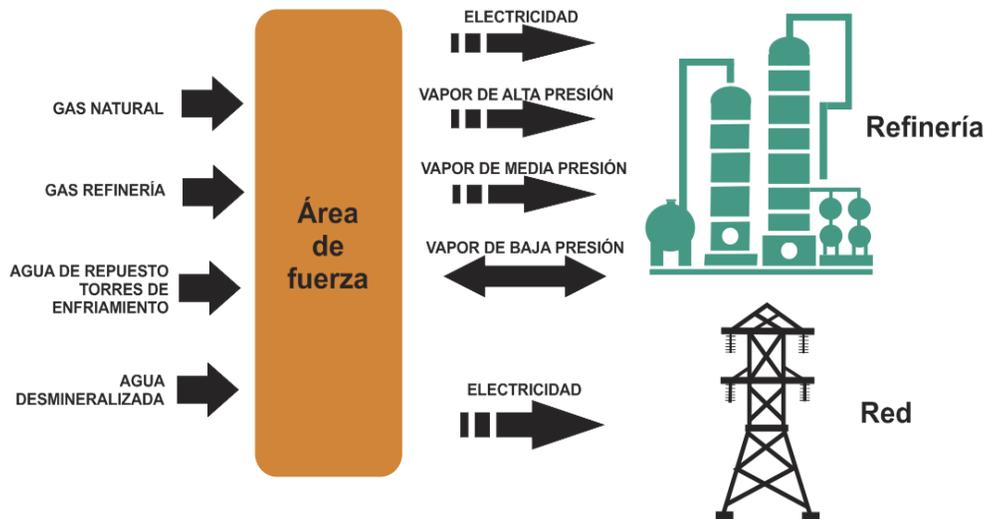


Figura 4. Diagrama de bloques Suministro de energía

La termoeléctrica norte está compuesta por cinco turbogeneradores con capacidades de generación de 18 a 32 MW y la termoeléctrica sur la conforman cuatro turbogeneradores con capacidad de generación de 3-6 MW.

La termoeléctrica norte está conformada por seis calderas que operan a 60 Kg/cm<sup>2</sup> y 482°C, estos equipos producen vapor de alta presión para los turbogeneradores de los cuáles se obtiene, en su punto de extracción vapor de media presión (19 Kg/cm<sup>2</sup> a 282°C).

Las calderas de la termoeléctrica norte son tecnologías con 30 años de operación que utilizan combustóleo y una mezcla de gas de refinería, gas combustible (33%), y gas natural (67%). Esta proporción de combustible se utiliza debido a la situación ambiental que enfrenta la zona en la que se encuentra la refinería.

En la termoeléctrica sur se tienen tres calderas que producen vapor para plantas de proceso, el vapor de media presión que producen estas calderas es de 19 kg/cm<sup>2</sup> y 282 °C, y utilizan gas combustible para su generación (Figura 5).

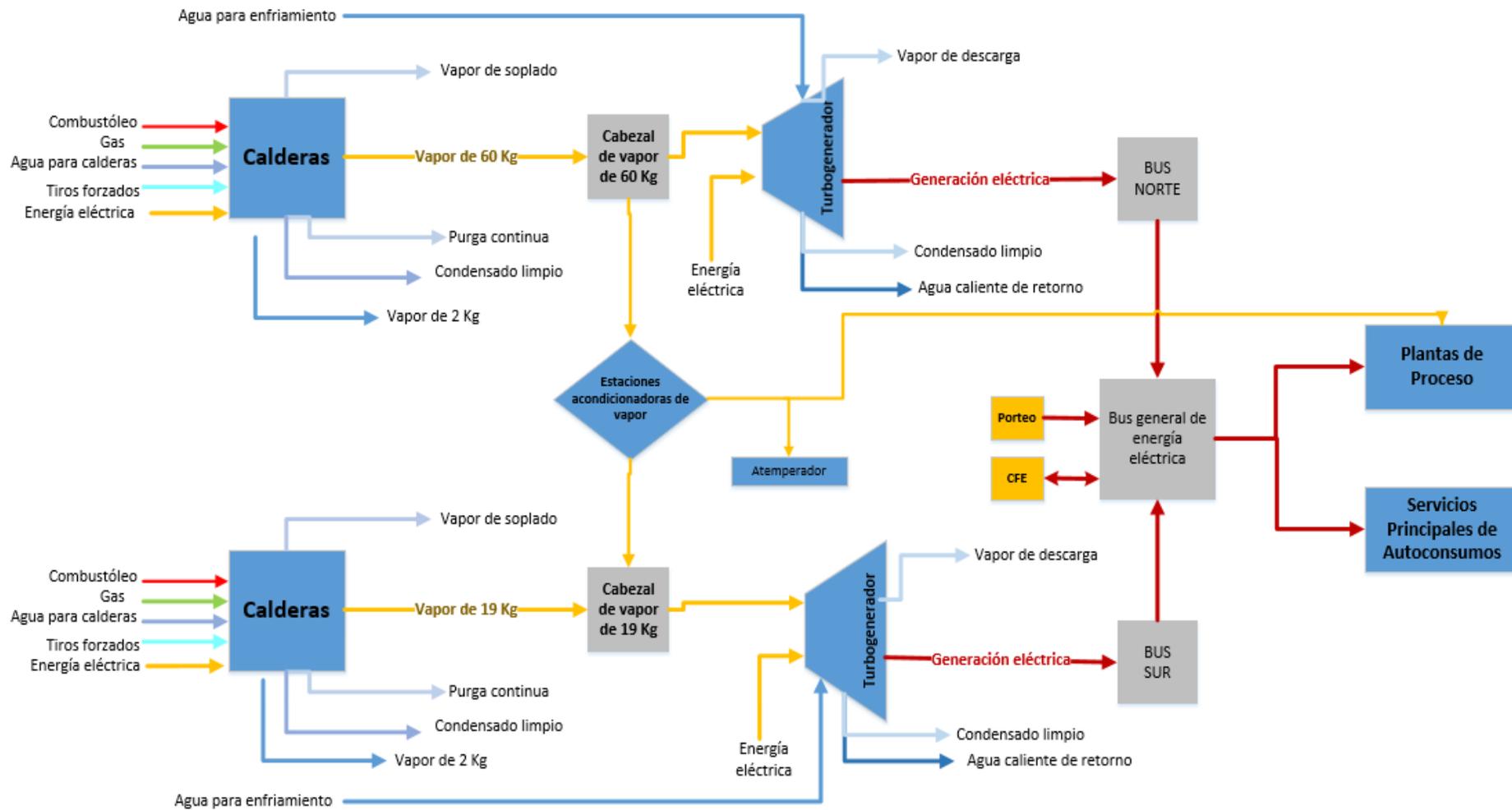
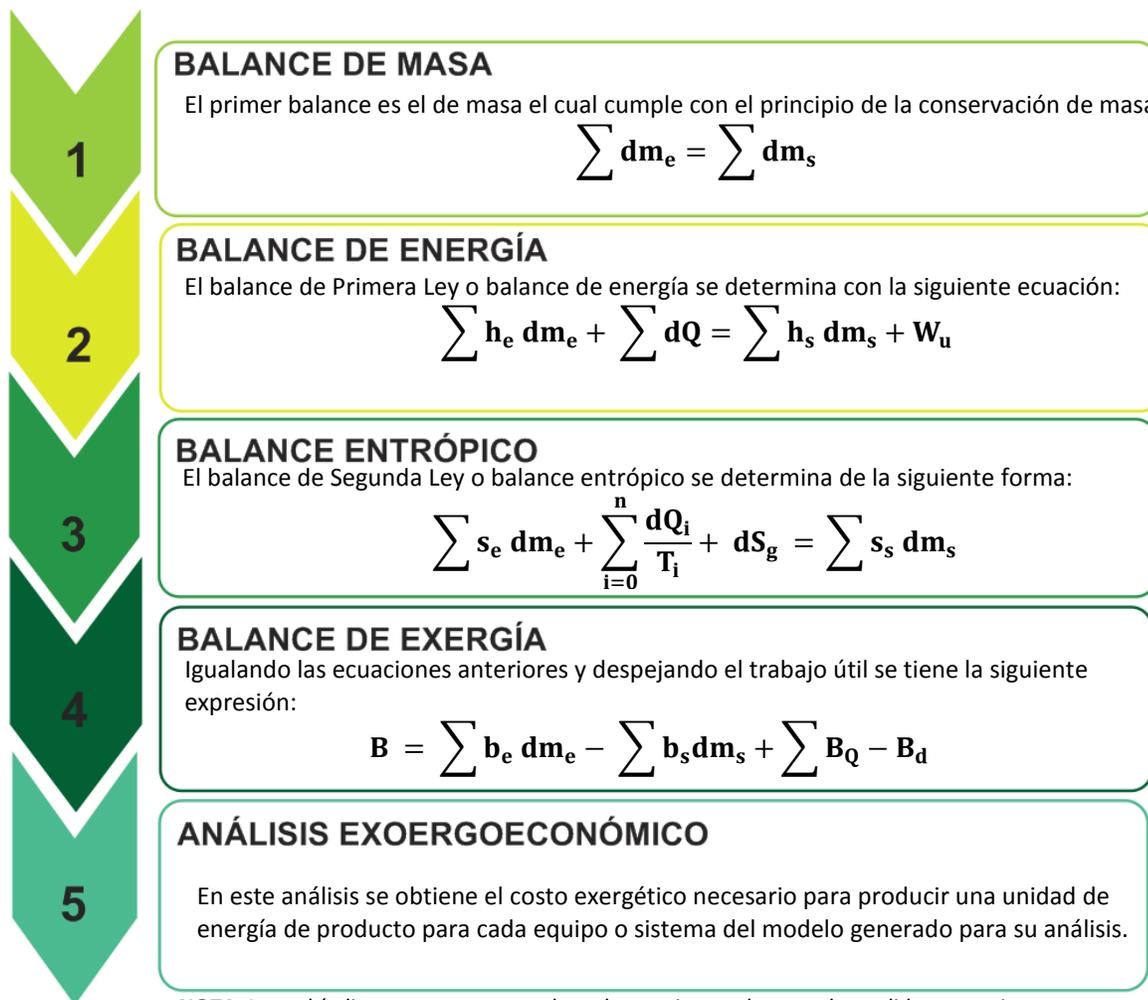


Figura 5. Diagrama Simplificado del área de fuerza de la Refinería



## 4. Metodología

En un análisis de exergía se emplean la primera ley y la segunda ley de la Termodinámica considerando las irreversibilidades de los procesos, y poder obtener las causas que originan la disminución de su rendimiento, y cuantificarlas. Este análisis es una metodología que da un panorama en el uso de la energía en una Refinería para este trabajo, generando un diagnóstico que justifique más racionalmente la toma de decisiones en la mejora de su operación actual.



**NOTA:** Los subíndices  $_e$  y  $_s$  corresponden a las corrientes de entrada y salida respectivamente.

### Símbolos

$h$ = entalpía específica de la corriente  
 $s$ = entropía específica de la corriente  
 $m$ = masa  
 $B$ = exergía

$W$ = Trabajo  
 $Q$ = Calor  
 $T$ = temperatura  
 $d$ = diferencial

Para el balance de exergía, el trabajo útil máximo sucede cuando el proceso es completamente reversible  $S_g = 0$ , por lo que en un proceso real (irreversible) se pierde capacidad de hacer trabajo a una razón de  $T_0 S_g$ . ( UNAM, 2004)



Como se observa en la Figura 7, se tiene un gran número de equipos y líneas de productos, subproductos, recursos entre otros por lo que se utilizó un análisis sistémico (Usón Sergio, 2010) en el que como primer paso se elaboró la matriz de incidencia (matriz [A]) que es la que muestra tanto entradas como salidas para los distintos equipos que conforman nuestro escenario de análisis, donde el número de columnas corresponde al número de corrientes o líneas y el número de filas está referido al número de equipos que conforman el modelo establecido para el sistema. Un ejemplo de su elaboración se muestra en la siguiente figura.

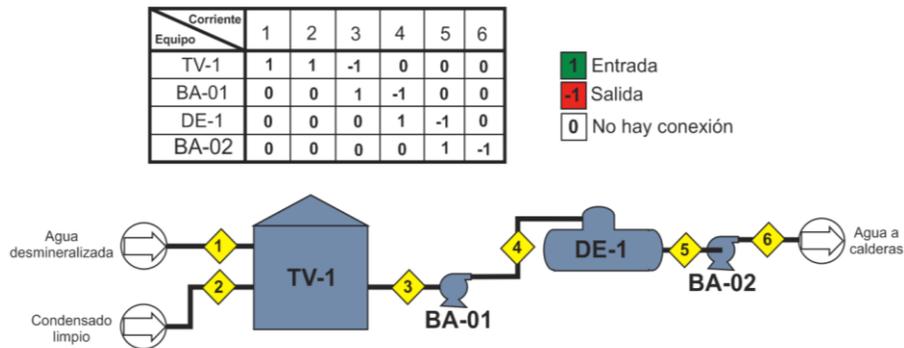


Figura 6. Construcción de la matriz de incidencia

Dónde a las corrientes entrantes a un equipo les corresponde un valor de **1**, por el contrario si es una corriente de salida le corresponde un valor de **-1**, para corrientes que no tengan conexión alguna con el equipo se pone **0**. En este ejemplo, para el caso del balance de energía considera también los flujos de energía eléctrica requeridos para que se accionen los equipos electromecánicos.

Para realizar los balances correspondientes se multiplica la matriz de incidencia por la matriz de flujo.

$$[A][\dot{m}] = [0] \dots \dots \dots \text{Balance de materia}$$

El vector resultado es cero ya que siguiendo el principio de la conservación de la materia es un balance.

$$[A][E] = [0] \dots \dots \dots \text{Balance de energía}$$

Al igual que el balance de masa, la matriz resultante de esta multiplicación debe ser cero para que exista la conservación de energía.

$$[A][\dot{B}] = [\dot{B}_d] \dots \dots \dots \text{Balance de exergía}$$

Como resultado de la multiplicación de estas dos matrices se obtiene un vector de destrucción de exergía  $B_d$  (Usón Sergio, 2010).



### 5. Propiedades termodinámicas

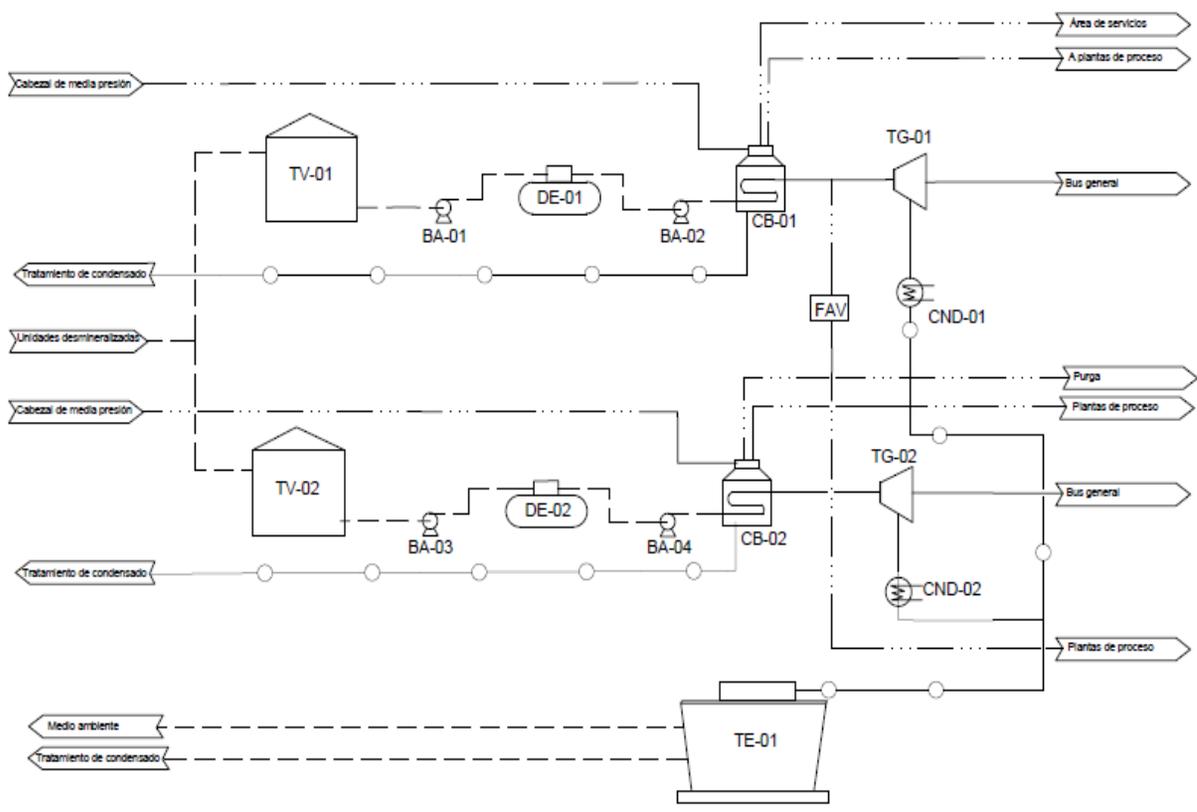
Las propiedades termodinámicas describen el estado termodinámico en un momento determinado de cualquier delimitado sistema de estudio, dichas propiedades pueden ser de dos tipos:

1. **Propiedades extensivas.** Dependen del tamaño o extensión del sistema, por ejemplo la masa y volumen.
2. **Propiedades intensivas.** Son independientes del tamaño del sistema como son temperatura, presión, densidad, entre otros.

En diferentes partes de la Refinería se cuenta con instrumentos de medición como presión y flujo principalmente, para llevar a cabo un mejor control de los procesos, cuantificar el consumo de insumos y productos en cada área y proceso de la Refinería, también se requiere esta información para llevar a cabo la conformación de bases de datos para determinar el desempeño de los equipos en estudios y proyectos que se lleven a cabo.

El alcance del estudio está específicamente delimitado por el área de fuerza de la refinería seleccionada, para el circuito de vapor de agua y generación de energía eléctrica que es fundamental para el funcionamiento de las distintas plantas que conforman la Refinería.

En la tabla 1 se presentan los valores de las propiedades consideradas en el análisis. Para este trabajo la información se obtuvo de las bitácoras de operación, manuales, hojas de especificación de equipos, e informes. Las corrientes expresadas hacen referencia al modelo presentado en la Figura 7 que está compuesto por 16 sistemas y 47 corrientes entre los cuáles son vapor de alta, media y baja presión.



EQUIPOS	
TV-01	Tanques de almacenamiento área norte
TV-02	Tanques de almacenamiento área sur
DE-01	Deaeradores área norte
DE-02	Deaeradores área sur
BA-01	Equipos electromecánicos de agua desmineralizada
BA-02	Equipos electromecánicos de agua deareada norte
BA-03	Equipos electromecánicos de agua desmineralizada
BA-04	Equipos electromecánicos de agua deareada norte
CB-01	Calderas de alta presión
CB-02	Calderas de baja presión
TG-01	Turbogeneradores de alta presión
TG-02	Turbogeneradores de baja presión
CND-01	Condensadores de calderas de alta presión
CND-02	Condensadores de calderas de baja presión
FAV	Válvulas reductoras de presión
TE-01	Torres de enfriamiento

..... Vapor  
 - - - - - Agua  
 —○— Condensado

Figura 7. Modelo del área de fuerza de la Refinería



**Tabla 1. Propiedades termodinámicas de las corrientes del proceso**

NO.	Flujo	T	P	v	u	h	s	x
		°C	kPa	m <sup>3</sup> /kg	KJ	KJ/Kg	KJ/Kg°C	
1	Agua tratada	25.5	10	0.00	106.96	106.97	0.37	0
2	Agua limpia	25.5	10	0.00	106.96	106.97	0.37	0
3	Agua limpia	28	3.77	0.00	117.41	117.41	0.41	0
4	Agua a deareador	28.65	3.919195	0.00	120.13	120.13	0.42	0
5	Agua deareada	118.6	1948	0.00	496.93	498.99	1.51	0
6	Agua deareada	118.6	6200	0.00	495.46	502.01	1.51	0
7	Vapor de alta presión	482	5883.99	0.06	3049.90	3380.57	6.83	1
8	Vapor de media presión	270	1940	0.12	2719.50	2954.50	6.66	1
9	Vapor de soplado	350	1863.26	0.15	2861.97	3139.86	6.99	1
10	Vapor de purga	350	1863.26	0.15	2861.97	3139.86	6.99	1
11	Vapor de alta presión	482	5883.99	0.06	3049.90	3380.57	6.83	1
12	Vapor de alta presión	482	5883.99	0.06	3049.90	3380.57	6.83	1
13	Vapor de media presión	338	19.48	0.14	2840.00	3111.30	6.93	1
15	Condensado	140	196.13	0.95	2561.40	2748.50	7.24	0
16	Condensado	45	196.13	0.00	188.39	188.59	0.64	0
17	Condensado a enfriamiento	45	196.13	0.00	188.39	188.59	0.64	0
18	Agua fría	32	84.26	0.00	134.12	134.20	0.46	0
19	Agua limpia	25.5	10	0.00	106.96	106.97	0.37	1
20	Agua limpia	28	3.77	0.00	117.41	117.41	0.41	0
21	Agua a deareador	28.65	3.91	0.00	120.13	120.13	0.42	0
22	Agua deareada	118.6	1948	0.00	496.93	498.99	1.51	0
23	Agua a caldera	118.6	2100	0.00	496.87	499.10	1.51	0
24	Vapor de media presión	270	1940	0.12	2719.50	2954.50	6.66	1
25	Vapor de media presión	270	1940	0.12	2719.50	2954.50	6.66	1
26	Purga continua	338	19.48	0.14	2840.00	3111.30	6.93	1
27	Vapor de baja presión	70	980.66	0.00	292.74	293.74	0.95	0
28	Condensado	70	980.66	0.00	292.74	293.74	0.95	0
29	Vapor de media presión	270	1940	0.12	2719.50	2954.50	6.66	1
30	Energía eléctrica							
31	Condensado	73.4	196.13	0.00	307.14	307.34	1.00	0
32	Condensado	45	196.13	0.00	188.39	188.59	0.64	0
33	Vapor de baja presión	70	980.665	0.00	292.74	293.74	0.95	0

Nota: Las propiedades como volumen, entalpía, entropía y composición de obtuvieron de la herramienta de Excel TPSX.



## 6. Balance de masa

El balance de materia se realizó con un promedio de valores de flujos correspondientes al año 2014 ya que en este período se presentó un alto porcentaje de carga de los equipos (los valores se muestran en la Tabla 2)

**Tabla 2. Flujos másicos**

No.	Flujo	Flujo másico (kg/h)
1	Agua tratada	940.55
2	Agua limpia	753.92
3	Agua limpia	753.92
4	Agua a deareador	753.92
5	Agua deareada	753.92
6	Agua deareada	753.92
7	Vapor de alta presión	746.45
8	Vapor de media presión	71.03
9	Vapor de soplado	2.08
10	Vapor de alta presión	56.42
11	Vapor de alta presión	630.56
12	Vapor de alta presión	115.90
13	Vapor de media presión	115.90
15	Energía eléctrica	0.00
16	Condensado	630.56
17	Condensado	630.56
18	Condensado a enfriamiento	660.01
19	Agua fría	636.91
20	Agua limpia	186.63
21	Agua limpia	186.63
22	Agua a deareador	186.63
23	Agua deareada	186.63
24	Agua a caldera	186.63
25	Vapor de media presión	184.78
26	Vapor de media presión	27.63
27	Purga continua	1.85
28	Vapor de baja presión	10.83
29	Condensado	16.80
31	Vapor de media presión	29.45
32	Energía eléctrica	0.00
33	Condensado	29.45



No.	Flujo	Flujo másico (kg/h)
34	Condensado	29.45
35	Condensado	20.00
36	Energía eléctrica	0.00
37	Energía eléctrica	0.00
38	Energía térmica	0.00
39	Energía térmica	0.00
40	Energía de FAV	0.00
41	Energía salida COND-01	0.00
42	Energía eléctrica	0.00
43	Energía térmica	0.00
44	Energía eléctrica	0.00
45	Energía térmica a	0.00
46	Energía salida COND-02	0.00
47	Energía perdida en TE	0.00

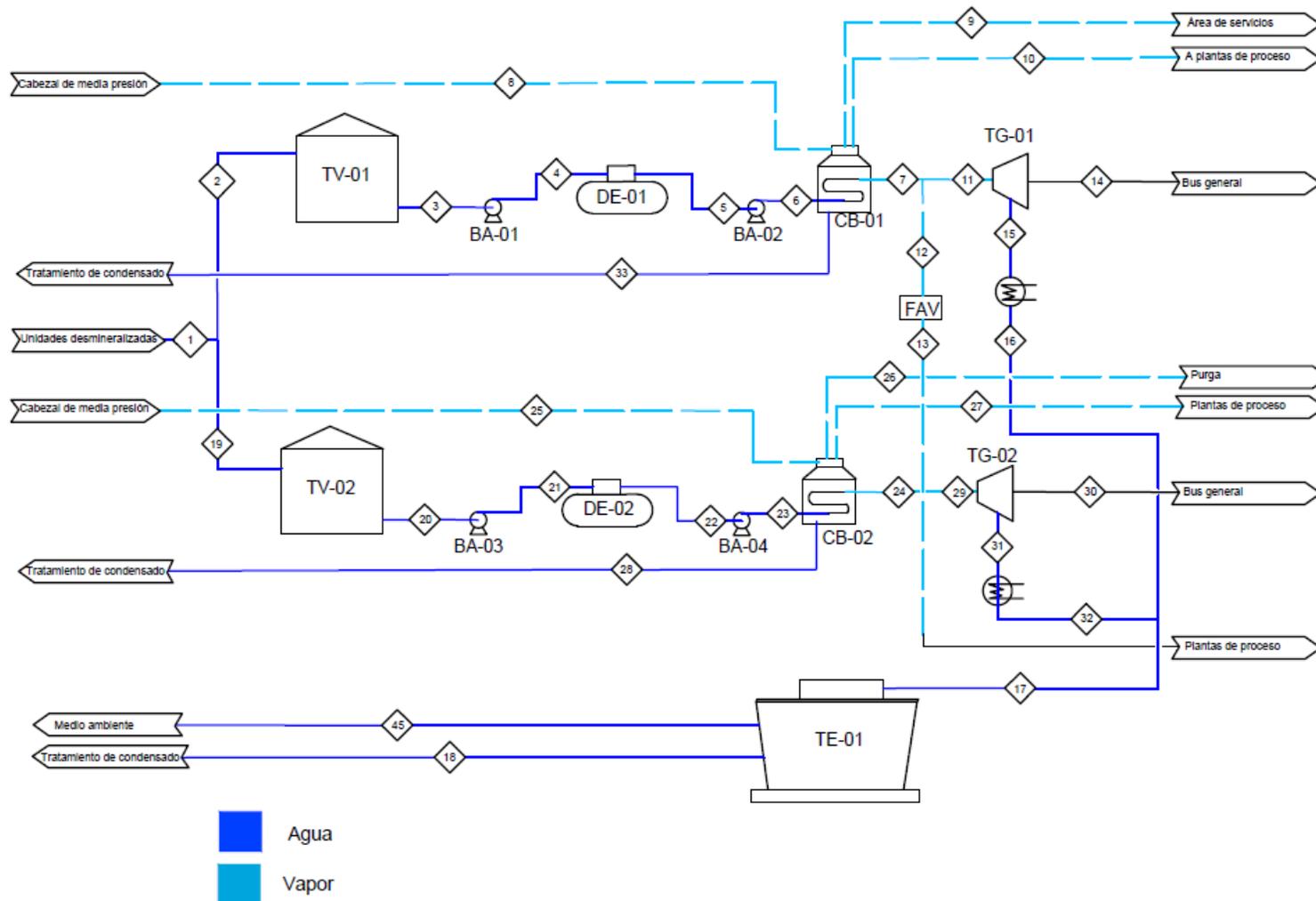


Figura 8. Diagrama del Balance de masa



## 7. Balance de Energía

Tabla 3. Flujos de energía

NO.	Flujo	KJ/h
1	Agua tratada	110,431.56
2	Agua limpia	88,518.92
3	Agua limpia	88,518.92
4	Agua a deareador	90,567.40
5	Agua deareada	376,196.31
6	Agua deareada	378,473.14
7	Vapor de alta presión	2,523,444.72
8	Vapor de media presión	209,872.75
9	Vapor de soplado	6,541.37
10	Vapor de purga	177,140.20
11	Vapor de alta presión	2,131,652.44
12	Vapor de alta presión	391,792.28
13	Vapor de media presión	360,584.62
14	Energía eléctrica	398,560.64
15	Condensado	1,733,091.80
16	Condensado	118,917.15
17	Condensado a enfriamiento	124,471.17
18	Agua fría	85,473.20
19	Agua limpia	21,912.64
20	Agua limpia	21,912.64
21	Agua a deareador	22,419.73
22	Agua deareada	93,126.45
23	Agua a caldera	93,146.98
24	Vapor de media presión	545,935.21
25	Vapor de media presión	81,645.86
26	Purga continua	5,754.23
27	Vapor de baja presión	3,182.17
28	Condensado	4,934.73
29	Vapor de media presión	87,010.82
30	Energía eléctrica	77,959.57
31	Condensado	9,051.25
32	Condensado	5,554.03
33	Vapor de baja presión	5,874.77
34	Energía eléctrica	2,048.00
35	Energía eléctrica	2,277.00
36	Energía térmica	285,628.92
37	Energía térmica	2,124,655.17



NO.	Flujo	KJ/h
38	Energía de FAV	752,376.90
39	Energía salida COND-01	1,614,174.65
40	Energía eléctrica	507.00
41	Energía térmica	70,706.72
42	Energía eléctrica	21.00
43	Energía térmica a	385,013.50
44	Energía salida COND-02	3,497.00
45	Energía perdida en TE	36,207.00
46	Agua evaporada	2,791.21
47	Vapor de media presión	801,255.28

Siguiendo la metodología descrita en el capítulo cuatro, se multiplicó la matriz de incidencia y la matriz de flujo de energía que son 47 (Tabla 3), que dio como resultado la matriz [0] que indica que todas las corrientes de energía que entran salen en el caso de estudio, no hay acumulación, ni destrucción de flujos energéticos, el siguiente paso es llevar a cabo el cálculo de exergía.

En la Figura 9 se muestran todos los flujos de energía que hay en el área de fuerza de la refinería identificándose las corrientes de vapor, energía eléctrica, combustible, entre otros.

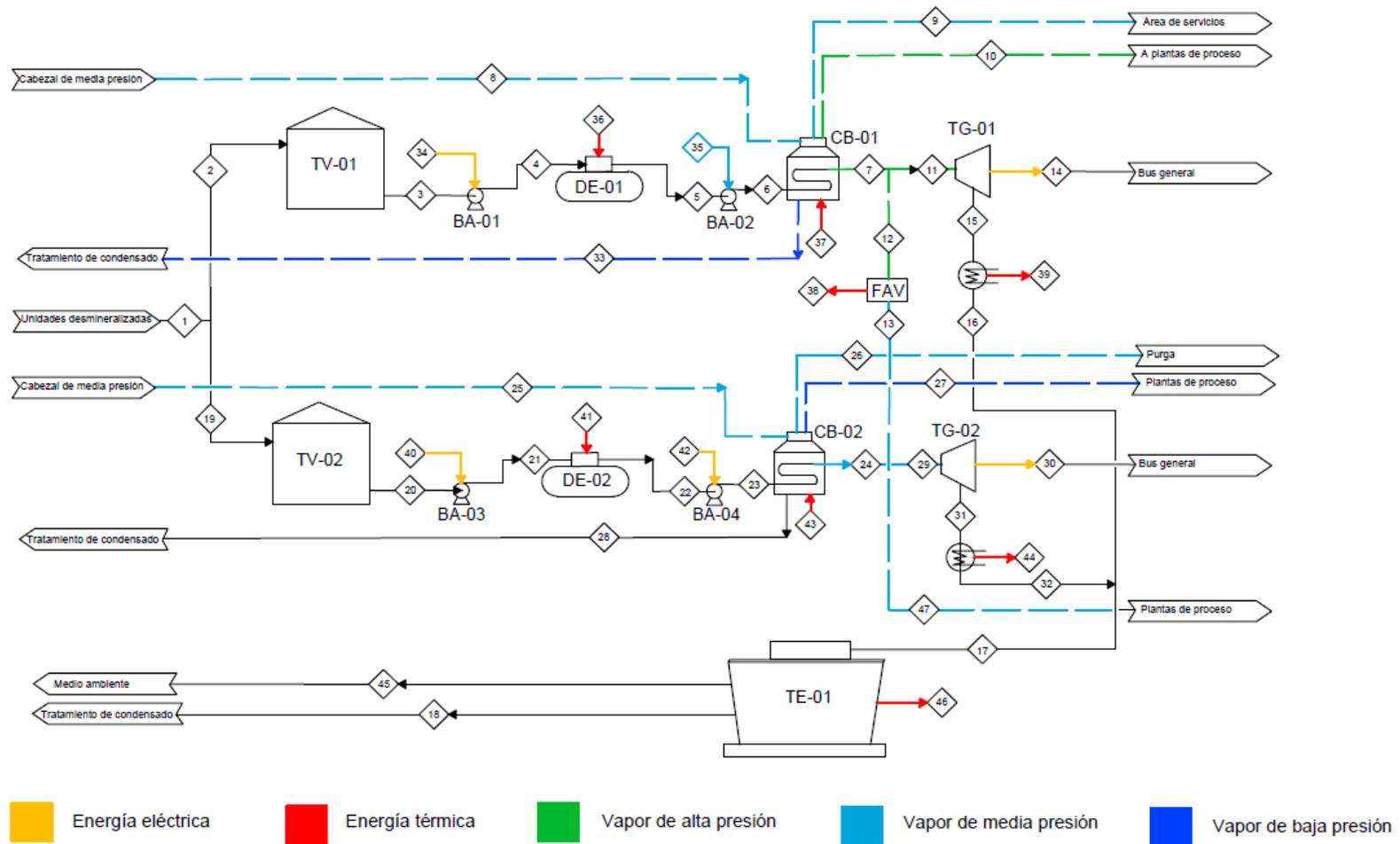


Figura 9. Balance de energía

Al realizar el balance de energía se muestran las distintas salidas y entradas del sistema

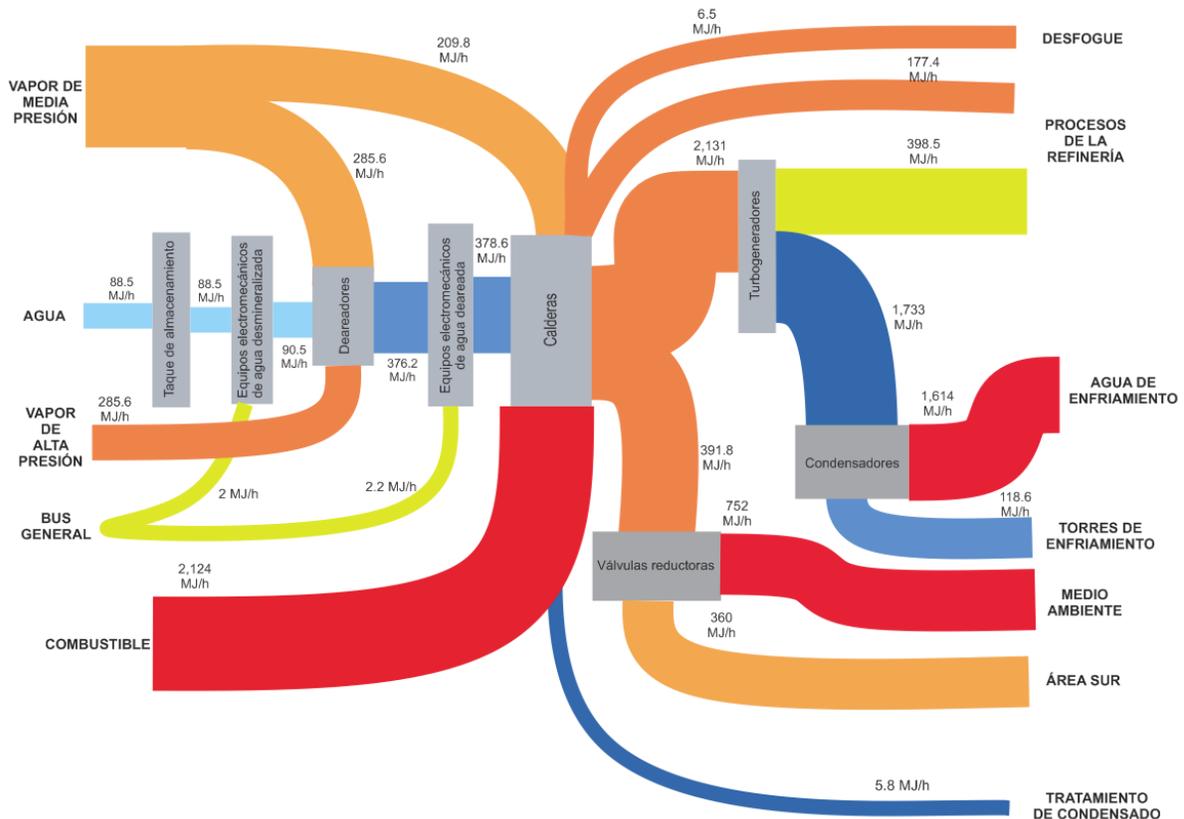


Figura 10. Fuerza norte de la Refinería

En el área de fuerza norte de la refinería se encuentran las calderas de alta presión que son alimentadas de una mezcla de combustóleo y una mezcla de combustible generado en la refinería y gas natural. Para la generación de vapor de alta presión, el 7% del flujo de vapor se destina para uso en la Refinería en los procesos de calentamiento.

El autoabastecimiento de energía representa el 17% de la energía total suministrada al sistema, mientras que el resto, principalmente es suministrado por el combustible para las calderas; de la energía total de salida, sólo el 17% va directo a las plantas de proceso en forma de vapor y energía eléctrica, 10% se manda a los turbogeneradores del área norte, el 20% se va en pérdidas y el resto se manda al área de fuerza sur de la refinería, a la línea de entrada de vapor de los turbogeneradores de media presión.



El área sur del caso de estudio presenta un menor consumo de combustibles, vapor y energía eléctrica y se ve reflejado en los influentes de exergía y por lo tanto en los productos.

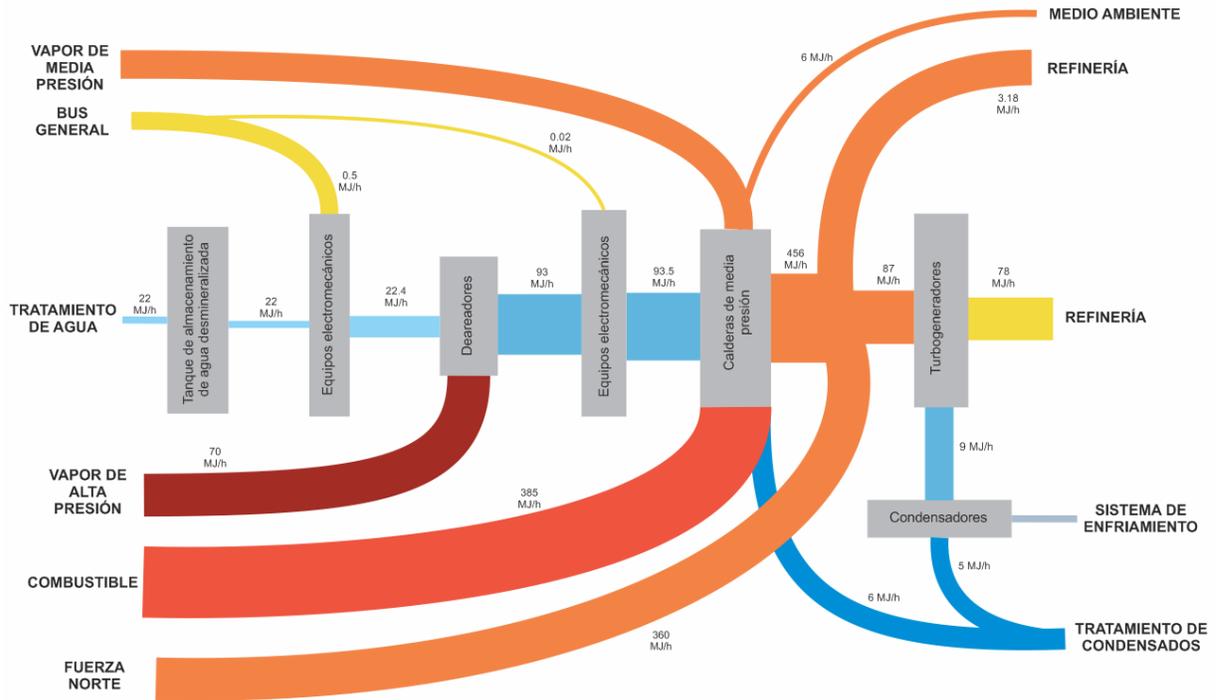


Figura 11. Fuerza sur de la Refinería

En el área sur del sistema de generación de vapor y electricidad se obtuvo que la mayor parte del flujo de energía se va en el vapor de media presión que va a los distintos servicios y procesos de la Refinería, el 1.5% de la energía de salida se pierde como consecuencia de las fugas, venteos no programados y derivado de mal estado de los equipos o malas prácticas operativas.

Para identificar de forma más puntual dónde se llevan a cabo estas pérdidas se puede realizar el balance de energía por equipo, recabando información detallada.



## 8. Balance de exergía

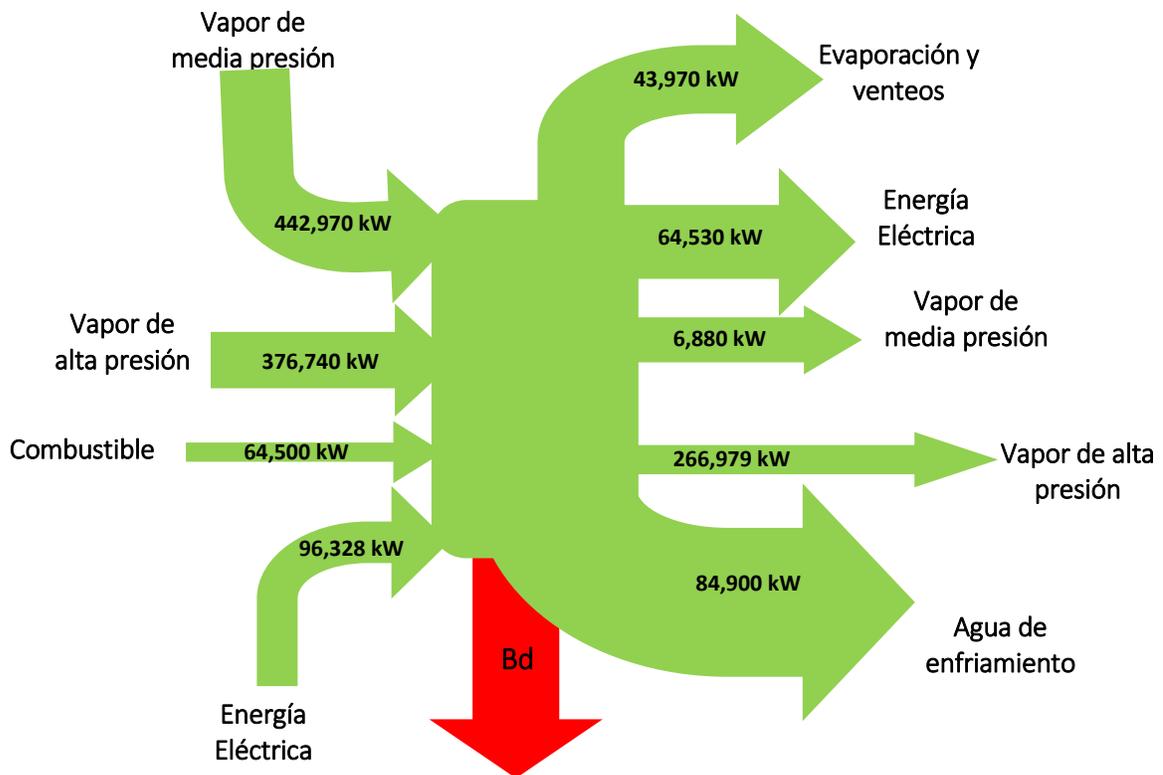
Tabla 4. Exergía de los flujos

NO.	Flujo	B (kJ)
1	Agua tratada	3,850
2	Agua limpia	3,086
3	Agua limpia	18,802
4	Agua a deareador	22,876
5	Agua deareada	552,543
6	Agua deareada	550,603
7	Vapor de alta presión	3,637,549
8	Vapor de media presión	318,910
9	Vapor de soplado	9,859
10	Vapor de purga	266,979
11	Vapor de alta presión	3,072,780
12	Vapor de alta presión	564,769
13	Vapor de media presión	543,618
14	Energía eléctrica	60,296
15	Condensado	256,936
16	Condensado	103,589
17	Condensado a enfriamiento	108,427
18	Agua fría	36,988
19	Agua limpia	764
20	Agua limpia	4,654
21	Agua a deareador	5,663
22	Agua deareada	136,781
23	Agua a caldera	136,764
24	Vapor de media presión	829,570
25	Vapor de media presión	124,064
26	Purga continua	8,675
27	Vapor de baja presión	3,930
28	Condensado	6,094
29	Vapor de media presión	132,216
30	Energía eléctrica	4,207
31	Condensado	11,474
32	Condensado	4,838
33	Vapor de baja presión	7,255
34	Energía eléctrica	2,048



NO.	Flujo	B (kJ)
35	Energía eléctrica	1,108
36	Energía térmica	284,079
37	Energía térmica	1,546
38	Energía de FAV	24,327
39	Energía salida COND-01	-
40	Energía eléctrica	507
41	Energía térmica	92,664
42	Energía eléctrica	11
43	Energía térmica a	1,003
44	Energía salida COND-02	-
45	Energía perdida en TE	34,565
46	Agua evaporada	730
47	Vapor de media presión	1,217,422

El balance general de exergía se muestra en la siguiente figura donde la diferencia de la exergía de entrada menos la exergía de salida da el valor de la irreversibilidad del sistema.



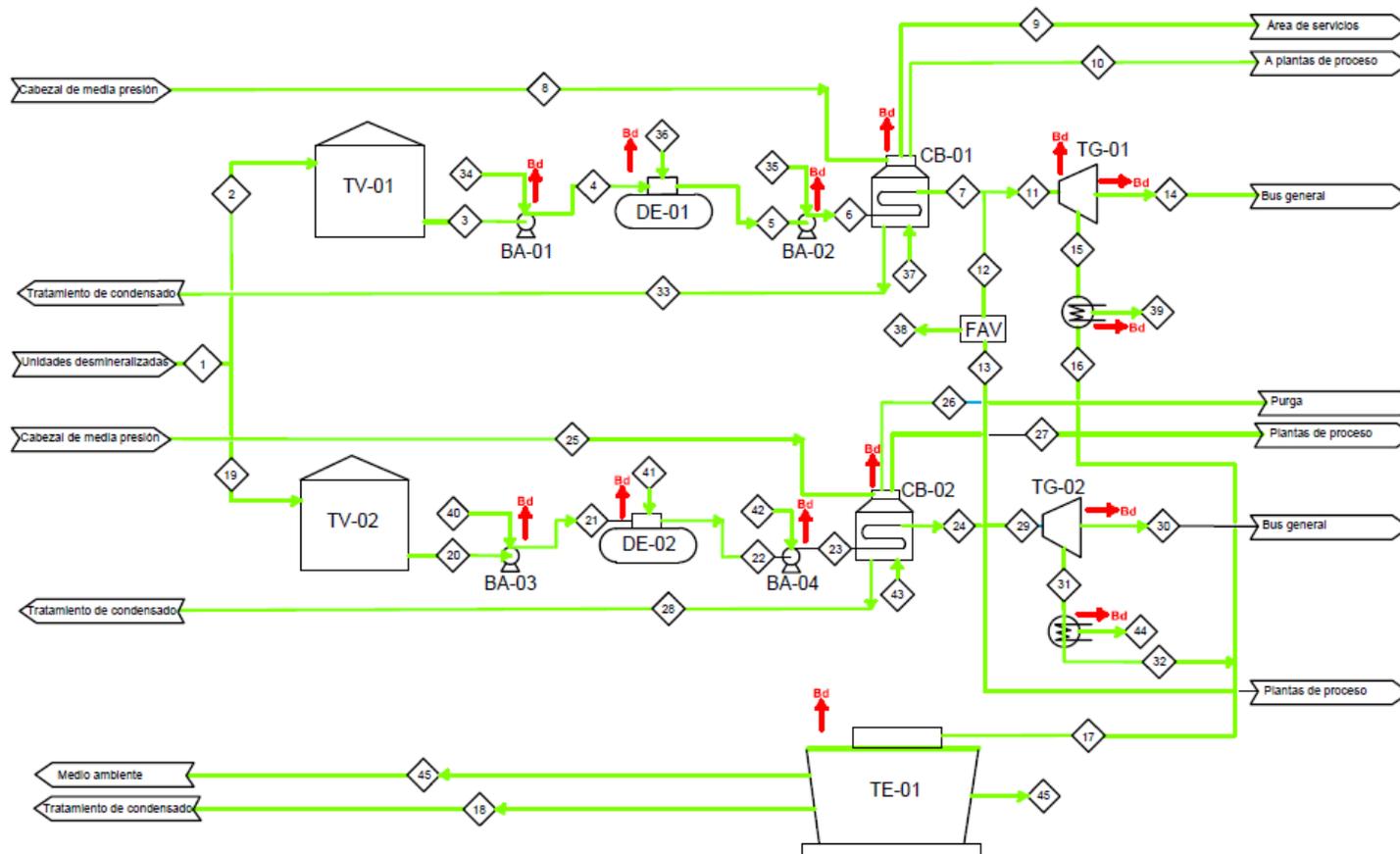


Figura 12. Balance de exergía



Para cada equipo del área de fuerza de la Refinería se determinó la cantidad de exergía destruída

**Tabla 5. Exergía destruída**

TAG	Equipo	Bd	%
TV-01	Tanque de agua desmineralizada norte	2,812	0.04%
BA-01	Equipo electromecánico	2,026	0.03%
DE-01	Deareador norte	245,588	3.74%
BA-02	Equipo electromecánico	3,048	0.05%
CB-01	Caldera de alta presión	3,050,584	46.51%
TG-01	Turbogenerador de alta presión	2,755,548	42.01%
CND-01	Condensador	153,347	2.34%
FAV	Válvulas reductoras de presión	21,151	0.32%
TV-02	Tanque de agua desmineralizada SUR	3,890	0.06%
BA-03	Equipo electromecánico	501	0.01%
DE-02	Deareador sur	1,009	0.02%
BA-04	Equipo electromecánico	6	0.00%
CB-02	Caldera de media presión	116,535	1.78%
TG-02	Turbogenerador de media presión	124,949	1.90%
CND-02	Condensador	6,636	0.10%
TE	Torres de enfriamiento	71,440	1.09%

La mayor pérdida de exergía se presenta en las calderas de alta presión y los turbogeneradores de alta presión que juntos representan el 88% de la exergía destruída de todo el sistema de generación de vapor y electricidad.

La exergía se denomina como la capacidad de obtención de trabajo útil a partir de cierta cantidad de energía o flujo energético, es una medida de la calidad de la energía. Las pérdidas de exergía se dividen en dos de acuerdo a su distribución en un sistema:

### Pérdidas internas

- Son debidas a las irreversibilidades de procesos que toman lugar dentro de un sistema. Las pérdidas debido a expansiones, pérdidas de presión, fricción en máquinas, calor y transferencia de masa a temperaturas finales y diferencia de concentraciones son algunos ejemplos.

### Pérdidas externas

- Están relacionadas a las condiciones relativas del sistema y del ambiente. Por ejemplo, pertenecen a este grupo las pérdidas debido a un aislamiento no ideal, y los flujos de exergía no utilizada que se deja en la planta.



Las pérdidas internas se deben principalmente a imperfecciones en los equipos y máquinas y a la manera en que son integradas en el sistema. Las pérdidas externas se deben a incompatibilidad entre los procesos como un todo y las condiciones externas a él, así como la incompatibilidad de las tecnologías individuales componentes del sistema (Brodyansky, B.M; Sorin M.V, 1994).

## 9. Análisis Exergoeconómico

Para el análisis exergoeconómico del área de fuerza de la refinería se siguió un análisis sistémico, tomando la matriz de incidencia que se hizo para los balances de materia y energía, se obtuvieron las matrices de recursos y productos con la finalidad de obtener el costo exergético y el costo para cada equipo (M. A. Lozano, 1993).

### Matriz de recursos

RECURSOS		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	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42										
Equipos		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	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42										
1 TV-01	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						
2 BA-01	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					
3 DE-01	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				
4 BA-02	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			
5 CB-01	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			
6 TG-01	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			
7 FAV	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		
8 CND-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		
9 TE	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		
10 TV-02	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	
11 BA-03	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	
12 DE-02	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	
13 BA-04	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	
14 CB-02	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	
15 TG-02	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	
16 CND-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

### Matriz de productos

PRODUCTOS		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	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42											
Equipos		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	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42											
1 TV-01	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			
2 BA-01	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		
3 DE-01	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		
4 BA-02	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		
5 CB-01	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		
6 TG-01	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		
7 FAV	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	
8 CND-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		
9 TE	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	
10 TV-02	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	
11 BA-03	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	
12 DE-02	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	
13 BA-04	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	
14 CB-02	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	
15 TG-02	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	
16 CND-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



Para calcular los costos con la ecuación anterior se necesitan m-n ecuaciones adicionales para resolver el problema, de otra forma se establece de la siguiente forma:

$\alpha = \text{Número de flujos} - \text{Número de equipos} = 47 - 16 = 31$  ecuaciones faltantes.

La matriz  $\alpha$  se define identificando los productos y recursos para cada equipo y tomando en cuenta ciertas consideraciones como son:

- Múltiples productos de un mismo equipo tienen el mismo costo unitario
- El costo exergético de los flujos de entrada al sistema es conocido
- Si un equipo está constituido por un flujo de entrada y un flujo de salida, el costo exergético unitario del flujo de salida tiene el mismo costo exergético de salida
- Los residuos y pérdidas tienen un costo exergético igual a cero.

Para el caso de estudio se hicieron las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_1 = \frac{B^*_2}{B_2} = \frac{B^*_3}{B_3}$$

$$\alpha_2 = \frac{B^*_2}{B_2} = \frac{B^*_9}{B_9}$$

$$\alpha_3 = \frac{B^*_3}{B_3} = \frac{B^*_4}{B_4}$$

$$\alpha_4 = \frac{B^*_4}{B_4} = \frac{B^*_5}{B_5}$$

$$\alpha_5 = \frac{B^*_7}{B_7} = \frac{B^*_{10}}{B_{10}}$$

$$\alpha_6 = \frac{B^*_7}{B_7} = \frac{B^*_{11}}{B_{11}}$$

$$\alpha_7 = \frac{B^*_7}{B_7} = \frac{B^*_{12}}{B_{12}}$$

$$\alpha_8 = \frac{B^*_8}{B_8} = \frac{B^*_{25}}{B_{25}}$$

$$\alpha_9 = \frac{B^*_{11}}{B_{11}} = \frac{B^*_{15}}{B_{15}}$$

$$\alpha_{10} = B_{13} = B^*_{13}$$

$$\alpha_{11} = B_{14} = B^*_{14}$$

$$\alpha_{12} = \frac{B^*_{16}}{B_{16}} = \frac{B^*_{17}}{B_{17}}$$

$$\alpha_{13} = \frac{B^*_{16}}{B_{16}} = \frac{B^*_{32}}{B_{32}}$$

$$\alpha_{14} = \frac{B^*_{19}}{B_{19}} = \frac{B^*_{20}}{B_{20}}$$

$$\alpha_{15} = \frac{B^*_{20}}{B_{20}} = \frac{B^*_{21}}{B_{21}}$$

$$\alpha_{16} = \frac{B^*_{21}}{B_{21}} = \frac{B^*_{22}}{B_{22}}$$

$$\alpha_{17} = \frac{B^*_{24}}{B_{24}} = \frac{B^*_{29}}{B_{29}}$$

$$\alpha_{18} = \frac{B^*_{24}}{B_{24}} = \frac{B^*_{47}}{B_{47}}$$

$$\alpha_{19} = \frac{B^*_{29}}{B_{29}} = \frac{B^*_{31}}{B_{31}}$$

$$\alpha_{20} = B_{34} = B^*_{34}$$

$$\alpha_{21} = B_{35} = B^*_{35}$$

$$\alpha_{22} = \frac{B^*_{36}}{B_{36}} = \frac{B^*_{41}}{B_{41}}$$

$$\alpha_{23} = B_{37} = B^*_{37}$$

$$\alpha_{24} = B_{40} = B^*_{40}$$

$$\alpha_{25} = B_{42} = B^*_{42}$$

$$\alpha_{26} = B_{43} = B^*_{43}$$

$$\alpha_{27} = B_{39} = 0$$

$$\alpha_{28} = B_{44} = 0$$

$$\alpha_{29} = B_{38} = 0$$

$$\alpha_{30} = B_{45} = 0$$

$$\alpha_{31} = B_{44} = B^*_{40}$$





**Tabla 1. Costo exerético de corrientes**

Corriente	Flujo	B*	k
1	Agua tratada	3875	1.02
2	Agua limpia	3166	1.03
3	Agua limpia	19290	1.03
4	Agua a deareador	23026	1.01
5	Agua deareada	837341	1.52
6	Agua deareada	692100	1.26
7	Vapor de alta presión	10877140	2.99
8	Vapor de media presión	739543	2.32
9	Vapor de soplado	29480	2.99
10	Vapor de purga	798331	2.99
11	Vapor de alta presión	9188345	2.99
12	Vapor de alta presión	1688794	2.99
13	Vapor de media presión	1226432	2.26
14	Energía eléctrica	60296	1.00
15	Condensado	11201854	43.60
16	Condensado	5841934	56.40
17	Condensado a enfriamiento	5472983	50.48
18	Agua fría	57639	1.56
19	Agua limpia	1158	1.52
20	Agua limpia	7053	1.52
21	Agua a deareador	8220	1.45
22	Agua deareada	198556	1.45
23	Agua a caldera	554807	4.06
24	Vapor de media presión	1871557	2.26
25	Vapor de media presión	287701	2.32
26	Purga continua	19571	2.26
27	Vapor de baja presión	8866	2.26
28	Condensado	307623	50.48
29	Vapor de media presión	284334	46.65
30	Energía eléctrica	4207	1.00
31	Condensado	46548	4.06
32	Condensado	12859	2.66
33	Vapor de baja presión	9120	1.26
34	Energía eléctrica	2048	1.00
35	Energía eléctrica	1108	1.00
36	Energía térmica	284079	1.00



Corriente	Flujo	B*	k
37	Energía térmica	1546	1.00
38	Energía de FAV	24486	1.01
39	Energía salida COND-01	3215	1.23
40	Energía eléctrica	507	1.00
41	Energía térmica	92664	1.00
42	Energía eléctrica	11	1.00
43	Energía térmica a	1003	1.00
44	Energía salida COND-02	4652	1.25
45	Energía perdida en TE	34,565	1.65
46	Agua evaporada	2056	2.82
47	Vapor de media presión	2746574	2.26

**Tabla 2. Costos exergeticos**

Equipo	BF	BP	Irreversibilidad	K	$\eta$
TV-01	3085.8	18801.8	15716.1	0.16	16%
BA-01	2025.8	2048.4	22.6	0.99	99%
DE-01	529667.0	284078.8	245588.2	1.86	54%
BA-02	1939.9	1108.3	831.7	1.75	57%
CB-01	827426.4	3595477.5	2768051.1	4.35	23%
TG-01	2815844.0	60295.5	2755548.5	46.70	28%
FAV	564769.2	543617.7	21151.4	1.04	96%
CND-01	256936.2	103589.2	153347.1	2.48	40%
TE	108427.3	35567.6	72859.7	3.05	33%
TV-02	763.9	4654.3	3890.5	6.09	16%
BA-03	1008.5	507.1	501.5	1.99	50%
DE-02	131117.7	92663.9	38453.8	1.41	71%
BA-04	16.8	11.2	5.6	1.50	67%
CB-02	130680.6	680201.1	549520.5	0.19	19%
TG-02	120742.0	4207.2	116534.7	28.70	32%
CND-02	11474.4	4838.1	6636.3	2.37	42%

La irreversibilidad es la pérdida de la calidad de energía los equipos donde se lleva a cabo la mayor irreversibilidad son en las torres de enfriamiento, en los procesos de la Refinería, y en las calderas de alta presión.

Para el análisis exergoeconómico se siguió la siguiente metodología (A. Valreo):

$$\prod_F + Z = \prod_P$$



Dónde  $\Pi_F$  y  $\Pi_P$  son el costo exergoeconómico de los flujos que constituyen el recurso F y el producto P de la unidad y Z es la contribución no energética de producción, se toman en consideración todos los equipos de la planta

La matriz  $\alpha$  se multiplicará por la matriz  $\Pi$

$$\alpha \times \Pi = \Pi_c$$

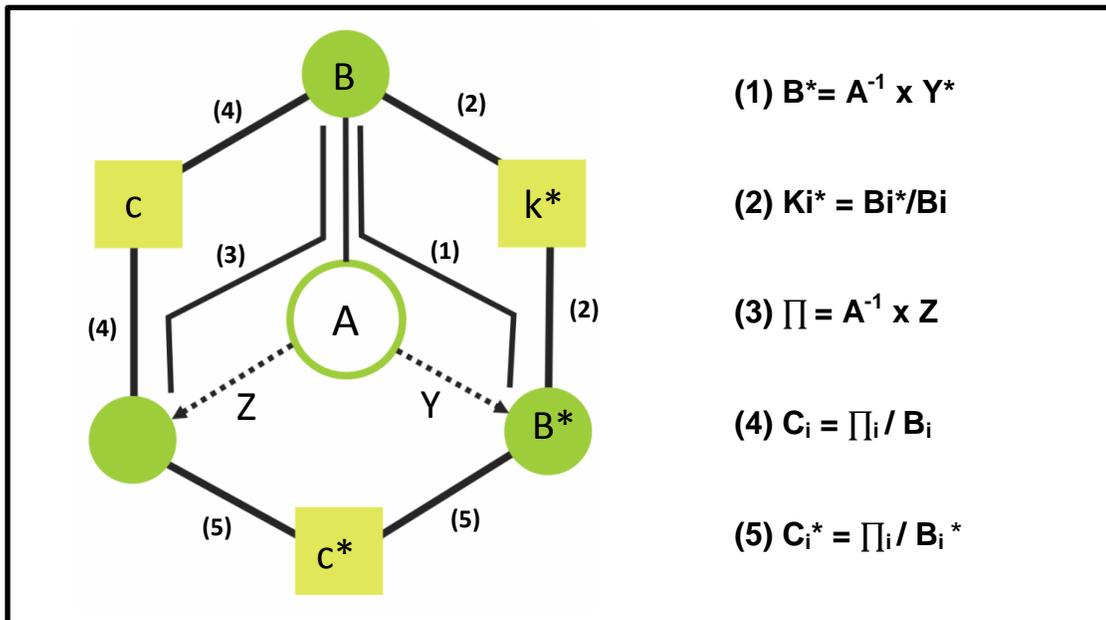
Siendo  $\Pi_c$  el vector que representa la asignación económica de los flujos que entran al sistema (Tabla 3), para determinar el costo exergoeconómico de los flujos de la planta

$$A \times \Pi = Z$$

Donde  $Z = [-Z/\Pi_c]$  es el vector que contiene la valorización económica externa del sistema, incluye los costos de amortización y mantenimiento.

El costo exergoeconómico unitario ( $c^*$ ) es el costo económico por unidad de energía asociada a un flujo determinado del sistema, representa el valor monetario por unidad de energía.

$$\Pi = c^* * B^*$$



(M. A. Lozano, 1993)

La conexión entre el cálculo de los costos energéticos y los exergoeconómicos se muestran en la figura anterior.



**Tabla 3. Costos variables flujos**

No.	Corriente	$\Pi_c$ (MNX)/kg
1	Agua desmineralizada	\$42.48
2	Condensado limpio	\$23.39
3	Agua a deareadores	\$31.46
4	Agua a deareadores	\$32.02
5	Agua deareada a calderas	\$32.63
6	Agua deareada a calderas	\$34.32
7	Vapor de alta presión	\$329.67
8	Vapor de media presión	\$290.63
9	Vapor de soplado	\$31.83
10	Vapor de purga	\$31.83
11	Vapor de alta presión	\$329.67
12	Vapor de alta presión	\$329.67
13	Vapor de media presión	\$290.63
14	Energía a calderas norte	\$36.66
15	Agua caliente de turbos	\$19.44
16	Condensado de turbo	\$23.63
17	Agua a torres de enfriamiento	\$23.07
18	Condensado	\$26.13
19	Condensado limpio	\$23.39
20	Agua desmineralizada	\$42.48
21	Agua a deareadores	\$31.46
22	Agua deareada a calderas	\$22.63
23	Agua deareada a calderas	\$30.32
24	Vapor de media presión	\$253.27
25	Vapor de media presión	\$290.63
27	Vapor de soplado	\$253.27
28	Condensado limpio	\$23.63
29	Vapor de media presión	\$254.99
31	Condensado	\$19.44
34	Energía a la bomba BA-01	\$1.04
35	Energía a la bomba BA-02	\$1.04
36	Vapor de media presión	\$290.63
37	Combustible	\$61.66

No.	Corriente	$\Pi_c$ (MNX)/kg
38	Vapor de media presión	\$290.63
40	Energía a la bomba BA-03	\$1.04
41	Vapor de media presión	\$290.63

Fuente: PEMEX (2014-2015)



Siguiendo la metodología se llegan a los siguientes costos unitarios por equipos, donde el valor representa el costo en unidades monetarias para generar una unidad energética de producto

**Tabla 4. Costo exergoeconómico**

<b>Equipo</b>	<b>C (\$/KJ)</b>
TV-01	3.55
BA-01	150.38
DE-01	523.23
BA-02	153.51
CB-01	691.45
TG-01	577.41
CND-01	456.23
FAV	35.74
TV-02	5.24
BA-03	100.58
DE-02	489.67
BA-04	99.59
CB-02	982.56
TG-02	407.22
CND-02	154.50
TE	305.54



### 10. Conclusiones

La refinería de nuestro caso de estudio genera el 97% del total de la energía que requiere para sus procesos y abastecer los servicios demandados por la misma; la óptima operación de su sistema de generación de vapor y energía es de importancia, por lo que se llevó a cabo el análisis energético en este trabajo.

El área de calderas y turbogeneradores del área norte que corresponden a la generación de vapor de alta presión con una pérdida de 33% y 25% de pérdidas de energía útil respectivamente.

La entropía destruida se traduce en pérdida de la capacidad de hacer trabajo y por lo tanto una destrucción de exergía, los equipos que presentaron un mayor valor de entropía destruida y por lo tanto una destrucción de exergía son las calderas de alta presión y turbogeneradores del área norte que presentan una destrucción de exergía de 46% y 42% respectivamente del total de exergía destruida en el sistema de generación de vapor y energía eléctrica de la Refinería.

En términos de costos exergéticos estos tres equipos o áreas tienen un valor de irreversibilidad alto siendo las calderas de media presión los equipos que presentan el mayor valor con 46 unidades necesarias para generar una unidad de recursos, este valor alto es debido a que estos equipos se encuentran trabajando en un rango del 48% de su capacidad de diseño, trabajando y a una eficiencia del 28% de acuerdo a los datos de operación reportados.

Los equipos con mayores costos para la generación de productos se encuentran las dos calderas (982 \$/KJ), el alto costo se incrementa en estas unidades debido al elevado costo de mantenimiento que reciben los equipos debido a la mala calidad del agua de alimentación provocando corrosión e incrustación, disminuyendo la eficiencia de los equipos que actualmente andan en el rango de 23% en las calderas de alta presión, problema que no se ha resuelto y perjudica en el desempeño.

Tras el análisis del área de fuerza de una refinería mediante la elaboración de un balance de exergía se pudo obtener, analizar e identificar que las calderas de alta presión es donde se está llevando a cabo pérdida de energía de manera significativa, esto debido a distintos factores como operativos, tecnológicos o de diseño entre otros, que pueden ser disminuidos para evitar pérdidas energéticas, económicas y en algunos casos perjudiciales para el medio ambiente.







# Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería



```
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Folder: C:\Users\BMS139\Documents\MATLAB
Shortcuts How to Add What's New
>> B = [ 0.7139; 0.8838; 6.3553; 0.0159; 7.1129; 7.9004; 2.7941; 0.0079; 0.4318; 0.0766; 279.3928; 236.0141; 3.9955; -0.6949; -0.0022; 0.1671; 0.0039; 1.7608; 1
B =
1.0e+004 *
0.0001
0.0001
0.0006
0.0000
0.0007
0.0008
0.0003
0.0000
0.0000
0.0000
0.0000
0.0279
0.0236
0.0004
-0.0001
-0.0000
0.0000
0.0000
0.0002
0.0002
0.0000
0.0000
0
0.0000
0.0054
0.0003
0.0009
```

```
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help Cerrar
Current Folder: C:\Users\BMS139\Documents\MATLAB
Shortcuts How to Add What's New
>> C = A*B
C =
1.0e+004 *
-0.0005
0.0008
-0.0007
-0.0000
-0.0262
0.0079
0.0010
0.0034
0.0011
0.0001
-0.0001
0.0006
-0.0002
-0.0000
-0.0045
0.0001
0.0018
-0.1216
-1.4426
0.0010
0.0000
```





## 12. Bibliografía

1. UNAM. (2004). *Instituto de Energías Renovables*. Recuperado el Mayo de 2016, de Exergía: <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Modulos/Modulo4.pdf>
2. A. Valreo, T. G. (s.f.). *Combinig Thermodynamics an Economics in energy Systems*. *Energy*.
3. Dirección General de Electricidad. (Mayo de 2008). *Ministerio de energía y minas*. Recuperado el Febrero de 2016, de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Guia10%20Refineria.pdf>
4. Ducardo, L. M. (2001). *Modelación matemática basada en análisis exergéticos de una Caldera*. Recuperado el Abril de 2016, de <http://bdigital.uao.edu.co/bitstream/10614/8222/1/T06189.pdf>
5. Fundación Vida Sostenible. (2016). *Refinerías*. Recuperado el Enero de 2016, de [http://www.larutadelaenergia.org/conversores/v5\\_b1.asp?v=4&b=0](http://www.larutadelaenergia.org/conversores/v5_b1.asp?v=4&b=0)
6. Granados Hernández Elías, L. A. (2015). Consumo de energía y emisiones de bióxido de carbono del sector. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 16(4), 503-513.
7. *Industria Petrolera*. (2016). Recuperado el Enero de 2016, de <http://www.industriapetroleramexicana.com/tag/sistema-nacional-de-refinacion/>
8. Instituto Mexicano del Petróleo. (2006). *Identificaión de mejoras de orientación en Refinerías*. Recuperado el Abril de 2016, de <http://www.procaisol.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4290/1/rodolfodelrosal.pdf>
9. M. A. Lozano, A. V. (1993). Theory of the exergetic cost. *Energy*, 939-960.
10. (2008). Pollution Control in Petroleum Refineries and Petrochemical Units. En S. Mahajam, *Pollution Control in process Industries* (págs. 219-223). India: McGraw-Hill.
11. Manuel F. Fernández M., L. H. (2006). Sistema de Cogeneración. *IIE*, 67-72.
12. Martínez, J. A. (1998). Ahorro de energía en refinerías. *Ingerinería Química*, 69-77.
13. PEMEX. (Enero de 2016). Sistema de costos MOCSAR. México, México.
14. PEMEX REFINACIÓN. (2008). *Refinería "Ing. Antonio M. Amor"*. Recuperado el Marzo de 2016, de <http://www.cmic.org/comisiones/Sectoriales/energia/hidrocarburos/reunionesendel egaciones/Leon/Ref%20Ing.%20Antonio%20M.Amor.pdf>
15. Princeton University. (1987). *The Petroleum Refining Industry*. Recuperado el febero de 2016, de <https://www.princeton.edu/~ota/disk3/1983/8312/831208.PDF>



16. Statistics, W. P. (s.f.). *México*. Recuperado el 2013 de 11 de 20, de <http://www.worldpopulationstatistics.com/mexico-population-2013/>
17. Tibaquirá, J. E. (2005). *Universidad Tecnológica de Pereira*. Recuperado el Febrero de 2016, de Termodinámica: <http://utp.edu.co/~juantiba/termoresu.pdf>
18. Usón Sergio, V. A. (2010). *Thermoeconomic Diagnosis of Energy Systems*. Valencia: Prensas Universitarias de Zaragoza.