

# **DIAGNÓSTICO Y ANÁLISIS DE MALFUNCIONES EN UNA CENTRAL TÉRMICA**

*José Luis Lombana Ocaña, Esteban Ribadeneira P. Jorge Mario Doval, Juan Pablo Gómez, Carlos Arturo Londoño<sup>1</sup>*

## **Resumen**

En el análisis de generación de energía eléctrica en una central térmica, con los diferentes procesos que se involucran, se tienen pérdidas energéticas, en muchos casos se subestiman, sin embargo es importante cualificarlas y cuantificarlas para mejorar el rendimiento de la planta y ahorrar recursos con miras a un proceso energéticamente eficiente dentro de las regulaciones ambientales necesarias.

Estas pérdidas energéticas, “Malfunciones” tienen un impacto sobre el fin último, la producción de energía eléctrica y se pueden cuantificar teniendo en cuenta los balances termodinámicos, las condiciones de diseño y las de operación para alcanzar la generación deseada o requerida, con el mínimo de costos y el mejor desempeño de la planta, por medio de una metodología para el estudio de malfunciones, analizando los dispositivos que se ven afectados por la operación de la central térmica buscando un mejor rendimiento la planta.

**Palabras Clave:** malfunciones, central térmica, condiciones de diseño y operación, balances de energía y exergía.

## **Abstract**

The study of electricity generation in electric generating power stations and their processes can be affected by energy losses.

Energy losses, in some cases, are ignore, but they have be computed to achieve the best performance and minimum cost within environmental policies.

It's possible know “Bad functions” values by using second thermodynamic law, design parameters and operation parameters.

In consequence, this paper presents a methodology to obtain bad functions values.

**Key words:** “bad functions”, generating power stations, second thermodynamic law.

---

<sup>1</sup>Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía – Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Artículo que se presenta en la sede para la asignatura de Políticas Energéticas: Uso Racional de la Energía como parte del proceso de evaluación y resultado derivado del estudio sobre “Malfunciones en una Central Térmica”.

## 1. Introducción

A lo largo de la vida de una instalación térmica es normal que se produzca una variación de las condiciones del funcionamiento de sus equipos. A estas variaciones se les llama malfunciones y pueden tener dos orígenes distintos: las malfunciones intrínsecas, debidas al deterioro del dispositivo y las inducidas, que caracterizan la desviación del comportamiento termodinámico en operación con respecto al de referencia.

Sin embargo, al intentar esta evaluación, en muchos casos es complejo diferenciar entre los tipos de malfunción, entonces es necesario estudiar su efecto combinado.

En varias plantas el efecto de las malfunciones es subestimado, prefiriéndose una extralimitación en el trabajo de los diferentes dispositivos con su respectivo deterioro, en contraposición a la evaluación y corrección de las causas de las malfunciones.

Pese a esto, se deben cuantificar y cualificar para lograr un mínimo de costos de funcionamiento, ahorro en los recursos y reducción de los impactos ambientales por mala operación de equipos.

Para la caracterización y evaluación de las malfunciones en una central térmica, se describe una metodología que se basa en el trabajo de Royo y Valero<sup>1,2,5,6</sup> y se complementa con el trabajo de Chejne y Restrepo<sup>3</sup>, en la cual se emplean los balances de energía, entropía, exergía y las condiciones de diseño y operación de una planta<sup>4</sup>.

La metodología se basa en el criterio de costos unitarios de las corrientes exergéticas, con lo cual se comparan los resultados para condiciones de diseño y operación en la aplicación del método.

## 2. Descripción de la planta térmica analizada

La figura 1 muestra la estructura física de una planta térmica simple, la cual consta de los

siguientes dispositivos: caldera (1), turbina de alta (2), turbina de baja (3), condensador (4), calentador (5), bomba (6), bomba (7), dispositivo ficticio para simular las perdidas de calor (SPC) (8), válvula (9), bomba (10), generador (11), intersección (12) (Se propone la intersección de los flujos del calentador (5) y la bomba (7) como un dispositivo adicional para el análisis de los costos exergéticos unitarios). como se presenta en el esquema 1. En las tablas 1 y 2 se detallan los datos de los flujos de diseño y operación correspondientes.

En el análisis, se propone como un solo dispositivo el condensador (4) y la bomba (10), ya que se tiene información conjunta de los dos equipos.

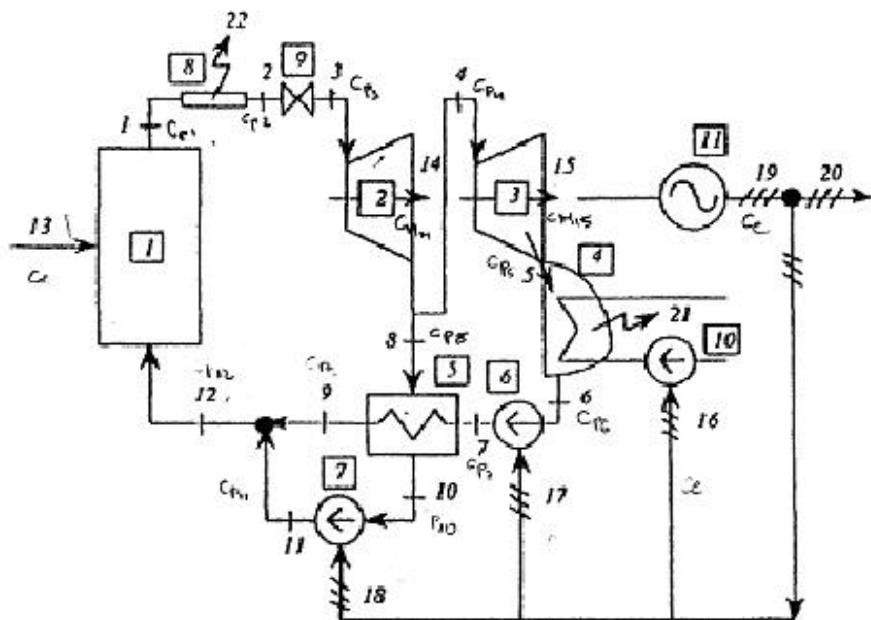
## 3. Análisis con el criterio de balances de Exergía

### 3.1. Descripción

Para realizar este análisis se hace uso de las propiedades termodinámicas a la entrada y a la salida de los diferentes dispositivos de los subsistemas definidos en la planta, se debe cuantificar los valores de entalpía, entropía y finalmente de exergía con el uso de propiedades medibles como el flujo másico, temperatura y presión, principalmente.

A partir de esta información se obtiene el “consumo” de cada dispositivo, este se define como la desviación de las propiedades termodinámicas a la entrada y a la salida de en cada equipo, tanto para las condiciones de diseño que pueden ser las recomendadas por el creador de los dispositivos, como para las condiciones de operación con las que se cuente.

A partir de los balances exergéticos que se obtienen se establece, en apariencia, la distribución de pérdidas energéticas en los subsistemas de la central térmica, es decir se halla el orden de importancia de los diversos equipos para el mejoramiento de la planta.



**Figura 1.** Esquema de la planta térmica

Condiciones Diseño						
i	m (kg/s)	P(bar)	T (°K)	h (KJ/Kg)	s(KJ/Kg)	ex (KJ/Kg)
0	0	1	293.15	84	0.296	0
1	19.73	60.61	818.4	3527.6	7.01	1475.6
2	19.73	60.61	813.15	3515.3	6.995	1467.7
3	19.73	60	812.89	3515.3	6.999	1466.4
4	16.57	4.23	493.45	2902	7.231	784.9
5	16.57	0.06	308.58	2279.3	7.416	108.1
6	16.57	0.06	308.58	148.4	0.511	1.6
7	16.57	63.9	309.13	156.4	0.516	8
8	3.17	4.23	493.45	2902	7.232	784.9
9	16.57	63.8	413.3	593.7	1.734	88.2
10	3.17	4.23	418.8	613.3	1.797	89.4
11	3.17	63.8	419.8	621.4	1.801	96.4
12	19.73	63.8	414.35	589.1	1.745	89.5

**Tabla 1.** Parámetros medidos y propiedades termodinámicas para condiciones de diseño

Condiciones Operación						
i	m (kg/s)	P(bar)	T (°K)	H (KJ/Kg)	s(KJ/Kg)	ex (KJ/Kg)
0	0	1	293.15	84	0.296	0
1	19.98	60.68	818.86	3528.6	7.01	1476.4
2	19.98	60.68	813.15	3515.3	6.994	1467.8
3	19.98	60	812.86	3515.3	6.999	1466.4
4	16.86	4.23	498.55	2912.6	7.253	789.3
5	16.86	0.06	308.58	2293.4	7.462	108.8
6	16.86	0.06	308.58	148.4	0.511	1.6
7	16.86	64.39	309.27	157	0.518	8.1
8	3.12	4.23	498.55	2912.6	7.523	789.3
9	16.86	64.27	410.79	583	1.708	85.1
10	3.12	4.23	418.79	613.3	1.797	89.4
11	3.12	64.27	419.92	622	1.802	96.6
12	19.98	64.27	412.22	589.1	1.723	86.9

**Tabla 2.** Parámetros medidos y propiedades termodinámicas para condiciones de operación

### 3.2. Modelo Matemático

Se calcula la exergía total de los flujos:

$$\dot{Ex}_i = \dot{m}_i ex_i$$

Los resultados se presentan en la tabla 3, tanto para las condiciones de diseño y operación.

Ahora, para cada dispositivo se toman las corrientes de entrada y salida con su respectivo exergía total como se muestra en la tabla 4 para las dos condiciones. Luego para cada dispositivo se calcula la exergía consumida, en diseño y operación como sigue:

$$Ex_{ci} = \sum Ex_{ei} - \sum Ex_{si}$$

donde:

Ex<sub>ci</sub>: exergía total consumida en cada dispositivo.

Ex<sub>ei</sub>: exergía total de cada flujo de entrada.

Ex<sub>si</sub>: exergía total de cada flujo de salida.

Por ultimo se realiza la diferencia entre la exergía consumida de cada dispositivo de operación menos la de diseño, los resultados se muestran en la tabla 5.

### 3.3. Análisis teniendo en cuenta el concepto de costos unitarios

#### Descripción:

Se propone, para el análisis de malfunciones, tener en cuenta el concepto de costos unitarios de diseño u operación factibles. Los costos unitarios se establecen en forma matricial para las diferentes corrientes que intervienen en la planta, relacionándolos con los flujos exergéticos correspondientes.

Es necesario establecer las malfunciones en los equipos con la relación energética: combustible – producto y la diferencia de esta relación entre las condiciones de operación y diseño. Una variable que se requiere también, es el producto de cada dispositivo en condiciones de operación.

Así, es posible obtener el valor del impacto de cada una de las malfunciones de las diversas corrientes en el consumo total de combustible.

**Tabla 3.** Exergías totales para las corrientes de la planta

Diseño		Operación	
i	Ex (Kw)	i	Ex (Kw)
0	0	0	0
1	29113.588	1	29498.472
2	28957.721	2	29326.644
3	28932.072	3	29298.672
4	13005.793	4	13307.598
5	1791.217	5	1834.368
6	26.512	6	26.976
7	132.56	7	136.566
8	2488.133	8	2462.616
9	1461.474	9	1434.786
10	283.398	10	278.928
11	305.588	11	301.392
12	1765.835	12	1736.262
13	64228	13	65632
14	10923	14	10868
15	9309	15	9422
16	46	16	74
17	156	17	182
18	30	18	34
19	20232	19	20290
20	20000	20	20000
21	35303	21	36165
22	243	22	268

### Cálculos:

Las ecuaciones que se plantean a partir de las exergías obtenidas de cada corriente, para hallar los valores de los costos unitarios de diseño ó operación factible son:

Se proponen las siguientes igualdades:

$$\begin{aligned} C_{p1} &= C_{p2} = C_{p3} = C_{ps1} \\ C_{p8} &= C_{p4} = C_{ps2} \\ C_{p11} &= C_{p9} = C_{p12} = C_{ps3} \\ C_{m14} &= C_{m15} = C_m \end{aligned}$$

Se tiene la eficiencia de la turbina :

$$\eta_{turbina} = 80\%$$

La matriz de cálculo es presenta en la tabla 6.

Al resolver el sistema de ecuaciones se obtienen los costos exergéticos unitarios y se presentan en la tabla 7.

A continuación, se establecen las relaciones combustible - producto en las condiciones de diseño y operación, genéricamente se define producto (P) como la exergía contenida en la utilidad deseada en el equipo que se analiza y combustible (F) como la exergía que se emplea para conseguir dicha utilidad. Se define, entonces la relación:

$$K_i = \frac{F_i}{P_{equipo}}$$

	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S
	Caldera(1)		Turbina(2)		Turbina(3)		Int(4)+Bomb(10)		Intercamb(5)		Bomb(6)	
D	64228.00	29113.60	28932.10	2487.20	13005.80	1791.20	1791.20	26.50	132.60	283.40	26.50	132.60
	1765.80			13005.80		9309.00	46.00		2487.20	1461.50	156.00	
				10923.00							27.00	136.60
O	65632.00	29498.50	29298.70	2462.60	13307.60	1834.40	1834.40	27.00	136.60	278.90	182.00	
	1736.30			13307.60		9422.00	74.00		2462.60	1434.80		
				10868.00								
	Bomb(7)		SPC(8)		Válvula (9)		Generador(11)		Intersec(12)			
D	283.40	305.60	29113.60	28957.70	28957.70	28932.10	10923.00	20232.00	1461.50	1765.80		
	30.00						9309.00		305.60			
O	278.90	301.40	29498.50	29326.60	29326.60	29298.70	10868.00	20290.00	1434.80	1736.30		
	34.00						9422.00		301.40			

**Tabla 4.** Corrientes exergéticas de entrada y salida para los dispositivos de la planta a las condiciones de diseño y las condiciones de operación

KW	Calder(1)	Turbina(2)	Turbina(3)	Int(4)+Bom(10)	Int(5)	Bom(6)	Bom(7)	SPC(8)	Válv(9)	Gen(11)	Inter(12)
D	36880.20	2516.10	1905.60	1810.70	874.90	50.50	7.80	155.90	25.60	0.00	1.30
O	37869.80	2660.50	2051.20	1881.40	885.50	72.40	11.50	171.90	27.90	0.00	0.00
O - D	989.60	144.40	145.60	70.70	10.60	21.90	3.70	16.00	2.30	0.00	-1.30

**Tabla 5.** Diferencia entre condiciones de operación y diseño

Cps <sub>1</sub>	Cps <sub>2</sub>	Cps <sub>3</sub>	Cm	Ce	Cp <sub>6</sub>	Cp <sub>7</sub>	Cp <sub>10</sub>	TI <sup>1.1</sup>
29113.6	0	-1765.8	0	0	0	0	0	64228
-28932.1	-12647.56	0	10923	0	0	0	0	0
0	-13005.8	0	9309	0	0	0	0	0
0	-358.24	0	0	-46	26.5	0	0	0
0	0	0	-1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	-156	-26.5	132.6	0	0
0	-2487.2	1461.5	0	0	0	-132.69	283.4	0
0	0	305.6	0	-30	0	0	-283.4	0
1 - ?	1	0	0	0	0	0	0	0

**Tabla 6.** Matriz de costos unitarios

<sup>1.1</sup> TI (término independiente) costo total exergético en la entrada de la caldera

COSTO UNITARIO	VALOR
$C_{ps_1}$	2.46
$C_{ps_2}$	2.347
$C_{ps_3}$	4.1961
$C_m$	3.1837
$C_e$	3.1762
$C_{p_5}$	0.4694
$C_{p_6}$	37.2407
$C_{p_7}$	11.1793
$C_{p_{10}}$	4.1886

**Tabla 7.** Costos unitarios

Los resultados obtenidos para la condición de operación y diseño se presentan en la tabla 8.

#### 4. Evaluación de Malfunciones

Se procede a hallar las malfunciones a partir de las relaciones combustible - producto a condiciones de diseño y de operación mediante la expresión:

$$\Delta K = K_{operación} - K_{diseño}$$

Las malfunciones obtenidas para cada equipo del sistema estudiado, se presentan en la tabla 9.

#### 5. Evaluación del impacto de las Malfunciones

Teniendo los valores numéricos de las malfunciones, se determina los impactos de las malfunciones en el proceso, estos se calculan mediante la expresión:

$$\Delta F_i = C_{i_{diseño}} \cdot \Delta K_i \cdot P_{i_{operación}}$$

Teniendo en cuenta solo los valores positivos de  $\Delta F_i$  (malfunciones), debido a que son los que contribuyen al impacto total en el sistema, se obtiene:

$$\sum \Delta F_i = 4481.93 \text{Kw}$$

Con este valor se puede obtener el porcentaje del impacto total que contribuye cada impacto individual.

Los diferentes impactos que tolera cada equipo y su respectivo porcentaje se presentan en la tabla 10.

#### 6. Valoración de Resultados

A partir del análisis por el balance de exergía, se observa que los dispositivos que tienen mayores malfunciones en su orden son: caldera, turbina de baja, turbina de alta y el condensador.

A partir del análisis, al tener en cuenta los costos exergéticos unitarios, se puede observar que las malfunciones de mayor impacto en la planta se producen en:

1. Turbina de alta (líneas 8 y 14), debido a que contribuyen con el 35.8% y 28.2% respectivamente, a las malfunciones totales siendo las de mayor impacto.
2. Caldera que genera el tercer mayor impacto a la malfunción total (12.4%).
3. Turbina de baja respecto al producto 15, genera el 7.5% del impacto total de las malfunciones.
4. Generador respecto a la entrada 15, contribuye con un 6.2% del impacto total de las malfunciones.

EQUIPO	Relación Combustible-Producto (K).Condición de Diseño	Relación Combustible-Producto (K).Condición de Operación
CALDERA (1)	$K = \frac{F_{13}}{P_1} = 2.2061$	$K = \frac{F_{13}}{P_1} = 2.2249$
	$K = \frac{F_{12}}{P_1} = 0.0607$	$K = \frac{F_{12}}{P_1} = 0.0589$
DISPOSITIVO (8)	$K = \frac{F_3}{P_2} = 1.0054$	$K = \frac{F_3}{P_2} = 1.0059$
VÁLVULA (9)	$K = \frac{F_2}{P_3} = 1.0009$	$K = \frac{F_2}{P_3} = 1.0010$
TURBINA (2)	$K = \frac{F_3}{P_{14}} = 2.6487$	$K = \frac{F_3}{P_{14}} = 2.6959$
	$K = \frac{F_3}{P_4} = 2.2246$	$K = \frac{F_3}{P_4} = 2.2017$
	$K = \frac{F_3}{P_8} = 11.6324$	$K = \frac{F_3}{P_8} = 11.8975$
TURBINA (3)	$K = \frac{F_4}{P_{15}} = 1.3971$	$K = \frac{F_4}{P_{15}} = 1.4124$
	$K = \frac{F_4}{P_5} = 7.2609$	$K = \frac{F_4}{P_5} = 7.2545$
CONDENSADOR (4) Y BOMBA (10)	$K = \frac{F_{16}}{P_6} = 1.7358$	$K = \frac{F_{16}}{P_6} = 2.7407$
	$K = \frac{F_5}{P_6} = 67.5925$	$K = \frac{F_5}{P_6} = 67.9407$
GENERADOR (11)	$K = \frac{F_{15}}{P_{19}} = 0.4601$	$K = \frac{F_{15}}{P_{19}} = 0.4644$
	$K = \frac{F_{14}}{P_{19}} = 0.5399$	$K = \frac{F_{14}}{P_{19}} = 0.5356$
BOMBA (6)	$K = \frac{F_6}{P_7} = 0.1999$	$K = \frac{F_6}{P_7} = 0.1977$
	$K = \frac{F_{17}}{P_7} = 1.1765$	$K = \frac{F_{17}}{P_7} = 1.1324$
	$K = \frac{F_8}{P_9} = 1.7018$	$K = \frac{F_8}{P_9} = 1.7163$

<b>INTERCAMBIADOR (5)</b>	$K = \frac{F_8}{P_{10}} = 8.7763$	$K = \frac{F_8}{P_{10}} = 8.8297$
	$K = \frac{F_7}{P_9} = 0.0907$	$K = \frac{F_7}{P_9} = 0.0952$
	$K = \frac{F_7}{P_{10}} = 0.4679$	$K = \frac{F_7}{P_{10}} = 0.4898$
<b>BOMBA (7)</b>	$K = \frac{F_{10}}{P_{11}} = 0.9274$	$K = \frac{F_{10}}{P_{11}} = 0.9253$
	$K = \frac{F_{18}}{P_{11}} = 0.0982$	$K = \frac{F_{18}}{P_{11}} = 0.1128$
<b>INTERSECCIÓN</b>	$K = \frac{F_9}{P_{12}} = 0.8277$	$K = \frac{F_9}{P_{12}} = 0.8264$
	$K = \frac{F_{11}}{P_{12}} = 0.1731$	$K = \frac{F_{11}}{P_{12}} = 0.1736$

**Tabla 8.** Relación combustible - producto para condiciones de diseño y operación

EQUIPO	MALFUNCIONES ?K
<b>CALDERA (1)</b>	0.0188
	-0.0018
<b>DISPOSITIVO (8)</b>	0.0005
<b>VÁLVULA (9)</b>	0.0001
<b>TURBINA (2)</b>	0.0472
	-0.0229
	0.2651
<b>TURBINA (3)</b>	0.0153
	-0.0064
<b>CONDENSADOR (4) Y BOMBA (10)</b>	1.0049
	0.3482
<b>GENERADOR (11)</b>	0.0043
	-0.0043
<b>BOMBA (6)</b>	-0.0022
	0.1559
<b>INTERCAMBIADOR (5)</b>	0.0145
	0.0534
	0.0045
	0.0219
<b>BOMBA (7)</b>	-0.0021
	0.0146
<b>INTERSECCIÓN</b>	-0.0013
	0.0005

**Tabla 9.** Malfunciones ?K para cada equipo

EQUIPO	IMPACTO DE LAS MALFUNCIONES (Kw) ?F	PORCENTAJE DEL IMPACTO (%)
CALDERA (1)	554.57 -222.80	12.4 -
DISPOSITIVO (8)	36.07	0.8
VALVULA (9)	7.21	0.2
TURBINA (2)	12261.91 -749.67 1605.97	28.2 - 35.8
TURBINA (3)	338.34 -27.55	7.5 -
CONDENSADOR (4) Y BOMBA (10)	86.18 4.41	1.9 0.1
GENERADOR (11)	277.77 -277.77	6.2 -
BOMBA (6)	-11.19 67.64 48.83	- 1.5 1.1
INTERCAMBIADOR (5)	34.95 72.18 68.28	0.8 1.6 1.5
BOMBA (7)	-2.65 13.98	- 0.3
INTERSECCIÓN	-9.47 3.64	- 0.1

**Tabla 10.** Impacto de las malfunciones y porcentaje de cada una sobre el proceso global del sistema

## 7. Conclusiones

Es conveniente realizar una optimización en los siguientes dispositivos: turbina de alta, caldera, turbina de baja y generador, respectivamente.

El análisis a partir de los balances exergéticos es un método erróneo para el cálculo de malfunciones, ya que cuando se aplica el concepto de costos unitarios se llega a resultados totalmente diferentes.

La forma en que se plantea la matriz de costos exergéticos unitarios, permite valorar en forma eficaz los valores de dichos costos.

En algunos casos, se evidencia que el dispositivo trabaja mejor en condiciones de operación que en las de diseño, lo que produce valores negativos de malfunciones.

## REFERENCIAS

- AGUILAR J, et al; Estudio económico de una planta simple de cogeneración; Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza.
- CHEJNE F., et al; New rules for the exergo – economic optimization methodology; Instituto de Energía – Escuela de Procesos y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.2002.
- GALLEGOS A, et al; Bases para el análisis de “Malfunciones” en sistemas termomecánicos; Departamento de ingeniería mecánica, Universidad de Zaragoza.
- LOZANO M, et al; Thermo-economic diagnosis of energy systems; Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza.

- ROYO J, et al; Un Nuevo método para el análisis de malfunciones en equipos termomecánicos; Departamento de ingeniería mecánica, Universidad de Zaragoza.
- VALERO A, et al; On-line thermoeconomic diagnosis of thermal power plants; CIRCE.