

## BALANCES DE MATERIA Y DE ENERGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN CALDERAS

Javier Armijo C.

Facultad de Química e Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos

### RESUMEN

Se presenta la solución de las ecuaciones de conservación de materia y de energía, en estado estacionario, para estimar la eficiencia térmica de un generador de vapor de agua. El análisis sistemático de las ecuaciones revela que los resultados dependen de las variables seleccionadas como datos de entrada para los cálculos. Los resultados indican que las reacciones químicas de combustión aportan alrededor del 90% de la energía necesaria para el proceso; y que el gasto de energía está compartida por el vapor generado y los gases de chimenea.

**Palabras clave:** Balance, Materia, Energía, Calderas, Eficiencia.

### ABSTRACT

We are showing solutions of equations matter and energy conservation steady state for calculate thermal efficiency of steam generators. The analysis of freedom degree show results are functions of variables chosen as input data. The results indicate chemical reactions contribute with 90 per cent of energy necessary and expense energy share to steam and exit gas.

**Keywords:** Balance, Mass, Energy, Steam generators, Efficiency.

### INTRODUCCIÓN

Para determinar la eficiencia térmica de una caldera se deben resolver las ecuaciones de Balance de Materia y de Energía (BME). De esta manera se puede estimar las pérdidas de energía a fin de prever las posibles mejoras al proceso que conduzcan a un incremento de la eficiencia.

Diferentes boletines y revistas<sup>1,2,3</sup>, que promocionan el uso racional de la energía y la implementación de programas de eficiencia energética en las empresas del sector productivo, difunden cálculos de la eficiencia térmica a partir de ecuaciones del BME simplificadas y de ecuaciones empíricas que pueden conducir a erradas conclusiones.

En este trabajo se aplican las ecuaciones de continuidad y la primera ley de la termodinámica

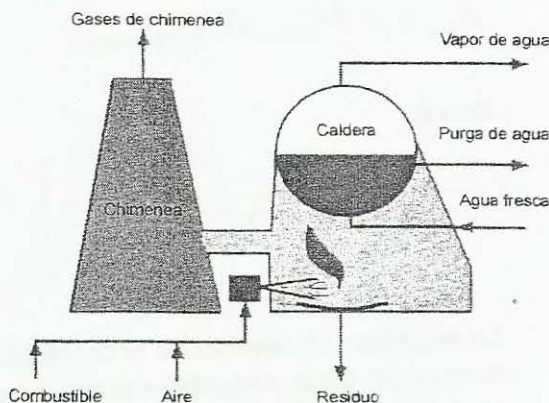
a un generador de vapor, y proponemos una solución sistemática para calcular su eficiencia térmica.

La Figura 1 muestra un diagrama de flujo de un típico generador de vapor. El combustible, que puede ser gas o líquido, se mezcla con aire tomado del medio ambiente. La mezcla se lleva a una cámara de ignición donde se produce la combustión. Las reacciones químicas de combustión producen nuevas especies químicas, que son expulsados como gases de chimenea, así mismo grandes cantidades de calor que se utiliza para generar vapor de agua en la caldera a partir de agua fresca de alimentación. La purga de agua que se retira de la caldera evita la acumulación de agua y controla la concentración de sales en la caldera. El residuo está compuesto de material no quemado.

Para el balance de materia y de energía consideramos:

- Combustible líquido compuesto de carbón, oxígeno, nitrógeno, azufre y agua.
- Aire que contiene oxígeno, nitrógeno y vapor de agua.
- Gases de chimenea compuesto de bióxido de carbón, monóxido de carbón, oxígeno, nitrógeno, bióxido de azufre, vapor de agua.
- Agua fresca fría o saturada según la temperatura la que se encuentre. La purga se considera agua líquida saturada a la presión de trabajo de la caldera. El vapor de agua que sale de la caldera se considera saturado a la presión que se indique.

Figura N°1. Diagrama de flujo para un generador de vapor.



## II. ECUACIONES DE BALANCE DE MATERIA Y DE ENERGÍA (BME)

Para escribir las ecuaciones de balance de materia suponemos condiciones de operación estacionaria y que el residuo de la combustión es despreciable.

### Balance de materia para cada especie química

Balance de carbón:

$$\frac{Lw_1}{12} = G(y_1 + y_2) \quad (1)$$

Balance de oxígeno:

$$L\left(\frac{w_2}{32} + \frac{w_6}{36}\right) + A\left(x_1 + \frac{z}{2}\right) = G\left(y_1 + \frac{y_2}{2} + y_3 + y_5 + \frac{y_6}{2}\right) \quad (2)$$

Balance de hidrógeno:

$$L\left(\frac{w_3}{2} + \frac{w_6}{18}\right) + Az = Gy_6 \quad (3)$$

Balance de nitrógeno:

$$\frac{Lw_4}{28} + A(1 - x_1) = Gy_4 \quad (4)$$

Balance de azufre:

$$\frac{Lw_5}{32} = Gy_5 \quad (5)$$

Restricción:

$$y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 = 1 \quad (6)$$

La moles de vapor de agua por moles de aire seco se calcula de la ecuación 7:

$$z = \frac{(HR) P_s}{P_0 - (HR) P_s} \quad (7)$$

Donde la presión de vapor ( $P_s$ ) de agua pura se determina a la temperatura del aire ( $T_A$ ).

### Balance de materia en la línea de agua

$$W = p + v \quad (8)$$

### Balance de energía

El balance de energía es una aplicación de la primera ley de la termodinámica en condiciones de flujo estacionario:

$$Q = \sum_{i=\text{salidas}} E_i - \sum_{i=\text{entradas}} E_i + E_r \quad (9)$$

Donde Q es el flujo de calor que se intercambia con el medio ambiente, es positivo si el calor ingresa al proceso y negativo si el calor sale.

$E_i$  representa el contenido de energía de una corriente cualquiera i. El símbolo de sumatoria

indica que debe sumarse el contenido de energía de todas las corrientes.

$E_r$  representa la energía producida por las reacciones químicas, es proporcional con el calor de reacción. Si las reacciones químicas liberan energía, como las reacciones de combustión, el calor de reacción es negativo.

Aplicamos la ecuación 9 al generador de vapor y obtenemos:

$$Q = E_{Gas} + E_{Vapor} + E_{Purga} - (E_{Comb} + E_{Aire} + E_{Agua}) + E_r \quad (10)$$

El contenido de energía de cualquier corriente se calcula de la ecuación 11:

$$E_i = m_i \int_{T_{ref}}^{T_i} C_{pi} dT \quad (11)$$

Donde:  $m_i$  es el flujo másico o molar de la corriente  $i$ ,  $C_{pi}$  es su calor específico,  $T_{ref}$  es la temperatura de referencia y  $T_i$  es la temperatura de la corriente  $i$ . Para corrientes que son una mezcla de especies químicas la ecuación 11 debe aplicarse a cada una de los componentes.

Para calcular los términos de energía,  $E$ , de la ecuación 10 necesitamos fijar una temperatura de referencia. Para las especies que participan o se generan en las reacciones químicas se asume una temperatura de referencia igual a 25°C. En esta categoría se encuentran el combustible, el aire y los gases de chimenea. Para las sustancias que no participan en las reacciones químicas se toma como temperatura de referencia igual a 0°C. El agua contenido en el combustible y en el aire se consideran como sustancia no reactivas.

Con la ecuación 11, cada termino de la ecuación 10 se desarrolla a continuación.

**Para los gases de chimenea:**

$$E_{Gas} = \sum_{j=1}^5 G y_j \int_{T_{ref}}^{T_G} C_{pj} dT + E_{aguadereacc} + E_{aguadlibre} \quad (12)$$

Donde:

$$E_{aguadereacc} = \frac{18}{2} w_3 L \int_{T_{ref}=25}^{T_G} C_{p6} dT \quad (13)$$

$$E_{aguadlibre} = \left( \frac{w_3 L}{18} + zA \right) \left[ 18\lambda_0 + \int_{T_{ref}=0}^{T_G} C_{p6} dT \right] \quad (14)$$

La ecuación 13 representa la energía del agua proveniente de la combustión del hidrógeno del combustible.

La ecuación 14 representa la energía del agua libre contenida en el combustible y el aire, que no proviene de ninguna reacción química. En este caso se considera que el agua, en su estado de referencia líquido a 0°C, se evapora y luego se sobrecalienta hasta la temperatura del gas de chimenea.

**Para el aire:**

$$E_{Aire} = A \int_{T_{ref}}^{T_A} C_{paire} dT + E_{humedad} \quad (15)$$

Donde:

$$E_{humedad} = zA \left[ 18\lambda_0 + \int_{T_{ref}=0}^{T_A} C_{p6} dT \right] \quad (16)$$

La ecuación 16 representa el contenido de energía del agua presente en el aire. En este caso el agua evaporada se sobrecalienta hasta la temperatura de la aire.

En las ecuaciones 14 y 16 el término  $\lambda_0$  es el calor latente de vaporización a 0 °C.

**La energía del combustible** se determina integrando la ecuación 11 suponiendo que el calor específico es independiente de la temperatura:

$$E_{Comb} = LC_{PL}(T_L - T_{ref}) \quad (17)$$

**Para las corrientes de vapor de agua, purga y agua de alimentación** la integral de la ecuación 11 se reemplaza por la entalpía

(13) que se determina de la tabla de vapor saturado y se expresa como función de la temperatura de saturación ( $T_s$ ):

Vapor saturado:  $E_{vapor} = V f_1(T_s)$  (18)

(14) Agua saturada:  $E_{purga} = P f_2(T_s)$  (19)

Agua fría:  $E_{agua} = W f_2(T_w)$  (20)

Donde la temperatura de saturación se determina conociendo la presión de saturación ( $P_s$ ) que se toma igual a la presión de trabajo de la caldera:

$P_s = f_3(T_s)$  (21)

$P_s = P_0 + P_m$  (22)

$P_0$  es la presión atmosférica.

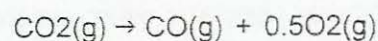
(15) Las funciones,  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$  de las ecuaciones 18, 19, 20, 21 respectivamente, se determinan por regresión tomando los datos que aparecen en las Tablas de vapor<sup>4</sup>. El agua fría que ingresa a la caldera se considera como saturado a la temperatura que ingresa a la caldera. En cambio, la purga se considera líquido saturado a la temperatura  $T_s$ .

(16) **La energía de reacción ( $E_r$ )** de la ecuación 10 es una cantidad relacionada con el poder calorífico (PC) del combustible. El poder calorífico del combustible es el valor negativo del calor estándar de combustión. El poder calorífico inferior (PCI) es un valor considerando que el agua, producto de la reacción, se encuentra en estado de vapor. En cambio, el poder calorífico superior (PCS) considera al agua en estado líquido.

(17) El calor estándar de combustión es el calor de reacción de una sustancia con oxígeno cuando los reactivos y los productos están a 25°C y 1 atmósfera de presión. Es una cantidad negativa que indica que se libera calor durante la reacción. Los valores del calor de reacción se encuentran tabulados<sup>3</sup> para diferentes sustancias considerando que todo el carbón forma CO<sub>2</sub> (combustión completa), todo el hidrógeno forma agua, todo el azufre

forma SO<sub>2</sub> y que el nitrógeno del combustible forma nitrógeno gaseoso. A partir de 1800 °C el nitrógeno reacciona parcialmente para formar óxido nítrico (NO). Se denomina combustión incompleta si parte del carbón forma monóxido de carbón (CO).

Para calcular la energía de reacción,  $E_r$ , se considera la energía liberada por la combustión completa del combustible disminuido por la energía de la reacción:



$E_{CO}$  = energía de reacción

Así tenemos:

$E_r = -[L(PCI) - Gy_2E_{CO}]$  (23)

Donde  $E_{CO}$  = -(Calor estándar de combustión del CO). Cuando  $y_2 = 0$  la energía de reacción,  $E_r$ , es igual al liberado por la combustión completa del combustible.

**Aire teórico, aire en exceso y eficiencia térmica**

Las reacciones de combustión se llevan a cabo con más aire del que se necesita para suministrar oxígeno en proporción estequiométrica al combustible.

Oxígeno teórico: es la cantidad de oxígeno que se necesita para efectuar la combustión completa del combustible suponiendo que todo el carbono del combustible se oxida para formar CO<sub>2</sub>, todo el hidrógeno se oxida para formar H<sub>2</sub>O y todo el azufre forma SO<sub>2</sub>. Las moles de oxígeno se calcula de la ecuación 24 a partir de la composición del combustible:

$O_2 \text{ teórico} = \left( \frac{w_1}{12} + \frac{w_3}{2} + \frac{w_5}{32} \right) * L$  (24)

Aire teórico: es la cantidad de aire que contiene el oxígeno teórico.

Aire en exceso: es la cantidad de aire adicional al teórico, se calcula de la ecuación 25:

$$\text{Aire exceso, \%} = \frac{\text{Aire actual} - \text{Aire teorico}}{\text{Aire teorico}} \cdot 100 \quad (25)$$

La eficiencia de un proceso se expresa como el cociente entre la ganancia a inversión. En nuestro caso, la ganancia es la energía contenida en el vapor de agua generado por la caldera y la inversión es la energía por la cual debemos pagar para vaporizar el agua. La eficiencia térmica se calcula de las ecuaciones 25 y 26 dependiendo de cómo exprese el término de la inversión:

$$\text{Eficiencia(1), \%} = 100 \frac{\text{Energía del vapor de agua}}{\text{Energía que ingresa}} \quad (26)$$

$$\text{Eficiencia(2), \%} = 100 \frac{\text{Energía del vapor de agua}}{\text{Poder calorífico del combustible}} \quad (27)$$

La ecuación 25 considera como inversión toda la energía disponible por las corrientes que entran al proceso más el proporcionado por el calor de combustión. En la ecuación 26 solo se considera como inversión el calor de combustión (poder calorífico del combustible).

### III. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

La Tabla 1 muestra el resultado del análisis del grado de libertad para el sistema de ecuaciones: 1 a 6 y 8 del balance de materia (BM). En total tenemos que fijar 5 variables para resolver las ecuaciones del balance de materia. Como la ecuación 8 es independiente de las ecuaciones 1 a 6, los 5 grados de libertad se distribuyen de la siguiente manera:

- 2 grados de libertad para la ecuación 8.
- 3 grados de libertad para las ecuaciones 1 a 6.

La última columna de la Tabla 1 indica que tenemos 9 variables por calcular con las ecuaciones 1 a 6, de estas variables debemos fijar 3. Tenemos 20 formas posibles de seleccionar 3 variables de un conjunto de 9 como se muestra en la Tabla 2.

Tabla N° 1. Grados de libertad para el Balance de Materia.

Variables para el balance de materia	Variables independientes	Variables por calcular
L, w(1), ..., w(6) = 7	w(1), ..., w(6) = 6	L = 1
A, x(1), HR, T <sub>A</sub> = 4	x(1), HR, T <sub>A</sub> = 3	A = 1
G, y(1), ..., y(6) = 7	Ninguna = 0	G, y(1), ..., y(6) = 7
W, P, V = 3	Ninguna = 0	W, P, V = 3
Suma = 21	Suma = 9	Suma = 12
Ecuaciones del balance de materia (1, 2, 3, 4, 5, 6, 8) = 7		
Grados de libertad para todo el sistema = 5		

Tabla N° 2. Selección de variables para resolver las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5 y 6 del balance de materia.

Caso	Variables especificadas	Caso	Variables especificadas
1	L, y(1), y(2)	11	L, A, y(2)
2	L, y(1), y(3)	12	L, A, y(3)
3	L, y(2), y(3)	13	L, G, y(1)
4	A, y(1), y(2)	14	L, G, y(2)
5	A, y(1), y(3)	15	L, G, y(3)
6	A, y(2), y(3)	16	A, G, y(1)
7	G, y(1), y(2)	17	A, G, y(2)
8	G, y(1), y(3)	18	A, G, y(3)
9	G, y(2), y(3)	19	L, G, A
10	L, A, y(1)	20	y(1), y(2), y(3)

Para resolver la ecuación 8 especificamos 2 variables, el flujo del agua de alimentación (W) y la producción de vapor (V), el flujo de la purga (P) se calcula.

El balance de energía se resuelve después de resolver el balance de materia. Se supone que las propiedades fisicoquímicas de las sustancias son conocidas. Se tiene entonces 5 variables: Q, T<sub>G</sub>, T<sub>A</sub>, P<sub>S</sub>, T<sub>L</sub> y una ecuación de balance de energía. Por lo tanto, debemos especificar 4 variables, estas son: T<sub>G</sub>, T<sub>A</sub>, P<sub>S</sub>, T<sub>L</sub>.

Finalmente, analicemos la ecuación 9 en relación al signo de la variable Q que representa el calor neto intercambiado con los alrededores.

El término E<sub>i</sub> de la ecuación 9 tiene signo negativo, tal como se muestra en la ecuación 23, y puede incluirse dentro de la sumatoria de las corrientes de entrada. Por lo tanto, la ecuación 9 queda como sigue:

$$Q = \sum_{i=\text{salidas}} E_i - \sum_{i=\text{entradas}} E_i$$

Ahora, si del balance de energía resulta que:

$Q > 0$ , significa que la suma del contenido de energía de las corrientes de salida es mayor que el de las corrientes de entrada. Es decir, existe una fuente externa, no tomada en cuenta en el balance, que debe proporcionar al proceso una cantidad adicional de energía. Esta situación es inesperada.

$Q < 0$ , significa que la suma del contenido de energía de las corrientes de salida es menor que el de las corrientes de entrada. Es decir, el proceso pierde energía hacia el medio exterior. Esta es una situación posible, las pérdidas pueden ser de diferente naturaleza, por ejemplo, por radiación desde la superficie de la caldera.

$Q = 0$ , en este caso no hay intercambio de calor con el medio exterior. La suma del contenido de energía de las corrientes de salida es igual al de las corrientes de entrada.

**Ejemplos** de cálculo del balance de materia y de energía (BME)

Para realizar los cálculos de BME necesitamos información básica que a continuación presentamos.

**Combustible:** En la Tabla 3 se muestran las propiedades del combustible y su composición.

Tabla N° 3. Algunas propiedades y composición del combustible.

Combustible	Residual 6	
API=	22,3	
PCI=	9755	Kcal/Kg
C <sub>PL</sub> =	0,473	Kcal/Kg°C
w(1)=	0,86	f. en peso
w(2)=	0,01	f. en peso
w(3)=	0,11	f. en peso
w(4)=	0,002	f. en peso
w(5)=	0,01	f. en peso
w(6)=	0,008	f. en peso

**Calor específico de gases:** se calcula con la ecuación 27.

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (27)$$

Donde T se expresa en °C y C<sub>p</sub> en Joule / mol °C.

Las constantes de la ecuación 27 se muestran en la Tabla 4.

Tabla N° 4. Constantes para la ecuación 26.

Gas	a	10 <sup>2</sup> b	10 <sup>5</sup> c	10 <sup>9</sup> d
Aire	28,94	0,4147	0,3191	-1,965
N2	29	0,2199	0,5723	-2,871
O2	29,1	1,158	-0,6076	1,311
CO2	36,11	4,233	-2,887	7,464
CO	28,95	0,411	0,3548	-2,22
SO2	38,91	3,904	-3,104	8,606
H2O	33,46	0,688	0,7604	-3,593

**Propiedades del agua:** La presión de saturación se considera que es la misma presión de trabajo de la caldera. Si se conoce la presión manométrica (P<sub>m</sub>) a la que opera la caldera, la presión de saturación (P<sub>s</sub>) en bares se calcula como sigue (ecuación 22):

$$P_s = 0.98066 P_m + 1.01325$$

La relación entre la presión de saturación y la temperatura de saturación, función f<sub>3</sub> de la ecuación 21, es:

$$P_s = -0.32758 + 0.00516308T_s + 7.5087710^{-5}T_s^2 - 1.3333210^{-6}T_s^3 + 1.4067810^{-8}T_s^4$$

El rango de aplicación de la ecuación anterior es desde 1 a 70 bar y 99.6°C a 285.8°C.

Para temperaturas menores a 60°C, como es el caso del vapor de agua contenida en el aire, la presión de vapor se calcula de la ecuación de Antoine:

$$\log(P_s^*) = 8.10765 - \frac{1750.286}{T_s + 235}$$

Donde P<sub>s</sub><sup>\*</sup> se expresa en mm de Hg.

La función f<sub>1</sub> de la ecuación 18 representa la entalpía del vapor saturado, se calcula de la siguiente ecuación:

$$H_v = 2541.5 + 0.56883T_s + 0.0156839T_s^2 - 1.038510^{-4}T_s^3 + 2.8223810^{-7}T_s^4 - 3.5156610^{-10}T_s^5$$

Donde  $H_v$  corresponde al vapor saturado de 99.6 a 285.8 °C, se expresa en Kjoule/kg,

La función  $f_2$  de las ecuaciones 19 y 20 representa la entalpia del agua líquida saturada:

$$H_L = 0.0289928 + 4.19891T_s - 4.700510^{-4}T_s^2 + 3.8841910^{-6}T_s^3$$

Donde  $H_L$  corresponde al líquido saturado desde 0 a 100 °C, se expresa en Kjoule/kg,

Calor latente de vaporización ( $\lambda_0$ ) a 0°C = 2501.6 Kjoule/Kg.

**Reacción química para la ecuación 23:**

$$E_{CO} = 67637 \text{ Kilocalorías/Kilomol}$$

### Condiciones de operación

Las condiciones operación para el cual realizamos los cálculos del BME se muestran en la Tabla 5.

Tabla N° 5. Condiciones de operación para el BME.

L, flujo de combustible	100 gal/h
Temperatura del combustible	110 °C
W-flujo de agua	4315 Kg/h
Temperatura del agua	45 °C
V, flujo vapor saturado	4315 Kg/h
Presión de vapor manométrica	4,6 Kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura del aire	27 °C
Humedad Relativa	61 %
Temperatura del gas	200 °C

### Resultados de los cálculos del BME

Los resultados de los cálculos del balance de materia y de energía se presentan en las Tablas 6 y 7 para los casos 1, 2, 10, 11 y 12 de la Tabla 2.

Tabla N° 6. Resultados del Balance de Materia. Combustible igual a 348.2 kilogramos por hora.

Caso	Aire Kmol/h	Gas Kmol/h	%volumen(base húmeda)				% exceso de aire
			CO <sub>2</sub>	CO	O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	
1	264.7	274.5	9.1	9 ppm	7.2	0.04	57
2	199.0	211.9	8.9	2.9	4.4	0.05	18.03
10	200	212.9	8.9	2.8	4.5	0.05	18.64
11	200	209.9	11.9	8.9 ppm	3.1	0.05	18.64
12	200	212.7	9.0	2.7	4.4	0.05	18.64

La tabla 6 muestra que los resultados del balance de materia dependen de la especificación de las variables que usamos como datos de entrada.

El flujo del gas de chimenea y el porcentaje en exceso de aire calculado son del mismo orden en los casos 2, 10, 11 y 12. Esto debido a que fue elegido como dato de entrada el flujo molar del aire y/o el porcentaje molar del oxígeno. Entre los casos 1 y 2, existe diferencias en los cálculos del flujo de gas y el porcentaje de aire en exceso.

Tabla N° 7. Resultados del Balance de Energía. Combustible igual a 348.2 kilogramos por hora.

Modalidad de balance	% exceso de aire	Q de ec. 10	Eficiencia térmica %	
			ec. 25	ec. 26
1 Combustible, CO <sub>2</sub> , CO	57	>0	76.21	83.49
2 Combustible, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	18.03	>0	78.22	83.49
10 Combustible, Aire, CO <sub>2</sub>	18.64	>0	78.19	83.49
11 Combustible, Aire, CO	18.64	<0	77.6	83.49
12 Combustible, Aire, O <sub>2</sub>	18.64	>0	78.19	83.49

La tabla 7 muestra los resultados del balance de energía donde se observa el signo de Q y la eficiencia térmica como funciones del porcentaje en exceso de aire. Independiente del caso que se trate, la eficiencia térmica calculada con la ecuación 26 es el mismo debido a que la energía del vapor de agua y el poder calorífico son los mismos en todos los casos. En cambio, la eficiencia térmica calculada con la ecuación 25 es diferente debido a que el denominador de la ecuación es diferente en todos los casos. Sin embargo, se observa que la diferencia no es substancial.

La situación más importante que se deduce de la tabla 7 está relacionado con el signo del calor intercambiado, Q. Q es > 0 en los casos 1, 2, 10 y 12. Lo que nos indica que datos como la temperatura del gas, flujo del vapor o la presión del vapor son incorrectos. Por ejemplo, si para el caso 1 se reduce la temperatura del gas a  $T_g = 150^\circ\text{C}$ , los resultados se obtiene  $Q < 0$  y las eficiencias son 77.26% y 83.49% calculados de las ecuaciones 25 y 26 respectivamente.

$Q < 0$  en el caso 11. En este caso existe pérdidas de calor hacia el exterior, esta situación es realista y esperada.

El signo de Q puede utilizarse como criterio para determinar si existe alguna información incorrecta cuando se recolecte información de campo.

Finalmente, presentamos los resultados del balance de energía a través de las figuras 2, 3, 4 y 5 donde se muestra el aporte y el gasto de energía de cada corriente involucrada en el proceso. Se toma el caso 1 con  $T_c = 150$  y el caso 11 con  $T_c = 200$  °C, en ambos  $Q < 0$ .

Las Figuras 2 y 3 muestran en términos porcentuales el aporte de energía, respecto al total, de cada corriente que ingresa al proceso y el proporcionado por la reacción química. Se observa que en cualquier de los casos, 1 y 11, el aporte de energía más importante lo constituye el dado por la reacción química.

Las figuras 4 y 5, por otro lado, muestran en términos porcentuales el consumo o gasto de energía, respecto al total, de cada una de las corrientes que salen del proceso. En cualquiera de los casos, 1 y 11, el vapor de agua consume la mayor parte de la energía que se aporta al proceso. Así mismo, se observa que una disminución de la temperatura de los gases de chimenea reduce su consumo de energía pero aumenta las pérdidas de calor al exterior para conservar el balance de energía.

Figura N° 2. Aporte de energía. Caso 11 con  $T_c = 200$ °C.

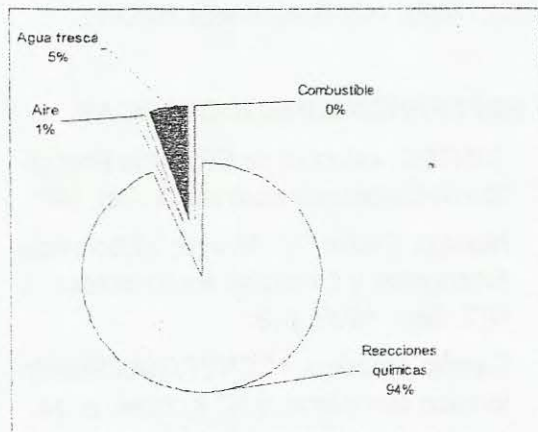


Figura N° 3. Aporte de energía. Caso 1 con  $T_c = 150$ °C.

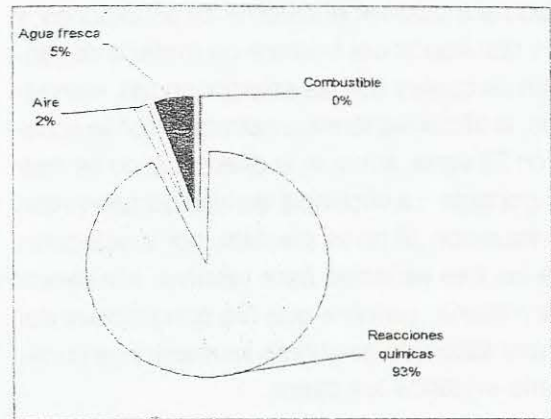


Figura N° 4. Consumo de energía. Caso 1 con  $T_c = 150$ °C.

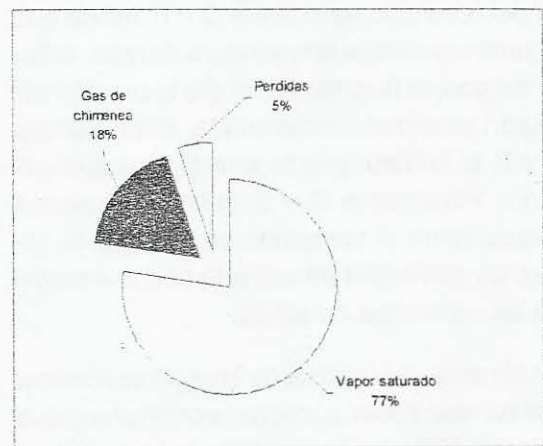
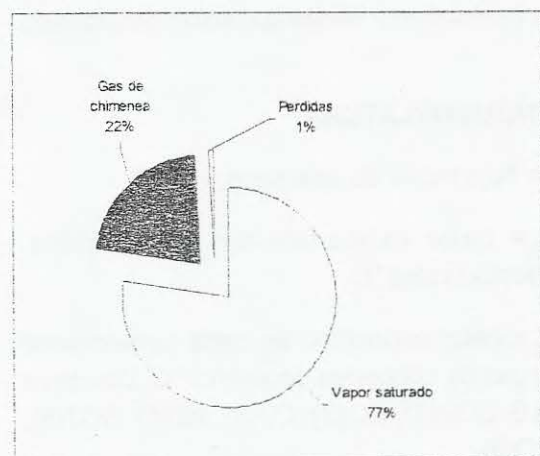


Figura N° 5. Gasto de energía. Caso 11 con  $T_c = 200$ °C.



#### IV. CONCLUSIONES

El balance de materia para las reacciones de combustión establece 6 ecuaciones independientes con 9 incógnitas, es decir, tenemos 3 grados de libertad. Por lo tanto, de las 9 incóg-



nitás se debe fijar tres variables como conocidas para resolver el sistema de ecuaciones, y los resultados del balance de materia dependen de cuales son las seleccionadas. Asimismo, la eficiencia térmica calculado con la ecuación 25 varía, aunque, la diferencia no es muy importante. La eficiencia térmica calculado con la ecuación 26 no es afectado por la selección de las tres variables para resolver el balance de materia, siempre que las condiciones del vapor saturado generado se mantenga constante en todos los casos.

El balance de energía determina el signo del calor intercambiado con el exterior,  $Q$ .

Si del resultado se obtiene  $Q > 0$ , indica que alguna variable (la temperatura del gas, el flujo del gas, el flujo del vapor y/o la presión del vapor) está mal condicionada. Si en cambio  $Q < 0$ , el proceso pierde energía hacia el exterior. Finalmente  $Q = 0$ , indica un balance exacto entre el contenido de energía de todas las corrientes de entrada con la energía de las corrientes de salida.

Finalmente, del balance de energía se observa que las reacciones químicas aportan al proceso más del 90% de la energía necesaria para el proceso. Asimismo, el gasto de energía está compartida por el vapor de agua generado y los gases de chimenea que salen del proceso.

## V. NOMENCLATURA

$A$  = flujo molar de aire seco, kmol/h.

$C_{PL}$  = calor específico del combustible, kilocalorías/kg °C.

$C_{pi}$  = calor específico de cada componente del gas de chimenea, joule/mol °C. Donde  $i = 1$  a 6. CO<sub>2</sub>(1), CO(2), O<sub>2</sub>(3), N<sub>2</sub>(4), SO<sub>2</sub>(5), H<sub>2</sub>O(6).

$C_{PA}$  = calor específico del aire, joule/mol °C.

$G$  = flujo molar de gas de chimenea, kmol/h.

HR = humedad relativa, sin dimensiones.

$L$  = flujo másico de combustible, kg/h.

$P$  = flujo másico del agua de purga, kg/h.

PCI = poder calorífico inferior del combustible, kilo calorías/kg.

$P_0$  = presión atmosférica local, igual a 760 mm Hg, o 1,01325 bares.

$P_m$  = presión manométrica del vapor, kg/cm<sup>2</sup>.

$P_v$  = presión manométrica del vapor, kg/cm<sup>2</sup>.

$P_s$  = presión de vapor o saturación del agua, en mm Hg o bares según la ecuación que se utilice para calcularlo.

$T_A$  = temperatura del aire, °C

$T_G$  = temperatura del gas de chimenea, °C.

$T_p$  = temperatura de la purga, °C.

$T_s$  = temperatura del vapor saturado, °C.

$T_w$  = temperatura del agua fresca, °C.

$x_1$  = fracción molar de O<sub>2</sub> en el aire, = 0,21.

$x_2$  = fracción molar de N<sub>2</sub> en el aire, = 0.79.

$y_i$  = fracción molar de los componentes del gas de chimenea. Donde  $i = 1$  a 6. CO<sub>2</sub>(1), CO(2), O<sub>2</sub>(3), N<sub>2</sub>(4), SO<sub>2</sub>(5), H<sub>2</sub>O(6).

$V$  = flujo másico del vapor de agua, kg/h.

$W$  = flujo másico del agua fresca, kg/h.

$w_i$  = fracción en peso de los componentes del combustible. Donde  $i = 1$  a 6. Carbón(1), O<sub>2</sub>(2), H<sub>2</sub>(3), N<sub>2</sub>(4), Azufre(5), H<sub>2</sub>O(6).

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ITINTEC, «Manual de Eficiencia Energética de Calderas Industriales», Oct. 1991.
2. Mariluz Pedro, V. Arroyo; «Eficiencia Energética y Energías Renovables», I, N°2, Sep. 1999, p. 9.
3. Carrillo Amadeo, «CENERGÍA» Boletín técnico semestral, 5 N° 8, 1994, p. 14.
4. Felder Richard, R. Rousseau, «Principios Elementales de los Procesos Químicos», Addison-Wesley Iberoamericana S.A., 1991, p. 682.