

AHORRO DE ENERGÍA EN UNA CALDERA UTILIZANDO ECONOMIZADORES

Javier Armijo C., Gilberto Salas C.

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

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza el sistema caldera-economizador para determinar el efecto del precalentamiento del agua en la eficiencia del sistema de generación de vapor. La solución de las ecuaciones del balance de materia y de energía (BME) permite establecer que existe un ahorro en el consumo de combustible a medida que se incrementa la temperatura del agua que ingresa a la caldera; asimismo, se consigue mejorar la eficiencia del generador de vapor. El ahorro de consumo de combustible depende del flujo de agua y es del orden del 5%.

Palabras clave: Balance de materia, Balance de energía, Generador de vapor, Economizadores, Eficiencia.

ABSTRACT

In this work we examine the boiler-economizers system to determine the effect of warm water in the efficiency of steam generation system. Solving the equations balance of matter and energy (BME) provides that there is a saving in fuel consumption as it increases the temperature of water entering the boiler, and it is achieved by improving the efficiency of steam generator. The savings on fuel economy depends on the flow of water and is about 5%.

Keywords: Mass balance, Energy balance, Steam generator, Economizers, Efficiency.

I. INTRODUCCIÓN

Una caldera o generador de vapor es un equipo destinado a la producción de vapor a partir de agua líquida. La energía necesaria para producir el vapor de agua se obtiene de las reacciones de combustión de un combustible sólido, líquido o gas, conjuntamente con el oxígeno del aire. Los gases calientes provenientes de las reacciones químicas se expulsan al medio ambiente. Es posible utilizar los gases para precalentar el agua fría que ingresa a la caldera mediante el empleo de un intercambiador de calor denominado economizador .

Para la simulación de la operación de una caldera se aplica los Balance de Materia y de Energía (BME) a una caldera cuyo

diagrama se muestra en la Figura N.º 1, la cual muestra el sistema de generador de vapor sin economizador. Los gases calientes de chimenea son expulsados directamente al medio ambiente, y el agua fresca que alimenta la caldera ingresa fría, normalmente, a temperatura ambiente.

Las ecuaciones del BME y las suposiciones del caso se presentan en el artículo de Armijo^[1]. El análisis sistemático de las ecuaciones de BME conduce a una solución dependiente de las variables considerados como datos de entrada para la simulación. Para este estudio, se toman como datos de entrada el flujo de combustible y la composición en base seca del CO₂ y CO en la mezcla de gases.

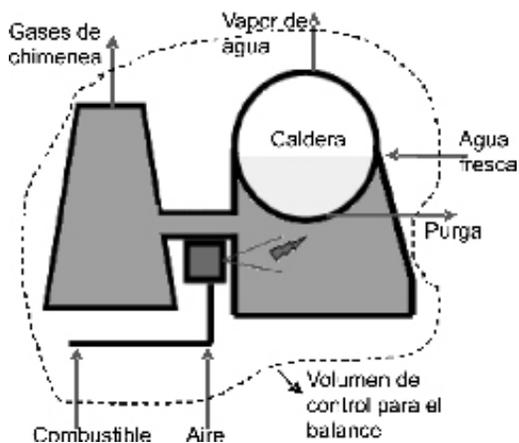


Figura N.º 1. Generador de vapor sin economizador donde se muestra el volumen de control que se toma para resolver el BME.

En el presente trabajo vamos a mostrar que el uso de los gases calientes de chimenea para precalentar el agua fría conduce a un ahorro de combustible y a un aumento de la eficiencia de la caldera.

II. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Para efectos de cálculo, se supone que el vapor de agua generado es saturado a 5.52 bares, la purga es cero, el combustible es Diesel N.º 6 y que los gases de chimenea tienen una composición en base seca de 10% CO₂ y 10 ppm de CO. En todos los cálculos realizados las pérdidas de calor son menores o iguales a 0.1% del total de energía.

La eficiencia de la caldera se calcula de las siguientes ecuaciones:

$$Eficiencia(1) = \frac{100 \text{Energía del vapor agua}}{\text{Energía total}} \quad (1)$$

$$Eficiencia(2) = \frac{100 \text{Energía del vapor agua}}{\text{Potencia calorífica combustible}} \quad (2)$$

Solución del BME para el generador de vapor sin economizador

Cuando no se considera la presencia del economizador el agua fresca ingresa fría a la caldera, normalmente a temperatura ambiente y los gases de chimenea se expulsan a una temperatura elevada. En la Figura N.º

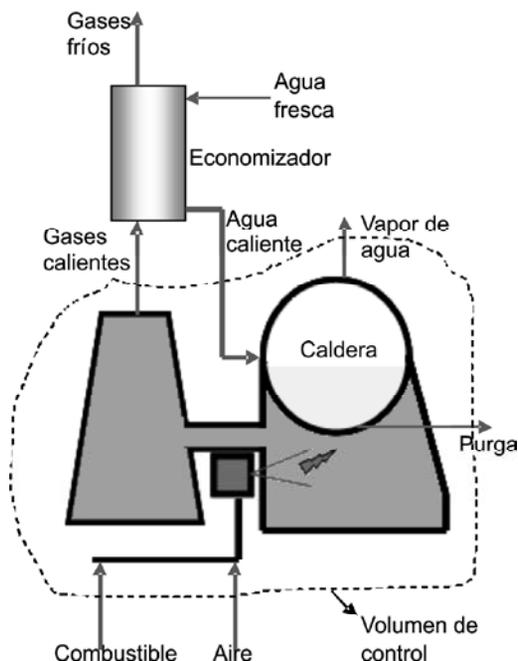


Figura N.º 2. Generador de vapor con economizador donde se muestra el volumen de control para la solución del BME.

1 se muestra el volumen de control donde se resuelve el BME. Suponemos las siguientes temperaturas:

Combustible = 110 °C

Aire = 27 °C

Gases de chimenea = 220 °C

Agua de alimentación = 20 °C

Los resultados de los cálculos se muestran en la Tabla N.º 1. Se observa que la cantidad generada de gases es directamente proporcional a la cantidad de combustible que ingresa al generador. Asimismo, a mayor cantidad de agua fresca que ingresa al generador, se requiere de mayor combustible. Las eficiencias de la caldera, calculadas con las ecuaciones 1 y 2, son prácticamente constantes e iguales 72% y 75%, respectivamente.

Tabla N.º 1. Resultados del BME sin economizador.

Combustible kg/h	Gases chim. kmol/h	Agua fresca kg/h	Eficiencia (1)	Eficiencia (2)
206,15	162,52	2315	72,3	75,66
294,95	232,52	3315	72,36	75,73
384,09	302,8	4315	72,33	75,69

Solución del BME para el generador de vapor con economizador

En este caso, considere el arreglo del generador de vapor como se muestra en la Figura N.º 2. Los gases calientes de chimenea se pasan por el economizador donde se enfrían a costa del calentamiento del agua fresca de alimentación. El BME se resuelve en el volumen de control señalado sobre la Figura N.º 2.

Tabla N.º 2. Resultados del BME con economizador.

Combustible kg/h	Gases chim. kmol/h	Agua caliente kg/h	Eficiencia (1)	Eficiencia (2)
198,14	156,21	2315	73,07	78,72
283,46	223,46	3315	73,13	78,8
369,12	291,00	4315	73,1	78,76

Agua a 45°C

Para los efectos de cálculo, suponemos las siguientes temperaturas:

Combustible = 110 °C

Aire = 27 °C

Gases calientes de chimenea = 220 °C

Agua caliente = 45 °C, 55 °C, 65°C y 75°C

Los resultados de los cálculos para cada temperatura del agua caliente se presentan en las Tablas N.ºs 2, 3, 4 y 5.

Las Tablas N.ºs 2, 3, 4 y 5 muestran que a mayor temperatura del agua caliente, menor es el consumo de combustible. Así, por ejemplo de

Tabla N.º 3. Resultados del BME con economizador.

Combustible kg/h	Gases chim. kmol/h	Agua caliente kg/h	Eficiencia (1)	Eficiencia (2)
194,66	153,46	2315	73,48	80,13
278,93	219,9	3315	73,43	80,07
363,2	286,33	4315	73,41	80,05

Agua a 55°C

Tabla N.º 4. Resultados del BME con economizador.

Combustible kg/h	Gases Chim. kmol/h	Agua caliente kg/h	Eficiencia (1)	Eficiencia (2)
191,53	150,99	2315	73,77	81,44
274,06	216,05	3315	73,82	81,5
356,93	281,39	4315	73,78	81,45

Agua a 65 °C

la Tabla N.º 2, según el flujo de agua, a 45 °C, el gasto de combustible es de 198 a 369 kg/h. De la Tabla N.º 4, a 65 °C, el gasto de combustible es de 191 a 357 kg/h, para los mismos flujos de agua caliente.

La Tabla N.º 1 muestra que en el caso del agua de alimentación a 20 °C, el consumo de combustible está en el rango de 206 a 384 kg/h. Estas cantidades son mayores que cualquiera de los resultados obtenidos para los casos del agua caliente a 45, 55, 65, y 75 °C.

Por otro lado, las Tablas N.ºs 2, 3, 4 y 5 muestran que las eficiencia (1) y eficiencia (2) se incrementan desde 73% a 74%, y 78% a 83%, respectivamente, a medida que aumenta la temperatura del agua caliente desde 45 °C a 75 °C. Estos resultados son mejores comparados a los obtenidos para el caso de agua a 20 °C, como se observa de la Tabla N.º 1, la eficiencia (1) es de 72% y la eficiencia (2) es de 76%.

La Figura N.º 3 presenta los resultados de las Tablas N.ºs 1, 2, 3, 4 y 5 en relación al consumo de combustible como función de la temperatura del agua de alimentación que ingresa a la caldera. Cuando no hay economizador, la temperatura del agua es de 20 °C. La presencia del economizador permite ingresar el agua a temperaturas de 45, 55, 65 y 75 °C. La Figura N.º 3 muestra que el consumo de combustible disminuye con el aumento de la temperatura del agua caliente para cualquier flujo de agua.

Los resultados de los cálculos del BME demuestran que la presencia del economizador, el cual permite calentar el agua fría antes de ingresar a la caldera, mejora la eficiencia del sistema y produce un ahorro de combustible. Pero ahora, el problema que

Tabla N.º 5. Resultados del BME con economizador.

Combustible kg/h	Gases Chim. kmol/h	Agua caliente kg/h	Eficiencia (1)	Eficiencia (2)
188,39	148,62	2315	74,96	82,79
269,53	212,48	3315	74,12	82,87
351,91	276,72	4315	74,99	82,83

Agua a 75 °C

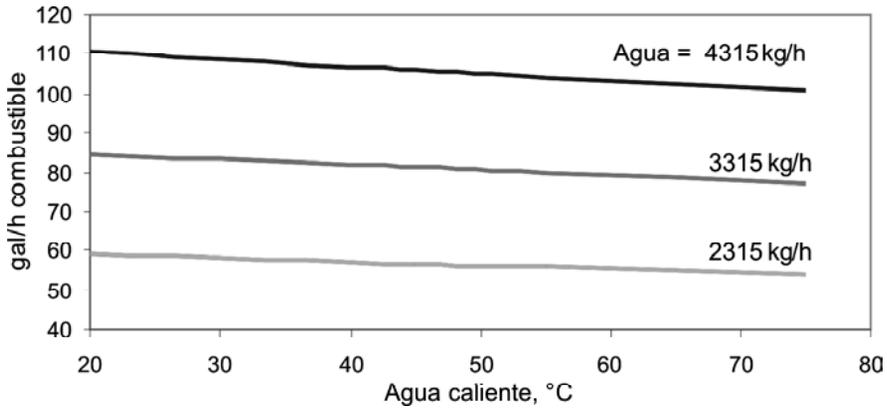


Figura N.º 3. Consumo de combustible en función de la temperatura del agua de alimentación.

nos planteamos es si disponemos suficiente gas de chimenea para calentar el agua fría. Para responder esta pregunta, debemos resolver el BME alrededor del economizador.

Solución del BME en el economizador

La Figura N.º 4 muestra el volumen de control alrededor del economizador, donde se resuelve el BME suponiendo que las pérdidas de calor son despreciables.

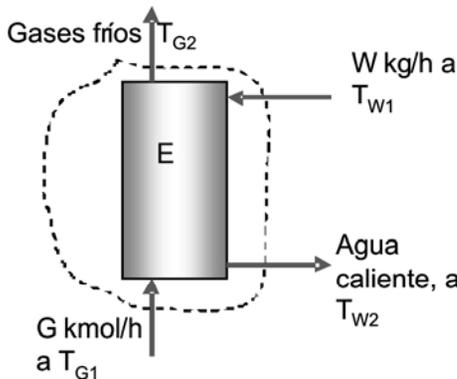


Figura N.º 4. Volumen de control para resolver el BME en el economizador.

Del balance de energía, se obtiene la ecuación para calcular el flujo de gas en función del flujo de agua:

$$G \int_{T_{G1}}^{T_{G2}} C_{Pm} dT_G = W(h_{w2} - h_{w1}) \tag{3}$$

Donde: h_{w1} y h_{w2} son las entalpías del agua que se determinan de las tablas de vapor a la temperatura T_{W1} y T_{W2} , respectivamente.

C_{Pm} es el calor específico de la mezcla de gases.

Para resolver la integral del denominador de la ecuación 3, necesitamos el calor específico de la mezcla de gases de chimenea. La composición del gas de chimenea es el mismo para todos los casos debido a que hemos supuesto una composición fija para el CO_2 y el CO . La Tabla N.º 6 muestra la composición del gas de chimenea y las constantes para el polinomio del calor específico:

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \tag{4}$$

Tabla N.º 6. Constantes para el CP en joule/mol °C.T en °C.

Gas	%volumen	a	10 ² b	10 ⁵ c	10 ⁹ d
N2	74,53532	29	0,2199	0,5723	-2,871
O2	7,232245	29,1	1,158	-0,6076	1,311
CO2	9,089788	36,11	4,233	-2,887	7,464
CO	0,000909	28,95	0,411	0,3548	-2,22
SO2	0,0396397	38,91	3,904	-3,104	8,606
H2O	9,102099	33,46	0,688	0,7604	-3,593

La entalpía del agua saturada en función de la temperatura se determina de la ecuación:

$$H_w = 0.0289928 + 4.19891T - 0.000470051T^2 + 0.00000388419T^3 \tag{5}$$

Donde H_w en kjoule/kg y T en °C.

Los resultados del BME en el economizador se muestran en la Tabla N.º 7 para diferentes

flujos de agua fresca. Para los cálculos, se ha tomado en 150 °C la temperatura del gas a la salida del economizador, y en 20 °C la temperatura del agua fría. Se observa que la cantidad de gas requerido para calentar el agua aumenta a medida que se incrementa la temperatura del agua caliente a la salida del economizador.

La Tabla N.º 7 muestra la cantidad de gas requerido para calentar el agua mientras que las Tablas N.ros 2, 3, 4 y 5 muestran la cantidad de gas producido en la combustión. Los resultados de dichas tablas deben ser confrontados. Por ejemplo, la tabla 8 muestra los resultados para el caso de 4315 kg/h de agua de alimentación.

Tabla N.º 7. Flujo de gas requerido para calentar el agua.

Tempera. del gas		Tempera. del agua		Kmol/h de gas		
Entrada	Salida	Entrada	Salida	2315 kg/h	3315 kg/h	4315 kg/h
220	150	20	45	105,3	157,6	205,2
220	150	20	55	147,4	220,7	287,2
220	150	20	65	189,6	283,8	369,4
220	150	20	75	231,8	346,9	451,6

Tabla N.º 8.

Tempera. agua	Gas producido kmol/h gas	Gas requerido kmol/h gas
45	201	205,2
55	287,2	287,2
65	369,4	369,4
75	451,6	451,6

Se observa que la cantidad de gas producido disminuye y la cantidad de gas requerido aumenta, ambos con el aumento de la temperatura del agua caliente. Para una mejor ilustración, los resultados de la tabla anterior son graficados en la Figura N.º 4. En la gráfica se observa que la cantidad requerida se intercepta con la cantidad producida, dando como resultado el punto de operación para el sistema caldera-economizador. Luego, para

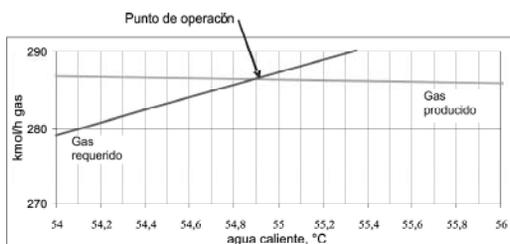


Figura N.º 4. Punto de operación para el sistema caldera-economizador. Flujo de agua = 4315 kg/h .

un flujo de 4315 kg/h de agua la temperatura de calentamiento operativo en el sistema caldera-economizador es 54.9 °C, y el flujo de gas es 286 kmol/h.

Siguiendo el mismo análisis, se obtiene el punto de operación para los otros casos del flujo de agua: 3315 y 2315 kg/h. La tabla N.º 9 presenta los resultados.

Tabla N.º 9. Punto de operación del sistema caldera-economizador.

Agua		Gas kmol/h
kg/h	°C	
4315	54,9	286
3315	54,9	220
2315	56,3	153

III. CONCLUSIONES

1. El sistema caldera-economizador reduce el consumo de combustible. Por ejemplo, para un flujo de agua de 4315 kg/h el consumo de combustible es 110.3 gal/h cuando el agua ingresa fría a 20 °C, y 104.3 gal/h para agua caliente a 55 °C. Es decir, ahorramos 6 gal/h que representan 51840 galones por año, si consideramos que la caldera trabaja 8640 horas por año. El ahorro de combustible es del orden del 5%.
2. La eficiencia del sistema caldera-economizador es mayor en relación a la caldera sin economizador. Los cálculos muestran que la eficiencia (1) se incrementa de 72% hasta 74% cuando la temperatura del agua pasa de 20 °C hasta 75 °C, respectivamente. Por otro lado, la eficiencia (2) se incrementa de 75% hasta 83% cuando la temperatura del agua pasa de 20 °C hasta 75 °C, respectivamente.
3. Existe una temperatura de agua caliente que determina la igualdad en la cantidad de gas producido por la combustión y la requerida para el precalentamiento del agua en el economizador. Dicha temperatura depende del flujo de agua que ingresa a la caldera.

IV. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Armijo C.J. Rev Per Quím e Ing Quím 2006; 9(54).