

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES OPERATIVAS Y LA CAPACIDAD DE UN CALDERO PIROTUBULAR EN EL AHORRO DE ENERGÍA

Ing. José Huapaya Barrientos

Departamento de Físicoquímica de la Facultad de Química e Ing. Química de la UNMSM.

Resumen: El trabajo resalta la importancia del uso óptimo de los insumos energéticos en la actividad industrial, como una necesidad de competitividad internacional y nacional. El ahorro de combustible es cuantificado anualmente y se comprueba el beneficio económico que logran las empresas al recuperar la energía de las purgas en la operación de un generador de vapor. Un caso real es discutido con el propósito de convalidar los conceptos señalados.

Palabras Claves: Ahorro de energía

Abstract: This paper focuses on the best use of energetic resources on industrial activity, according to the international and national need of competitiveness. Annually, a quantification of fuel savings is made and the economic benefit accomplished by the companies is checked. This was realized through the energy recovered from the elimination process occurred in the operation of a steam generator. A real case is discussed to convalidate the stated concepts.

Key words: Saving energy

INTRODUCCIÓN

Se estima que el 40% de energía térmica mundial es utilizada en la producción de energía eléctrica. Si la eficiencia térmica de los sistemas de generación fuese incrementada en un 5%, el ahorro de energía sería de enorme importancia (1). El menor consumo de combustible tiene un impacto positivo en la conservación de los recursos naturales y una menor emisión de gases y partículas contaminantes. El uso eficiente de la energía reduce los costos del producto y eleva la competitividad empresarial. El ahorro de energía se da a través de la racionalización, integración de los procesos y la recuperación térmica de líneas de alto contenido energético. El ahorro de combustible es considerado hoy como una "nueva fuente de energía" para la economía de una nación. En nuestro país, el número de generadores de vapor del tipo pirotubular se estima en 1500 (2), la mayor parte de estas unidades no cuenta con sistemas de recuperación de energía de las pur-

gas y gases de combustión. Sin embargo, cualquier sistema propuesto debe ser evaluado desde el punto de vista de su rentabilidad.

En este trabajo se propone recuperar la energía de las purgas de dos generadores de vapor del tipo pirotubular de 300 y 230 BHP marca ECLIPSE instalados en una planta textil en la ciudad de Lima. La instalación del sistema eleva la temperatura de alimentación del agua, de 30 °C, en que operan actualmente, a 79 °C. Como resultado de esta mejora, se reduce el consumo de combustible con los beneficios económicos para la empresa, y una disminución de emisiones gaseosas y partículas al medio ambiente.

Este estudio es ampliado para evaluar el efecto de la potencia del caldero y la presión de operación.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El control adecuado de la purga es de suma importancia para mejorar la eficiencia térmica

ca de un generador de vapor. Si la purga no es suficiente, los sólidos disueltos y otras impurezas presentes en el agua causan incrustaciones, depósitos, formación de espumas y el priming. Las espumas son formaciones de pequeñas burbujas de vapor dispersas en la superficie del líquido. El término priming se refiere a la ebullición repentina y explosiva. La incrustación y depósitos se deben a una disminución de la solubilidad de las sales de calcio, magnesio, hierro y otras impurezas que contiene el agua. La espuma y el priming generan arrastre de las sales, las cuales son transportadas por el vapor produciendo incrustaciones, obstrucciones y corrosión en las válvulas, trampas de vapor y la tubería de retorno de condensado. Este fenómeno ocurre de acuerdo con ciertas condiciones operativas, como la concentración de los sólidos disueltos, sólidos suspendidos, el diseño del caldero, la presión y la capacidad de operación del generador(3). Los fabricantes de generadores especifican el límite máximo de sólidos disueltos (SD) a fin de garantizar la calidad del vapor en términos de sólidos arrastrados que no superan 1ppm.

Para una operación eficiente, además de limitar los SD, es frecuente controlar la alcalinidad (M), la concentración de sulfatos (SS), Fe, Cu y otros componentes. La cantidad de purga puede establecerse específicamente por cualquiera de los componentes presentes en el agua de alimentación y el agua del interior del generador. En generadores de vapor de alta presión, la purga se realiza para mantener una concentración máxima de sílice (3 a 5 ppm) con el fin de evitar depósitos en las turbinas. Para mantener la concentración de los SD se descarga o purga una cantidad de líquido en forma intermitente o continua.

La purga intermitente consiste en abrir la válvula al drenaje de forma periódica. Por lo general, el calor que tiene la purga es desperdiciado. Las purgas intermitentes conducen a salinidades variables en la caldera, y en consecuencia a una operación no uniforme promoviendo el arrastre. La purga continua se lleva a efecto con un flujo controlado, eliminándose en forma continua las sales y man-

teniendo su concentración constante. Esta purga puede pasar a través de un intercambiador de calor y recuperar la mayor parte del calor sensible. Si la caldera opera a alta presión, parte de la purga puede ser flasheada a vapor de baja presión en uno o varios pasos antes de pasarla a través del intercambiador de calor.

La American Society of Mechanical Engineers (ASME) ha propuesto límites para la concentración de las impurezas en el agua de alimentación y en los Generadores de Vapor, tal como se detalla en las tablas 1, 2 y 3.

TABLA 1
CALIDAD DE AGUA RECOMENDADA PARA GENERADORES DE ALTA PRESIÓN CON RECALENTADORES, TURBINAS Y RESTRICCIONES EN LA PUREZA DEL VAPOR (4)

PRESIÓN DE OPERACIÓN Bar	LÍMITES EN EL AGUA DE ALIMENTACIÓN		
	HIERRO (ppm Fe)	COBRE (ppm Cu)	DUREZA TOTAL (ppm CaCO ₃)
0 - 21.0	0.1	0.05	0.300
21 - 32.0	0.050	0.025	0.300
32.0 - 41.0	0.030	0.020	0.200
41.0 - 52.0	0.025	0.020	0.200
52.0 - 62.0	0.020	0.015	0.100
62.0 - 69.0	0.020	0.015	0.050
69.0 - 103	0.010	0.010	0.000
103 - 138	0.010	0.010	0.000
PRESIÓN DE OPERACIÓN Bar	LÍMITES EN EL AGUA DE LA CALDERA		
	SÍLICE (ppm SiO ₂)	M (ppm CaCO ₃)	SD ppm
0 - 21.0	150	350	3500
21 - 32.0	90	300	3000
32.0 - 41.0	40	250	2500
41.0 - 52.0	30	200	2000
52.0 - 62.0	20	150	1500
62.0 - 69.0	8	100	1000
69.0 - 103	2	0	150
103 - 138	1	0	100

TABLA 2

LÍMITES DE LAS IMPUREZAS DEL AGUA EN GENERADORES ACUOTUBULARES, RECOMENDADOS POR LA AMERICAN BOILER AND AFFILIATED INDUSTRIES (5)

PRESIÓN DEL VAPOR EN LA SALIDA BAR	SD (ppm)	M (ppm CaCO ₃)	SS (ppm)	SÍLICE * COMO SiO ₂ (ppm)
0 – 21	3500	700	300	125
21 – 32	3000	600	250	90
32 – 41	2500	500	150	50
41 – 52	2000	400	100	35
52 – 62	1500	300	60	20
62 – 69	1250	250	40	10
69 – 103	1000	200	20	2
103 – 138	750	150	10	1
138 – MAYOR	500	100	5	1

* Límites de sílice en el agua para tener en el vapor entre 0.02-0.03 ppm de sílice

TABLA 3

PARÁMETROS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL GENERADOR QUE TRABAJA HASTA 17 BAR (250 PSI), RECOMENDADOS POR LA CASA MAGNUS EE.UU., ESPECIALIZADA EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

LÍMITE	DUREZA TOTAL DT (ppm CaCO ₃)	RESIDUAL DE FOSFATO = PO ₄	ALCALINIDAD PARCIAL P (ppm CaCO ₃)
MÍNIMO	0.0	40	170
MÁXIMO	3.0	60	420
	ALCALINIDAD TOTAL M (ppm CaCO ₃)	RESIDUAL DE SULFITO = SO ₃ (ppm CaCO ₃)	CLORUROS Cl (ppm CaCO ₃)
MÍNIMO	250	30	0
MÁXIMO	500	60	250

CONTROL DE LA PURGA

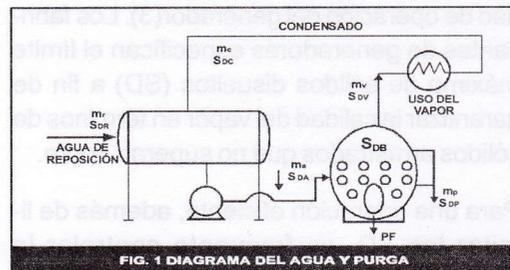
A. Ajuste de la purga

El ajuste de la purga se basa en:

- Medida de la conductividad que relaciona los S.D.
- La concentración de la sílice, cuando está limitada en el proceso
- La concentración de alcalinidad, si el valor límite genera arrastre

La purga continua se realiza mediante controladores de purga automática, que actúan de acuerdo con una sonda que mide la conductividad del agua en el generador

B. Caudal de purga



La cantidad de purga se define:

1. Basado en el porcentaje de agua de reposición

$$P(\%) = \frac{SDR(\mu\text{mhos})R}{SDB(\mu\text{mhos})B} \times 100\%$$

$$m_p = \left(\frac{SDR}{SDB} \right) m_r$$

2. Basado en el porcentaje de evaporación del generador de vapor

$$P(\%) = \left(\frac{SDA}{SDB-SDA} \right) \times 100\%$$

$$m_p = \left(\frac{SDA}{SDB-SDA} \right) m_v$$

Mediante un balance de masa se calcula los SD_A

$$SDA = \frac{m_R SD_R + m_C SD_C}{m_A}$$

Si X es la fracción del retorno

$$SD_A = SD_R (1 - X) + SD_C X$$

RECUPERACIÓN ENERGÉTICA DE LA PURGA

Los sistemas de recuperación de la energía dependen de la presión de operación, cantidad de purga y la forma en que se usará el calor. En los generadores de baja presión, el agua de la purga se deja evaporar bruscamente, y el vapor FLASH se envía a los calentadores o cualquier otro sistema que requiera energía a baja presión. En los generadores de alta presión, esta expansión se realiza en más de dos etapas y además utilizan un intercambiador de calor para recuperar el calor sensible de la purga final. Comúnmente, las calorías recuperadas se emplean para precalentar el agua de reposición. La presión en el tanque de expansión, se determina en función del uso del vapor generado.

ESTUDIO EXPERIMENTAL

Los datos experimentales fueron obtenidos del promedio mensual de dos generadores pirotubulares de las siguientes características:

Generador ECLIPSE de 300 BHP, 80% de carga y 81% de eficiencia, presión de operación 100 PSI y consumo de petróleo R-500 de 69 Gal/h y una concentración de SDA de 250 ppm

Generador ECLIPSE de 230 BHP, 80% de carga, 81% de eficiencia, presión de operación 100 PSI, consumo de petróleo R-500 de 84 Gal/h y una concentración de SDA de 250ppm.

La temperatura de alimentación del agua al generador $T_w = 30$ °C. El costo actual del combustible \$ 0.86 / galón, con un retorno del 75%.

METODOLOGÍA DE LA TOMA DE DATOS

En una primera etapa, los datos obtenidos determinan las pérdidas de energía que se producen en las purgas, las cuales son cuantificadas en función del mayor consumo de combustible R-500. Una segunda etapa permite proponer un sistema de recuperación de energía cuantificando los ahorros potenciales anuales. En una tercera etapa, se proyectan ahorros en función de la potencia del caldero y la presión de operación.

Para obtener los datos, se consideró lo siguiente:

- La información de la presión de operación, el caudal de vapor y los SDA fue reportada a un 80% de carga de operación, con un promedio de 6500 horas al año.
- El rendimiento fue obtenido por la información directa del responsable de la planta de vapor.
- Los SDB considerados son los que recomiendan los fabricantes de generadores de vapor, y están en concordancia con lo que se maneja en las plantas, que es de 3 500ppm

RESULTADOS

Primera parte

- | | |
|-------------------------------------------|----------------------------|
| ▶ Caudal de vapor por hora | 6 660 Kg |
| ▶ Caudal de purga por hora | 512 Kg |
| ▶ Caudal de purga por kg | 590 Kj |
| ▶ Calor perdido en la purga | 1.964 x 10 ⁹ Kj |
| ▶ Poder calórico neto del R-500 por galón | 1 50408 Kj |
| ▶ Galones de R-500 por año | 16 121Gal |
| ▶ Pérdida anual en dólares | 16 400 |

Segunda parte

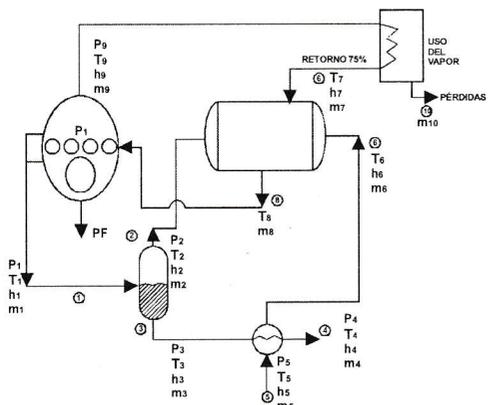


FIG. 2. INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DE LA PURGA

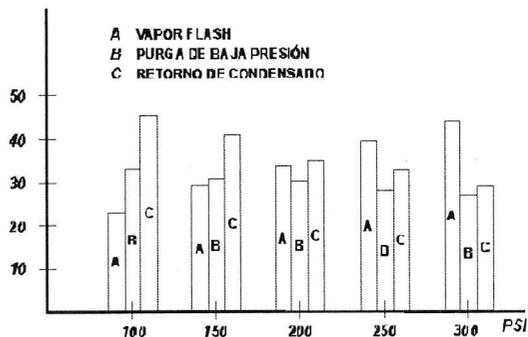


FIG. 3. PORCENTAJES DE ENERGÍA RECUPERADA EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN DE OPERACIÓN CON SDA = 230, RETORNO DE CONDENSADO DEL 75% Y UNA $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$

% ENERGÍA RECUPERADA POR LÍNEA DE PROCESO

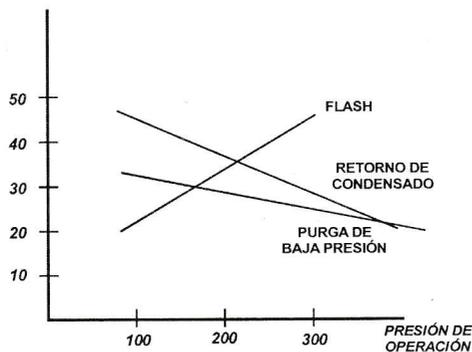


FIG. 4. PORCENTAJE DE ENERGÍA RECUPERADA POR LÍNEA DE PROCESO

ENERGÍA RECUPERADA Kj/h

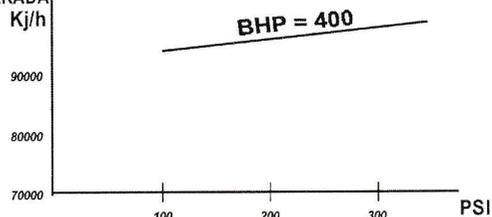


FIG. 5. RECUPERACIÓN DE ENERGÍA (Kj/h) PARA UNA CALDERA DE 400 BHP EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN DE OPERACIÓN

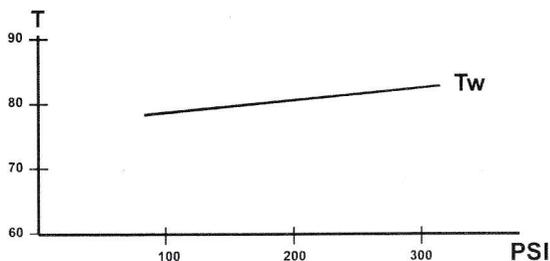


FIG. 6. INCREMENTO DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN (T_w) EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN DE OPERACIÓN

% DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

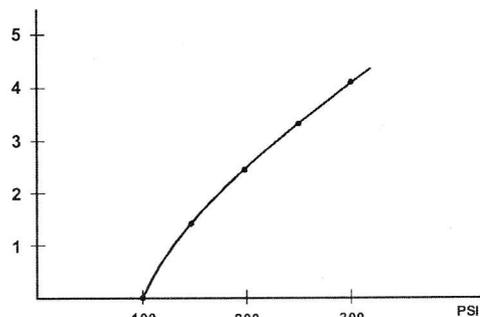


FIG. 7. PORCENTAJES DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA PARA UNA CALDERA DE 400 BHP EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN DE OPERACIÓN

TABLA 5
CONTRIBUCIÓN DE LAS CORRIENTES
EN LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

PURGA A BAJA PRESIÓN (kj / h)	VAPOR FLASH (kj / h)	RETORNO DE CONDENSADO (kj / h)
168 896	146 230	238 243
30.5%	26.4%	43.1
PURGA A BAJA PRESIÓN (kj / h)	TOTAL DE ENERGÍA RECUPERADA	AHORROS ANUALES
168 896	553 369	3.6 X 10 ⁹ kj
30.5%	100%	\$ 16 000*

La figura 2 muestra un sistema típico de recuperación de energía de la purga: las evaluaciones técnicas pueden incluir uno o más intercambiadores de calor para aprovechar el calor sensible de la pureza de baja presión.

La figura 3 muestra la importancia de recuperar el condensado y el calor sensible. En generadores de baja presión, es importante elevar la temperatura del agua de alimentación, siendo necesario optimizar el retorno de condensado y limitar las pérdidas de energía en las tuberías de retorno.

La figura 4 explica la influencia de la presión de operación en el ahorro de energía. Cuando la presión es 200 PSI, el vapor flash tiene mayor importancia que el calor sensible del condensado y el calor de purga a baja presión.

En la figura 5 se indica que a mayor potencia se recupera más energía. En el sector pesquero se tienen calderos de 600, 700 y 1000 BHP de potencia.

La figura 6 muestra que a mayor presión de operación, la temperatura del agua de alimentación se incrementa, mejorando el rendimiento de la caldera al disminuir el consumo de combustible para generar la evaporación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con un sistema de recuperación de energía, en las condiciones operativas para los dos

calderos ECLIPSE, se puede ahorrar anualmente un promedio de 18 000 galones de combustible Residual 500. Si este ahorro se multiplica por el precio actual del combustible, se tiene un potencial de ahorro de \$ 16 000 dólares al año.

REFERENCIAS

1. Silvia A Nebra, Análisis Exergético y Termoeconomía de los Procesos, Departamento de Energía, Facultad de Ingeniería Mecánica-Universidad del estado de Campiñas Brasil. Enero 2003
2. Estadística del Parque de Calderos, Dirección de Asuntos Ambientales, Ministerio de la Producción. 1999
3. Sheppard T. Powell, Manual de Aguas para Usos Industriales. Volumen II. Editorial Limusa S.A. 1987 Mexico
4. Nalco Chemical Company. Boletín Técnico Technifax 1995
5. Eskel Nordell, Tratamiento de Agua para la Industria y Otros Usos. Editorial CECSA 1979
6. Gonzalo Rodríguez Guerrero, Operaciones de Calderas Industriales. ECOE Ediciones Santa Fe de Bogota 2000
7. Anthony Lawrence Koham, Manual de Calderas, principios operativos. Edit. Mc Graw Hill 2000
8. II Simposium Internacional de Ingeniería Química, Conversión de Agua y Reuso en la Industria. C.I.P. Nov. 2001

RECONOCIMIENTO

El autor desea expresar su agradecimiento al personal técnico de la empresa TEXTILIA S.A., por su valiosa contribución y las facilidades en la obtención de los datos de operación utilizados en el presente trabajo.

SIMBOLOGÍA

- SD = Sólidos disueltos o minerales disueltos a nivel de iones
- Ppm = Unidad de concentración, expresado como mg de un componente por kg de agua

M	= Alcalinidad total, que expresa la concentración de iones que generan alcalinidad: HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^-	SD_C	= Sólidos disueltos en el condensador
SS	= Sólidos suspendidos, partículas finamente dispersas en el agua de difícil sedimentación.	SD_A	= Sólidos disueltos en la alimentación en ppm
PF	= Purgas de fondo, elimina lodos acumulados en el generador.	$(\text{mmhos})_R$	= Conductividad en el agua de reposición en m mhos
P(%)	= Porcentaje de purga, respecto al agua de reposición o el porcentaje de evaporación	$(\text{mmhos})_B$	= Conductividad en el agua en el generador en m mhos
SD_R	= Sólidos disueltos en el agua de reposición en ppm	m_R	= Caudal de agua de reposición
SD_B	= Sólidos disueltos máximos permitidos en el generador en ppm	m_P	= Caudal de purga
		m_V	= Caudal de vapor producido por el generador
		m_C	= Caudal de retorno de condensado
		m_A	= Caudal de alimentación de agua