

# SISTEMA PARA MEJORAR LA EFICIENCIA TÉRMICA DE LOS GENERADORES DE VAPOR, MEDIANTE LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DE LAS PURGAS

Ing. José Huapaya Barrientos  
Facultad de Ingeniería Química y Manufacturera  
E-mail: jhbperu@terra.com.pe

## 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.*

## 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.*

## 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 es 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 parque de generadores de vapor del tipo pirotubular se estima en 1500 [2], la mayor parte de estas unidades no cuentan con sistemas de recuperación de energía de las purgas 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 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 será ampliado para evaluar el efecto de mejorar la calidad de agua en la alimentación, y el uso de aditivos orgánicos que reducen el número de purgas.

## FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

El control adecuado de la purga es de suma importancia para mejorar la eficiencia térmica de un generador de vapor. Si la purga no es suficiente, los sólidos disueltos y otras impurezas presentes en el agua es la causa de 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 debe 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 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, sulfatos, SS, Fe, Cu y otros componentes. La cantidad de purgas puede basarse específicamente por cualquiera de los componentes presentes en el agua de alimentación y en el interior del generador.

En generadores de vapor de alta presión, se purga para mantener una concentración máxima de sílice (3 a 5 ppm) con el fin de evitar depósitos en las turbinas. El método de mantener la concentración de los SD, es descargar o purgar una cantidad de líquido en forma intermitente o continua.

La purga intermitente consiste en abrir la válvula al drenaje, efectuando esta operación en una forma periódica. Por lo general, el calor que tiene la purga es desperdiciada. 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 eliminando continuamente una cantidad de las sales a un flujo controlado de manera que mantiene una concentración constante en la caldera reduciendo el arrastre.

Esta purga puede pasar a través de un intercambiador de calor y recuperar la mayoría del calor sensible. Si la caldera opera a alta presión, parte de la purga

puede ser “falseada” a vapor de baja presión en uno o varios pasos antes de pasarlo 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.

**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 <sub>3</sub> )
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 <sub>2</sub> )	M (ppm CaCO <sub>3</sub> )	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 <sub>3</sub> )	SS (ppm)	SÍLICE * COMO SiO <sub>2</sub> (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.

LIMITE	DUREZA TOTAL DT (ppm CaCO <sub>3</sub> )	RESIDUAL DE FOSFATO DE PO <sub>4</sub> <sup>≡</sup>	ALCALINIDAD PARCIAL P (Ppm CaCO <sub>3</sub> )
MINIMO	0,0	40	170
MÁXIMO	3,0	60	420
ALCALINIDAD TOTAL M (ppm CaCO <sub>3</sub> )	RESIDUAL DE SULFITO SO <sub>3</sub> <sup>≡</sup> (ppm CaCO <sub>3</sub> )	CLORURO S Cl (ppm CaCO <sub>3</sub> )	PH
250	30	0	10,5
500	60	250	11,5

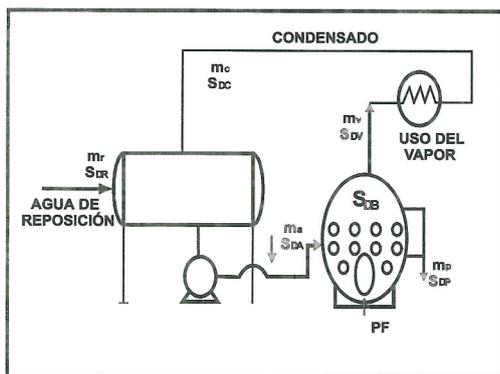
### CONTROL DE LA PURGA

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.

Caudal de purga.-



**Fig. 1** Diagrama del Agua y Purga.

La cantidad de purga se define:

B1 Basado en el porcentaje de agua de reposición

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

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

B2 Basado en el porcentaje de evaporación del generador de vapor

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

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

P(%) = Porcentaje de purga, respecto al agua de reposición o el porcentaje de evaporación

SD<sub>R</sub> = Sólidos disueltos en el agua de reposición, en ppm

SD<sub>B</sub> = Sólidos disueltos máximos permitidos en el generador, en ppm

SD<sub>C</sub> = Sólidos disueltos en el condensado

SD = Sólidos disueltos en la alimentación, en ppm

(μmhos)R = Conductividad en el agua de reposición en, μ mhos

(μmhos)B = Conductividad en el agua en el generador en, μ mhos

m<sub>R</sub> = Caudal de agua de reposición

m<sub>p</sub> = Caudal de purga

m<sub>v</sub> = Caudal de vapor producido por el generador

m<sub>C</sub> = Caudal de retorno de condensado

m<sub>A</sub> = Caudal de alimentación de agua

Mediante un balance de masa se calcula los SD<sub>A</sub>

$$SD_A = \frac{m_R S_{DR} + m_C S_{DC}}{m_A}$$

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 pirrotubulares 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 84 gal/h y una concentración de  $SD_A$  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 69 gal/h y una concentración de  $SD_A$  de 250 ppm.

La temperatura de alimentación del agua al generador  $T_w = 30^\circ\text{C}$ , siendo el costo actual del combustible \$ 0.86 / Galón, con un retorno del 75%.

### METODOLOGÍA DE LA TOMA DE DATOS

Los datos obtenidos en una primera etapa determinan las pérdidas de energía que se producen en las purgas, los cuales son cuantificados 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. 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, caudal de vapor y  $SD_A$  fueron reportadas a la carga de operación (80%), con un promedio de horas al año de 6500.

El rendimiento fue obtenido por la información directa del responsable de la planta de vapor.

Los  $SD_B$  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 3500ppm.

### RESULTADOS

#### 1ra. parte

Caudal de vapor por hora	6660 kg
Caudal de purga por hora	512kg
Caudal del vapor flash	59kg
Calor perdido en la purga (6500 h por año)	$1.964 \times 10^9 \text{kJ}$
Poder calórico neto del R-500 por galón	150408kJ
Volumen de R-500 por año	61 m <sup>3</sup>
Pérdida anual, en dólares	16400

#### 2da. parte

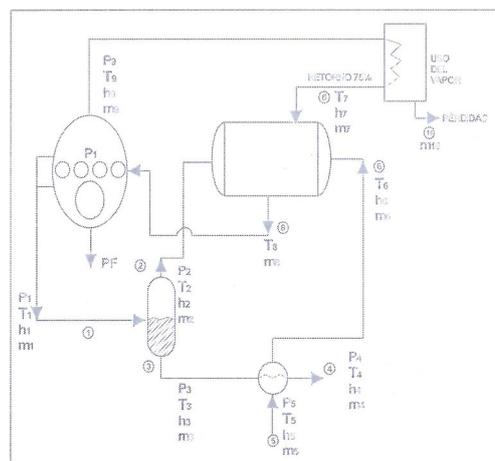
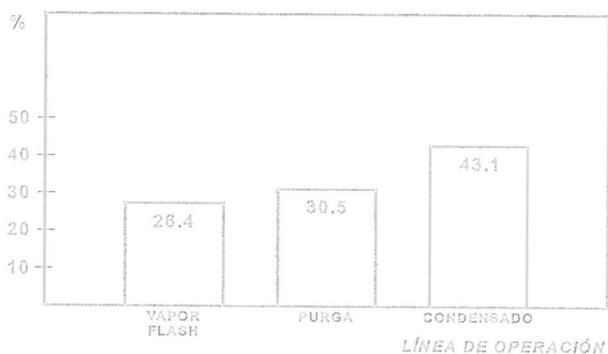


Fig. 2 Instalación de un sistema de recuperación de energía de la purga.

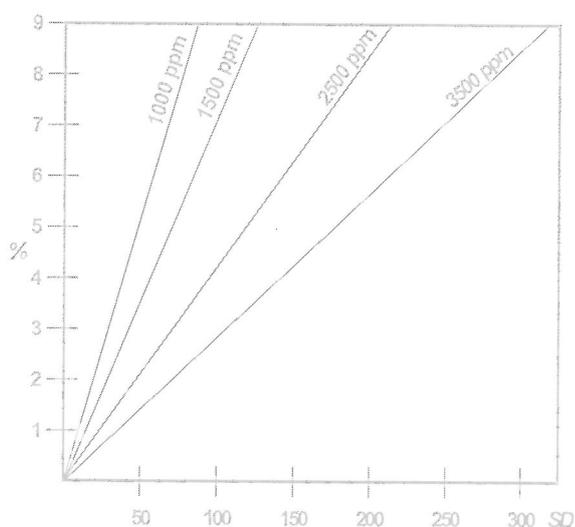
**Tabla 5.** Contribución de las corrientes en la recuperación de energía.

PURGA A BAJA PRESIÓN (kJ/h)	VAPOR FLASH (kJ/h)	RETORNO DE CONDENSADO (kJ/h)	TOTAL DE ENERGÍA RECUPERADA	AHORROS ANUALES
168896 30,5%	146230 26,4%	238243 43,1	553369 100%	3,6 X 10 <sup>9</sup> kJ \$ 16000*

\* Considerando una eficiencia del 80% de recuperación.



**Fig. 3** Porcentaje de energía recuperada por línea de operación.



**Fig. 4** Variaciones del porcentaje de purga en función de los sólidos disueltos en el agua de alimentación y la máxima concentración permitida en los generadores de vapor.

## CONCLUSIONES

Los mercados internacional y nacional requieren de empresas competitivas, siendo un factor de competitividad el uso eficiente de los insumos energéticos.

De acuerdo a los resultados representados en la Fig. 4, podemos señalar que el caudal de purga aumenta, cuando se incrementan los SD en el agua de alimentación. Asimismo, la purga se incrementa cuando disminuye el límite de sólidos disueltos en el generador.

La Fig. 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.

Con un sistema de recuperación de energía, en las condiciones operativas de los calderos ECLIPSE, se puede ahorrar anualmente un promedio de 18000 galones de combustible Residual 500.

Si este ahorro se multiplica por el número de generadores de vapor en operación en el país, resulta de mucha significancia en el ahorro de divisas y se contribuye con preservar la calidad del aire ambiental.

## RECONOCIMIENTO

El autor desea expresar 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<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, OH<sup>-</sup>.

SS = Sólidos suspendidos, partículas finamente dispersas en el agua de difícil sedimentación.

PF = Purgas de fondo, elimina lodos acumulados en el generador.

### REFERENCIAS

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