

# ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN CALDERAS

En el presente artículo se dan a conocer los principales parámetros que influyen en la eficiencia térmica de las calderas, así como también, el análisis de las alternativas existentes para reducir las pérdidas de calor de mayor importancia. Mediante gráficos y ejemplos prácticos se dan a conocer los ahorros de combustible que son posibles de conseguir.

## **Introducción.**

La eficiencia de una caldera, dicho de manera simple, corresponde a la razón entre el calor absorbido (por el agua, vapor, fluido térmico, etc.) y el calor liberado en el equipo. La diferencia entre el calor liberado y el calor absorbido corresponderá a las pérdidas de calor de la caldera.

Dado que una caldera consume durante un año, por concepto de uso de combustible, varias veces el valor (capital) inicial de uno de estos equipos, los ahorros que son posibles de obtener con el incremento de solo un par de puntos de eficiencia son considerables.

Una gran mayoría o prácticamente la totalidad de las plantas que poseen calderas no tienen claridad de la importancia que tiene, en la reducción de los costos operacionales (ahorro de combustible), la operación de los generadores de vapor, fluido térmico o agua caliente en condiciones de máxima eficiencia.

## **Pérdidas de calor principales.**

A continuación se dan a conocer las pérdidas de calor principales que afectan a una caldera, los mecanismos existentes para reducir estas pérdidas y los potenciales ahorros de combustible (dinero) que son posibles de conseguir.

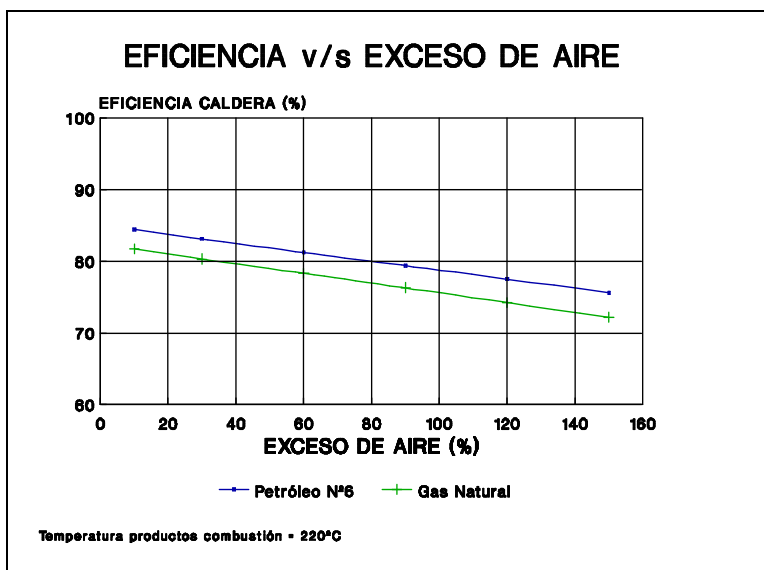
Para poder cuantificar la influencia de las diferentes pérdidas de calor que serán presentadas más adelante, se considerarán los ahorros de dinero (combustible) posibles de conseguir, tomando en cuenta una caldera de 20 ton/h (producción de vapor).

1. Pérdida de calor asociada al exceso de aire.

El concepto de “exceso de aire” tiene relación con la cantidad de aire para la combustión que debe ser entregado por sobre el estequiométrico, para lograr una buena mezcla aire/combustible y con ello una buena combustión. La magnitud del exceso de aire requerido por una caldera varía principalmente de acuerdo al tipo de combustible y a la tecnología del quemador. En la tabla N°1 se pueden observar valores referenciales para diferentes tipos de combustibles y quemadores.

COMBUSTIBLE	TIPO DE QUEMADOR	EXCESO DE AIRE MÍNIMO
Gas Natural	Atmosférico	65 %
	Tipo Anillo	45 %
	Boquillas	10 %
	Bajo exceso de aire	1 %
Petróleo	Atomizado por presión	15 %
	Copa rotativa	22 - 35 %
	Atomizado con vapor o aire	8 - 15 %
Carbón	Parrilla móvil	36 %
	Parrilla fija	36 %
	Pulverizado	8 %

**Tabla N°1: Valores referenciales de exceso de aire de acuerdo al tipo de combustible y quemador.**



**Gráfico N°1: Eficiencia v/s exceso de aire para el caso del petróleo residual y el gas natural (considerando una temperatura de salida de gases de 220°C).**

En el gráfico N°1 se observa la eficiencia térmica de una caldera en relación al exceso de aire con el que se encuentra trabajando, tanto para el caso de gas natural como para el caso del petróleo.

A modo de ejemplo, analicemos el ahorro de combustible que significaría la operación de nuestra caldera con un exceso de aire de un 20 % en vez de un 60%. En un período de un año el ahorro asociado al menor consumo de combustible, sería del orden de los US\$45,000.00., considerando un precio de US\$150.00/ton de petróleo residual. A modo de referencia señalemos que este “ahorro” es equivalente al precio de na de los quemadores de la caldera (en general calderas piro-tubulares con una capacidad superior a 15.500 Kg/h de vapor, poseen dos fogones y deben utilizar dos quemadores).

En general se sugiere trabajar con excesos de aire levemente superiores a los presentados en la tabla N°1, para compensar problemas de combustión asociados a variaciones en las propiedades del combustible y variaciones en el aire requerido para la combustión (presión atmosférica y temperatura).

El trabajar con excesos de aire inferiores a los recomendados también provoca disminuciones drásticas en la eficiencia de una caldera, debido a la combustión incompleta del combustible. Otros problemas asociados a la operación con excesos de aire insuficientes son la formación de depósitos al interior de la caldera (hollín) y la emisión de productos de la combustión con características explosivas y tóxicas.

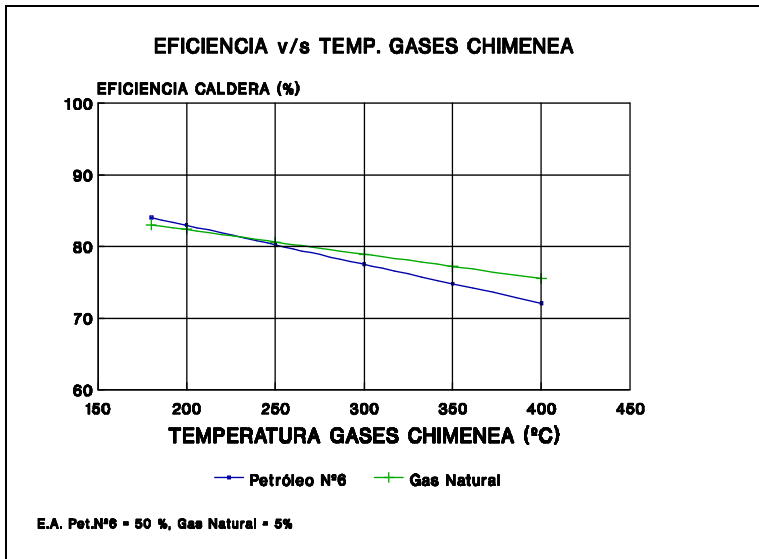
La determinación del exceso de aire con el que está trabajando una caldera puede ser efectuada en forma sencilla, a través de la medición del contenido de O<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub> y CO presente en los productos de la combustión.

Los procedimientos que deben realizarse para reducir las pérdidas de calor asociados a un exceso de aire diferente al requerido, tienen relación con: ajuste de la presión de combustible, ajuste de la presión del hogar, “swirl” en la entrada de aire al quemador, presión de atomización, temperatura del combustible, posición del quemador, espesor de la cama de combustible sólido, razón aire sobre y bajo parrilla, distribución de aire bajo parrilla, etc.

## 2. Pérdida de calor asociada a la temperatura de los productos de las combustión.

La pérdida de calor asociada a los productos (gases) de la combustión (en chimenea) representa un al rededor de un 18 % para el caso de las calderas que utilizan gas y 12 % para el caso de las calderas que utilizan carbón y petróleo.

En el gráfico N°2 se observa la relación entre la eficiencia y la temperatura de los productos de la combustión en la chimenea para el caso del gas natural y el petróleo residual. El exceso de aire considerado en la confección de este gráfico, fue de 50 % y 5 % para petróleo residual y gas natural respectivamente.

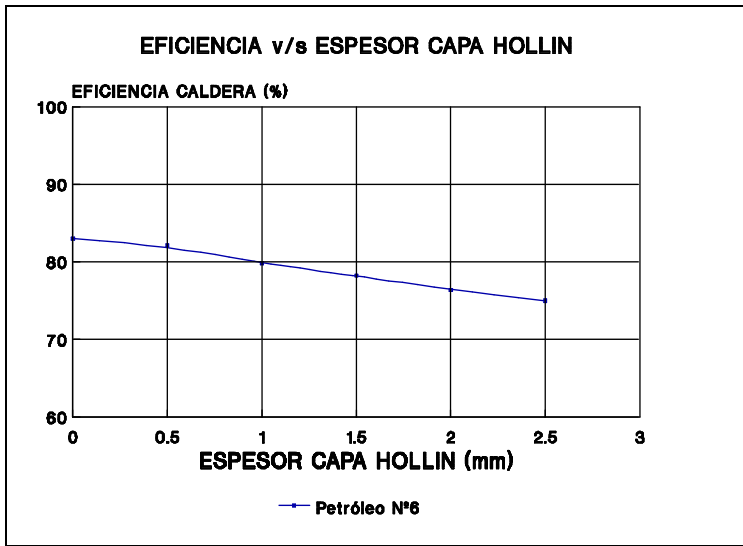


**Gráfico N°2: Eficiencia**

**v/s temperatura de los productos de la combustión.**

En este gráfico queda de manifiesto como un aumento en la temperatura en los productos de la combustión puede provocar una significativa reducción de la eficiencia de las calderas.

Regresemos al ejemplo práctico de nuestra caldera de 20 t/h y supongamos que producto del ensuciamiento del equipo la temperatura aumentó de 220 °C a 350 °C. Este aumento en la pérdida de calor en los productos de la combustión, y consiguiente reducción en la eficiencia, traería consigo un incremento en el gasto anual por concepto de consumo de combustible de \$147,000.00. Este monto equivale al precio total de la caldera!.

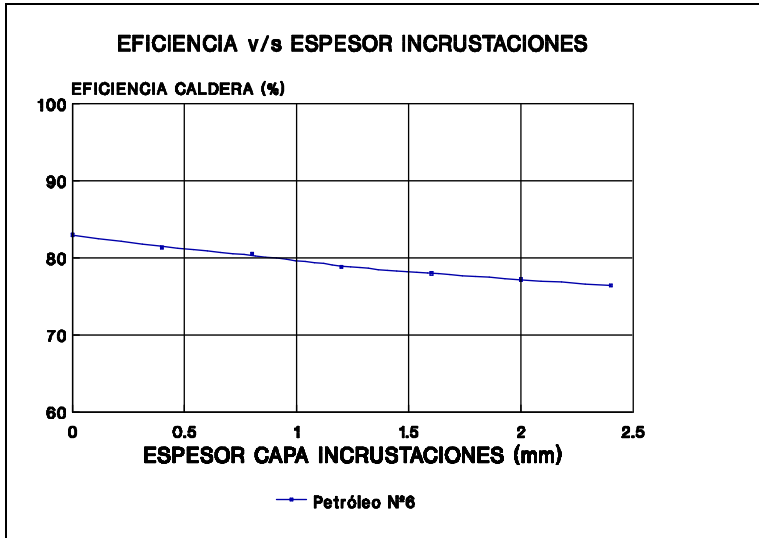


**Gráfico N°3: Eficiencia v/s espesor capa hollín (lado fuego).**

En los gráficos N°3 y N°4 se observa la influencia de hollín (ensuciamiento lado gases) e incrustaciones (ensuciamiento lado agua) en la eficiencia de una caldera. En el caso de estos gráficos se relaciona el espesor de las capas de hollín e incrustaciones con el deterioro de la eficiencia. Recordemos que tanto el hollín como las incrustaciones actúan como aislantes deteriorando el flujo de calor entre los productos de la combustión y el fluido contenido en la caldera. La acumulación de incrustaciones es especialmente crítica ya que trae consigo problemas de refrigeración de las superficies metálicas de una caldera, pudiendo provocar daños catastróficos por sobrecalentamiento.

En los gráficos N°3 y N°4 se observa como capas de hollín e incrustaciones de solo un par de milímetros pueden provocar deterioros considerables en la eficiencia de una caldera. En base a lo observado en estos gráficos, queda de manifiesto la importancia de un buen ajuste de los quemadores y limpiezas periódicas del lado gases para evitar la acumulación de hollín; y por sobretodo contar con excelente tratamiento de agua.

Para el caso de una caldera, que a pesar de tener sus superficies internas y externas libres de hollín e incrustaciones, presenta una elevada temperatura de salida de los gases es recomendable considerar la instalación de sistemas recuperadores de calor en la salida de la caldera.



**Gráfico N°4: Eficiencia v/s espesor de las incrustaciones (lado agua).**

Entre estos sistemas recuperadores de calor se destaca el economizador (o precalentador de agua) y también el precalentador de aire; siendo este último utilizado generalmente en el caso de calderas que utilizan combustibles sólidos.

Para evaluar la instalación de un economizador u otro sistema de recuperación de calor, se deben tomar en cuenta las temperaturas mínimas admisibles de los productos de la combustión, para no alcanzar el punto rocío ácido (temperatura de condensación de ácidos contenidos en los productos de la combustión). Estas temperaturas mínimas admisibles son presentadas, junto a los puntos de rocío de los diferentes combustibles y las temperaturas mínimas del agua de alimentación, en la tabla N°2.

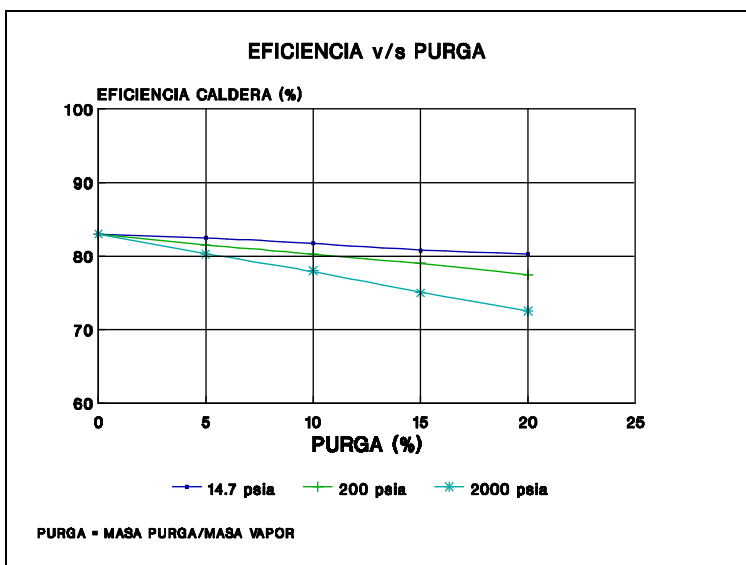
COMBUSTIBLE	PUNTO ROCÍO ÁCIDO	TEMP. MÍNIMA EN CHIMENEA	TEMP. ADMISIBLE AGUA ALIMENTACIÓN
Gas Natural	65 °C	121 °C	100 °C
Petróleo Liviano	82 °C	135 °C	100 °C
Petróleo bajo azufre	93 °C	148 °C	104 °C
Petróleo alto azufre o carbón	110 °C	160 °C	115 °C

**Tabla N°2: Puntos de rocío ácido, temperaturas mínimas recomendadas para los productos de la combustión y temperaturas admisibles del agua alimentación para prevenir corrosión en recuperadores de calor, de acuerdo al tipo de combustible.**

Consideremos nuevamente el caso de nuestra caldera de 20 ton/h, que utiliza petróleo residual (de elevado contenido de azufre) como combustible. Supongamos que las superficies de transferencia están limpias, pero que a pesar de esto la temperatura de salida de los gases alcanza los 380 °C. De acuerdo a la tabla N°2 podríamos bajar la temperatura de los productos de la combustión hasta 160 °C. Considerando una reducción de la temperatura de los gases en chimenea de 380 a 200 °C, lograríamos un ahorro anual, por concepto de menor consumo de combustible, de US\$170,000.00, superando con olgura el valor de esta caldera.

#### 4. Pérdida de calor en la purga.

En el gráfico N°5 se observa la relación entre el porcentaje de purga y la reducción de eficiencia, para diferentes presiones de operación de una caldera.

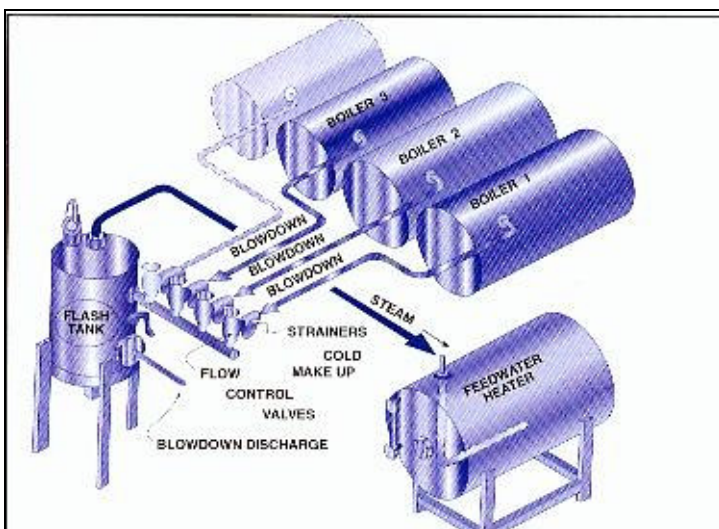


**Gráfico N°5: Relación entre porcentaje de purga y eficiencia de una caldera, de acuerdo a la presión de trabajo.**

Todos aquellos mecanismos tendientes a reducir la cantidad de agua/vapor eliminada a través de la purga de la caldera permitirán conseguir una reducción en las pérdidas de calor asociadas a la purga. Entre estos mecanismos figura un óptimo tratamiento de agua, el uso de purgas continuas (operadas por sistemas control, que incluyen la medición de las características del agua) y, para el caso de las purgas manuales, contar con operadores capacitados para mantener adecuados parámetros del agua de la caldera. Se estima que un adecuado tratamiento de agua y una buen manejo por parte de los operadores puede traer consigo ahorros de combustible cercanos al 1 %. Es decir, US\$18,000.00 para el caso de la caldera utilizada como ejemplo.

También es posible considerar la incorporación de sistemas recuperadores de calor en los sistemas de purga de una caldera. En la figura N°1 se observa un sistema de recuperación de calor acoplado a la purga de un conjunto de calderas. El “vapor flash” generado en el estanque de expansión es conducido al estanque de almacenamiento de agua, como medio de precalentamiento, y el agua o condensado puede ser utilizado para el precalentamiento del agua de reposición en un intercambiador de calor (carcaza/tubos). Este sistema de recuperación de calor podría permitir ahorros de combustible del orden del 1 %, es decir, US\$18,000.00.

Estos sistemas de recuperación del calor proveniente de la purga son aplicables si el agua de reposición de una caldera supera el 5%.

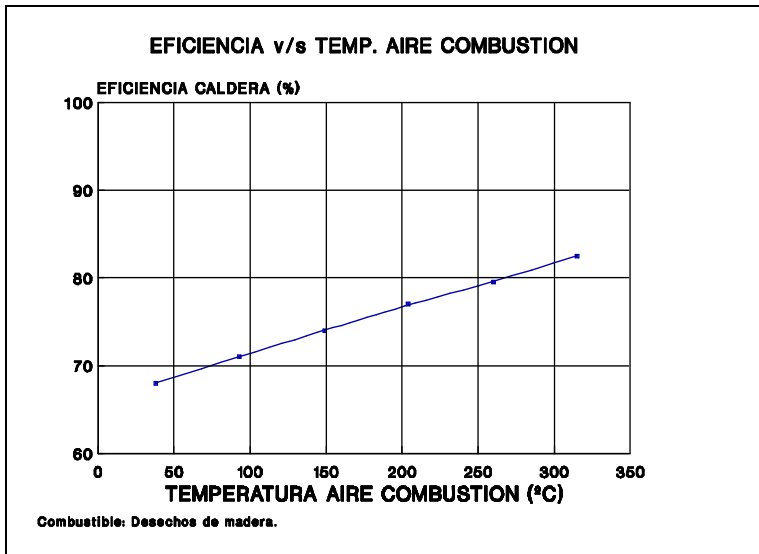


**Figura N°1: Sistema de recuperación de calor de la purga.**

#### 5. Pérdidas de calor debido a no contar con un sistema de precalentamiento del aire requerido para la combustión:

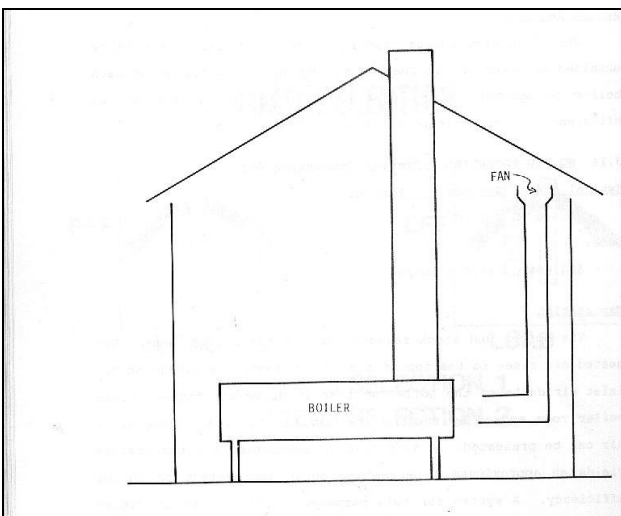
El precalentamiento del aire requerido para la combustión es utilizado principalmente en calderas que utilizan combustibles sólidos (carbón, madera, biomasa, etc.), ya que, una mayor temperatura del aire de la combustión permite obtener una combustión más completa. En el gráfico N°6 se observa el importante aumento de eficiencia conseguido, para el caso de la utilización de desechos de madera, al precalentar el aire requerido para la combustión. Al calentar el aire para la combustión hasta 260 °C es posible lograr incrementos en la eficiencia del orden de un 15 %.





**Gráfico N°6: Relación entre eficiencia y temperatura del aire de combustión, para el caso de la utilización de desechos de madera como combustible.**

Para el caso de las calderas que utilizan combustibles líquidos y gaseosos es posible instalar un sistema como el mostrado en la figura N°2, donde se aprovecha la estratificación de aire existente generalmente en una sala de calderas. El sistema contempla la aspiración de aire de mayor temperatura existente en la parte alta de la sala de calderas. Se estima que con este tipo de sistema sería posible lograr un aumento en la eficiencia y con ello ahorros anuales de combustible cercanos al 1 %. Sin embargo, la mayor temperatura del aire para la combustión traerá consigo temperaturas de llama más altas y con ello un aumento en la formación de óxidos de nitrógeno (Revista Induambiente N°21: “Bajo el Signo de la X”).



**Figura N°2: Sistema para capturar aire caliente en una sala de calderas**

6. Pérdidas de calor asociadas al uso de vapor en vez de aire comprimido par la atomización de petróleo residual.

Aire comprimido o vapor son utilizados para lograr la atomización de los petróleos residuales. La energía requerida para obtener el aire comprimido es generalmente solo una pequeña fracción de la energía requerida para producir el vapor para la atomización. Se estima que la utilización de aire comprimido en vez de vapor, para la atomización de petróleos residuales, permite aumentar la eficiencia en un 1 %. Es decir ahorrar en un año aproximadamente US\$18,000.00.

La evaluación del tipo de medio (vapor o aire comprimido) utilizado para atomizar el petróleo debe considerar los costos asociados a la obtención del aire comprimido y las recomendaciones del fabricante del quemador.

7. Pérdidas de calor asociadas a la peración dinámica, puntos de máxima eficiencia y pérdidas de calor por radiación:

Las pérdidas de calor asociadas a la operación dinámica de una caldera pueden ser considerables y tienen relación con un sobredimensionamiento de la caldera con respecto a la demanda de energía (vapor, agua caliente, etc.). La operación dinámica de una caldear se refiere a las variaciones de carga y a los ciclos de encendido y apagado que realiza. Lo ideal es que una caldera trabaje en formas continua no apagándose jamás.

En la tabla N°3 se observa la relación entre los ciclos de encendido en una hora y la pérdida de energía asociada.

Nº DE CICLOS/HORA	PÉRDIDA DE ENERGÍA
2	2
5	8
10	30

**Tabla N°3: Relación entre los ciclos de encendido/apagado y la pérdida de energía.**

La importante pérdida de energía asociada a los ciclos de encendido/apagado tiene relación con la pérdida de calor por radiación y la pérdida de calor asociada al aire que pasa a través de la caldera durante la ventilación que forma parte de cada secuencia de encendido de un quemador, así como también, el aire que pasa a través de la caldera cuando esta está detenido debido a la acción del tiraje natural del equipo.

Para reducir esta pérdida al máximo es sumamente importante definir correctamente el tamaño de la caldera requerida para cierto proceso productivo, o bien, ajustar el tamaño de las boquillas del quemador para asegurar un funcionamiento continuo.

En el caso de disponer de más de una caldera, es sumamente importante conocer la curva de eficiencia en relación a la carga, para definir la combinación ideal de estos equipos, que permita la operación en puntos de máxima eficiencia.

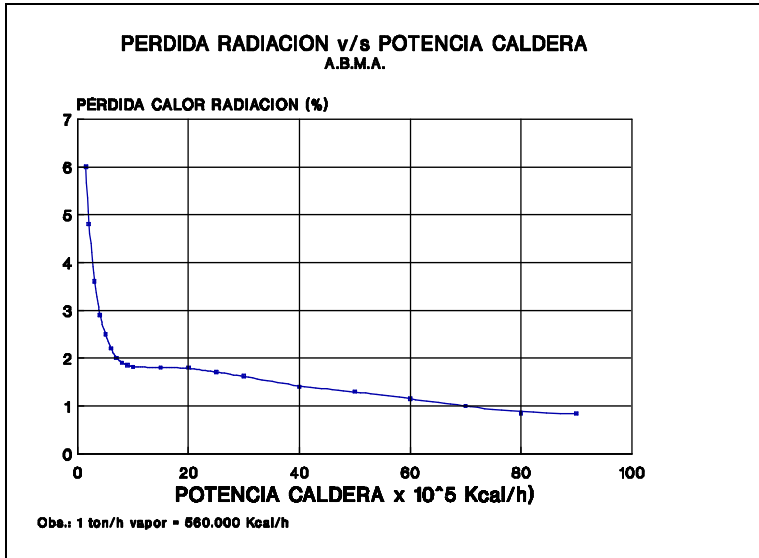
CARGA CALDERA (%)	PERDIDA POR RADIACION (Kcal/h)	CALOR LIBERADO (Kcal/h)	PÉRDIDA CALOR RADIACIÓN (%)
10 %	224.000	1.120.000	20 %
25 %	224.000	2.800.000	8 %
50 %	224.000	5.600.000	4 %
100 %	224.000	11.200.000	2 %

**Tabla N°4: Relación entre pérdida de calor por radiación y carga de la caldera.**

En relación a la pérdida de calor por radiación de una caldera, su valor es constante independiente de la carga a la que se encuentre operando, sin embargo, su influencia en la eficiencia varía con la carga de la caldera. Para que esta afirmación se entienda mejor, recurramos nuevamente a nuestra caldera de 20 t/h. En la tabla N°4 se muestra la variación de la pérdida de calor por radiación de esta caldera con la carga a la que se encuentre operando. En esta tabla se observa como aumenta la incidencia (porcentual) de la pérdida de calor por radiación en la eficiencia de la caldera al disminuir la carga; a pesar de que su valor se mantiene constante independiente de la carga.

Este hecho nos lleva a llamar la atención sobre la importancia de operar una caldera en sus puntos de máxima eficiencia, como generalmente ocurre para cargas superiores al 75 %.

En el gráfico N°7 se presenta la relación entre las pérdidas de calor por radiación y la capacidad de una caldera, según la American Boiler Manufacturing Association.



**Gráfico N°7: Pérdida de calor v/s potencia caldera de acuerdo a la A.B.M.A.**

### **Comentarios.**

El análisis de las pérdidas de calor principales que afectan el rendimiento de una caldera, realizado en este artículo, pretende llamar la atención sobre los importantes ahorros de energía y combustible que pueden ser logrados con cuidados y regulaciones mínimas de los generadores de vapor de una planta.

En la actualidad la reducción de los costos operacionales y los ahorros de energía asociados deben ser considerados en las políticas y estrategias de las empresas que pretenden liderar los cada vez más competitivos mercados existentes en estos tiempos.

Las empresas nacionales deben tener claridad en cuanto a que sus competidores ya no se encuentran solo dentro de las fronteras de nuestro país, sino que principalmente provienen del extranjero, donde si existe una tremenda conciencia con respecto a los ahorros energéticos y a la disminución de los gastos operacionales.

Arnulfo Oelker Behn  
THERMAL ENGINEERING LTDA.