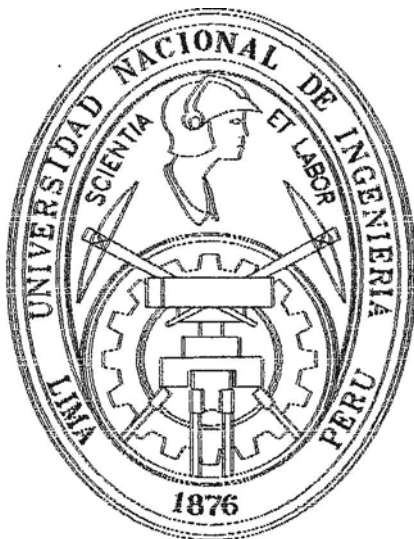


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA Y MANUFACTURERA



***“EVALUACION ENERGETICA EN CALDERAS
INDUSTRIALES”***

**INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**

INGENIERO QUÍMICO

**POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE
CONOCIMIENTOS**

PRESENTADO POR:

ELSA MERCEDES CARBAJAL YANAC

LIMA – PERÚ

2002

RESUMEN

En el presente informe se presenta el procedimiento seguido para identificar y calcular las pérdidas de energía en un caldero, y por consiguiente conocer el grado de aprovechamiento de la energía aportada al sistema por el combustible, que en términos técnicos se denomina eficiencia.

En la determinación de la eficiencia se ha utilizado tanto el método directo identificando las corrientes de entrada y salida, y el método indirecto o de pérdidas separadas que incluye medidas puntuales utilizando un analizador de gases, y criterios de pérdidas de energía.

Se presentan tres casos prácticos para su evaluación, se realiza el cálculo de eficiencia a diferentes cargas, y se proponen acciones con la finalidad de corregir deficiencias que se traducen en pérdidas de energía, y que implican un mayor consumo de combustible y el incremento de la emisión de gases de combustión.

Los casos evaluados son:

Caldero pirotubular

Caldero acuotubular

Caldero acuotubular que utiliza bagazo como combustible

El cálculo de eficiencia para los dos primeros casos, se ha realizado a dos cargas y el tercer caso con carga alta.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones respectivas.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION	4
2. DESARROLLO DE CONCEPTOS Y TECNICAS.....	5
2.1 COMBUSTION	5
2.2 COMBUSTIBLES.....	8
2.3 VAPOR.....	10
2.4 CALDEROS	12
2.4.1 PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN	15
2.4.2 FACTOR DE CARGA.....	19
2.4.3 CIRCUITO DE AGUA.....	21
3. EVALUACION ENERGÉTICA EN CALDERAS.....	22
3.1 METODOS PARA LA DETERMINACION DE EFICIENCIA TERMICA	23
3.1.1 METODO DIRECTO	23
3.1.2 METODO INDIRECTO.....	24
3.2 DETERMINACION DE EFICIENCIA ENERGETICA EN CALDEROS.....	29
3.2.1 ACTIVIDADES A DESARROLLAR.....	29
3.2.2 CASOS PRACTICOS.....	31
CALDERO 1.....	33
CALDERO 2.....	37
CALDERO 3.....	41
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
4.1 CONCLUSIONES.....	43
4.2 RECOMENDACIONES.....	44
5. BIBLIOGRAFIA.....	46
APÉNDICE A.....	47
APÉNDICE B.....	49
APÉNDICE C.....	54

1. INTRODUCCION

Los equipos de combustión de mayor uso en las plantas industriales son los generadores de vapor, estos son usados para transferir energía de un combustible a un fluido que transporta calor a diferentes temperaturas, ya sea para su uso en los procesos o para calentamiento.

La gran mayoría de calderas en el Perú queman un combustible líquido derivado del petróleo, tales como el Diesel N° 2, en las pequeñas y medianas instalaciones, o los Residuales N° 5, 6 ó 500 en instalaciones medianas ó grandes. En muchos casos las calderas trabajan con eficiencia térmicas menores a la máxima alcanzable, lo cual implica un mayor consumo de combustibles y el consiguiente incremento de gases de combustión.

Para lograr una combustión eficiente en calderas, no solamente se requiere que el combustible sea suministrado al quemador a una adecuada presión y temperatura, o que el exceso de aire sea el requerido; si no también que el estado de mantenimiento del sistema de combustión sea óptimo.

El uso eficiente de la energía generada por un combustible, reduce las emisiones a un mínimo, siendo esta una solución para disminuir la emisión de los gases causantes del efecto invernadero y atenuar el impacto sobre el medio ambiente.

En el presente documento se describen los resultados de las evaluaciones energéticas realizadas en tres (03) calderas, para esto se realizaron inspecciones y mediciones de parámetros de combustión; luego se procedió a calcular la eficiencia térmica de las calderas por los métodos directo e indirecto. Finalmente se presentan las acciones a seguir para mejorar la eficiencia.

2. DESARROLLO DE CONCEPTOS Y TECNICAS

2.1 COMBUSTION

Es la oxidación rápida de los combustibles con gran liberación de calor, del resultado del proceso de combustión se obtienen diversos gases y productos, entre ellos los más importantes son el CO (monóxido de carbono), el CO₂ (dióxido de carbono), el O₂ (Oxígeno), Hidrocarburos no quemados (HC), Nitrógeno, Agua y bajo ciertas condiciones NO_x (óxidos de Nitrógeno).

La reacción química (simplificada) que ocurre durante una combustión es la siguiente:



La combustión completa, donde el combustible y el oxígeno se queman por completo, solo produce CO₂ (dióxido de carbono) y H₂O (agua) muy pocas veces, se lleva a cabo y entonces surge el CO (monóxido de carbono) y consiguientemente aparece O₂ (Oxígeno) y HC (Hidrocarburos), tengamos en cuenta que la aparición de los mismos es porque al no completarse la combustión "siempre queda algo sin quemar."

A continuación detallaremos cada uno de estos gases:

Dióxido de carbono - CO₂

El dióxido de Carbono es un producto natural del proceso de combustión. Las emisiones de dióxido de carbono contribuyen a aumentar lo que se denomina "efecto invernadero" con un incremento de la temperatura que ocasiona el calentamiento global o cambio climático. Produce efectos locales, regionales y globales, tanto en el micro como en el macroclima con repercusiones sobre la salud humana.

Los impactos sobre la salud humana son por vía directa (exposición al estrés térmico e incidentes patológicos de las temperaturas extremas), e indirecta (incremento en algunos contaminantes del aire, pólenes y esporas de hongos; malnutrición; incremento potencial de enfermedades transmitidas por insectos y por el agua; afectación de las infraestructuras de salud pública, etc.)

Monóxido de carbono - CO.

El Monóxido es resultado del proceso de combustión e indica que la combustión es incompleta, es un gas tóxico, inodoro e incoloro. Se difunde rápidamente por el aire, ya que tiene la misma densidad.

Efectos sobre la salud: al no ser irritante no produce síntomas en las vías respiratorias, pero pasa rápidamente a la sangre donde se combina con la hemoglobina. El CO tiene una afinidad 250 veces mayor que el O₂ para combinarse con la hemoglobina, y la carboxihemoglobina es incapaz de transportar oxígeno, por lo tanto, produce una asfixia celular a nivel de todos los tejidos. Ocasiona una disminución progresiva de todas las funciones del organismo humano siendo más acusadas en pacientes con enfermedades cardiovasculares y respiratorias. En casos extremos produce coma y muerte.

Exceso de Oxígeno - O₂

Es el oxígeno del aire que no se utilizó en el proceso de combustión, es un indicador del exceso de aire empleado.

Óxidos de Nitrógeno.- NO_x

El NO_x es el término genérico que engloba a los óxidos de nitrógeno, gases altamente reactivos que contienen nitrógeno y oxígeno en proporciones variables, se originan en los procesos de combustión interna de alta temperatura. La mayoría de los gases son incoloros e inodoros, pero uno de los más importantes, el NO₂ puede adquirir un color entre rojo y marrón. El NO_x y sus contaminantes pueden ser transportados a largas distancias por la acción del viento y ocasionar problemas locales, comárcales y regionales.

Los NO_x con la humedad ambiental y las radiaciones ultravioletas solares, reaccionan con radicales hidroxilos para formar ácido nítrico, que conjuntamente con los ácidos sulfuroso y sulfúrico que se forman desde el SO_2 modifican el pH del agua y forman la llamada lluvia ácida.

Dióxido de azufre - SO_2

El dióxido de azufre se genera al quemar combustibles con contenidos de azufre, es un gas transparente que por la acción de diversos componentes atmosféricos (radiación ultravioleta, oxígeno, ozono, humedad ambiental, radicales peróxidos e hidróxidos) se transforma en SO_3 y finalmente en ácido sulfúrico (H_2SO_4). Este ácido, junto con el ácido nítrico, es el responsable de generar las llamadas precipitaciones ácidas o lluvia ácida, que ocasiona un fuerte impacto medioambiental.

Actúan sinérgicamente con las partículas finas y en ocasiones hasta el 20% de las partículas están compuestas de gotas microscópicas de ácido sulfúrico y otros sulfatos, formando los llamados aerosoles ácidos.

Hidrocarburos – HC

Este se da por una mezcla deficiente entre el combustible y oxígeno. La deficiencia puede ser producida por una mezcla muy rica o muy pobre entre estos dos elementos.

2.2 COMBUSTIBLES

Los combustibles son una fuente primaria de energía; esta energía en forma de calor se libera por la oxidación del combustible con aire, produciendo gases a altas temperaturas.

Los combustibles se clasifican según su estado en sólidos, líquidos y gaseosos, según su procedencia en naturales, manufacturados y residuales, entre los más comunes tenemos:

Sólidos: Carbones minerales (lignito, bituminoso, antracita), madera, coques, bagazo (residuo resultante de la molienda de la caña de azúcar, se usa en para producir vapor en los ingenios azucareros, sobre todo en las que no hay aplicación para productos derivados)

Líquidos: en estado natural los petróleos y algunas breas, los otros se obtienen por destilación del petróleo, son las gasolinas, kerosene, petróleos diesel y residuales.

Gaseosos: los hidrocarburos gaseosos naturales, el GLP (gas licuado de petróleo).

En los combustibles líquidos, la relación carbono/hidrógeno (C/H), el contenido de nitrógeno, azufre y la dificultad de combustión se incrementa de la manera siguiente:

Kerosene → Diesel-2 → Residual-6 → Residual-500

Cuando se quema un combustible, a mayor relación C/H mayores son las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), gas cuya concentración en la atmósfera tiene relación directa con el incremento de la temperatura media de la tierra (efecto invernadero o calentamiento global de la tierra).

Asimismo a mayor contenido de Nitrógeno y Azufre en el combustible, se incrementan las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO₂), respectivamente.

Los combustibles livianos, por su baja viscosidad y menor contenido de impurezas, pueden atomizarse y mezclarse mejor con el aire y producir una combustión más rápida y limpia o baja en emisiones de monóxido de carbono (CO), NO_x, SO₂ y partículas de hollín, en comparación a los combustibles pesados.

Poder calorífico de los combustibles

Es la cantidad de calor liberado en las reacciones de combustión por unidad de volumen o peso de un combustible, para los combustibles más usuales se suele medir experimentalmente mediante un calorímetro.

Se puede expresar en base seca o húmeda, y se clasifican en:

a) Poder calorífico superior. Es la cantidad de calor que se desprende de la combustión completa de una unidad de combustible, quedando el agua formada en estado líquido a 0°C y 1 atm.

b) Poder calorífico inferior. Es la cantidad de calor que se desprende de la combustión completa de una unidad de combustible, quedando el agua formada en forma de vapor.

2.3 VAPOR

El vapor es un medio conveniente y controlable para transportar calor y energía, se genera como resultado de la adición de suficiente calor al agua para producir su vaporización, esto ocurre en dos etapas: primero el agua tomará el calor hasta llegar a la temperatura de ebullición (calor sensible), segundo continuará absorbiendo calor en cantidad suficiente para que produzca el cambio de estado de agua a vapor (calor latente).

Cuando el agua se calienta en un recipiente cerrado, hasta su temperatura de ebullición, el vapor liberado produce un incremento de la presión interna del recipiente, con este incremento de presión, la temperatura de ebullición del agua también aumentará. Durante el cambio de estado de líquido a vapor a presión constante, el vapor en contacto con el líquido mantendrá su temperatura constante, hasta completar la evaporación, esta se denomina **temperatura de saturación**.

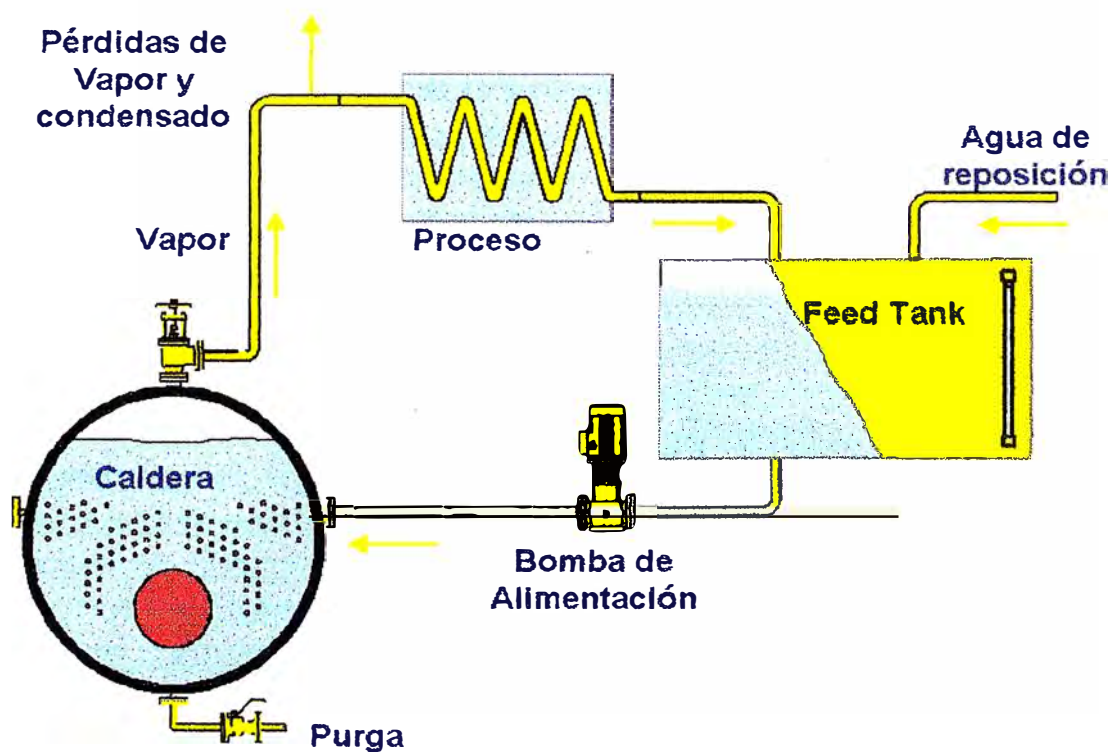
El vapor que contenga agua en cualquier forma, minúsculas gotas, humedad o niebla se llama **vapor húmedo**, este puede ser el resultado de la retención de agua durante la ebullición o de un proceso parcial de condensación, en cualquier caso el contenido de calor del vapor húmedo es menor que el del vapor seco saturado. El porcentaje de vapor seco por peso de la mezcla se denomina **calidad del vapor**, la temperatura del vapor húmedo es la misma que la del vapor seco a una presión dada.

El vapor con una temperatura mayor que la correspondiente al vapor saturado a una presión dada, se llama vapor sobrecalentado, cuando se mantiene la presión de un vapor saturado seco y se continúa suministrando calor, el sobrecalentamiento producirá un aumento de temperatura y volumen. El calor total (entalpía) del vapor sobrecalentado es igual a la suma del vapor saturado más el calor de sobrecalentamiento.

Las propiedades de un vapor sobrecalentado se aproximan a las de un gas, una de las características más importantes es la dependencia de la energía interna con la temperatura, adicionalmente como no tiene humedad no existe la posibilidad de condensación hasta que no se haya enfriado a la temperatura de saturación.

Con el vapor saturado, el calor disponible depende exclusivamente de la presión, mientras que con el saturado hay un calor adicional proporcionado por el sobrecalentamiento. Este calor adicional se obtiene por el aumento del consumo de combustible, pero dan una mejor eficiencia.

En el esquema siguiente se muestra el circuito típico del vapor generado en el caldero.



2.4 CALDEROS

Los generadores de vapor o calderos comprenden todos aquellos recipientes a presión, en los cuales mediante la aplicación del calor producido por la oxidación de un combustible o por gases residuales de un proceso industrial, se transforma el agua contenida en él, en vapor de agua. El vapor generado se utiliza después en otro proceso industrial, en la generación de energía, etc.

Las calderas de vapor se clasifican, atendiendo a la posición relativa de los gases calientes y del agua, en acuotubulares y pirotubulares; por la posición, de los tubos, en verticales, horizontales e inclinados; por la forma de los tubos, de tubos rectos y de tubos curvados; y por la naturaleza del servicio que prestan, en fijas, portátiles, locomóviles y marinas. La elección de una caldera para un servicio determinado depende del combustible de que se disponga, tipo de servicio, capacidad de producción de vapor requerida, duración probable de la instalación, y de otros factores de carácter económico.

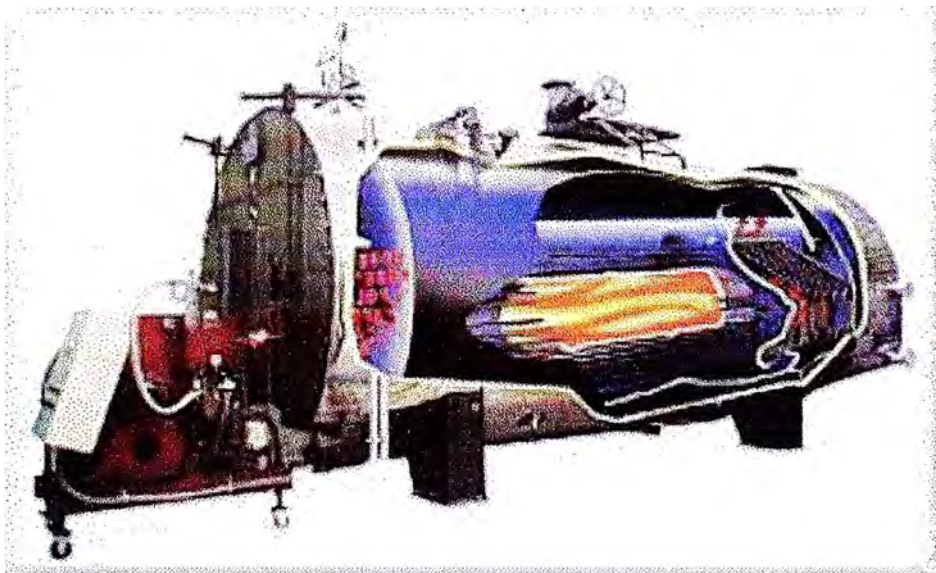
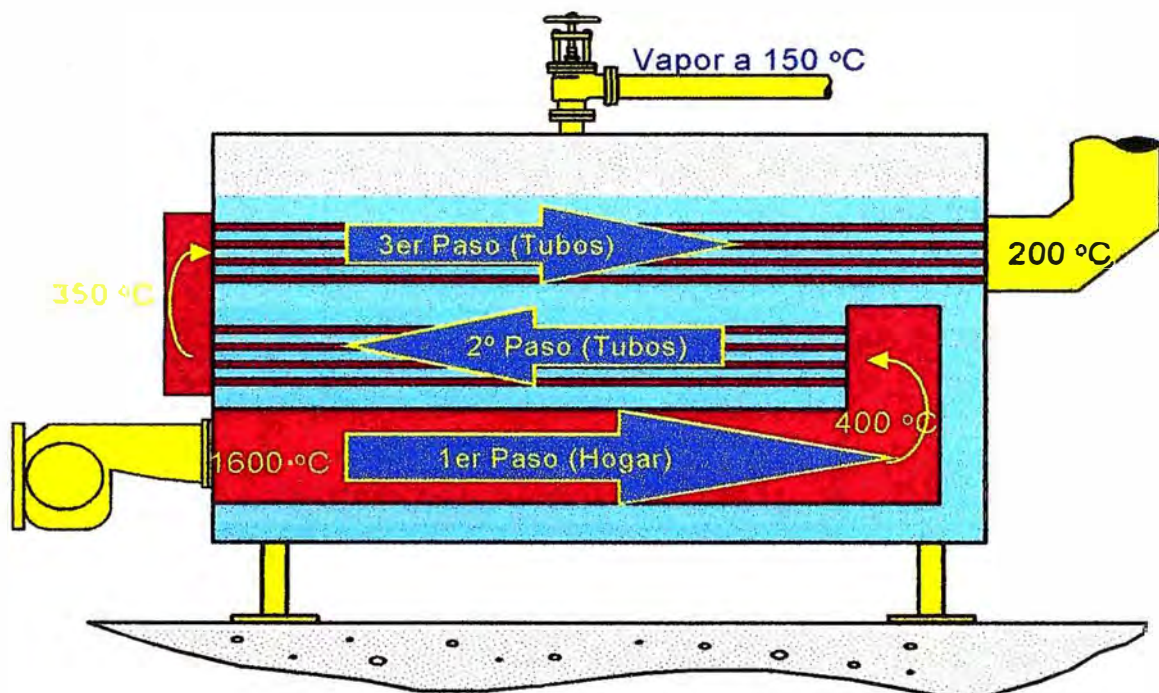


Fig. Caldero pirotubular

Calderos Piro tubulares: En estos calderos el calor se transmite desde el interior de los tubos, el agua circula por el exterior de los tubos, los gases pueden circular dos o más veces por las áreas de calefacción llamadas pasos, a fin de aprovechar al máximo la energía de los gases de combustión.

Están diseñadas para trabajar a presiones máximas de 20 bar y consumos hasta 30 T/h de vapor, son económicas, de alto rendimiento y fácil mantenimiento.

En el gráfico siguiente se muestra una caldera piro tubular de tres pasos de cámara húmeda.

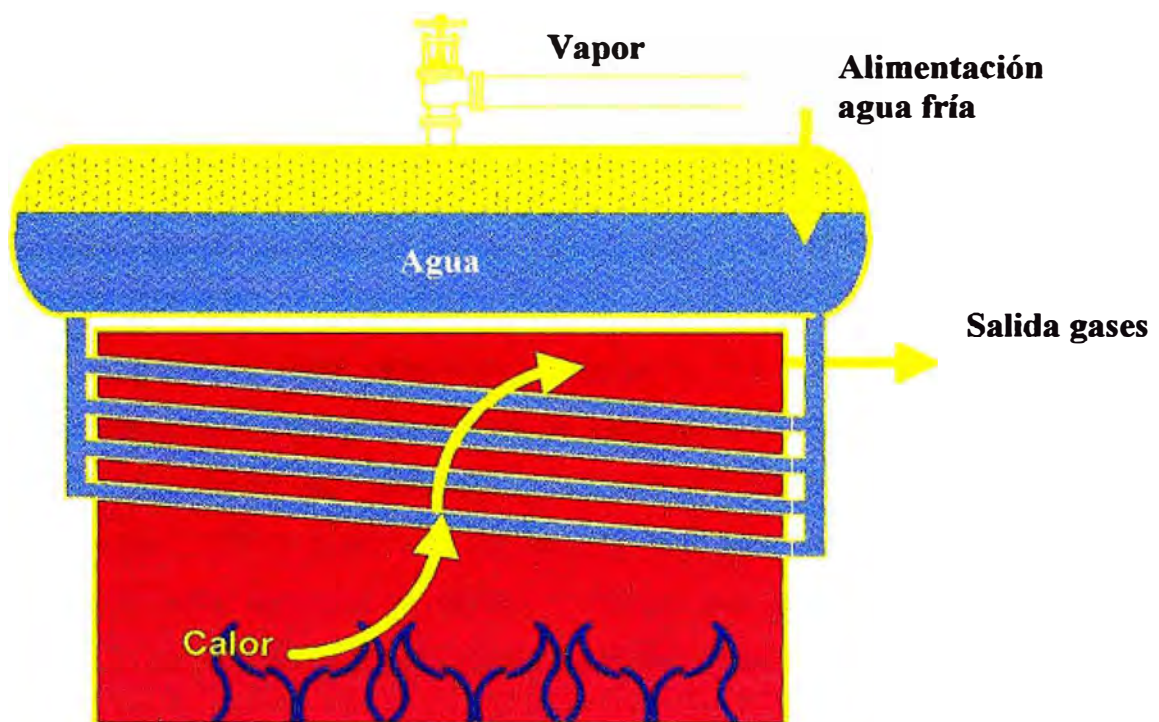


En el apéndice A, se presenta un gráfico en el que se detallan los componentes de un caldero piro tubular típico.

Calderos Acuotubulares: El principio de la caldera acuotubular es que los gases circulan por el exterior de los tubos y el agua por el interior de estos. Estas calderas se prefieren a las piro-tubulares cuando se requiere mayor capacidad de generación de vapor y altas presiones.

Estas calderas son de menor peso por unidad de vapor generado, requieren menor tiempo para generar vapor, son de mayor facilidad de montaje y desmontaje, con mayor seguridad para altas presiones.

Pueden tener uno, dos, tres, cuatro y hasta cinco tambores o domos, así como también varios cabezales colectores de tubos, los más comunes son del tipo A, D y O.



2.4.1 PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN

Estos parámetros influyen en la eficiencia de la combustión y en la calidad de las emisiones al ambiente, son principalmente:

a) Exceso de aire

Para cada combustible es posible calcular la cantidad de aire que se necesita para la combustión. En la práctica es necesario añadir un exceso de aire para asegurar la combustión completa, dicho exceso varía de un combustible a otro. Para ajustar un sistema de combustión, lo ideal es usar la cantidad mínima de exceso de aire que asegure una combustión limpia y segura, esta cantidad dependerá del tipo de combustible y el tipo de quemador empleado.

La concentración de oxígeno en los gases de chimenea es un indicador de la cantidad de aire en exceso empleado para la combustión.

$$\text{Exceso de aire (\%)} = (n - 1) \times 100 \quad \text{donde: } n = 21 / (21 - \%O_2)$$

Desde el punto de vista energético, excesos de aire altos implican pérdidas de energía dado que el aire en exceso se calienta a expensas de la energía útil, saliendo finalmente por chimenea. Asimismo, deficiencias de aire ocasionan inquemados (CO y partículas de hollín), que también implican una pérdida energética toda vez que constituyen energía no aprovechada que sale por chimenea ó se depositan en los tubos, requiriendo mantenimientos más frecuentes.

Desde el punto de vista ambiental, altos niveles de CO y hollín, pueden afectar negativamente al medio ambiente, las emisiones de estos parámetros son relativamente fáciles de controlar mediante la regulación del exceso de aire.

Las emisiones de SO_2 no dependerán mayormente del exceso de aire; en cambio si las de NO_x , cuyos niveles pueden reducirse por efecto del enfriamiento de llama y de la acción reductora del CO , ambos dependientes del exceso de aire.

Reducción del exceso de aire

Un simple ajuste del exceso de aire no es suficiente, la mezcla aire/combustible debe ser la apropiada. Los sistemas de combustión usan dos fuentes de aire de combustión, el aire que se mezcla inmediatamente con el combustible para iniciar la combustión (aire primario); y el usado para completar la combustión (aire secundario). Es necesario que estas variables sean las adecuadas para obtener una completa y limpia combustión.

El efecto de la reducción del exceso de aire en la eficiencia del caldero se muestra en figura 1. La relación entre el O_2 , CO_2 , y el exceso de aire se muestra en la figura 2.

FIGURA N° 1

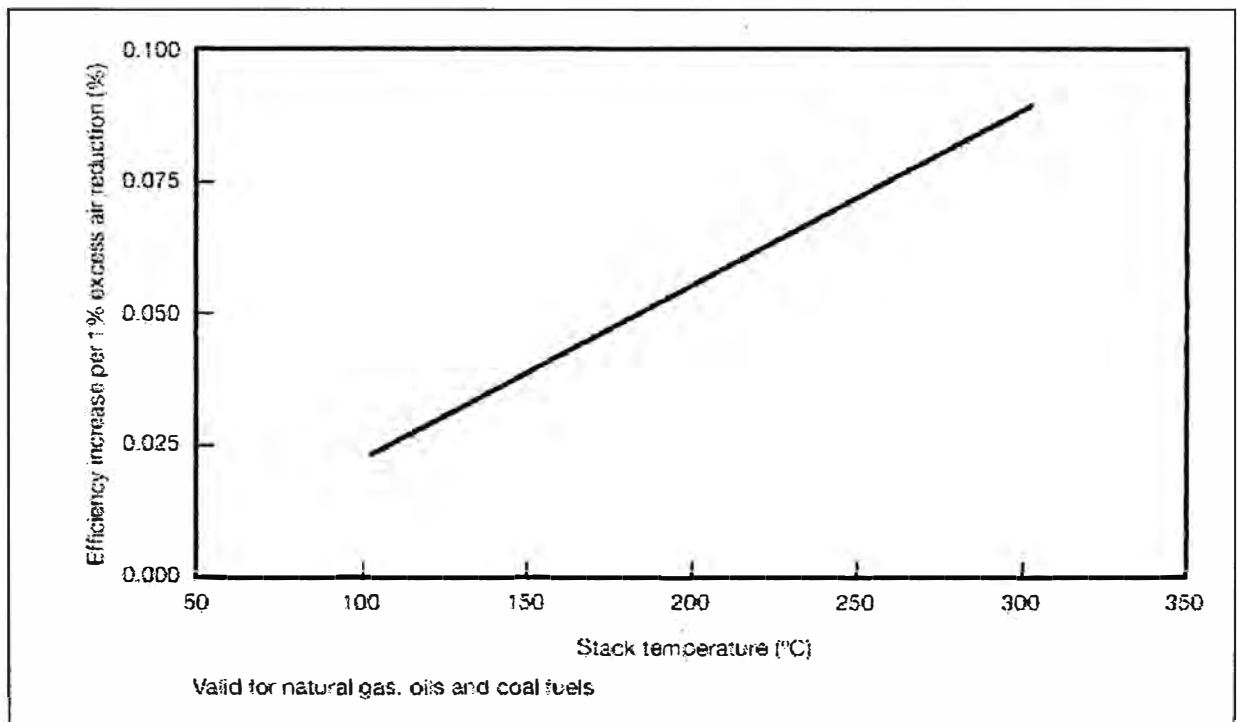
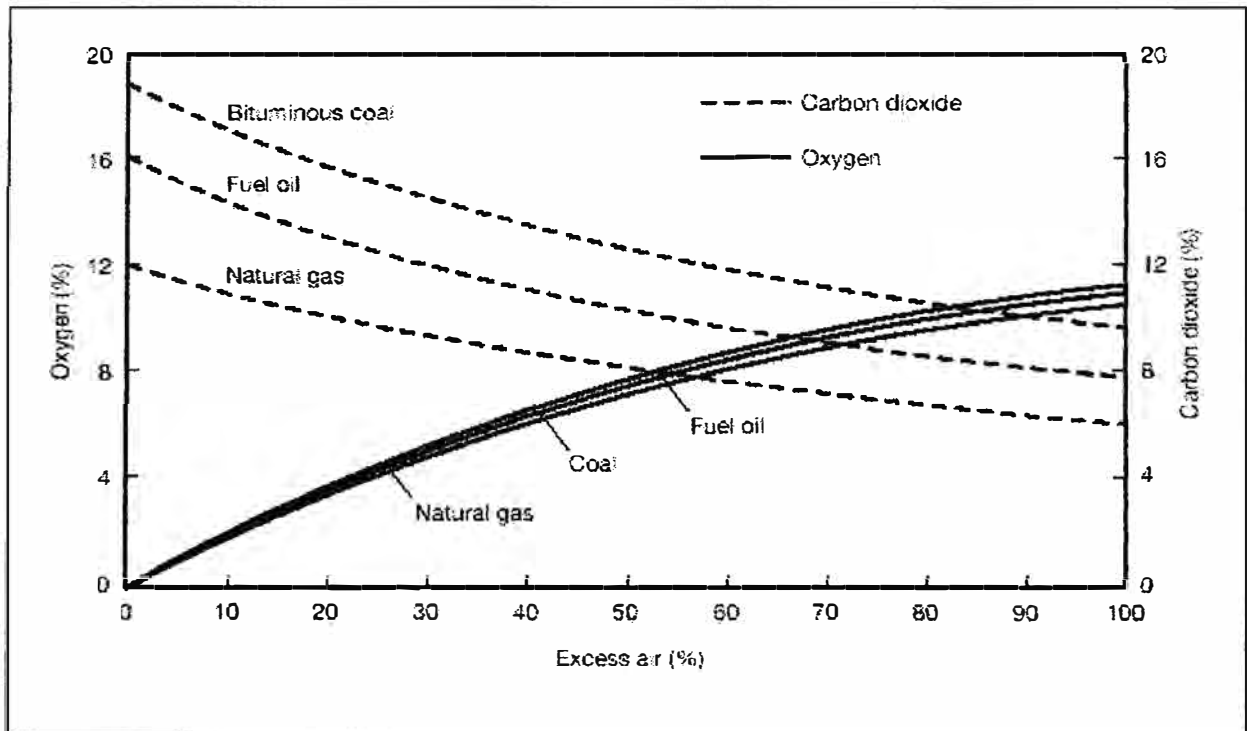


FIGURA N° 2



Los beneficios que se consiguen al reducir el exceso de aire son los siguientes:

Menores pérdidas de calor en el gas de chimenea que abandona la caldera, en virtud de que se deja de calentar innecesariamente aire en exceso que es evacuado junto con los gases. A menor volumen de gases de chimenea, menores son las pérdidas de calor.

Mayor transferencia de calor radiante en el hogar de la caldera.

Reducción de las emisiones de gases contaminantes (NO_x , SO_2 , CO) en virtud de que se quema menos combustible para satisfacer la misma demanda de vapor.

En resumen, una mayor eficiencia de la caldera, menor costo de producción de vapor por el menor consumo de combustible y el consiguiente ahorro económico.

Para regular el exceso de aire, es necesario contar con un equipo portátil o fijo de monitoreo de CO_2 y O_2 , el cual deberá ser utilizado por un entrenado y experimentado operador de calderos.

En pequeños generadores de calor es posible realizar el control manual; en sistemas más grande será necesario usar un control automático con corrección por medida de O_2 , en este circuito se incluye un apoyo al control por la relación aire/combustible a través de la medida del caudal de vapor. Este sistema funciona modificando la relación aire/combustible fijada manualmente, para ello se fija un nivel de oxígeno óptimo en los gases y el controlador compara el nivel medido con el fijado, añadiendo o quitando aire para ajustarse al valor fijado. El sistema se denomina modulante.

b) Temperatura del combustible

Si se trata de un Residual 6 ó Residual 500, se debe llegar a la temperatura necesaria para conseguir una viscosidad adecuada que permita lograr una buena atomización del combustible, lo que en última instancia favorece una buena mezcla aire-combustible y su eficiente combustión.

Es común encontrar que por falta de un suficiente calentamiento del combustible se produzcan altas emisiones de CO y hollín, lo cual se trata de subsanar (erróneamente) incrementando el exceso de aire.

Para quemadores eficientes de tiro forzado el exceso de aire *mínimo* y la temperatura de atomización del combustible recomendada se muestra en el Cuadro N°01.

Cuadro N° 01

Parámetro*	Combustible		
	Diesel – 2	Residual - 6	Residual - 500
Exceso de aire (%)	15 – 20	20 – 25	25 – 30
Temperatura de atomización (°C)			
• Atomización mecánica	--	100 - 120	115 - 130
• Atomización con vapor	--	80 – 90	95 – 105
• Oxígeno – O ₂ (%)	3.5	4.0	4.5
• Monóxido de Carbono - CO (ppm)	200	400	500
• Opacidad (Índice de Bacharach)	2	3	4

*Fuente: Programa de Ahorro de Energía - PAE

2.4.2 FACTOR DE CARGA

La determinación del factor de carga de la caldera se obtiene de la fórmula siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Factor de carga (K)} &= \frac{\text{Producción actual de vapor}}{\text{Producción máxima de vapor}} * 100 \\ &= \frac{\text{Masa de vapor actual (m}_{VA})}{\text{Masa de vapor nominal (m}_{VN})} * 100 \end{aligned}$$

▪ **Producción actual de vapor:** Es el flujo de vapor registrado por un medidor o calculado por el balance de materia y energía, en condiciones de operación actual de la caldera.

▪ **Producción máxima de vapor:** Es el flujo máximo de vapor establecido según el diseño de la caldera. Dicho valor se establece de acuerdo a la expresión de la capacidad de las calderas en boiler horse power - BHP.

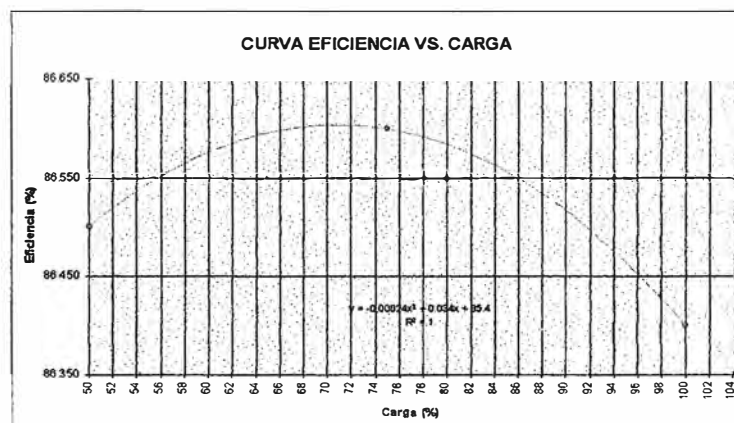
Un BHP es equivalente a 34,5 libras de vapor por hora, producido desde agua a 100 °C hasta vapor a la misma temperatura o aproximadamente 33 475 BTU/h, considerando que el calor de vaporización es de 970,3 BTU/lb.

Variación de la eficiencia con el factor de carga del caldero

Siempre que varía la carga de la caldera, también varía la eficiencia en función del exceso de aire y como consecuencia de las pérdidas de calor. Esta es la razón por la que los sistemas de control de la combustión tratan de mantener el funcionamiento de la caldera en el punto de rendimiento máximo para cada carga.

Dado que la eficiencia es función de la carga a la que trabaja, lo ideal sería que cada caldera trabajara en el máximo de eficiencia para su carga, y que la carga fuese aquella en la cual su eficiencia a la vez fuese la máxima. La primera de estas condiciones es fácil de cumplir ya que se pueden regular los parámetros de combustión, de tal manera que se obtenga la máxima eficiencia. La segunda de las condiciones es casi imposible, ya que la carga viene fijada por las necesidades de los consumidores y la demanda es muy variable.

Normalmente las calderas tienen un máximo de eficiencia cuando su carga esta entre 65/85% de la máxima. En el gráfico siguiente se muestra la variación de eficiencia con la carga para un caldero de 100 BHP.



2.4.3 CIRCUITO DE AGUA

Las impurezas del agua pueden ser la causa de los siguientes efectos perjudiciales para la caldera:

- 1.- Reducción de la cantidad de calor transmitido debida a la formación de incrustaciones sobre las superficies de caldero.
- 2.- Averías en los tubos y planchas, producidas por la disminución de la cantidad de calor transmitido a través de ellos.
- 3.- Corrosión y fragilidad del acero en la caldera.
- 4.- Mal funcionamiento, formación de espumas y arrastres de agua en cantidad por el vapor.
- 6.- Pérdidas caloríficas debidas a frecuentes purgas.
- 7.- Menor rendimiento de los equipos que utilizan el vapor, a causa de la suciedad en el circuito ó incrustaciones.

Los fines principales del tratamiento del agua de alimentación del caldero son quitar las materias solubles y en suspensión y eliminar de los gases. Las materias solubles se expresan como sólidos totales disueltos (STD), este es un parámetro proporcional a la conductividad, y es el que comúnmente se controla tanto en el agua de alimentación como en la caldera.

3. EVALUACION ENERGÉTICA EN CALDERAS

Con una adecuada evaluación energética en calderas se puede conocer el aprovechamiento de la energía aportada al sistema por el combustible, lo que permite corregir deficiencias que se traducen en pérdidas de energía, que a su vez implican un mayor consumo de combustible y el incremento de la emisión de gases de combustión.

La identificación de las pérdidas de energía en la caldera permite proponer las mejoras que resultan en acciones con o sin inversión, que conllevan a la optimización de la eficiencia térmica y ahorros de combustible.

La evaluación energética está orientada a presentar los niveles recomendados de parámetros y realizar el análisis técnico – económico de las mejoras, para calcular los ahorros que conlleva la optimización del sistema de combustión se utiliza la fórmula siguiente:

$$\text{Ahorro (\%)} = 1 - (\text{Eficiencia actual} / \text{Eficiencia mejorada})$$

El procedimiento para evaluar las calderas

Reconocimiento del equipo a evaluar

Conocer los parámetros de combustión

Calcular la eficiencia energética, en muchos de los casos se realiza por el método indirecto, dado que no se requiere contar con información de la producción de vapor y es posible conocer las pérdidas por separado.

Evaluar las oportunidades de incremento de eficiencia y ahorro de energía

Determinar las inversiones para mejorar la eficiencia, y los ahorros proyectados.

3.1 METODOS PARA LA DETERMINACION DE EFICIENCIA TERMICA

Existen dos métodos para determinar la eficiencia térmica en una caldera, la aplicación de uno u otro método dependerá de la facilidad de contar con información de los consumos de agua, combustible y generación de vapor.

3.1.1 METODO DIRECTO

Este método consiste en determinar la eficiencia a partir de mediciones directas de la energía entrante (consumos de combustible y agua), así como la energía saliente (producción de vapor). Según el método la eficiencia de la caldera será obtenida por la aplicación de la fórmula siguiente:

$$Ef = \left(\frac{V (H_v - H_a)}{F \times PCI} \right)$$

Donde:

Ef : Eficiencia energética

V : Vapor generado

H_v : Entalpía de vapor saturado o sobrecalentado

H_a : Entalpía de agua de alimentación

F : Consumo de combustible

PCI : Poder calorífico del combustible (superior o inferior)

3.1.2 METODO INDIRECTO

Este método consiste en obtener la eficiencia a partir del cálculo separado de todas las pérdidas de energía que se suceden en la caldera. La eficiencia de la caldera será obtenida por la aplicación de la fórmula siguiente:

$$Ef = 100 - P_{gs} - P_{gw} - P_{Is} - P_{Ig} - P_r - P_p$$

Donde:

Ef : Eficiencia de la caldera

P_{gs} : Pérdida de calor del gas seco

P_{gw} : Pérdida de calor del gas húmedo.

P_{Is} : Pérdida de calor por inquemados sólidos

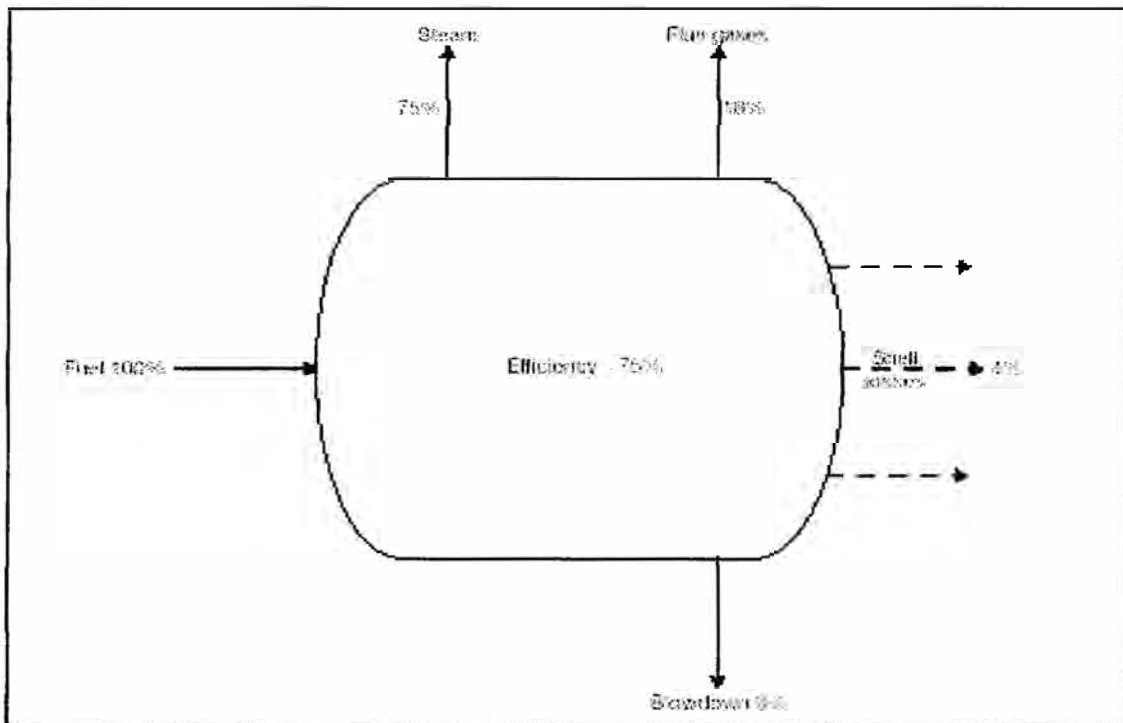
P_{Ig} : Pérdida de calor del inquemados gaseosos

P_r : Pérdida de calor por radiación

P_p : Pérdida de calor por purgas

En la figura siguiente, se presenta un ejemplo gráfico de este método.

FIGURA N° 03



A continuación se detallan los factores que influyen en la eficiencia de las calderas:

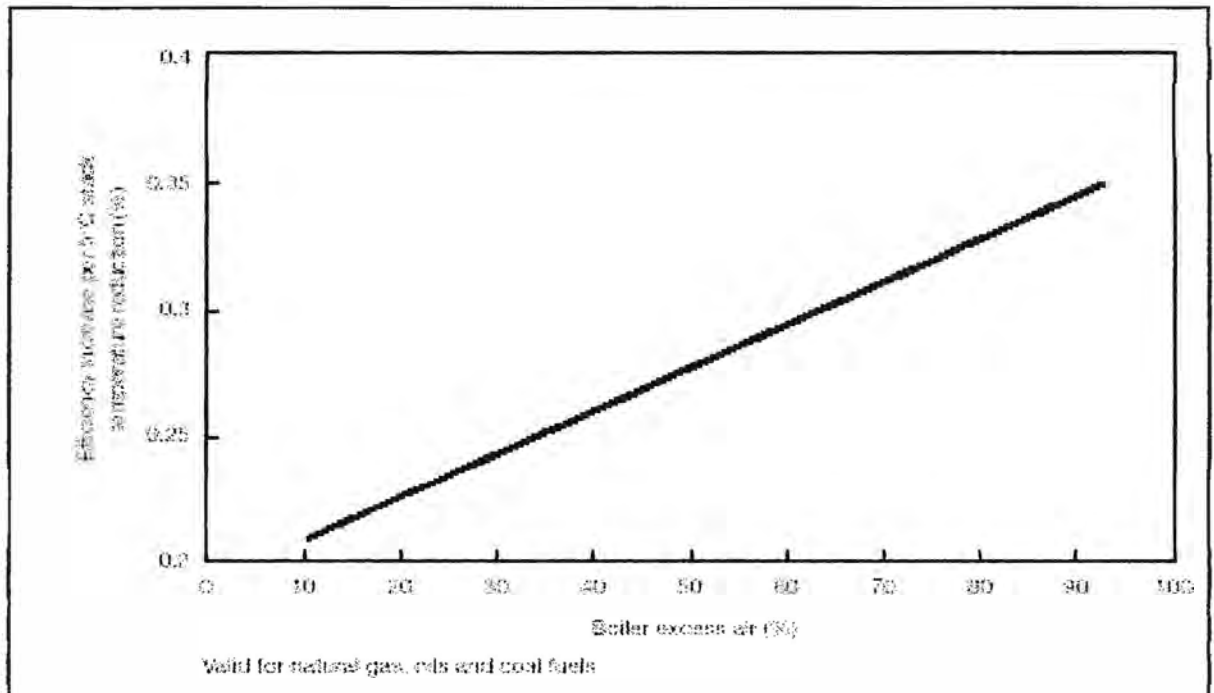
Pérdidas de calor en los gases de combustión. (P_{gs} y P_{gw})

En la práctica varían del 8 al 35% dependiendo del combustible. El factor de mayor influencia es la temperatura de salida de gases y el exceso de aire presente.

Para minimizar estas pérdidas es esencial que se lleve a cabo una correcta combustión, para lo cual el combustible debe estar limpio y a la temperatura adecuada, los quemadores deben de estar en buenas condiciones, y el aire de combustión (primario y secundario) deberá ser introducido en la proporción y turbulencia adecuada.

En la figura 4, se puede apreciar la influencia de la temperatura de los gases en la eficiencia del caldero.

FIGURA N°4



Pérdidas por quemados sólidos (P_{Is})

Estas pérdidas varían del 2 al 5% y son un claro indicativo de la deficiencia de aire de combustión, siendo sus posibles causas la pobre distribución de aire por debajo de lo requerido y la inadecuada atomización del combustible derivado de malas prácticas de almacenamiento y preparación.

Pérdidas por quemados gaseosos (P_{Ig})

La concentración de CO en los gases de combustión debe ser mínima. Existen tres factores que influyen sobre este parámetro: la inadecuada mezcla aire combustible, insuficiente aire de combustión y el ingreso de aire falso.

Las pérdidas por este gas son medidas en términos de la no-conversión de carbón en CO₂, y son relativamente pequeñas; sin embargo, la operación del caldero, se ve influenciada por el rápido ensuciamiento de las superficies de transmisión de calor.

Pérdidas por radiación (P_r)

La variación aceptable de las pérdidas de calor por radiación y convección debe estar entre 0,5 al 5% a plena carga y de acuerdo con el tamaño de la caldera, la presión de trabajo y el aislamiento.

Para reducir estas pérdidas se deberán considerar las siguientes acciones: reparar total o parcialmente los aislamientos y refractarios, aumentar el espesor de los aislamientos, o cambiar el material del aislamiento.

Pérdidas por purgas (P_p)

Estas pérdidas varían del 1 al 6%, dependen principalmente del contenido de sólidos totales disueltos - STD en el agua de la caldera, la calidad del agua de reposición, la cantidad de condensado no contaminado que retorna al sistema y las variaciones en la carga de la caldera y el tipo de tratamiento interno.

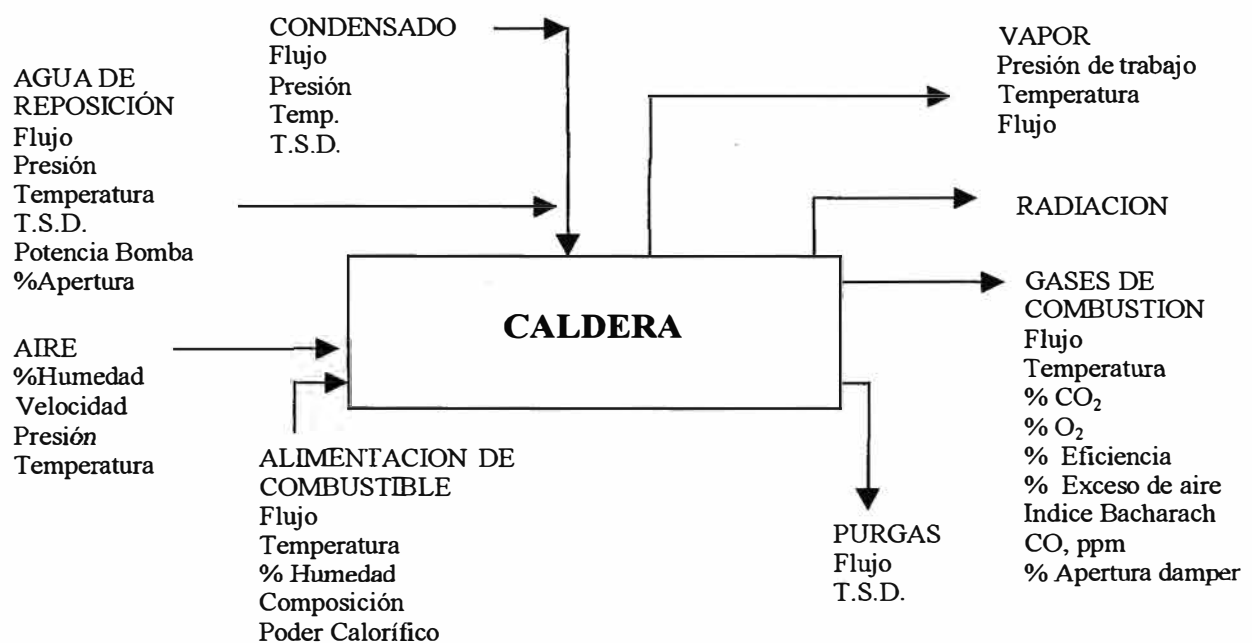
El mantenimiento de una adecuada calidad de agua en el caldero y en la alimentación, maximizar el retorno de condensados, así como la recuperación del calor de las purgas, el aumento del espaciado en el periodo de purga, son acciones que pueden ayudar a minimizar estas pérdidas.

BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA

La determinación de la eficiencia energética se realiza empleando un balance de materia y energía detallado, que utiliza como información básica la medición del consumo de combustible, la composición del combustible y los resultados del análisis de gases de combustión, entre otros.

Las corrientes de entradas y salidas consideradas para el balance de materia y energía de la caldera, se presentan en el diagrama de flujo siguiente:

DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA



Las fórmulas utilizadas para realizar el balance de materia y energía se presentan en el Apéndice B.

3.2 DETERMINACION DE EFICIENCIA ENERGETICA EN CALDEROS

3.2.1 ACTIVIDADES A DESARROLLAR

a) Reconocimiento

En esta etapa se identifican las características de la caldera (tipo, potencia, antigüedad, tipo de combustible, modo de operación, etc.), así como los componentes de su sistema de combustión y su historial de mantenimiento.

b) Evaluación del estado actual

Consiste básicamente en conocer el estado del mantenimiento de los diversos componentes del sistema de combustión de las calderas. Los puntos a evaluar son:

- Aislamiento del casco de la caldera: estado
- Bombas: presión de descarga, sellos (fugas), rpm.
- Calentadores: limpieza, controles termostáticos.
- Válvula moduladora de combustible: fugas.
- Regulador de presión: presión, componentes internos.
- Tobera de atomización del quemador: estado.
- Difusor de aire: estado.
- Manómetros y termómetros: estado.

c) Medición de parámetros de combustión

Consiste en determinar los siguientes parámetros de combustión básicos:

- Exceso de aire (reflejado por la concentración de oxígeno gases de combustión).
 - Opacidad de gases (presencia de hollín).
-

- Inquemados gaseosos (monóxido de carbono - CO)
- Temperatura de gases.
- Temperatura de ingreso del combustible y agua de alimentación

Adicionalmente, la concentración de óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) en las emisiones.

Para efecto de las mediciones relacionadas a los gases de combustión se podrá utilizar los siguientes equipos:

Analizador de gases: para determinar los parámetros O₂, CO, CO₂, SO₂ y NO_x en la salida de los gases de combustión, en la mayoría de casos cuentan con termocupla para la medición de la temperatura de los gases.

Opacímetro (probador de humos): para la determinación de hollín, se hace pasar una muestra de gas a través de un papel de filtro especial, en el cual se forma una mancha circular cuyo color puede variar del negro al blanco, la tonalidad está relacionada con la cantidad de hollín presente en los gases de chimenea. La mancha compara con patrones numerados del 0 al 9 (Índice de Bacharach) y de intensidad creciente.

3.2.2 CASOS PRACTICOS

Se han realizado evaluaciones energéticas en tres calderos, cuyas características son las siguientes:

Cuadro N° 02

Características	Caldera 1	Caldera 2	Caldera 3
Tipo	Pirotubular	Acuotubular	Acuotubular
Potencia	125 BHP		
Presión nominal	10.2 kg/cm ²	37.3 kg/cm ²	42.4 kg/cm ²
Producción nominal	1650 kg/hr	53 000 kg/hr	34 000 kg/hr
Combustible	PR-6	PR-6	Bagazo

a) Situación encontrada

En el Cuadro N° 03 se muestra el estado de los parámetros de combustión de las calderas a evaluar.

Cuadro N° 03

Tipo de caldera	Carga	Parámetro				
		O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	Temp. (°C)	I.B.
Caldero 1	Alta	11.5	7.5	240	275	7
	Baja	12.3	7.0	230	254	8
Caldero 2	Alta	6.0	11.9	6	278	2
	Baja	11.2	7.8	250	260	4
Caldero 3	Alta	12.9	7.9	1280	262	5

Comparando los resultados de las mediciones realizadas con los valores óptimos del Cuadro N° 01, se puede apreciar que de las tres calderas, solo la caldera 2 trabajando a carga alta, presenta niveles aceptables de exceso de aire e inquemados (bajo hollín y CO).

En los otros casos se presentan altos niveles de inquemados, y oxígeno remanente mayor a lo recomendable.

b) Calculo de eficiencia energética

Método Directo

Los cálculos por este método se han realizado solo para el caldero 2, dado que para aplicarlo es necesario contar con la información de consumo de combustible registrada por contómetro y el registro continuo de la producción de vapor.

Los resultados de la determinación de la eficiencia energética aplicando las fórmulas del ítem 3.1, se presentan en el Cuadro N° 04.

Cuadro N° 04
Resultados Método Directo – Caldero 2

DATOS	CARGA ALTA	CARGA BAJA
Vapor Generado (lb/h)	103000	58500
Entalpía vapor (BTU/lb)	1350.3	1350.3
Entalpía agua (BTU/lb)	243.92	243.92
Alimentación de petróleo (gal/h)	900	550
PCS (BTU/gal)	156749	156749
Eficiencia (%)	80.78	75.07

Método Indirecto

Con los resultados de los análisis de gases, pruebas de opacidad, mediciones de temperatura de gases presentados en el cuadro N° 03 y la información de consumo de combustible promedio, se han calculado mediante un balance de materia y energía la eficiencia de los 03 calderos. Todos los cálculos se han realizado en base P.C.S.

En el Apéndice C, se muestran la información y cálculos realizados para la determinación de la eficiencia térmica por este método. En el cuadro siguiente se presenta en resumen los resultados obtenidos.

Cuadro N° 05
Resultados Método Indirecto

Tipo de caldera	Carga	Método indirecto
		Balance de materia y energía
Caldero 1	74.5	69.3
	52.1	68.3
Caldero 2	79.9	81.2
	42.1	74.9
Caldero 3	91.9	52.6

Comparación de los resultados

Tal como se aprecia en los cuadros 4 y 5, los resultados obtenidos en el caldero 2 por el método directo e indirecto son cercanos. Los valores calculados por el método directo son menores ya que se trata de un promedio del tiempo de registro de datos, mientras que en el método indirecto se trata de valores puntuales.

c) Evaluación de casos

CALDERO 1

La combustión en este caso es deficiente, lo cual demanda usar más exceso de aire del necesario, dando como resultado bajas eficiencias térmicas y mayores emisiones al ambiente. Las eficiencias térmicas en base P.C.S. en carga alta y baja son de 69.3 % y 68.3 % respectivamente.

Las pérdidas separadas se muestran en el Cuadro N° 06; las mayores pérdidas se dan por los gases de chimenea siendo de 24 y 23.8% para carga alta y baja respectivamente; esto se debe al elevado exceso de aire y la alta temperatura de los gases que indican la falta de limpieza de los tubos por el lado del agua y gases.

Cuadro N° 06

Pérdidas	Balance de materia y energía	
	C. Alta	C. Baja
Pérdidas por gas seco (%)	17.09	17.04
Pérdidas por humedad (%)	6.94	6.85
Pérdidas por purga (%)	0.84	1.17
Inquemados gaseosos (%)	0.14	0.15
Inquemados sólidos (%)	3.87	3.86
Radiación (%)	1.46	2.05

Asimismo, se tiene elevadas pérdidas por inquemados sólidos (3.8%), lo cual indica una mala atomización del combustible.

Mejoras propuestas

- **Requerimientos de mantenimiento**

Para lograr que los parámetros de combustión alcancen los niveles recomendados, es necesario que los componentes del sistema de combustión estén en **buen estado**, los componentes básicos a considerar son: bombas, filtros, calentadores, válvula moduladora de combustible, regulador de presión, boquilla de atomización del quemador, difusor de aire, así como la limpieza y cambio de los tubos, siendo este último en el que se recomienda poner una mayor atención.

Con una reducción de la temperatura de gases de 275°C a 220°C, se conseguiría un incremento de la eficiencia térmica del 2.2%.

- **Regulación del exceso de aire**

Se recomienda ajustar adecuadamente el exceso de aire y reducir los inquemados, para lo cual es necesario realizar un mantenimiento previo de los sistemas de combustión. Este trabajo consiste en regular los flujos de aire mediante la apertura del damper del ventilador y del combustible mediante la válvula de ingreso al quemador, de tal manera que se mantenga una relación aire – combustible que logre un mínimo de exceso de aire.

Las inversiones requeridas para ajustar los sistemas mecánicos son bajas, ya que sólo es necesario contratar un especialista que posea un analizador y probador de humos.

Según la figura 4, si se logra reducir el exceso de aire de 133% actual a 35%, se conseguirá un incremento de la eficiencia en 7.7%.

- **Incremento de la temperatura del agua de alimentación y porcentaje de retorno de condensados**

La temperatura del agua de alimentación a la caldera es uno de los factores que afectan su rendimiento, en este caso la temperatura de alimentación es baja (50°C), se sabe que a mayor temperatura del agua, menor es el consumo de combustible de la caldera, porque gran parte del calor necesario para elevar su temperatura, ya lo tiene el agua y no es necesario que lo aporte el combustible.

En este caso se recomienda incrementar el porcentaje de retorno de condensados actual de 35% a 80%, con lo cual se conseguirá un incremento en la eficiencia y ahorros en el consumo de combustible y en el tratamiento del agua de reposición.

Las ventajas que se obtendrían son:

Disminución de la purga

El agua de reposición al caldero tiene 375 ppm de STD, mientras que el condensado tiene 12 ppm de STD, por tanto el contenido de STD en el agua de alimentación es de 231 ppm de STD; considerando que el fabricante recomienda mantener en el agua en la caldera en 3500 ppm de STD, la purga actual es de 62 kg/h. De incrementarse el retorno de condensados a un 80%, el agua de alimentación a la caldera tendría un contenido de 75 ppm de STD y la purga se reduciría a 19 kg/h, lográndose una disminución de 43 kg/h.

Disminución del agua de reposición

El agua de reposición se reduciría de 825 l/h a 254 l/h, por lo que habría un ahorro en el consumo de reactivos para tratar 571 l/h de agua.

Incremento en la temperatura del agua de alimentación de 50 a 80°C.

Ingresando los nuevos datos derivados del incremento de temperatura y retorno de condensados a la hoja de cálculo de balance de materia y energía, se lograría un incremento de la eficiencia en 1.1%.

En conclusión se estima que el incremento en la eficiencia puede ser de un 11%, es decir de 68.8% en promedio a 79.8%. Este incremento en terminos de ahorro en consumo de combustible es de 13.7%.

CALDERO 2

La eficiencia en operación a carga alta es de 81.2% cercana al valor óptimo de 83% (base PCS), dicha eficiencia puede mejorarse mediante la disminución del exceso de aire a niveles óptimos. En operación a carga baja la eficiencia disminuye notablemente (74.9%), esto debido a que esta caldera está regulada para trabajar solo en carga alta, condición necesaria para el adecuado funcionamiento del sistema de cogeneración con el que cuentan. En el siguiente cuadro se presenta el detalle de las pérdidas.

Cuadro N° 07

Pérdidas	Balance de materia y energía	
	C. Alta	C. Baja
Pérdidas por gas seco (%)	10.28	14.52
Pérdidas por humedad (%)	6.72	6.79
Pérdidas por purga (%)	0.44	0.77
Inquemados gaseosos (%)	0.0	0.14
Inquemados sólidos (%)	0.9	1.81
Radiación (%)	0.45	0.86

Las bajas pérdidas por inquemados en carga alta (0.9%) indican una buena atomización del combustible en la boquilla del quemador.

Mejoras propuestas

- **Regulación del exceso de aire**

Al igual que en el caso anterior se recomienda regular el exceso de aire de 38.1% a 25% previa revisión y mantenimiento del sistema de combustión.

- **Mejora del aislamiento en la caldera**

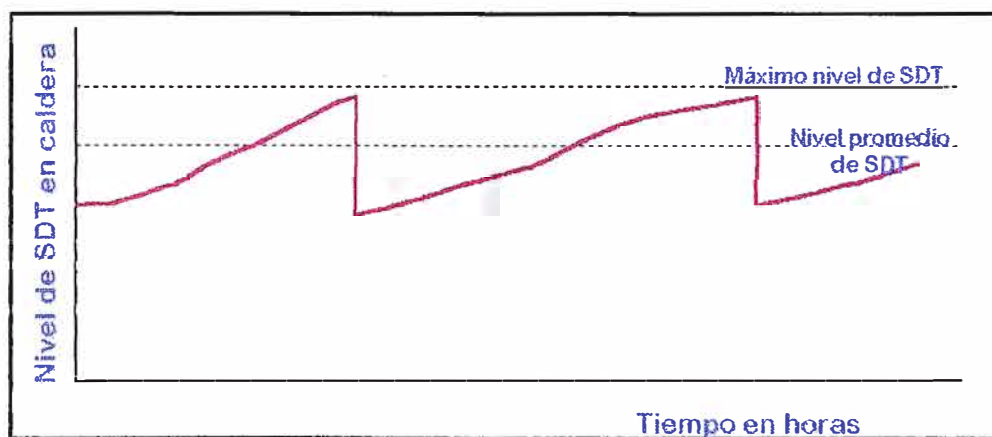
Se requiere revisar el aislamiento de la caldera, ya que se observó el deterioro en la parte frontal y lateral de la caldera.

- **Implementación de sistema automático de control de purga**

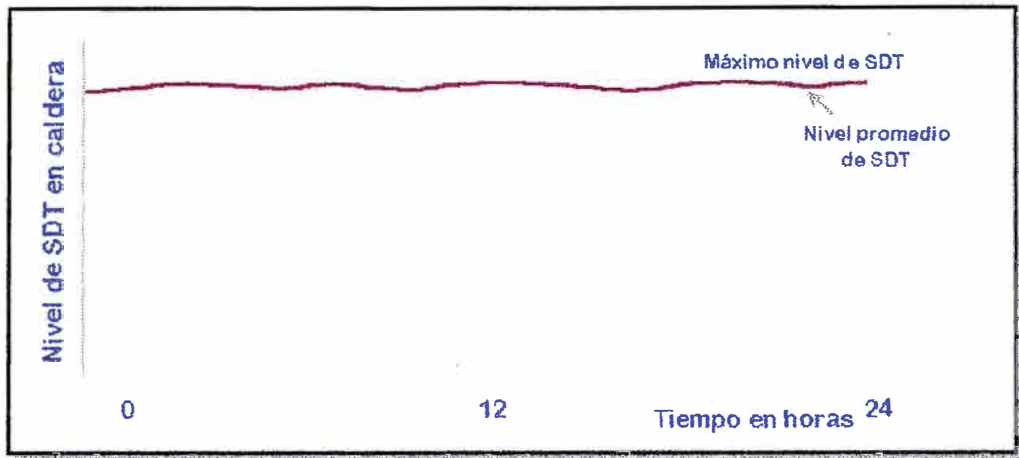
La implementación de este sistema permitirá:

1. Mantener el nivel de TDS en la caldera cerca del valor máximo permitido para minimizar pérdidas de calor y costos de tratamiento.
2. Prevenir un valor de TDS demasiado alto que causaría vapor con arrastre de suciedad, contaminación del producto y bloqueo de las trampas.
3. Mantener la caldera limpia de incrustaciones
4. Proporciona estas ventajas con el mínimo de atención manual

La diferencia entre realizar una purga manual o purga automática se puede apreciar en los gráficos siguientes:

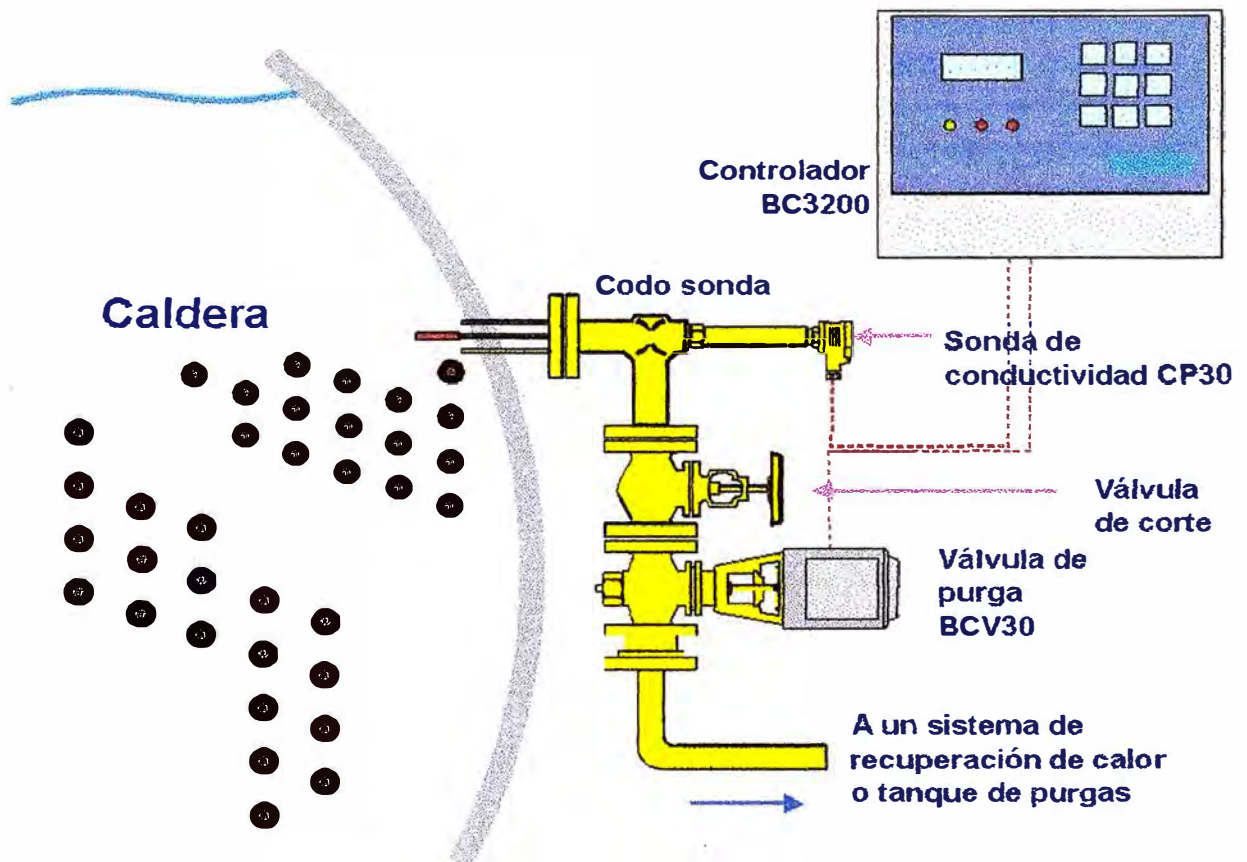


Purga manual



Purga automática

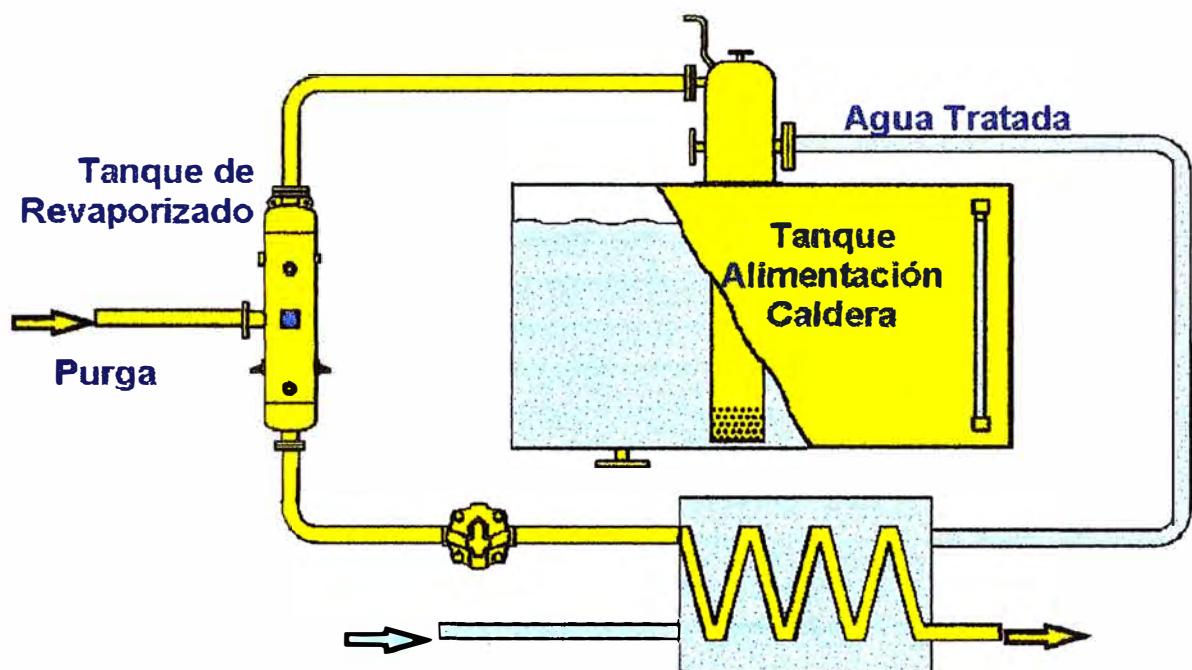
El sistema automático propuesto es el siguiente:



- **Uso del calor de las purgas**

Se propone enviar la purga a un tanque de revaporizado, para de esta manera aprovechar el calor e incrementar la temperatura del agua de alimentación a la caldera.

El sistema propuesto se muestra en la siguiente figura:



CALDERO 3

Para este caso la evaluación sólo se ha realizado a carga alta, ya que la demanda del sistema de cogeneración no permite variar las condiciones de operación. En el cuadro siguiente se presentan las pérdidas por separado:

Cuadro N° 07

Pérdidas	C. Alta
Pérdidas por gas seco (%)	18.18
Pérdidas por humedad (%)	25.08
Pérdidas por purga (%)	0.33
Inquemados gaseosos (%)	0.91
Inquemados sólidos (%)	2.30
Radiación (%)	0.45

La combustión al igual que en el caso del caldero 1 es deficiente, lo que da como resultado bajas eficiencias térmicas y mayores emisiones al ambiente. La eficiencia de la caldera, determinada por el método indirecto en carga promedio de operación (91.9%) es de 52.6 % (utilizando bagazo en base al P.C.S.).

Las mayores pérdidas son por humedad (25.08%), esto debido a que el combustible bagazo ingresa a la cámara de combustión con un 50% de humedad, perdiéndose por tanto gran parte de la energía aportada por el combustible en calentar el agua a la temperatura de los gases de combustión.

Los calderos bagaceros pueden llegar hasta una eficiencia del 62%, por tanto en este caso la eficiencia pueden mejorarse mediante la disminución del exceso de aire y la reducción de pérdidas por humedad.

Mejoras propuestas

- **Reducir la humedad del combustible**

Se recomienda evaluar la posibilidad de reducir el porcentaje de humedad del bagazo a un 35%, condición que se ha logrado en otras calderas similares. La eficiencia se incrementaría en 7%.

- **Automatización y aprovechamiento de purgas**

Al igual que en el caso anterior también se propone la automatización de la purga y el aprovechamiento de la energía de las purgas.

- **Implementación de sistema de reducción de emisiones**

Se recomienda la instalación de un sistema de minimización de emisiones particuladas (hollín), a fin de mitigar la contaminación. En este caso se propone la instalación de un lavador de gases, sistema que arrastra los sólidos, siendo también necesaria la instalación de un sedimentador, de tal manera que el agua de lavado pueda ser reutilizada y los sólidos separados puedan ser utilizados luego de su acondicionamiento como fertilizante.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

1. En los casos evaluados, se puede notar que las eficiencias calculadas no varían significativamente de un método a otro.
 2. Para una evaluación completa es recomendable utilizar el método indirecto ya que permite identificar el origen de las pérdidas.
 3. La eficiencia energética en promedio para el caso de la caldera pirotubular de baja potencia (125 BHP) es de 68.8%, valor que se encuentra por debajo del valor óptimo de 83%; esta eficiencia puede incrementarse con las mejoras propuestas hasta 79.8%, lográndose un ahorro en el consumo de combustible de 13.7%.
 4. Las pérdidas más significativas en las calderas de menor eficiencia (1 y 3) son las debidas a los gases de chimenea. Para el caso de la caldera 1, la pérdida es de 24%, lo cual se debería a la mala transferencia de calor por incrustaciones del lado del agua y gases; en cuanto a la caldera 3 que usa bagazo como combustible es de 43.3 %, y se atribuye al alto porcentaje de humedad del bagazo.
 5. Es posible lograr ahorros económicos y beneficios ambientales con una operación eficiente de los sistemas de combustión. Para mantener una eficiente operación de estos sistemas es necesario contar con un adecuado programa de mantenimiento; cuando los componentes del sistema de combustión presentan fallas, no puede realizarse un ajuste completo de la combustión, es decir a llegar al mínimo exceso de aire e inquemados.
-

6. Los beneficios ambientales que se pueden obtener por una buena operación de los sistemas de combustión, se derivan del menor consumo de combustible, lo cual implica producir un menor volumen de gases de combustión que afectan el ambiente, tales como el CO₂ (gas de efecto invernadero), NO_x y SO₂ (gases tóxicos y formadores de lluvia ácida), CO (gas tóxico) y partículas (hollín).
7. El control del exceso de aire es una de las técnicas más efectivas para mejorar la eficiencia de una caldera, con inversiones que pueden ser bajas o moderadas, dependiendo del sistema de control que se adopte.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Para una adecuada evaluación energética en calderas es necesario contar con información real del consumo de combustible, lo cual permitirá contabilizar los ahorros derivados de las mejoras que se implementen.
 2. En el caso del caldero 1, se recomienda mejorar el tratamiento del agua de alimentación, así como la revisión de tubos de calentamiento que reducen transmisión de calor hacia el agua.
 3. Para las calderas 2 y 3, se recomienda automatizar las purgas y aprovechar la energía de estas para elevar la temperatura del agua de alimentación.
 4. Es recomendable llevar acabo el mantenimiento preventivo de los sistemas de combustión en las calderas de vapor, lo cual permite conseguir ahorros de energía y reducción de las emisiones al ambiente. Después de cada mantenimiento se deben realizar pruebas y ajustes periódicos de la combustión (cada 3 meses), chequeando que sus parámetros estén dentro de los rangos antes recomendados.
-

5. En términos generales, los puntos que deberán ser atendidos en los programas de mantenimiento preventivo de los sistemas de combustión de las calderas, son: quemadores, ventiladores, controles, instrumentos, calentadores de combustible, bomba de combustible, filtros, compresor de aire y termómetros.

 6. Establecer un programa de capacitación al personal operativo de calderas, referido al mantenimiento energético y operación eficiente de calderas.
-

5. BIBLIOGRAFIA

Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía - IDAE, Uso Eficiente de energía en calderas y redes de fluidos, El Instituto, 1988, pag. 38.

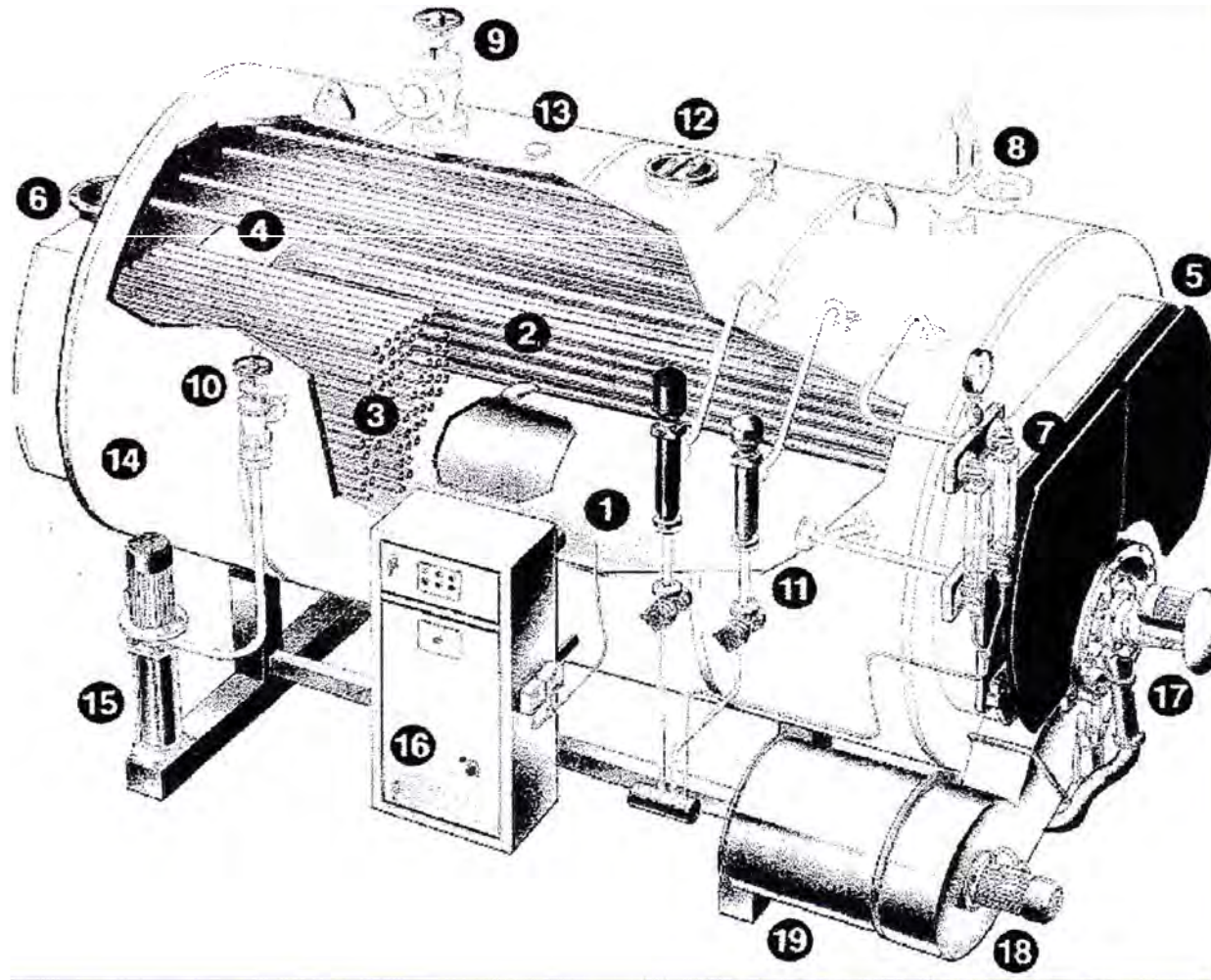
Energy Efficiency Best Practice Programme, Energy Efficient Operation of industrial Boiler Plant, Crown copyrigh, England, 1999, pag. 4.

Proyecto para ahorro de energía – PAE, Manual para expertos y consultores en Eficiencia Energética y Energías Renovables, 1999, pag. 1.1-1.

Instituto de Investigación Tecnológica Industrial y de Normas Técnicas, Manual de Eficiencia Energética en Calderas Industriales, fondo editorial CDI, 1991, pag. 6.

APENDICE A
DETALLE DE COMPONENTES DE CALDERAS

CALDERA PIROTUBULAR



- 1 Hogar.
- 2 Tubos (2do paso)
- 3 Tubos (3er paso)
- 4 Cámara de combustión
- 5 Caja de humos frontal
- 6 Caja de salida posterior
- 7 Visor
- 8 Válvula de seguridad
- 9 Válv. salida vapor
- 10 Válv retención agua
- 11 Controles de nivel
- 12 Entrada de hombre
- 13 Conex.repuesto
- 14 Carcaza
- 15 Bomba agua
- 16 Panel de control
- 17 Quemador
- 18 Ventilador
- 19 Silenciador ventilador

APENDICE B
DETALLE DE FORMULAS METODO INDIRECTO

BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA
FORMULAS EMPLEADAS

1. Pérdida de calor del gas seco (P_{gs}) : [kcal/h]

$$P_{gs} = m_{gs} * C_{pg} * (T_{gch} - T_o) \quad \text{[kcal/h]}$$

2. Pérdida de calor del gas húmedo (P_{gw}) : [kcal/h]

$$P_{gw} = [(0,09 * \%W_H + n * r_{a/c} * \phi_a) * m_c * C_{pvag}(T_{gch} - T_o) + (C_{va} + 0,01 * \%W_{H2O}) * m_c * (H_{vr} - T_o)] \quad \text{: Para PCI}$$

$$P_{gw} = [(C_{va} + 0,09 * \%W_H + 0,01 * \%W_{H2O}) * m_c * (H_{vr} - T_o) + n * r_{a/c} * \phi_a * m_c * C_{pvag}(T_{gch} - T_o)] \quad \text{: Para PCS}$$

3. Pérdida por inquemados sólidos (P_{Is}) : [kcal/h]

$$P_{Is} = [(IB / 200) * m_c * PCI] \quad \text{: Para PCI}$$

$$P_{Is} = [(IB / 200) * m_c * PCS] \quad \text{: Para PCS}$$

4. Pérdida por inquemados gaseosos (P_{Ig}) : [kcal/h]

$$P_{Ig} = 56,5 * \%W_c * [0,0001 * CO_{(ppm)} / (\%V_{CO2} + 0,0001 * \%W_c)] * m_c$$

5. Pérdida de calor por purga (P_p) : [kcal/h]

$$P_p = C_{purga} * (H_{purga} - T_o)$$

6. Pérdidas por radiación (P_r) : [kcal/h]

A obtenerse de la fórmula empírica de la norma DIN 1942.

$$Pr_c = \left(\frac{0.0113 * P^{0.7}}{Q} \right) * 100$$

Donde:

P	=	Potencia de la caldera (MW)
Q	=	Generación de vapor (kg/h)
T_o	=	Temperatura de referencia (°C)
T_{gch}	=	Temperatura del gas de chimenea (°C)
T_g	=	Temperatura del gas de chimenea (°C)
T_{cq}	=	Temperatura del combustible al ingreso del quemador (°C)
T_{aa}	=	Temperatura del agua de alimentación (°C)
T_a	=	Temperatura de ingreso del aire de combustión (°C)
$r_{a.c}$	=	Relación aire combustible estequiométrico (kg/kg)
Q_{wa}	=	Calor del agua de alimentación (kcal/h)
Q_{vp}	=	Calor del vapor de precalentamiento (kcal/h)
Q_{va}	=	Calor del vapor de atomización (kcal/h)
Q_v	=	Calor del vapor (kcal/h)
Q_{CT}	=	Calor sensible del combustible (kcal/h)
Q_{CR}	=	Calor de reacción del combustible (kcal/h)
Q_c	=	Caudal de combustible (gal/h)
Q_{aw}	=	Calor del aire húmedo (kcal/h)
Q_{as}	=	Calor del aire seco (kcal/h)
P_r	=	Pérdida por radiación y convección (%)
P_p	=	Pérdida de calor por las purgas (%)
P_{Is}	=	Pérdida por inquemados sólidos (%)
P_{Ig}	=	Pérdida por inquemados gaseosos (%)

P_{gw}	=	Pérdida de calor del gas húmedo (%)
P_{gs}	=	Pérdida de calor del gas seco (%)
PCS	=	Poder calorífico superior (kcal/gal)
PCI	=	Poder calorífico inferior (kcal/gal)
P	=	Presión (mmHg)
n	=	Índice de exceso de aire.
m_{wa}	=	Flujo de agua de alimentación (kg/h)
m_{vp}	=	Flujo de vapor de Precalentamiento (kg/h)
m_v	=	Flujo de vapor (kg/h)
m_{gw}	=	Flujo de gas húmedo (kg/h)
m_{gs}	=	Flujo de gas seco (kg/h)
m_c	=	Flujo de combustible (kg/h)
m_{aw}	=	Flujo de aire húmedo (kg/h)
m_{as}	=	Flujo de aire seco (kg/h)
m_{va}	=	Flujo de vapor de atomización (kg/hr)
IB	=	Índice de Bacharach
H_{vs}	=	Entalpía del vapor saturado (kcal/kg)
H_{vr}	=	Entalpía del vapor recalentado (kcal/kg)
H_{vpre}	=	Entalpía del vapor de precalentamiento (kcal/kg)
H_{va}	=	Entalpía del vapor de atomización (kcal/kg)
H_{purga}	=	Entalpía del agua de purga (kcal/kg)
H_g	=	Humedad del gas (%)
H_a	=	Humedad del aire (%)
e_a	=	Exceso de aire (%)
C_{va}	=	Caudal del vapor de atomización saturado (kg/kg _{comb})
C_{pvag}	=	Calor específico medio del vapor de agua del gas (kcal/kg °C)
C_{purga}	=	Caudal de purga (l/h)
C_{pg}	=	Calor específico medio de los gases (kcal/kg °C)
C_{pc}	=	Calor específico medio del combustible (kcal/kg °C)
C_{pa}	=	Calor específico medio del aire (kcal/kg °C)
C_{aa}	=	Caudal de agua de alimentación (l/h)

$^{\circ}\text{API}_{\text{comb}}$	=	Grados API del combustible
ψ_r	=	Humedad relativa del aire (%)
δ_{ct}	=	Densidad del combustible a la temperatura de flujo (kg/l)
ϕ_a	=	Humedad absoluta del aire (kg/kg)
η	=	Eficiencia de la caldera (%)
$\%W_s$	=	Porcentaje en peso de azufre
$\%W_{\text{O}_2}$	=	Porcentaje en peso de O_2
$\%W_{\text{O}}$	=	Porcentaje en peso de O
$\%W_{\text{N}_2}$	=	Porcentaje en peso de N_2
$\%W_{\text{N}}$	=	Porcentaje en peso de nitrógeno
$\%W_{\text{H}_2\text{O}}$	=	Porcentaje en peso de agua
$\%W_{\text{H}}$	=	Porcentaje en peso de hidrogeno
$\%W_{\text{C}_2}$	=	Porcentaje en peso de C_2
$\%W_{\text{C}}$	=	Porcentaje en peso de C
$\%V_{\text{O}_2}$	=	Porcentaje en volumen de O_2
$\%V_{\text{CO}_2}$	=	Porcentaje en volumen de CO_2

APENDICE C
BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA EN LOS CASOS
EVALUADOS

**BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA
CALDERO PIROTUBULAR - CARGA ALTA**

ENTRADA DE DATOS	VALOR	UNIDAD
1. DATOS DE LA CALDERA		
Presión nominal	10	kg/cm ²
Temperatura nominal		°C
Producción de vapor	1651	kg/h
Potencia nominal	125	BHP
Potencia nominal	1226	kW
2. CONDICIONES AMBIENTALES		
Presión	752	mm Hg
Temperatura	23,5	°C
Humedad relativa	71,4	%
3. CONDICIONES DE REFERENCIA PARA EL BALANCE		
Temperatura	23,5	°C
Poder calorífico del combustible P C I = 1 / P C S = 2	2	#
4. DATOS DEL COMBUSTIBLE		
Tipo de combustible	PR-6	
Caudal	30	gal/h
Temperatura de medición de flujo	100	°C
Temperatura de ingreso al quemador	110	°C
Composición		
C	86	% peso
H	11	% peso
O	1	% peso
N	0,2	% peso
S	1	% peso
Agua	0,8	% peso
Características		
°API	15,2	#
P C S	10338	kcal/kg
P C I	9761	kcal/kg
Densidad (60/60)	0,9646	kg/l
Densidad a temperatura de medición de flujo	0,9167	kg/l
5. DATOS DEL AIRE DE COMBUSTION		
Composición		
O ₂	23,2	% peso
N ₂	76,8	% peso
Temperatura de ingreso	23,5	°C
Humedad absoluta	0,0131	kg/kg AS

6. DATOS DEL AGUA DE ALIMENTACION		
Caudal total	1270	l/h
Temperatura	50	°C
7. DATOS DEL VAPOR		
Tipo: Saturado = 1 / Recalentado = 2	1	#
Caudal	1207	kg/h
Presión absoluta	9,16	kg/cm ²
Temperatura	175	°C
8. DATOS DEL GAS DE CHIMENEA		
Temperatura	275	°C
Composición		
O ₂	11,5	%
CO ₂	7,5	%
CO	240	ppm
Indice de Bacharach	8	#
9. DATOS DE LA PURGA		
Caudal	62	kg/h
Presión absoluta	9,16	kg/cm ²
10. DATOS DEL VAPOR DE ATOMIZACION (Saturado)		
Caudal	0	
Presión absoluta	1	kg/cm ²
11. DATOS DE TABLAS DE VAPOR		
Entalpía del vapor saturado	662,2	kcal/kg
Entalpía del vapor recalentado	#N/A	kcal/kg
Entalpía del agua de purga	177,3	kcal/kg
Entalpía del vapor recalentado a T° del gas	722,9	kcal/kg
Entalpía del vapor de atomizacion	638,8	kcal/kg
12. DATOS DE CAPACIDADES CALORIFICAS		
Cp medio del aire de combustión	0,24	kcal/kg°C
Cp medio del O ₂ del gas	0,23	kcal/kg°C
Cp medio del CO ₂ del gas	0,226	kcal/kg°C
Cp medio del N ₂ del gas	0,252	kcal/kg°C
Cp medio del gas seco	0,246	kcal/kg°C
Cp medio del H ₂ O(v) del gas	0,46	kcal/kg°C
Cp medio del combustible	0,42	kcal/kg°C
13. OTROS DATOS		
Factor de carga de la caldera	73,1	%
Aire estequiométrico	13,69	kg/kg
Aire estequiométrico	10,14	Nm ³ /kg
Exceso de aire	115,8	%
Indice de exceso de aire	2,158	#

**BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA
CALDERO PIROTUBULAR - CARGA ALTA**

BALANCE DE MATERIA		
ENTRADAS	kg/h	Nm3/h
Combustible	104	
Aire seco	3072	2276
Humedad del aire	40	48
Agua de alimentación	1270	
Vapor de atomización	0	0
TOTAL	4486	2324
SALIDAS		
Gas Seco	3073	2222
Humedad del Gas	144	177
Vapor	1207	
Purga	62	
TOTAL	4486	2399

BALANCE DE ENERGIA		
ENTRADAS	kcal/h	%
Combustible	1075152	96,64
calor de reacción	3778	0,34
calor sensible	0	0,00
Aire seco	0	0,00
Humedad del aire	33655	3,02
Agua de alimentación	0	0,00
TOTAL	1112585	100

SALIDAS	kcal/h	%
Gas seco	190123	17,09
Humedad del gas	77249	6,94
Vapor	770911	69,29
Purga	9393	0,84
Inquemados gaseosos	1612	0,14
Inquemados sólidos	43006	3,87
Pérdidas por radiación y convección.	16201	1,46
Calor residual	4090	0,37
TOTAL	1112585	100

EFICIENCIA DE LA CALDERA	69,29	%
---------------------------------	--------------	----------

**BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA
CALDERO PIROTUBULAR - CARGA BAJA**

ENTRADA DE DATOS	VALOR	UNIDAD
1. DATOS DE LA CALDERA		
Presión nominal	10	kg/cm ²
Temperatura nominal	-	°C
Producción de vapor	1651	kg/h
Potencia nominal	125	BHP
Potencia nominal	1226	kW
2. CONDICIONES AMBIENTALES		
Presión	752	mm Hg
Temperatura	23,5	°C
Humedad relativa	71,4	%
3. CONDICIONES DE REFERENCIA PARA EL BALANCE		
Temperatura	23,5	°C
Poder calorífico del combustible P C I = 1 / P C S = 2	2	#
4. DATOS DEL COMBUSTIBLE		
Tipo de combustible	PR-6	
Caudal	21,5	gal/h
Temperatura de medición de flujo	100	°C
Temperatura de ingreso al quemador	110	°C
Composición		
C	86	% peso
H	11	% peso
O	1	% peso
N	0,2	% peso
S	1	% peso
Agua	0,8	% peso
Características		
°API	15,2	#
P C S	10338	kcal/kg
P C I	9761	kcal/kg
Densidad (60/60)	0,9646	kg/l
Densidad a temperatura de medición de flujo	0,9167	kg/l
5. DATOS DEL AIRE DE COMBUSTION		
Composición		
O ₂	23,2	% peso
N ₂	76,8	% peso
Temperatura de ingreso	23,5	°C
Humedad absoluta	0,0131	kg/kg AS

6. DATOS DEL AGUA DE ALIMENTACION		
Caudal total	920	l/h
Temperatura	50	°C
7. DATOS DEL VAPOR		
Tipo: Saturado = 1 / Recalentado = 2	1	#
Caudal	858	kg/h
Presión absoluta	9,16	kg/cm ²
Temperatura	175	°C
8. DATOS DEL GAS DE CHIMENEA		
Temperatura	254	°C
Composición		
O ₂	12,3	%
CO ₂	7	%
CO	230	ppm
Indice de Bacharach	8	#
9. DATOS DE LA PURGA		
Caudal	62	kg/h
Presión absoluta	9,16	kg/cm ²
10. DATOS DEL VAPOR DE ATOMIZACION (Saturado)		
Caudal	0	
Presión absoluta	1	kg/cm ²
11. DATOS DE TABLAS DE VAPOR		
Entalpía del vapor saturado	662,2	kcal/kg
Entalpía del vapor recalentado	#N/A	kcal/kg
Entalpía del agua de purga	177,3	kcal/kg
Entalpía del vapor recalentado a T° del gas	713	kcal/kg
Entalpía del vapor de atomizacion	638,8	kcal/kg
12. DATOS DE CAPACIDADES CALORIFICAS		
Cp medio del aire de combustión	0,24	kcal/kg°C
Cp medio del O ₂ del gas	0,229	kcal/kg°C
Cp medio del CO ₂ del gas	0,224	kcal/kg°C
Cp <i>medio</i> del N ₂ del gas	0,251	kcal/kg°C
Cp medio del gas seco	0,245	kcal/kg°C
Cp medio del H ₂ O(v) del gas	0,459	kcal/kg°C
Cp medio del combustible	0,42	kcal/kg°C
13. OTROS DATOS		
Factor de carga de la caldera	52	%
Aire estequiométrico	13,69	kg/kg
Aire estequiométrico	10,14	Nm ³ /kg
Exceso de aire	135,9	%
Indice de exceso de aire	2,359	#

**BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA
CALDERO PIROTUBULAR - CARGA BAJA**

BALANCE DE MATERIA		
ENTRADAS	kg/h	Nm3/h
Combustible	75	
Aire seco	2422	1794
Humedad del aire	32	38
Agua de alimentación	920	
Vapor de atomización	0	0
TOTAL	3449	1832
BALANCE DE MATERIA		
SALIDAS	kg/h	Nm3/h
Gas Seco	2422	1756
Humedad del Gas	107	131
Vapor	858	
Purga	62	
TOTAL	3449	1887

BALANCE DE ENERGIA		
ENTRADAS	kcal/h	%
Combustible	775350	96,62
calor de reacción	2725	0,34
calor sensible	0	0,00
Aire seco	0	0,00
Humedad del aire	24380	3,04
Agua de alimentación	0	0,00
TOTAL	802455	100

SALIDAS	kcal/h	%
Gas seco	136776	17,04
Humedad del gas	54966	6,85
Vapor	548005	68,29
Purga	9393	1,17
Inquemados gaseosos	1193	0,15
Inquemados sólidos	31014	3,86
Pérdidas por radiación y convección.	16438	2,05
Calor residual	4670	0,58
TOTAL	802455	100

EFICIENCIA DE LA CALDERA	68,29	%
---------------------------------	--------------	----------

**BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA
CALDERO ACUOTUBULAR - CARGA ALTA**

ENTRADA DE DATOS	VALOR	UNIDAD
1. DATOS DE LA CALDERA		
Presión nominal	37	kg/cm ²
Temperatura nominal	350	°C
Producción de vapor	52657	kg/h
Potencia nominal	4600	BHP
Potencia nominal	45126	kW
2. CONDICIONES AMBIENTALES		
Presión	752	mm Hg
Temperatura	23,5	°C
Humedad relativa	70	%
3. CONDICIONES DE REFERENCIA PARA EL BALANCE		
Temperatura	23,5	°C
Poder calorífico del combustible P C I = 1 / P C S = 2	2	#
4. DATOS DEL COMBUSTIBLE		
Tipo de combustible	PR-6	
Caudal	955	gal/h
Temperatura de medición de flujo	100	°C
Temperatura de ingreso al quemador	110	°C
Composición		
C	86	% peso
H	11	% peso
O	1	% peso
N	0,2	% peso
S	1	% peso
Agua	0,8	% peso
Características		
°API	15,2	#
P C S	10338	kcal/kg
P C I	9761	kcal/kg
Densidad (60/60)	0,9646	kg/l
Densidad a temperatura de medición de flujo	0,9167	kg/l
5. DATOS DEL AIRE DE COMBUSTION		
Composición		
O ₂	23,2	% peso
N ₂	76,8	% peso
Temperatura de ingreso	23,5	°C
Humedad absoluta	0,0128	kg/kg AS

6. DATOS DEL AGUA DE ALIMENTACION		
Caudal total	42600	l/h
Temperatura	110	°C
7. DATOS DEL VAPOR		
Tipo: Saturado = 1 / Recalentado = 2	2	#
Caudal	42086	kg/h
Presión absoluta	38,2	kg/cm ²
Temperatura	350	°C
8. DATOS DEL GAS DE CHIMENEA		
Temperatura	278	°C
Composición		
O ₂	6	%
CO ₂	11,9	%
CO	6	ppm
Indice de Bacharach	2	#
9. DATOS DE LA PURGA		
Caudal	513	kg/h
Presión absoluta	38,2	kg/cm ²
10. DATOS DEL VAPOR DE ATOMIZACION (Saturado)		
Caudal	0,066	
Presión absoluta	1	kg/cm ²
11. DATOS DE TABLAS DE VAPOR		
Entalpía del vapor saturado	#N/A	kcal/kg
Entalpía del vapor recalentado	760,3	kcal/kg
Entalpía del agua de purga	255,1	kcal/kg
Entalpía del vapor recalentado a T° del gas	724,3	kcal/kg
Entalpía del vapor de atomizacion	638,8	kcal/kg
12. DATOS DE CAPACIDADES CALORIFICAS		
Cp medio del aire de combustión	0,24	kcal/kg°C
Cp medio del O ₂ del gas	0,23	kcal/kg°C
Cp medio del CO ₂ del gas	0,227	kcal/kg°C
Cp medio del N ₂ del gas	0,252	kcal/kg°C
Cp medio del gas seco	0,246	kcal/kg°C
Cp medio del H ₂ O(v) del gas	0,461	kcal/kg°C
Cp medio del combustible	0,42	kcal/kg°C
13. OTROS DATOS		
Factor de carga de la caldera	79,9	%
Aire estequiométrico	13,69	kg/kg
Aire estequiométrico	10,14	Nm ³ /kg
Exceso de aire	38,2	%
Indice de exceso de aire	1,382	#

**BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA
CALDERO ACUOTUBULAR - CARGA ALTA**

BALANCE DE MATERIA		
ENTRADAS	kg/h	Nm3/h
Combustible	3314	
Aire seco	62699	46441
Humedad del aire	803	956
Agua de alimentación	42600	
Vapor de atomización	219	271
TOTAL	109635	47668
SALIDAS		
Gas Seco	62707	44742
Humedad del Gas	4329	5329
Vapor	42086	
Purga	513	
TOTAL	109635	50071

BALANCE DE ENERGIA		
ENTRADAS	kcal/h	%
Combustible	34260132	89,69
calor de reacción	120398	0,32
calor sensible	0	0,00
Aire seco	0	0,00
Humedad del aire	3684900	9,65
Agua de alimentación	134751	0,35
TOTAL	38200181	100

SALIDAS	kcal/h	%
Gas seco	3925897	10,28
Humedad del gas	2565247	6,72
Vapor	31008965	81,17
Purga	167495	0,44
Inquemados gaseosos	812	0,00
Inquemados sólidos	342601	0,90
Pérdidas por radiación y convección.	172537	0,45
Calor residual	16628	0,04
TOTAL	38200181	100

EFICIENCIA DE LA CALDERA	81,17	%
---------------------------------	--------------	----------

**BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA
CALDERO ACUOTUBULAR - CARGA BAJA**

ENTRADA DE DATOS	VALOR	UNIDAD
1. DATOS DE LA CALDERA		
Presión nominal	37	kg/cm ²
Temperatura nominal	350	°C
Producción de vapor	52657	kg/h
Potencia nominal	4600	BHP
Potencia nominal	45126	kW
2. CONDICIONES AMBIENTALES		
Presión	752	mm Hg
Temperatura	23,5	°C
Humedad relativa	70	%
3. CONDICIONES DE REFERENCIA PARA EL BALANCE		
Temperatura	23,5	°C
Poder calorífico del combustible P C I = 1 / P C S = 2	2	#
4. DATOS DEL COMBUSTIBLE		
Tipo de combustible	PR-6	
Caudal	550	gal/h
Temperatura de medición de flujo	100	°C
Temperatura de ingreso al quemador	110	°C
Composición		
C	86	% peso
H	11	% peso
O	1	% peso
N	0,2	% peso
S	1	% peso
Agua	0,8	% peso
Características		
°API	15,2	#
P C S	10338	kcal/kg
P C I	9761	kcal/kg
Densidad (60/60)	0,9646	kg/l
Densidad a temperatura de medición de flujo	0,9167	kg/l
5. DATOS DEL AIRE DE COMBUSTION		
Composición		
O ₂	23,2	% peso
N ₂	76,8	% peso
Temperatura de ingreso	23,5	°C
Humedad absoluta	0,0128	kg/kg AS

6. DATOS DEL AGUA DE ALIMENTACION		
Caudal total	22700	l/h
Temperatura	110	°C
7. DATOS DEL VAPOR		
Tipo: Saturado = 1 / Recalentado = 2	2	#
Caudal	22187	kg/h
Presión absoluta	38,2	kg/cm ²
Temperatura	350	°C
8. DATOS DEL GAS DE CHIMENEA		
Temperatura	260	°C
Composición		
O ₂	11,2	%
CO ₂	7,8	%
CO	250	ppm
Indice de Bacharach	4	#
9. DATOS DE LA PURGA		
Caudal	513	kg/h
Presión absoluta	38,2	kg/cm ²
10. DATOS DEL VAPOR DE ATOMIZACION (Saturado)		
Caudal	0,066	
Presión absoluta	1	kg/cm ²
11. DATOS DE TABLAS DE VAPOR		
Entalpía del vapor saturado	#N/A	kcal/kg
Entalpía del vapor recalentado	760,3	kcal/kg
Entalpía del agua de purga	255,1	kcal/kg
Entalpía del vapor recalentado a T° del gas	715,8	kcal/kg
Entalpía del vapor de atomización	638,8	kcal/kg
12. DATOS DE CAPACIDADES CALORIFICAS		
Cp medio del aire de combustión	0,24	kcal/kg°C
Cp medio del O ₂ del gas	0,229	kcal/kg°C
Cp medio del CO ₂ del gas	0,225	kcal/kg°C
Cp medio del N ₂ del gas	0,251	kcal/kg°C
Cp medio del gas seco	0,245	kcal/kg°C
Cp medio del H ₂ O(v) del gas	0,46	kcal/kg°C
Cp medio del combustible	0,42	kcal/kg°C
13. OTROS DATOS		
Factor de carga de la caldera	42,1	%
Aire estequiométrico	13,69	kg/kg
Aire estequiométrico	10,14	Nm ³ /kg
Exceso de aire	109,4	%
Indice de exceso de aire	2,094	#

**BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA
CALDERO ACUOTUBULAR - CARGA BAJA**

BALANCE DE MATERIA		
ENTRADAS	kg/h	Nm3/h
Combustible	1908	
Aire seco	54696	40513
Humedad del aire	700	834
Agua de alimentación	22700	
Vapor de atomización	126	156
TOTAL	80130	41503

SALIDAS	kg/h	Nm3/h
Gas Seco	54700	39535
Humedad del Gas	2730	3352
Vapor	22187	
Purga	513	
TOTAL	80130	42887

BALANCE DE ENERGIA		
ENTRADAS	kcal/h	%
Combustible	19724904	90,33
calor de reacción	69318	0,32
calor sensible	0	0,00
Aire seco	0	0,00
Humedad del aire	1963550	8,99
Agua de alimentación	77528	0,36
TOTAL	21835300	100

SALIDAS	kcal/h	%
Gas seco	3169455	14,52
Humedad del gas	1481612	6,79
Vapor	16347382	74,87
Purga	167495	0,77
Inquemados gaseosos	29620	0,14
Inquemados sólidos	394498	1,81
Pérdidas por radiación y convección.	187074	0,86
Calor residual	58164	0,27
TOTAL	21835300	100

EFICIENCIA DE LA CALDERA	74,87	%
---------------------------------	--------------	----------

**BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA
CALDERO ACUOTUBULAR - BAGACERO**

BALANCE DE MATERIA		
ENTRADAS	kg/h	Nm3/h
Combustible	19000	
Aire seco	133102	97248
Humedad del aire	1464	1721
Agua de alimentación	32000	
Vapor de atomización	1254	1555
TOTAL	186820	100524
SALIDAS		
Gas Seco	137594	97726
Humedad del Gas	17228	21269
Vapor	31551	
Purga	447	
TOTAL	186820	118995

BALANCE DE ENERGIA		
ENTRADAS	kcal/h	%
Combustible	40680900	92,00
calor de reacción	0	0,00
Aire seco	0	0,00
Humedad del aire	2768000	6,26
Agua de alimentación	771586	1,74
TOTAL	44220486	100

SALIDAS	kcal/h	%
Gas seco	8039961	18,18
Humedad del gas	11088441	25,08
Vapor	23253087	52,58
Purga	145946	0,33
Inquemados gaseosos	403255	0,91
Inquemados sólidos	1017023	2,30
Pérdidas por radiación y convección.	197470	0,45
Calor residual	75304	0,17
TOTAL	44220486	100

EFICIENCIA DE LA CALDERA	52,58	%
---------------------------------	--------------	----------

**BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA
CALDERO ACUOTUBULAR - BAGACERO**

ENTRADA DE DATOS	VALOR	UNIDAD
1. DATOS DE LA CALDERA		
Presión nominal	42	kg/cm ²
Temperatura nominal	350	°C
Producción de vapor	34332	kg/h
Potencia nominal	3000	BHP
Potencia nominal	29430	kW
2. CONDICIONES AMBIENTALES		
Presión	752	mm Hg
Temperatura	23,5	°C
Humedad relativa	60	%
3. CONDICIONES DE REFERENCIA PARA EL BALANCE		
Temperatura	23,5	°C
Poder calorífico del combustible P C I = 1 / P C S = 2	2	#
4. DATOS DEL COMBUSTIBLE		
Tipo de combustible	Bagazo	
Caudal	19000	kg/h
Temperatura de medición de flujo	23,5	°C
Temperatura de ingreso al quemador	23,5	°C
Composición		
C	23,56	% peso
H	2,93	% peso
O	23,46	% peso
N	0,05	% peso
S	0	% peso
Agua	50	% peso
Características		
°API	15,2	#
P C S	2141,1	kcal/kg
5. DATOS DEL AIRE DE COMBUSTION		
Composición		
O ₂	23,2	% peso
N ₂	76,8	% peso
Temperatura de ingreso	23,5	°C
Humedad absoluta	0,011	kg/kg AS

6. DATOS DEL AGUA DE ALIMENTACION		
Caudal total	32000	l/h
Temperatura	110	°C
7. DATOS DEL VAPOR		
Tipo: Saturado = 1 / Recalentado = 2	2	#
Caudal	31551	kg/h
Presión absoluta	42,4	kg/cm ²
Temperatura	350	°C
8. DATOS DEL GAS DE CHIMENEA		
Temperatura	262	°C
Composición		
O ₂	12,9	
CO ₂	7,9	
CO	1280	
Indice de Bacharach	5	#
9. DATOS DE LA PURGA		
Caudal	447	kg/h
Presión absoluta	42,4	kg/cm ²
10. DATOS DEL VAPOR DE ATOMIZACION (Saturado)		
Caudal	0,066	
Presión absoluta	1	kg/cm ²
11. DATOS DE TABLAS DE VAPOR		
Entalpía del vapor saturado	#N/A	kcal/kg
Entalpía del vapor recalentado	760,5	kcal/kg
Entalpía del agua de purga	262,4	kcal/kg
Entalpía del vapor recalentado a T° del gas	716,7	kcal/kg
Entalpía del vapor de atomización	638,8	kcal/kg
12. DATOS DE CAPACIDADES CALORIFICAS		
Cp medio del aire de combustión	0,24	kcal/kg°C
Cp medio del O ₂ del gas	0,229	kcal/kg°C
Cp medio del CO ₂ del gas	0,225	kcal/kg°C
Cp medio del N ₂ del gas	0,251	kcal/kg°C
Cp medio del gas seco	0,245	kcal/kg°C
Cp medio del H ₂ O(v) del gas	0,46	kcal/kg°C
13. OTROS DATOS		
Factor de carga de la caldera	91,9	%
Aire estequiométrico	2,71	kg/kg
Aire estequiométrico	1,98	Nm ³ /kg
Exceso de aire	158,5	%
Indice de exceso de aire	2,585	#