

LAS CALDERAS DE LOS INGENIOS AZUCAREROS Y LA AUSTERIDAD ECONÓMICA

Ing. WILLIAM A. MANSO HERNANDEZ

RESUMEN

Las calderas de un Ingenio Azucarero son grandes y pesados equipos que operan continuamente bajo severos parámetros los cuales contribuyen al deterioro de sus componentes y reducción de sus eficiencias y confiabilidad. A la vez, su vida útil es muy prolongada por lo cual ocasionalmente pueden resultar obsoletas con respecto a las necesidades energéticas y operativas del ingenio. En tiempos de crisis se impone la conveniencia de sacar el máximo beneficio de las calderas aprovechando sus potencialidades y disponer de las posibilidades de mejorarlas o adecuarlas a diferentes condiciones de operación. El Autor analiza la eficiencia de las calderas y su relación con el diseño y el estado técnico a la vez que esclarece las condiciones bajo las cuales pueden hacerse algunas mejoras a la eficiencia térmica y la capacidad de éstas dentro de un margen económico aceptable.

INTRODUCCIÓN

Hay consenso que las calderas son el corazón de cualquier ingenio. Suministran el vapor necesario para mover los motores primarios cuyo escape sirve a su vez como vapor para el proceso. Como las calderas se diseñan y fabrican con factores de seguridad apropiados a los parámetros tan intensos que impone su operación poseen una robustez considerable que contribuye a su prolongada vida útil tanto de diseño como de realidad práctica. Esa robustez y la consideración –mas o menos real-- de que las calderas no influyen en la extracción y rendimiento de sacarosa, precisamente permiten que a la hora de reducir presupuestos en mantenimiento o mejoras sean, muchas veces, las calderas las *“dejadas para el año que viene”*

Si bien es cierto que esto es posible, los gastos eliminados en calderas pueden contribuir a elevar los costos a la larga cuando el deterioro puede implicar grandes reparaciones, perdida de eficiencia que aumente el consumo de combustible o la sustitución de la caldera.

Cuando la austeridad se impone, conviene analizar el costo del combustible adicional y del deterioro acumulado, probablemente sea motivo para invertir en las calderas, no para dejar de invertir. Las calderas brindan muchas oportunidades como se indica brevemente en este trabajo cuyo objetivo es llamar la atención sobre posibles mejoras y las premisas a cumplir para ello siempre considerando la austeridad de los gastos.

EFICIENCIA:

Aunque para casi todos está muy claro el concepto de eficiencia de una caldera, en ocasiones uno encuentra una consideración torcida que relaciona la capacidad de la caldera

“soportar” malos tratos y sobrecarga con su eficiencia. Esto está lejos de la verdad. La eficiencia de una caldera se define fácilmente como:

$$\text{Eficiencia} = (100 - \text{pérdidas de calor}) = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \text{ en } \%$$

Las pérdidas de calor son:

q₂: Pérdida de calor con los gases de escape, depende proporcionalmente de la humedad del combustible, del exceso de aire, la humedad ambiental y la temperatura de los gases. Como un índice aproximado se puede decir que cada 14°C de temperatura de los gases de chimenea es un punto porcentual de pérdidas de eficiencia.

Está claro que reducir esta pérdida es posible cuando se reduce la humedad del combustible, se eliminan o reducen las entradas de aire a la caldera y cuando se reduce la temperatura de los gases de salida a la chimenea. Al hablar de reducir (o tal vez sea más apropiado decir “limitar” la humedad del combustible) el Autor no se refiere al uso de secadores, sino a prevenir que el bagazo salga muy húmedo de los molinos o se humedezca con lluvia u otras causas.

q₃: Se define como tal la pérdida de calor por combustión incompleta desde el punto de vista químico, sencillamente expresado, CO que no llegó a ser CO₂.

Normalmente el valor de combustión química incompleta es apenas una fracción de punto porcentual. La calidad de la combustión química depende del diseño y la aerodinámica del horno en el movimiento de flujos de gases y partículas para que cada átomo de combustible (Carbono básicamente) pueda “encontrar” dos átomos de oxígeno.

q4: Es la pérdida de calor por combustión incompleta por causas mecánicas como derrames en la alimentación de combustible, combustible extraído junto con las cenizas o arrastrado con los gases. Su valor puede oscilar entre 2 y hasta 5 puntos porcentuales de la eficiencia en calderas normales, en calderas en muy mal estado, puede ser más alto.

Contribuyen al aumento de las pérdidas por incombustión mecánica, los sistemas de alimentación de combustible con derrames o fugas, las limpiezas muy frecuentes o muy retardadas, el exceso de tiro inducido, el diseño del horno con poco tiempo de retención, la alimentación de combustible muy alta en el horno o dispersa en el volumen y altura y otros factores.

q5: Se refiere a las pérdidas de calor al medio ambiente que rodea la caldera, ya sea por radiación o convección, su valor normalmente no es tan alto y se reduce cuando la caldera no se “enfía” externamente por el viento o las superficies de la caldera están adecuadamente aisladas.

q6: Es la pérdida de calor extraído de la caldera con escorias líquidas o ceniza. En calderas bagaceras no se considera. Influye negativamente en la eficiencia cuando hay mas de 10% de cenizas en el combustible.

RELACIÓN ENTRE EL AMBIENTE Y LA EFICIENCIA

La caldera bagacera afecta negativamente al ambiente por:

1. Liberación de gases, lamentablemente cada unidad de masa de combustible quemado libera o produce una cantidad de gases. Mientras menos combustible y mas eficientemente se queme, la caldera libera menos cantidad de gases. Si aumenta la eficiencia de la combustión se reduce la cantidad de CO (o productos parciales) emitido a la atmosfera y aumenta proporcionalmente la emisión de CO₂ u otros productos finales con una mayor liberación de calor y menor efecto nocivo.
2. Temperatura de los gases: Mientras mas calientes salen los gases, es fácil comprenderlo, mayor la contaminación térmica se calienta del medio y consecuentemente el planeta.
3. Partículas emitidas: Estas son de dos tipos, combustible parcialmente quemado (hollín, partículas semicarbonizadas o incluso apenas secadas en la caldera) y cenizas. La reducción de las partículas emitidas, hasta valores límites, propios de cada tipo de horno y caldera depende del buen estado, del diseño y de la humedad y fraccionamiento del combustible, el exceso de tiro y entradas de aire puede aumentar la emisión.

Hay diferentes sistemas de limpieza de gases:

1. Húmedos proveen niveles aceptables aunque requieren una volumen de agua en circulación, una reposición de esta y estaciones de limpieza del agua circulante.
2. Secos (diferentes aplicaciones de ciclones) tiene menos eficiencia, consumen mas potencia y generalmente requieren mantenimiento por erosión.

3. Filtros electrostáticos al parecer no están difundidos en la industria azucarera, probablemente por sus costos elevados.

TEMPERATURA DEL VAPOR SOBRECALENTADO

La temperatura del vapor sobrecalentado debe ser adecuada al tipo de turbinas existentes para obtener el vapor de escape con unos 12 o 14°C de sobrecalentamiento recomendado para obtener buena transferencia de calor en los vasos evaporadores y otros consumidores de escape. Si se incrementa la temperatura del vapor, para tener menos consumo específico, hay que tener en cuenta que cada turbina, según su eficiencia puede convertir en energía mecánica una fracción de la energía térmica del vapor, el resto de la energía “sale” con el escape como sobrecalentamiento y será necesario degradarla con sistemas de atemperadores, bombeo, controles automáticos que al final resultan en disminución de eficiencia del ciclo. Por el contrario, un vapor con temperatura inferior a la adecuada a la turbina resulta en mayor consumo específico y condensación en la propia turbina o líneas de escape.

COMBUSTIBLES AUXILIARES

Casi siempre cuando el balance de calor del ingenio o el estado técnico de los equipos es pobre hay que acudir a combustibles auxiliares, generalmente derivados del petróleo o gases, a veces leña u otros residuos combustibles. En algunos países se usa carbón mineral.

Aparte del efecto económico que implica el abastecimiento y manejo de estos combustibles auxiliares se debe considerar que una caldera bagacera se dimensiona y diseña para bagazo, un combustible de bajo poder calórico con humedad relativamente alta que requiere hornos

grandes y superficies de transferencia convectivas. Mientras, los combustibles de mayor poder calórico (derivados del petróleo, gases, carbón) son mas apropiados para la transferencia por radiación en hornos mas pequeños.

Cuando se instalan quemadores auxiliares en una caldera bagacera no sólo se aumenta el costo por el combustible y los quemadores propiamente sino que la distribución de calor y esfuerzos es diferente y el tamaño relativamente grande de la caldera bagacera y sus superficies convectivas se subutilizan. Si inevitablemente hay que quemar combustibles auxiliares, es recomendable, alternativamente, analizar la adquisición de una caldera compacta diseñada para el combustible auxiliar. La complejidad de la instalación y operación y la salvaguarda de la caldera bagacera probablemente serán razones válidas para la inversión.

MANTENIMIENTO

Es tan evidente la influencia del mantenimiento en el estado técnico de los equipos que probablemente no debe mencionarse en este espacio. Vale, sin embargo y por ejemplos bien conocidos, recordar que en las calderas:

- La eficiencia se reduce cuando hay entradas de aire, pérdidas de calor radiante o convectivo al medio, inestabilidad de la operación, purgas excesivas por agua de mala calidad, etc.
- La capacidad cae cuando hay baja eficiencia, ventiladores en mal estado, superficies sucias u obturadas, deterioro de los refractarios, etc.
- La eficiencia del ciclo cae cuando la caldera tiene baja eficiencia, cuando la temperatura del vapor es baja, cuando las purgas son excesivas.

- La confiabilidad cae cuando el trabajo de mantenimiento es malo, hay parches, tuberías viejas con fugas, etc.

Al pensar en estos aspectos se evidencia que reducir el mantenimiento de la caldera por austeridad económica puede implicar grandes gastos.

AUTOMÁTICA E INSTRUMENTACIÓN

Si bien en algunas calderas bagaceras hay aspectos de automatización que pueden ser poco efectivos por la tremenda diferencia entre el tiempo de respuesta del fenómeno a controlar y de los dispositivos de control, también es necesario enfatizar que los elementos de seguridad no deben obviarse y dejar en las manos de los operarios temas como el nivel de agua o el necesario barrido de gases cuando se queman gases o líquidos auxiliares. En el caso de calderas modernas, con altas presiones o temperaturas, paredes aleteadas, alimentación mecánica de combustible, etc. la automatización se ha logrado con éxito.

Como mínimo, para la operación, cada caldera debe tener un módulo de instrumentos que le permita a los operadores y supervisores qué está ocurriendo en cada instante.

CUANDO CONSIDERAR EL REDISEÑO DE UNA CALDERA

La mayoría de las calderas instaladas en ingenios azucareros son susceptibles de recibir mejoras, muchas tienen más de 20, 25, o exceden los 35 años de servicio y su diseño corresponde a la época de su montaje. Muy frecuentemente el resto del ingenio se ha modernizado, instalado nuevos consumidores o ha tenido algunos cambios y las calderas son las mismas con bajas eficiencias, insuficiente generación para cargas picos o las nuevas demandas, deterioro, roturas frecuentes, condiciones de trabajo incompatibles con las

normas de seguridad e higiene, consumo de combustible auxiliar, alta contaminación ambiental, etc.

En estos casos se plantea la necesidad de nuevas calderas, un ejercicio costoso y lento, poco atractivo en épocas de crisis económicas en que la austeridad gobierna a los buenos deseos y la empresa toma la decisión de acostumbrarse a los problemas o reducir molida. Sin embargo, mediante rediseños de las calderas se pueden resolver gran parte de los problemas con efectividad y mucho menos costo en dependencia del alcance del rediseño y la proporción de elementos que se mantienen o cambian:

- El aumento de capacidad se logra con incremento o modificaciones de las superficies de transferencia de calor.
- Aumentar la eficiencia comienza por establecer las causas de la baja eficiencia y buscar las oportunidades de mejoras en la caldera. La vía mas sencilla es reducir la temperatura de los gases por medio de superficies recuperativas de calor. Las dos superficies clásicas son el calentador de aire y el economizador. Conocidas, seguras y sin partes en movimiento. En dependencia del objetivo y aspectos de diseño de la caldera se instala uno de estas dos o diferentes combinaciones de economizadores y calentadores de aire.

Hace algunos años estuvieron “de moda” los secadores de bagazo, si bien el bagazo seco es mejor combustible, las dificultades de operación y para sellarlos, costos, mantenimiento y otros temas fuera de alcance de este trabajo, han convertido, excepto contados y honrosos casos, a la mayoría de los secadores instalados, en grandes monumentos metálicos de paternidad anónima.

- Los cambios de temperatura del vapor –subir o bajar-- están relacionados con la superficie del sobrecalentador o el diseño del horno, especial atención debe darse al material utilizado y la separación de vapor dentro del domo para evitar fallos catastróficos.

OTRAS CAUSAS PARA REDISEÑAR UNA CALDERA

Necesidad de modernización para automatizar la caldera, aumentar el confort de operación, reducir contaminación ambiental, mejorar la extracción de cenizas, reducir la humedad y arrastres del vapor, reducir la frecuencia de roturas o a complejidad de piezas a comprar, adecuar a nuevos combustibles o instalar nuevos equipos auxiliares, etc.

Técnicamente, rediseñar una caldera es como diseñar una nueva, manteniendo tantos elementos originales como sea posible. Cada estudio, aunque sea para un simple objetivo debe obedecer a un análisis integral de la caldera y sus equipos auxiliares.

Un análisis integral de una caldera implica, calcular:

1. La combustión y transferencia de calor en toda la caldera;
2. El comportamiento hidrodinámico del circuito de agua y vapor. Fallos en la circulación natural pueden destruir una caldera.
3. Verificación de la capacidad de separación de vapor del domo de vapor.
4. El comportamiento aerodinámico del lado gases y aire;
5. Verificar las especificaciones de los equipos auxiliares. Rehacerlas si fuese necesario;
6. Otros.

ESTUDIO DE INTEGRIDAD Y VIDA REMANENTE

Como es conocido, el tiempo de servicio de las calderas de la industria azucarera puede ser muy variado, desde unidades con menos de cinco años hasta algunas considerablemente viejas. Quien escribe hace apenas unos tres años fue llamado para pedirle un “Diseño para modernizar” una caldera de cinco domos y ha visto, aun en funcionamiento, unidades con domos remachados de finales del siglo antepasado, son verdaderas bombas de tiempo, afortunadamente en bajas presiones

Para estimar la conveniencia de rediseñar, reparar capitalmente o sencillamente sustituir una caldera los criterios pueden variar con los factores económicos, la inspección visual, la historia de trabajo y los años de servicio del equipo en cuestión.

Normalmente los domos y colectores se diseñan para unos 25 años de servicio, que en la práctica no se debe entender como un límite. Está claro, que el concepto “año” en la industria azucarera tiene una connotación diferente a otras industrias, en dependencia de la duración de las zafras, la frecuencia de las paradas y la regularidad de la operación.

Las elevadas temperaturas y cargas mecánicas así como los procesos químicos y mecánicos que ocurren en una caldera conducen a deterioros por fatiga, pérdida de espesor, cambios estructurales de los aceros, pitting, fisuras, creep, etc.

Ocasionalmente, el calentamiento excesivo de algunas zonas por bajo nivel, la fatiga térmica por oscilaciones de nivel, choque de llamas directamente sobre las superficies

metálicas y otras son causas de deterioro metalúrgico o mecánico con reducción de la vida útil remanente de una caldera o de alguna de sus partes.

Entre los factores que influyen negativamente en la longevidad de las calderas y específicamente de las partes a presión:

Corrosión externa por:

- Falta de mantenimiento (Limpieza y pintura)
- Cercanía al mar u otra atmósfera corrosiva.
- Humedad en el aislamiento y refractario durante el tiempo muerto.

Corrosión interna por:

- Pitting corrosivo durante el tiempo muerto (Pobre conservación)
- Bajo pH del agua de calderas

Fatiga de bajos ciclos:

Un fenómeno menos divulgado, en las carreras de Ingeniería Mecánica se estudia prioritariamente la fatiga de altos ciclos que frecuencia ocasiona partiduras de ejes, dientes de engranajes y otros elementos de máquinas. Se presenta por la aplicación cíclica de cargas mecánicas por debajo de la carga de rotura, o sea, dentro de la zona elástica para mas de 107 ciclos de carga. En la práctica mas del 75 u 80% de los fallos de elementos de máquinas están relacionados con este tipo de fatiga. En los recipientes a presión –y otros equipos-- se presenta la fatiga de bajos ciclos –entre 10 y 100,000 ciclos-- que ocasiona el desarrollo de fracturas bajo carga mecánica que se aproxima o alcanza la región plástica por períodos prolongados. Una caldera con paradas semanales y variaciones de carga durante la operación, está expuesta a este tipo de fatiga que puede determinar su muerte prematura.

Los factores de deterioro antes mencionados pueden presentarse solos o simultáneamente en combinación con:

- Distorsión de los apoyos: Problemas de montaje, vigas debilitadas, cimientos hundidos o partidos, fallos de soldaduras, etc.
- Cargas adicionales: Cuando a las estructuras se le añade cargas que no fueron inicialmente concebidas y se elimina o reducen los factores de seguridad hasta límites peligrosos.
- Deficiencias en la dilatación: Tuberías sin la flexibilidad requerida, corrosión u otros daños en soportes deslizantes, etc.
- Impericia o limitaciones de mantenimiento: Muchos arreglos son dejados en las manos de personal sin la adecuada calificación. Como ejemplo, la soldadura de elementos a presión, requiere procedimientos que deben obedecerse rigurosamente para tener buenos resultados a corto y mediano plazo. Sin embargo la falta de celo deja soldaduras de alta responsabilidad en personas que no tiene ni los elementos teóricos ni los equipos apropiados.
- Concentración de tensiones.
- Exceso de rolado

Para conocer el estado y la vida útil remanente de las partes a presión con muchos años de servicio se hace el “estudio de integridad” que incluye en la mayoría de los casos:

1. Estudiar la caldera y su historia de fallos, reparaciones y mantenimiento.
2. Desnudar y limpiar la superficie de las partes a presión para la inspección visual.
Identificar zonas y tomar fotos para archivos.

3. Verificar las dimensiones y geometría (forma)
4. Medir los espesores
5. Comprobar las soldaduras de los domos y las conexiones y los espacios (ligaduras) entre barrenos con partículas magnéticas.
6. Medir la dureza superficial.
7. Hacer replicas metalográficas.
8. Hacer un barrido por ultrasonidos de toda la malla de barrenos

En los tubos de conexión y de bajada (Risers y downcomers) se recomienda:

1. Verificar las dimensiones y geometría (forma)
2. Medir espesores
3. Comprobar las soldaduras con partículas magnéticas o ultrasonido.

En los serpentines de economizadores y sobrecalentadores igual que en los tubos de bancos convectivos se recomienda:

1. Medir dureza superficial
2. Medir el espesor

Se entiende fácilmente que medir el espesor de un tubo de una caldera brinda muy poca o ninguna información sobre su estado y posibilidad de fallos dado que se refiere a un solo punto y precisamente en las zonas accesibles al operario, no necesariamente las mas críticas donde puede haber sobrecalentamientos, corrosión, esfuerzos concentrados etc. El Inspector experimentado debe conocer dónde medir.

La mayor certeza en esos casos se obtiene con pruebas de Eddy Current. También hay cámaras de video que pueden desplazarse por dentro de los tubos. Pero, puede decirse que

estos elementos de inspección “mas sofisticados” se deben reservar a las unidades grandes de altos parámetros.

En ocasiones, de la inspección visual se evidencia la necesidad de hacer pruebas destructivas con retiro de muestras de domos.

Afortunadamente el estudio de integridad completo no se requiere con frecuencia, a veces la inspección preliminar puede ser suficiente para determinar el estado técnico de una caldera o solicitar algunos análisis o estudios. Sin embargo, para conocer la vida útil remanente (VUR) no basta con una inspección y debe hacerse todos los trabajos antes indicados.

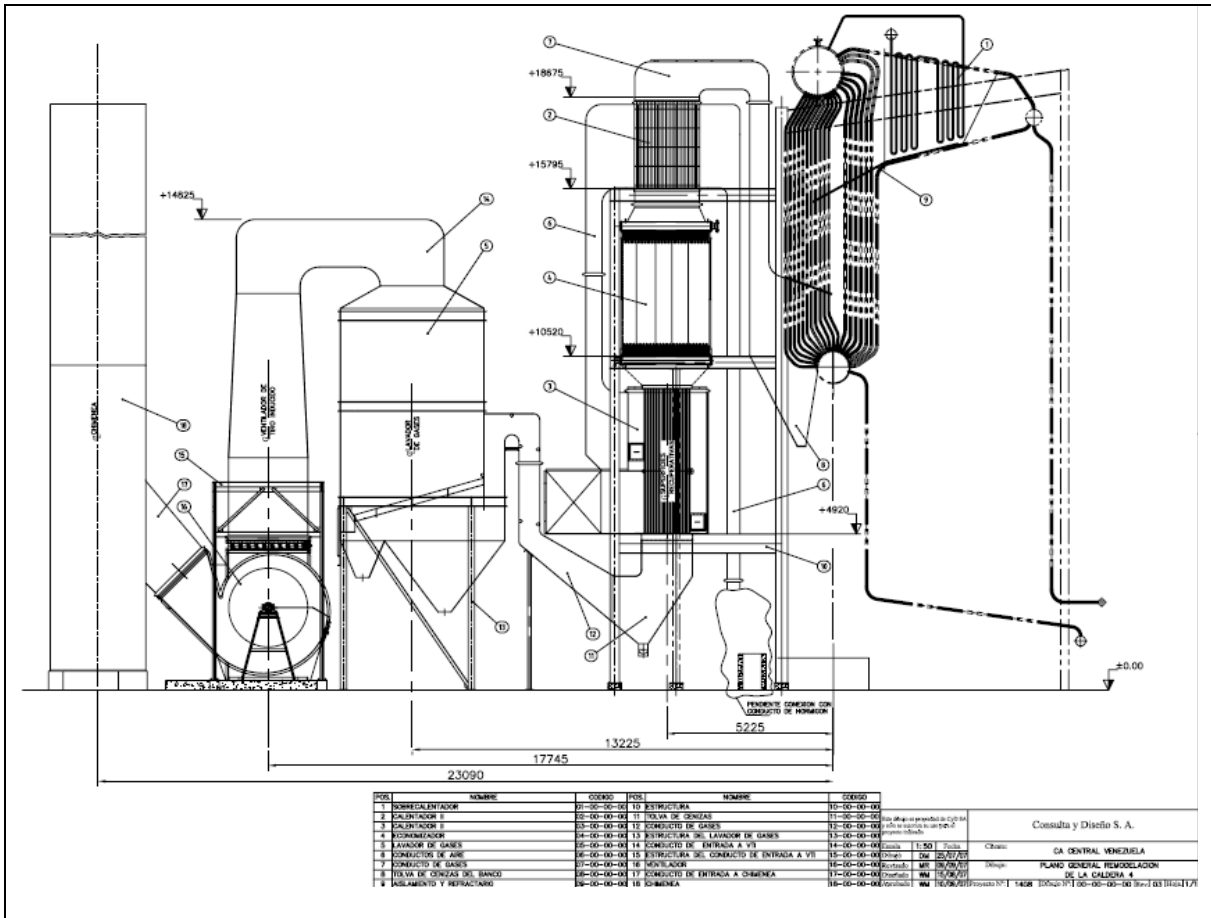
EJEMPLOS QUE VALIDAN EL REDISEÑO DE CALDERAS COMO UNA ALTERNATIVA VALIOSA CUANDO LA AUSTERIDAD IMPIDE GRANDES INVERSIONES



Figura 1: Caldera No 1 del Central Azucarero MOLIPASA, Edo Portuguesa, Venezuela. Caldera con domos para 36kg/cm² que operaba a 21kg/cm². Se modificaron el sobrecalentador y el recorrido de los gases en el banco de tubos. Se añadieron dos etapas de calentamiento de aire, un economizador y un lavador de gases tipo spray tower para pasar de 55t/h, 21kg/cm², 280°C a 90t/h, 31,6kg/cm², 385°C con una eficiencia de 84-85% (VCB)



Caldera No 2 del Complejo Azucarero Central La Pastora, Edo Lara, Venezuela. Este caso no es un rediseño sino una caldera nueva hecha a la medida en la estructura y espacio ocupados por una caldera que fue destruida por una explosión, 85t/h, 400°C, 42,6kg/cm² es una caldera totalmente aletada, horno de parrilla fija inclinada pinhole, con sobrecalentador semiradiante, con un calentador de aire secundario a 300°C, un economizador que elva el agua de 125 a 165°C y un calentador de aire primario a 200°C. La caldera tiene un lavador de gases tipo spray tower.



Caldera No 4 del Central Azucarero Venezuela, Edo Zulia, Venezuela. Este proyecto se realizó para añadir un segundo calentador de aire, un economizador y el lavador de gases a esta caldera con el objetivo de aumentar su eficiencia, disminuir el nivel de emisiones gaseosas y aumentar su capacidad de 60 a 85t/h.



Caldera No 4 del Central Azucarero del Táchira (CAZTA) Este ingenio tenía dos domos nuevos de fabricación japonesa y los cimientos para una caldera de 56t/ con un diseño tradicional, se les hizo el rediseño para hacer una moderna caldera aletada de 72t/h. Trabaja satisfactoriamente desde Julio de este año en curso. Se muestra la foto de las paredes aletadas y los esparcidores neumáticos durante el montaje.

REFERENCIAS

1. Birkett, H., A Short Course on Bagasse Boilers Operations, F. C. Schaffer & Associates, Inc. Baton Rouge, La. 1996.
2. Manso, W. & Perez, L., Engineering, Design & Redesigning of Steam Boilers. 2do. Congreso de la Asson. Latinoamericana de Diseñadores Industriales (ALADI) Habana, Cuba, 1982.
3. Manso, W. Redesigning boilers solves problems and saves Money, Presentado al Congreso de la West Indies Sugat Techn. Asson, Trinidad & Tobago, Abril de 2001
4. Manso, W. Experiencias en el Rediseño de Generadores de Vapor, Congreso de la ATAVE (Asson de Técnicos Azucareos de Venezuela) Yaritagua, Venezuela, 1998
5. Manso, W. Brief Notes on Removal of Particulate Matter from Bagasse Flue Gases, Reporte para F. C. Schaffer & Associates. Sept de 2007
6. Manso, W., Instalación de Quemadores para Derivados del Petróleo en Calderas Bagaceras. Notas. Reporte para Clientes, Consulta y Diseño, Enero de 2007
7. McBurney, B. and McBurney, J. C., Designing bagasse fired boilers for low emissions, ISJ., 1997, Vol. 99, No. 1179.
8. Pérez, L. & Manso. W., The redesigning of boilers as a present day economical alternative. Poster presentado al XVIII Congreso de la ISSCT, Habana, Cuba, 1983.