



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL
GENERADOR DE VAPOR NÚMERO DOS DE LA
INDUSTRIA AZUCARERA DE BELICE**

TRABAJO MONOGRÁFICO
Para obtener el grado de

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

PRESENTA
JOSÉ ANTONIO URBINA ORDÁZ

ASESORES
DR. FERNANDO ENRIQUE FLORES MURRIETA
DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ
M.C. JAIME DIONISIO CUEVAS DOMÍNGUEZ



Chetumal Quintana Roo, México, Junio de 2014



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Trabajo monográfico bajo la supervisión del comité del programa de licenciatura y aprobada como requisito para obtener el grado de:

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

Comité de trabajo monográfico

Asesor:



DR. FERNANDO ENRIQUE FLORES MURRIETA

Asesor:



DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ

Asesor:



M.C. JAIME DIONISIO CUEVAS DOMÍNGUEZ


UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
SERVICIOS ESCOLARES
TITULACIONES

Chetumal, Quintana Roo, México, Julio de 2014.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a nuestro señor creador por habernos dado lo necesario para seguir adelante día a día para lograr nuestros objetivos.

Agradezco firmemente a mis padres y hermanas que confiaron en mí para llevar a cabo este proyecto.

A mi Sr padre: José Urbina hablarme brindado la oportunidad a una educación superior, por su apoyo moral y sacrificio incondicional por creer en mí y haberme enseñado a salir adelante.

A mi Sra. madre: María del Carmen Urbina por su enseñanza a salir adelante aunque las cosas parezcan mal, y sobre todo el amor que me ofreció durante el estudio de la carrera.

A mis hermanas que siempre me apoyaron con sus consejos de seguir adelante.

A mi esposa Yazmin Urbina por haber brindado consejos y paciencia durante todos estos años.

A todos mis maestros que me dieron las herramientas necesarias para lograr este proyecto y lograr un pasa más a la superación.

A mi asesor de monografía el Dr. Fernando Enrique Flores Murrieta por haber confiado en mi persona, por la paciencia y por la dirección en este trabajo, de tal forma sin su apoyo no hubiera terminado este proceso tan importante.

Así mismo al Dr. José Hernández Rodríguez y al M.C Jaime Dionisio Cuevas Domínguez por el apoyo y el ánimo que me brindaron.

A todas estas personas que forman parte de mi vida y en mi formación les agradezco de ante mano y de corazón por todo este tiempo.

¡Muchas gracias!

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi esposa que siempre tuvo la paciencia y ánimo para darme fuerzas de terminar este título.

RESUMEN

En este trabajo se realizó la descripción, documentación y el análisis térmico del generador de vapor número dos de la Industria Azucarera de Belice, Planta de Orange Walk. El análisis se logró mediante la aplicación del método directo, la cual consiste en la aplicación de formulas empíricas obtenidas de referencias.

Para poder determinar la eficiencia térmica del generador de vapor se utilizaron parámetros de operación promedios, adquiridos de registros de análisis semanales. Estos valores fueron utilizadas en las formulas correspondientes al cálculo de dicha eficiencia térmica de operación.

Para poder demostrar las recomendaciones, se modificaron los parámetros de humedad de combustible, porcentaje de aire en exceso, temperatura de aire de combustión e incremento de mantenimiento. Los nuevos valores fueron utilizados en las formulas para poder determinar las ganancias de energía, lo cual resulta en un incremento de la eficiencia térmica en la instalación.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	3
DEDICATORIA.....	4
RESUMEN	5
INDICE DE TABLAS	9
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVO GENERAL	11
OBJETIVOS PARTICULARES	11
JUSTIFICACIÓN	12
CAPITULO 1. - Marco Teórico	13
1.1 Evolución de los Generadores de Vapor	13
1.2 Descripción del generador de vapor	19
1.2.1 Regulador de Agua de Alimentación	19
1.2.2 Purgadores.....	20
1.2.3 Válvula de Seguridad	21
1.2.4 Sopladores de Hollín	22
1.2.5 Paredes, Bóvedas y Hogares	24
1.2.6 Cámara de combustión	25
1.2.7 Pared del Hogar	27
1.2.8 Sobrecalentadores	30
1.2.9 Purificadores de vapor.....	32
1.2.10 Suavizadores de agua de alimentación	34
1.3 Combustibles Y Combustión.....	36
1.3.1 Combustión	39
1.3.2 Combustión completa.....	39
1.3.4 Combustión incompleta	40
1.3.5 Oxígeno, aire teóricos y en exceso.....	40
1.3.6 Aire de combustión.....	42
1.3.7 Parámetros importantes	43
1.3.8 Productos de combustión	43

1.3.9	Poder Calorífico.....	44
1.3.10	Bagazo de Azúcar como Combustible Renovable	44
CAPITULO 2. - METODOS DE CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE GENERADORES DE VAPOR		46
2.1	Combustión de bagazo mojado con exceso de aire	56
2.2	Pérdidas de calor en gases de combustión.....	62
2.3	Cantidad de vapor obtenible	63
2.4	Eficiencia del generador de vapor.....	64
2.5	Cálculo de temperatura de combustión	64
2.6	Calor específico medio.....	67
2.8	Estimación de la temperatura del hogar	70
2.9	Método de cálculo para incrementar la temperatura de combustión.....	71
CAPITULO 3. - DESARROLLO Y CASO DE ESTUDIO		73
3.1	Cálculo de la eficiencia térmica del generador de vapor de la Industria Azucarera de Belice	73
CAPITULO 4. - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		88

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 CICLO RANKINE CON SOBRECALENTAMIENTO	17
FIGURA 2 CIRCUITO DE CONTROL PARA REGULADORES DE AGUA DE ALIMENTACIÓN	20
FIGURA 3 VÁLVULA DE SEGURIDAD	22
FIGURA 4 SOPLADOR DE HOLLÍN TIPO PARED	23
FIGURA 5 SOPLADOR DE HOLLÍN TIPO RETRACTABLE	24
FIGURA 6 ALBAÑILERIA Y ESTRUCTURA DEL GENERADOR DE VAPOR	25
FIGURA 7 VISTA AÉREA DE UN HOGAR ENFRÍADO POR AGUA.....	26
FIGURA 8 PARED TIPO CAMISA DE AGUA	28
FIGURA 9 FLUJO DE GASES DE COMBUSTIÓN A TRAVÉZ DEL SOBRECALENTADOR.....	30
FIGURA 10 PURIFICADOR DE VAPOR	33
FIGURA 11 SUAVISADOR DE INTERCAMBIO IÓNICO	34

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 CONTRIBUCIONES PRINCIPALES.....	14
TABLA 2 IMPLEMENTACIÓN DE PROCESOS DE SOBRECALENTAMIENTO	15
TABLA 3 PROPIEDADES DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN	36
TABLA 4 PODER CALORÍFICO DE COMBUSTIBLES TÍPICOS PARA GENERADORES DE VAPOR.....	37
TABLA 5 CANTIDAD USUALES DE EXCESO DE AIRE PARA DIFERENTES TIPOS DE COMBUSTIBLES	42
TABLA 6 VOLUMEN DE PRODUCTOS DE GASES DE COMBUSTIÓN	58
TABLA 7 TEMPERATURAS DE COMBUSTIÓN EN HOGARES DE BAGAZO	71
TABLA 8 CANTIDAD DE BIÓXIDO DE CARBONO	78
TABLA 9 EFICIENCIA DE GENERADORES DE VAPOR.....	81
TABLA 10 VELOCIDADES	87

INTRODUCCIÓN

La producción de azúcar es la principal actividad económica en Belice, a pesar de las continuas fluctuaciones al ingreso nacional y a ganancias por exportación en la última década. Se estima que aproximadamente 40,000 personas dependen de la industria para su sobre vivencia económica, además del papel que juega en la sociedad y la política del país. Es una de las industrias más grandes en el sector agrícola y también es uno de los productos con más importancia para la exportación en Belice.

La producción y procesamiento de azúcar básicamente se concentra en los distritos de Corozal y Orange Walk encontrados en la parte norte del país, en donde se encuentran aproximadamente 9,000 cañeros registrados.¹

Belice produce aproximadamente 1.15 millones de toneladas de caña de azúcar y 111,000 toneladas de azúcar. Este producto se vende en el mercado local, mercados preferenciales de los Estados Unidos (USA) y mercado de la Unión Europea (EU), mercado mundial, mercado de CARICOM y al mercado Canadiense. De éstos, Belice recibe los precios más altos en los mercados de EU y USA.¹

En general, el precio promedio pagado a los cañeros para la caña de azúcar entregada es alto ya que los precios ofrecidos por los mercados preferenciales son elevados.

La Industria Azucarera de Belice no es considerada competitiva económicamente, particularmente en el mercado mundial. El costo promedio de la producción de azúcar varía entre 0.14 y 0.18 centavos americanos por libra de azúcar, el cual es más alto que los precios del mercado mundial sin embargo debajo de los precios obtenidos en los mercados preferenciales de EU y USA. Para que la industria sea competitiva en el mercado mundial se tiene que reducir costos de producción de azúcar hasta llegar

¹ Budhram Dowlal, Sugar Policy and Strategy: Strategic Actions for the Belize Sugar Industry, Belmopan, Belize

entre 0.10 y 0.12 centavos americanos por libra.² Esto implica que la eficiencia global de operación de la industria tiene que ser elevada utilizando buenas prácticas de ingeniería. Es muy importante que todos los procesos y sistemas que forman la industria funcionen eficientemente para garantizar una alta eficiencia.

OBJETIVO GENERAL

Realizar el análisis térmico del generador de vapor número 2, en la Industria Azucarera de Belice, para aumentar la eficiencia de operación y consecuentemente tener una mayor calidad de vapor.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Mejorar la calidad combustión.
2. Aumentar la eficiencia de operación del generador de vapor.
3. Aumentar y aprovechar eficientemente la producción y uso del vapor.

² Belize's Sugar Industry: A Synthesis of its current State, Challenges and Recommendations, Belmopan, Belize, 2001

JUSTIFICACIÓN

La Industria Azucarera de Belice inició su operación en el año de 1967 en el cual obtuvo tres generadores de vapor de la empresa Babcock and Wilcox. Estos generadores tienen una capacidad de producción de 50,000, 110,000 y 125,000 lbs_{vapor}/hr, respectivamente, con un periodo de vida teórico de diez años.³

Durante el transcurso de operación se observó que la vida útil de los generadores de vapor era de cinco años lo cual implica un alto costo del mantenimiento. Este costo se refleja directamente en el costo de azúcar lo cual reduce la competitividad de la industria en el mercado mundial. Por esta razón se lleva a cabo el análisis térmico del generador número dos de la Industria Azucarera de Belice.

A partir del análisis se logró identificar varias deficiencias de operación como son la calidad del combustible, temperatura de aire de combustión, aire de exceso, incrustación en tuberías por falta de mantenimiento y pérdidas de vapor por alta presión. Estos impactan directamente a los componentes, la estructura y la operación del generador de vapor resultando en una operación ineficiente.

Para mejorar la eficiencia se propone mejorar la calidad del combustible, aumentar la temperatura del aire de combustión, incrementar la cantidad de aire en exceso para asegurar una combustión completa, mejorar las prácticas de mantenimiento para mejorar la transferencia de calor y reciclar el vapor de desperdicio en el proceso de extracción de azúcar. Esto permite un aumento de eficiencia y reduce el costo de mantenimiento lo cual hace la industria competitiva en el mercado mundial.

³ Manual de Operación, Bobcock & Wilcox

CAPITULO 1. - Marco Teórico

1.1 Evolución de los Generadores de Vapor

A partir del año 150 A.D. se iniciaron los antecedentes en la producción de vapor. Fue Hero de Alejandría, quien inventó la primera unidad para la producción de vapor. Esta simplemente consistía de una olla calentada en su base, conteniendo agua en su interior; lo que podría ser una turbina de reacción.

También se considera como el origen de los generadores de vapor la olla de presión desarrollada por el Dr. Denis Von Papín, en el año 1680. Dicho Doctor fue el primer inventor en producir vapor a presión y quien aplicó por primera vez una válvula de seguridad.

A partir de los diseños y las características de los distintos modelos de generadores de vapor que se desarrollaron hasta el siglo XVIII, se deduce que las temperaturas y presiones de estos mismos no sobrepasaban los 120 °C y 4 kg/cm² respectivamente. Por consiguiente, la eficiencia de estos primeros equipos se considera ser menor que un 40%.

En la siguiente Tabla I, se hace hincapié a algunas de las principales contribuciones realizadas para el mejoramiento de la eficiencia de los generadores de vapor.

TABLA 1 CONTRIBUCIONES PRINCIPALES⁴

Fecha	Persona	Contribución
1730	Dr. John Allen	Construye primer generador con hogar interno y de tiro forzado. (Primer análisis de eficiencia).
1785	James Watt	Emplea el generador de vapor con hogar interno en su máquina de vapor.
1795	Richard Trevithick	Introduce el hierro en la construcción de los generadores de vapor.
1803	John Stevens	Incrementa la superficie de calefacción utilizando varios tubos interconectados a un depósito principal.

Durante las primeras dos décadas del siglo pasado, los rangos de temperatura de trabajo se incrementaron de los 150 a los 250°C, con la implementación de procesos de sobrecalentamiento. Estos avances se desglosan a continuación en la Tabla 2.

⁴Rodríguez Hernández José, Análisis del Cálculo de la Eficiencia Térmica en Generadores de Vapor. Editorial ESIME, México, 1993.

TABLA 2 IMPLEMENTACIÓN DE PROCESOS DE SOBRECALENTAMIENTO⁵

Fecha	Persona	Contribución
1921		Empleó el proceso de recalentamiento en una planta de Generación Eléctrica en Inglaterra.
1923	C.W. Clarke y Dwight P. Robinson	Demuestran que con el proceso de precalentamiento del aire, se obtiene un aumento de eficiencia, de 5 al 7%.
1928		Implementan la primera planta con ciclo binario.
1957		Entra en operación el 'Philo Plant' de la compañía Ohio Power.

Antes de proceder con esta investigación, es necesario primero definir varios conceptos importantes que surgieron a partir del desempeño científico brindado por los intelectuales de siglos pasados. Estas definiciones facilitarán la comprensión de términos esenciales en el ámbito de la ingeniería termodinámica y sus diferentes aplicaciones.

La ingeniería termodinámica es la profesión mediante la cual se aplican racionalmente los conocimientos de las matemáticas, física y las ciencias naturales, adquiridos por el estudio, la experiencia y la práctica, al desarrollo de métodos económicos de utilización de los materiales y las fuerzas de la naturaleza para beneficio de la humanidad.⁶

La ciencia de la termodinámica fue desarrollada para proporcionar un mejor conocimiento de los dispositivos conocidos como máquinas térmicas que absorben calor desde una fuente de alta temperatura y producen trabajo útil. Por tanto, la termodinámica es una rama de la física que describe los procesos naturales en donde los cambios de temperatura desempeñan un papel importante⁷. Dichos procesos

⁵ Rodríguez José, op. cit.,

⁶ Francis F. Huang, Ingeniería Termodinámica Fundamentos y Aplicaciones, CESSA México, 2000

⁷ Joseph Kestin, A course in Thermodynamics, John Wiley & Sons, Inc., Waltham, Mass., 1966

implican la transformación de energía de una forma u otra. Por tanto, la termodinámica trata de las leyes que gobiernan esa transformación de energía.

En base de lo anteriormente explicado, se concluye que la ingeniería termodinámica, es una ciencia que trata el estudio de la termodinámica y de su utilidad en el diseño de ingeniería de procesos, dispositivos y sistemas que implican la utilización adecuada de la energía y la materia para el beneficio de la humanidad.

Para poder demostrar la aplicación de la ingeniería termodinámica, se inicia el análisis de un sistema simple de producción de vapor.

Las industrias azucareras, como en el caso de estudio, consumen enormes cantidades de energía, gran parte de la cual es energía mecánica o eléctrica. El sistema de producción de vapor tiene como objetivo convertir la energía térmica en energía mecánica o eléctrica, cuyo uso es mucho más conveniente.

El agua entra al generador de vapor como un líquido a alta presión y sale de ella como vapor a presión y temperaturas altas, después de haber recibido energía térmica de la fuente de calor. El vapor entonces se expande en la turbina a un estado de presión y de temperaturas bajas produciendo, durante el proceso, trabajo útil. El vapor abandona la turbina a presión y temperaturas bajas, se condensa en el condensador, entregando la energía térmica al sumidero de calor. La presión del líquido condensado se eleva en una bomba a la presión de entrada al generador de vapor para que el proceso completo se inicie de nuevo.

El proceso de evaporación que ocurre en un generador de vapor tiene el nombre de 'Ciclo Rankine'.⁸

⁸ BABCOCK & WILCOX. Steam Its Generation and Use, 39ª. edición. Estados Unidos: The Babcock and Wilcox Company, 1978.

En 1926, por primera vez se publica, en los Estados Unidos, las recomendaciones para la prueba y evaluación de la eficiencia de los generadores de vapor, que son aceptables en la mayor parte de ese país. No es hasta que en 1964 se adopta como norma ANSI-ASME PTC 4.1: Pruebas para la operación de los generadores de vapor. En Alemania aparece la norma DIN 1942, que es el equivalente a la Americana.⁹

Actualmente las Industrias Azucareras en distintos países están desarrollando investigaciones para mejorar la eficiencia de los generadores de vapor que utilizan como combustible, el bagazo de caña.

En industrias eficientes, el bagazo se produce en exceso; y por este motivo las industrias azucareras tratan de quemar la mayor cantidad posible del bagazo sin importar la eficiencia de funcionamiento de los generadores de vapor. Esta combustión ineficiente se realiza ya que los generadores de vapor son sobre dimensionados con el propósito de producir la cantidad suficiente de vapor necesario para cumplir con los requisitos del ingenio.

Durante los años noventas se inicio la implementación de un viejo concepto, el cual surgió por la necesidad de ahorrar energía: los sistemas de cogeneración. Dicho concepto de ingeniería implica la producción simultánea de energía eléctrica y térmica en una sola operación; usando así el combustible de una manera más eficiente.

Mediante los sistemas de cogeneración, las industrias azucareras logran aprovechar la combustión apropiada de todo el bagazo producido, obteniendo un nivel de eficiencia aceptable. Esta solución ha causado que las industrias azucareras puedan exportar energía eléctrica, resultando en un aumento de ingresos y la autonomía de estos países en cuanto la importación de energía eléctrica. En estos sistemas de cogeneración, se aplican varios dispositivos de recuperación de energía térmica para así poder aprovechar la mayor cantidad de calor.¹⁰

La instalación está compuesta de varios sistemas de gran importancia como son los siguientes: recepción y preparación del bagazo, combustión de bagazo y generación

⁹ Rodríguez Hernández José, Mejoramiento del Consumo de Combustible en Función de la Eficiencia de los Generadores de Vapor, Instituto Politécnico Nacional, México 1990

¹⁰ Norman Magasiner, Bagasse-Fired Boilers with reference to Co-Generation

de vapor, protección del medio ambiente, turbo-alternador y producción de electricidad, condensador, sistema de agua de alimentación y torre de enfriamiento para el calor rechazado. En el caso aquí tratado solo se analizarán los dos primeros sistemas.

Es claro, que cuando se considera la oxidación de un combustible sólido se requiere de equipo especializado para poder lograr el almacenamiento y la preparación del combustible, de igual forma se requiere de un hogar grande para la combustión y una gran superficie de transferencia de calor. Se requieren equipos como sopladores de hollín, sistemas de manejo de cenizas y sistemas de desecho de cenizas. También hay que considerar otros componentes de vital importancia para el funcionamiento del generador de vapor como son los siguientes: regulador de agua de alimentación, cámara de combustión, paredes, quemadores, sopladores de hollín, tuberías, domos, dámper, chimenea, sobrecalentadores, purgadores, válvulas de seguridad, y suavizador para agua de alimentación.¹¹

1.2 Descripción del generador de vapor

1.2.1 Regulador de Agua de Alimentación

El regulador de agua de alimentación es un dispositivo objetivo primordial es regular el nivel de agua que circula dentro del generador de vapor. Este dispositivo se coloca en la parte frontal del generador, de tal forma, que pueda verse desde el suelo. La parte alta del regulador se pone en comunicación con la cámara del generador de vapor y el otro extremo con la fuente alimentadora de agua.

El funcionamiento se basa en el desplazamiento de flotadores suspendidos en dos palancas; cuando el nivel del agua se encuentra normal, el conjunto de palancas se encuentra en equilibrio estático y estando entonces cerrada la válvula de alarma. Cuando prevalecen las condiciones de nivel alto o bajo, se rompe el equilibrio estático

¹¹ Babcock & Wilcox, Manual de Operación

de las palancas causando que la válvula se abra y se escape vapor a alta presión; el cual hace funcionar el dispositivo de alarma sonoro.¹²

Normalmente este tipo de válvula se interconecta con una fuente alimentadora de agua y la cámara de combustión del generador de vapor el cual se representa en la figura 2. En la actualidad, un sistema automático de este tipo es utilizado en la industria azucarera de Belice.

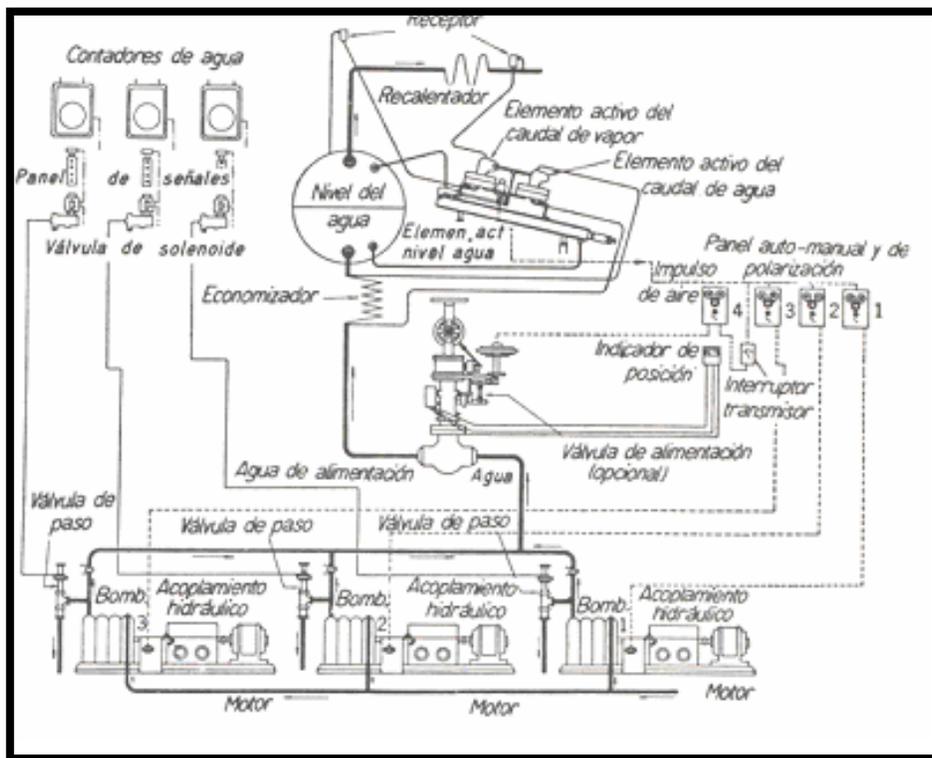


FIGURA 2 CIRCUITO DE CONTROL PARA REGULADORES DE AGUA DE ALIMENTACIÓN

1.2.2 Purgadores

Normalmente, los purgadores se encuentran en la parte baja del generador y en algunos casos en el cuerpo cilíndrico inferior. Estos dispositivos se utilizan para extraer una cierta cantidad de agua con el fin de sacar, del generador, los lodos,

¹² Severns W., Degler H., Miles J., Energía Mediante Vapor, Aire o Gas, Reverte, México 1992

sedimentos y espumas. Estas impurezas se crean durante el transcurso de evaporación del agua, el cual se combina mecánica y químicamente durante el funcionamiento del generador para formar una capa de incrustaciones sobre la superficie de la tubería. Esto causa el deterioro en la transferencia de calor, disminuyendo la eficiencia del generador; y, en casos extremos, traduciéndose en peligrosas deformaciones y erosiones que influyen negativamente en la tubería.¹³ En el caso particular de Belice, la industria azucarera lleva a cabo estos purgados una vez cada ocho horas, y cuando las precipitaciones son muchas se implementa un proceso de purgado continuo.

1.2.3 Válvula de Seguridad

Las válvulas de seguridad, ver figura 3, funcionan automáticamente para impedir que los generadores de vapor desarrollen presiones de vapor excesivas, abriéndose a una presión determinada y resultando en la liberación del vapor.

¹³ Baumeister Theodore, Avallone Eugene, Baumeister Theodore, Marks, Manual del Ingeniero Mecánico I y II, MacGraw Hill 1984

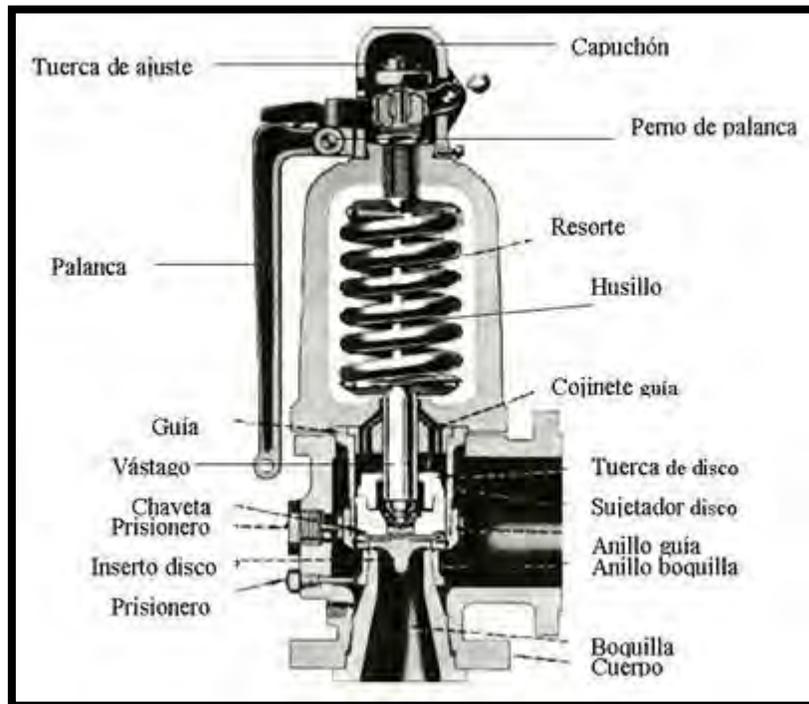


FIGURA 3 VÁLVULA DE SEGURIDAD

Existen muchas válvulas de seguridad empleadas en las industrias, en la cual, la presión del generador es vencida por un fuelle, cuya tensión puede ser ajustada por la parte superior.

Cabe mencionar que las empresas aseguradoras y las normas ASME especifican claramente el número de válvulas de seguridad que debe tener un generador de vapor.

1.2.4 Sopladores de Hollín

Los sopladores de hollín se utilizan para mantener la eficiencia del generador y su capacidad por medio de la eliminación periódica de la ceniza que se adhiere a las superficies que pueden absorber calor. Estos, están instalados permanentemente de tal forma que todas las superficies de caldeo sometidas a la acumulación de hollín puedan limpiarse con chorros de vapor, aire o una mezcla de ambos.¹⁴

¹⁴ Baumeister, op. cit.,

Existen varios tipos de sopladores de hollín instalados en la Industria Azucarera de Belice. Estos dispositivos pueden estar localizados en distintos puntos estratégicos para obtener la operación óptima del generador de vapor.

Por lo general, las paredes del horno se limpian con sopladores de pared, el cual es ilustrado en la figura 4. Este, proyecta un dispositivo hacia el interior del horno durante el soplado. Estos sopladores pueden ser instalados en una posición atrás de la pared de tubos para que pueda ser protegida una vez que se efectúa la operación de soplado.

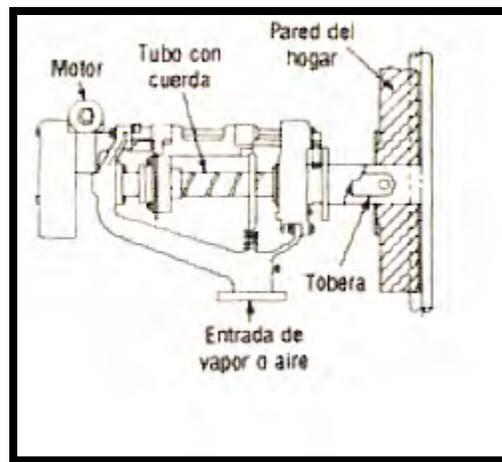


FIGURA 4 SOPLADOR DE HOLLÍN TIPO PARED

Los sopladores tipo retráctil de recorrido largo son los que generalmente se utilizan para los bancos de tubos que se encuentran en las zonas de gas de alta temperatura, así como en sobrecalentadores en donde la ceniza puede acumularse.

Mientras que el soplador retráctil, ver figura 5, avanza en el interior del generador, hay una bayoneta que gira y está provista de toberas de diámetro considerable que aportan una poderosa corriente de limpieza; esta bayoneta se retrae saliendo del generador para su protección cuando no está en operación.

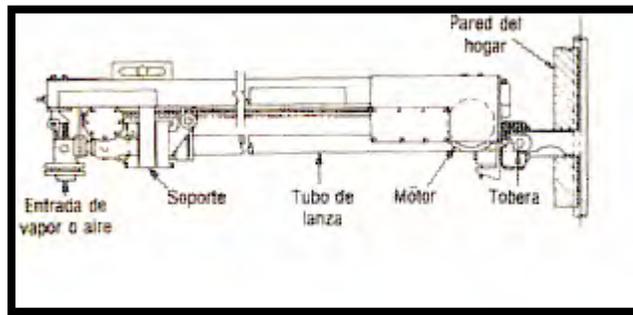


FIGURA 5 SOPLADOR DE HOLLÍN TIPO RETRACTABLE

Generalmente pueden utilizarse sopladores de hollín del tipo giratorio de tobera múltiple en los bancos de tubos que se encuentran en zonas de gas de baja temperatura como son los economizadores. Así como secciones del generador donde hay paredes metálicas sin enfriar que tienen una duración satisfactoria y donde la eliminación de la ceniza es más fácil.

En industria azucarera de Belice existen tres sopladores de tipo retractables con una boquilla. Están montadas en línea a través del techo del hogar en frente de los tubos de mamparas escalonadas. Estos sopladores son operados manualmente por medio de un eje de engranes extendido. Estos funcionan con vapor a una presión de 200 lb/plg². Cuatro sopladores no retráctales están montados en las paredes de los lados para poder limpiar el banco de tubería. Estos sopladores funcionan a una presión de 150 lbs/plg².

El vapor para los sopladores es tomado directamente de la salida de la caja del sobrecalentador por medio de válvulas maestras paralelas de 2 ½ plg de diámetro.

1.2.5 Paredes, Bóvedas y Hogares

Mediante la evolución de los generadores de vapor, los científicos lograron entender la importancia de la resistencia de materiales, para poder obtener una construcción y operación eficiente de los generadores. Es por este motivo, que los generadores industriales suelen descansar sobre estructuras construidas sobre perfiles de hierro independientes de la obra de albañilería, esto se refleja en la figura 6.

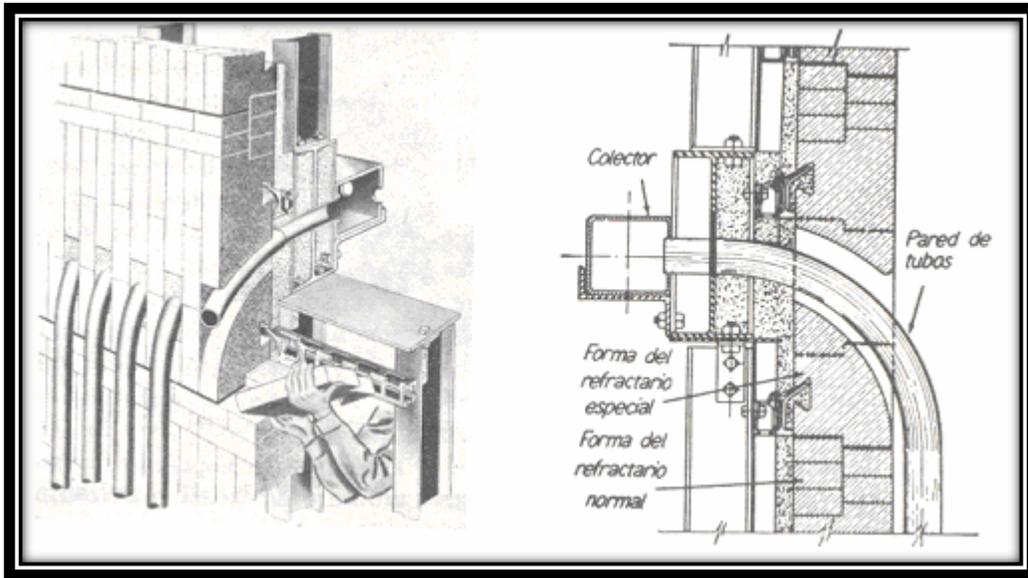


FIGURA 6 ALBAÑILERIA Y ESTRUCTURA DEL GENERADOR DE VAPOR

El empleo de estos materiales logró eliminar los problemas de dilataciones y contracciones que se producían mediante las altas temperaturas de operación.

1.2.6 Cámara de combustión

La cámara de combustión (hogar) es donde se lleva a cabo la combustión de los materiales orgánicos, en este caso un combustible sólido llamado bagazo. Aquí ocurre la mezcla de aire de combustión y el combustible. El aire que es suministrado al hogar forma una turbulencia, tipo ciclón, representada en la figura 7, el cual permite que el bagazo sea quemado en suspensión.

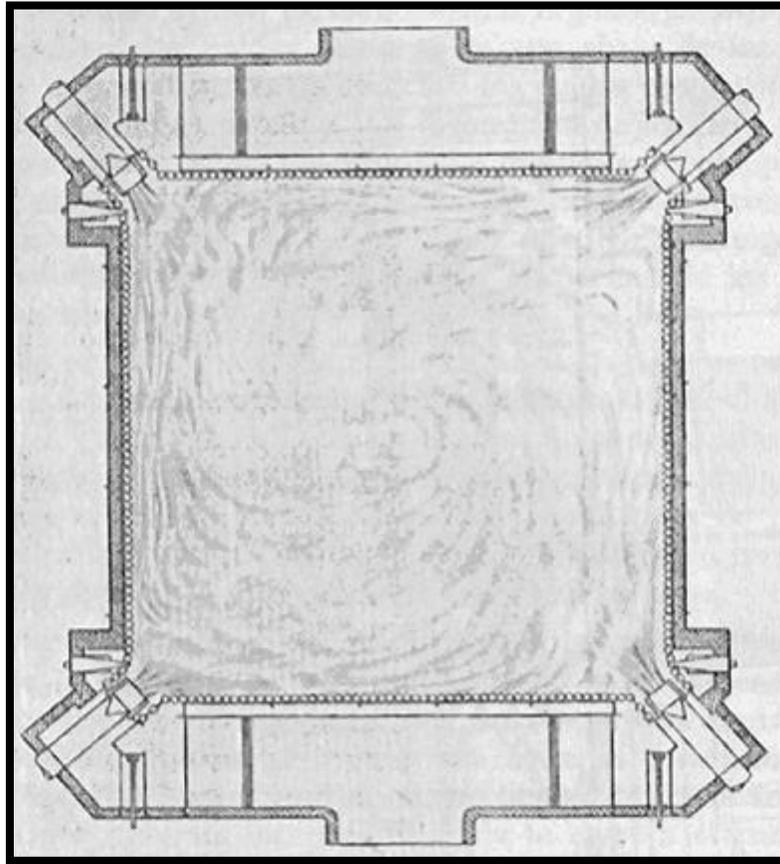


FIGURA 7 VISTA AÉREA DE UN HOGAR ENFRÍADO POR AGUA

El hogar confina la combustión de los productos y es capaz de resistir las altas temperaturas que se presentan y la presión que se utiliza. En el caso de la Industria Azucarera de Belice, la temperatura máxima del hogar es de aproximadamente 1600 °F.¹⁵

Las dimensiones y geometrías de los hogares dependen de dos condiciones:

- Velocidad de generación de energía térmica
- Método de combustión

El enfriamiento por agua de las paredes del hogar, reduce la transferencia de calor hacia los elementos estructurales y, en consecuencia, puede limitarse su temperatura a la que satisfaga los requisitos de resistencia mecánica y resistencia de oxidación. Las

¹⁵ Babcock & Wilcox, Manual de Operación

construcciones de hogares enfriados por agua facilitan el logro de grandes dimensiones del hogar y también de dimensiones óptimas de techos, tolvas, arcos y montajes de los quemadores; así como el uso de pantallas tubulares, planchas o paredes divisoras, para aumentar la superficie absorbente de calor en la zona de combustión.

Las superficies absorbentes de calor en el hogar, reciben de los productos de combustión dicho calor y contribuyen directamente a la generación de vapor, bajando al mismo tiempo la temperatura de los gases que salen del mismo. Estos tipos de hornos difieren en tamaño y forma, en la localización y espaciamientos de los quemadores, en la disposición de la superficie absorbente de calor y en la distribución de arcos y tolvas. La forma de la flama y su longitud afectan la geometría de la radiación, la velocidad y distribución de la absorción de calor por las superficies enfriadas por agua.

1.2.7 Pared del Hogar

Las paredes del hogar pueden ser de tres tipos:

- De refractario macizo
- De refractario colgante o sostenido
- De camisa de agua

Las paredes de refractario macizo se representan en la figura 8, normalmente son empleados en lugares en donde no se requieren grandes cantidades de vapor.

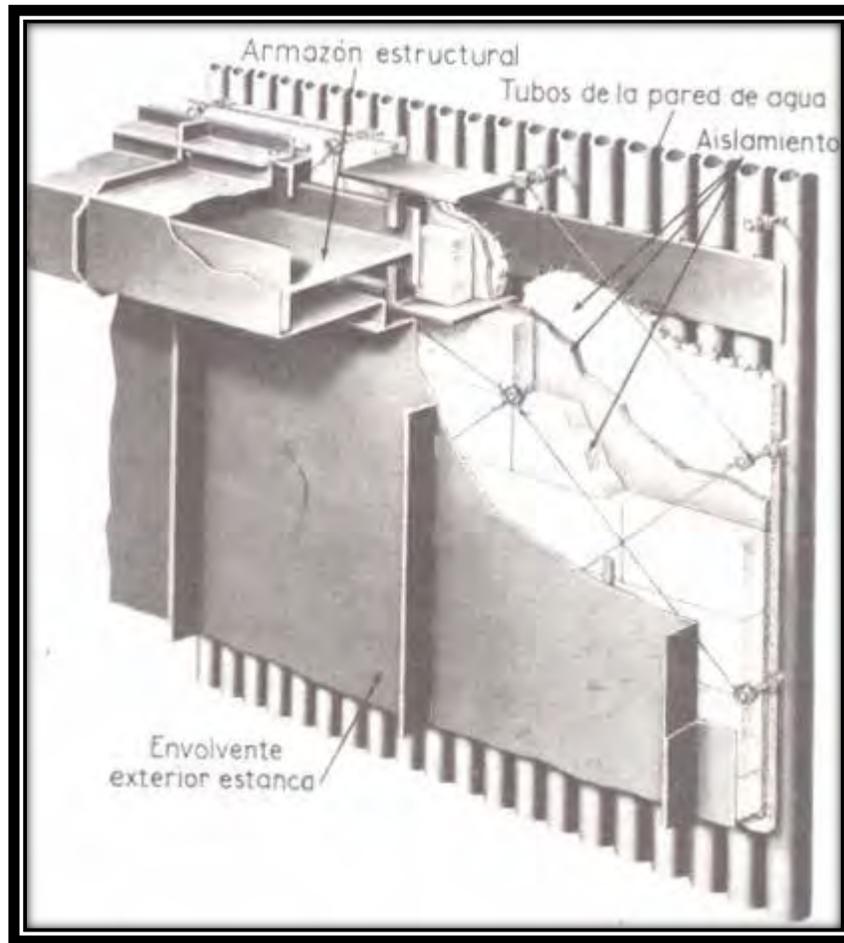


FIGURA 8 PARED TIPO CAMISA DE AGUA

La operación máxima que estos hogares pueden llevar a cabo, está limitada por el punto en que el efecto combinado del peso y temperatura deforma al ladrillo. Este estado se denomina punto límite del refractario y se logra cuando se intenta operar un generador a su máxima capacidad.

Las paredes de refractario colgantes descansan en una estructura de perfiles de hierro a la cual se adaptan refractarios de forma especial, ver figura 8. Estas paredes son enfriadas por el aire que pasa entre la obra de albañilería y el envolvente metálico externo. Este aire a su vez es utilizado como aire secundario en la combustión.¹⁶

¹⁶ Energía Mediante Vapor, Aire o Gas., p. 158

También, de la figura 8 se puede apreciar la pared tipo camisa de agua, la que es el empleado en la industria azucarera de Belice ya que 80% es enfriada por agua.¹⁷ Esta consiste en una hilera continua de tubos adosados a una pared de refractarios. A parte de prevenir la erosión, estos tubos son eficientes en la absorción de energía radiante, pudiéndose obtener el precalentamiento del agua de alimentación.

Las paredes frontales y laterales son de material refractario hasta una altura de 8 pies por encima del nivel de la parrilla, el resto de las paredes son enfriadas por agua que circula dentro de tubos con diámetro exterior de 2 31/32 plg y con separación de 6 plg. La parte baja de la pared posterior es de refractario hasta el nivel del cuerpo cilíndrico inferior, y lo que resta de la pared es enfriado por agua que circula por el interior de conductos de 2 31/32 plg de diámetro exterior por calibre 8 de espesor y con separación de 3 pulgadas. Existen 83 tubos en la pared posterior que inician del domo inferior y de una pared desviador de aproximadamente 12 pies, estos tubos forman cuatro filas de mamparas escalonadas antes de retornar al domo de vapor.

La pared frontal consiste de 41 tubos de 2 31/23 plg de diámetro externo por calibre 8 de espesor con un distanciamiento de 6 plg. Estos tubos están doblados por encima para así formar el techo del hogar y están conectados entre la pared de la caja frontal del hogar y el domo de vapor. La pared de la caja frontal esta suministrada por 8 tubos de 4 plg de diámetro externo por calibre 5 de espesor proveniente del domo de agua.

Cada pared lateral comprende 29 tubos de 2 31/32 plg de diámetro externo por un espesor de calibre 8, los cuales atraviesan verticalmente entre la parte superior e inferior de la sección cuadrada de la caja colector.

Los tubos de suministro desde el domo de agua hacia el lado inferior de la pared de la caja; uno hacia la sección posterior y cuatro hacia la sección frontal son de 4 plg de diámetro externo con un calibre de 5 de acero al carbón, y tubos ascendentes desde la parte superior de las cajas hacia el domo de vapor, uno de la parte posterior y cuatro desde la parte frontal, también son de 4 plg de diámetro externo por calibre 5 de espesor de acero al carbón.

¹⁷ Babcock & Wilcox, Manual de operación

Se toman medidas de drenaje del sistema de agua del hogar por medio de cinco válvulas. El domo de agua es suministrado con dos válvulas de purgas. El hogar cuenta con un área de 1745 pies² de transferencia de calor con una anchura de 21 pies y una altura de 14 pies.

1.2.8 Sobrecalentadores

Después de la evaporación completa del agua de alimentación en el generador, se adiciona calor al vapor de salida, este aumento de temperatura viene acompañado por un aumento de entropía del fluido, y a su vez, un aumento de la energía disponible para su uso en las turbinas. El calor se agrega en componentes del generador llamados sobrecalentadores, los cuales se componen de elementos tubulares expuestos a los productos gaseosos de alta temperatura de la combustión, como se muestra en la figura 9.

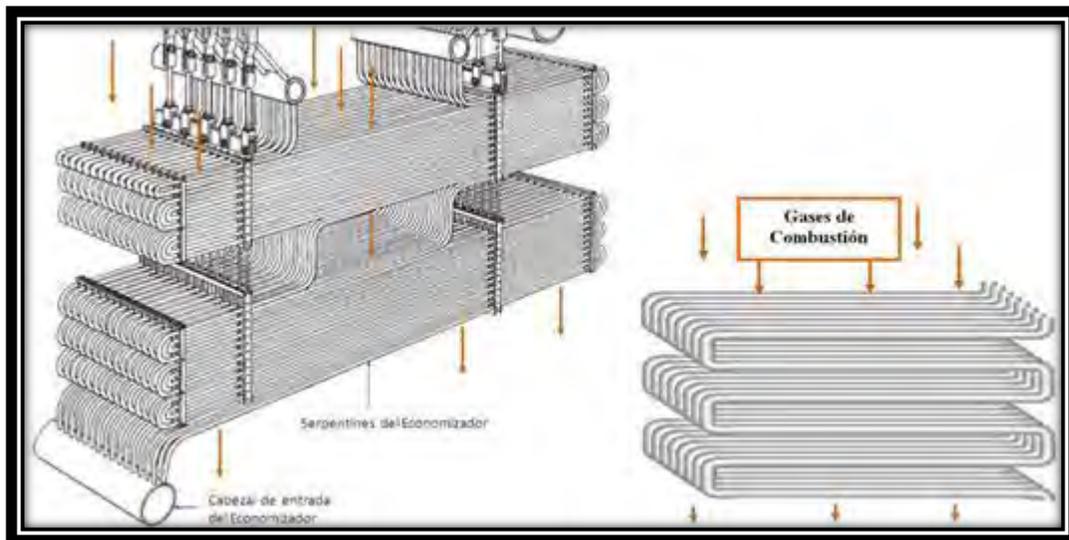


FIGURA 9 FLUJO DE GASES DE COMBUSTIÓN A TRAVÉS DEL SOBRECALENTADOR

Los sobrecalentadores son de dos tipos principales: de convección y radiación. La cantidad de calor absorbida y la cantidad de sobrecalentamiento alcanzada depende del tamaño, ubicación y disposición de las superficies absorbentes de calor; los diferenciales de temperatura entre gases, el metal del tubo y el vapor, los coeficientes

de transferencia de calor, todos estos factores son los utilizados para determinar el tipo de sobrecalentador.¹⁸

Los sobrecalentadores de tipo convección dan incremento de temperatura al aumentar la capacidad del generador. Los tipos de convección, son más simples y menos caros, y por tanto, los más usados. Estos se instalan en la salida del hogar, donde las temperaturas de los gases son más bajas que en las zonas donde se usan los sobrecalentadores de tipo radiante. Por lo común, los tubos se disponen en forma de elementos paralelos, con poco espaciamiento lateral, y en bancos de tubos que se extienden totalmente a través del ancho de la corriente de gas, con el gas fluyendo a través de los espacios relativamente angostos entre los tubos.

Los sobrecalentadores del tipo radiante se disponen para exposición directa a los gases del hogar y en algunos diseños, forma parte de la cubierta del mismo. Entre otros diseños, la superficie se dispone en la forma de serpentines, tubulares o planchas, con amplio espaciamiento lateral, extendiéndose hacia el hogar. Esta superficie se expone a los gases de alta temperatura del hogar que se mueven a velocidades relativamente bajas y la transferencia de calor es principalmente por radiación.

Una gran superficie de calefacción en un pequeño volumen solo es posible colocando los elementos con varias vueltas paralelas. Es posible, un costo mínimo de construcción cuando se requieran un mínimo de soportes y los elementos se coloquen verticalmente suspendidos de los cabezales; éste se clasifica colgante.

Los sobrecalentadores horizontales pueden ser drenables o no, según estén colocadas las vueltas con respecto al cabezal; si las vueltas están sobre el cabezal serán drenables.

Los sobrecalentadores de la industria son del tipo no drenables y consisten de 42 secciones de ancho, un tubo por sección, arreglos de dos pasos en contra-flujo para proveer una sola pasada de vapor. Los tubos son de 1 ¾ plg de diámetro externo por calibre 7 de espesor y de 42 pies de longitud de metal al carbón, separados a través de flujo de gases de 6 y 5 plg. Tiene un área de transferencia de calor de 810 pies² y

¹⁸ <http://www.bestpractices.com>

los tubos conectados en la parte superior del domo de vapor en la entrada y terminan en la caja de salida del sobrecalentador el cual es de 10 $\frac{3}{4}$ plg de diámetro exterior de acero moderado.

Son equipos con válvula de seguridad, tipo Hopkinson Hylif, de resortes de 2 $\frac{1}{2}$ plg. Estos son posicionados en las salidas del sobrecalentador y las válvulas están calibradas para accionarse a una presión de 314 lb/pie².

El suministro de vapor del sobrecalentador es mediante un tubo de 8 plg de diámetro hacia la válvula principal de cierre de vapor y una válvula separadora en el lado izquierdo del generador. Las válvulas de drenaje son conectadas a cada extremo de la caja del sobrecalentador y la presión de salida del vapor es registrada por un manómetro ubicado en una válvula de cierre y una en la válvula de control.

1.2.9 Purificadores de vapor

A medida que el vapor asciende de los tubos más bajos del generador, arrastra consigo agua, espuma y materias sólidas en suspensión. La función del purificador del vapor, vista en la figura 10, es prevenir que las espumas y materias sólidas sean arrastradas con el vapor saturado fuera del generador.

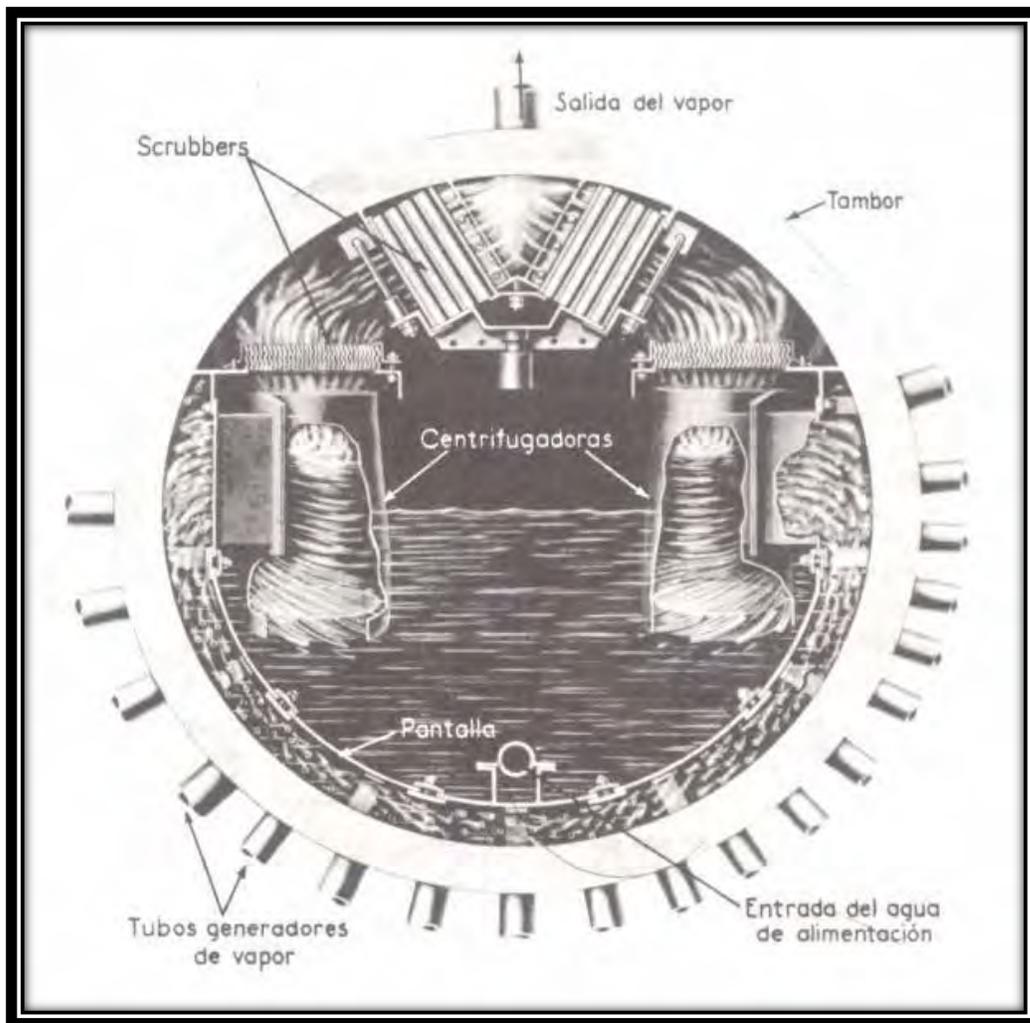


FIGURA 10 PURIFICADOR DE VAPOR

En este dispositivo, el vapor y el agua pasan primero por un separador centrífugo, donde el agua es devuelta al cuerpo cilíndrico del generador, ascendiendo el vapor entre tabiques ondulados denominados secadores. De esta forma se impide que las partes sólidas mantenidas en suspensión entren a los tubos del sobrecalentador, en donde la evaporación completa haría que se depositen en forma de incrustaciones.

El domo de vapor está construido de acero soldado con un diámetro interno de 54 plg y con un espesor de 1 ½ plg. El domo de vapor incorpora 20 separadores de vapor de 11 ½ plg tipo ciclón con purificadores primarios inclinados y arreglados en una fila; purificadores secundarios tipo T6 de 21 pies de largo.

La presión del vapor es registrada por un manómetro posicionado en una válvula de cierre y una de control. Dos válvulas de seguridad tipo Hopkinson Hylif con diámetro de 3 plg; uno para activarse a 333 lb/plg² y el otro a 335 lb/plg² están montados en el domo para descargar exceso de presión que pueda crearse.

1.2.10 Suavizadores de agua de alimentación

Una de las aplicaciones más comunes para el suavizador de intercambio iónico, ver figura 11; es el suavizar el agua de alimentación para los generadores de vapor.

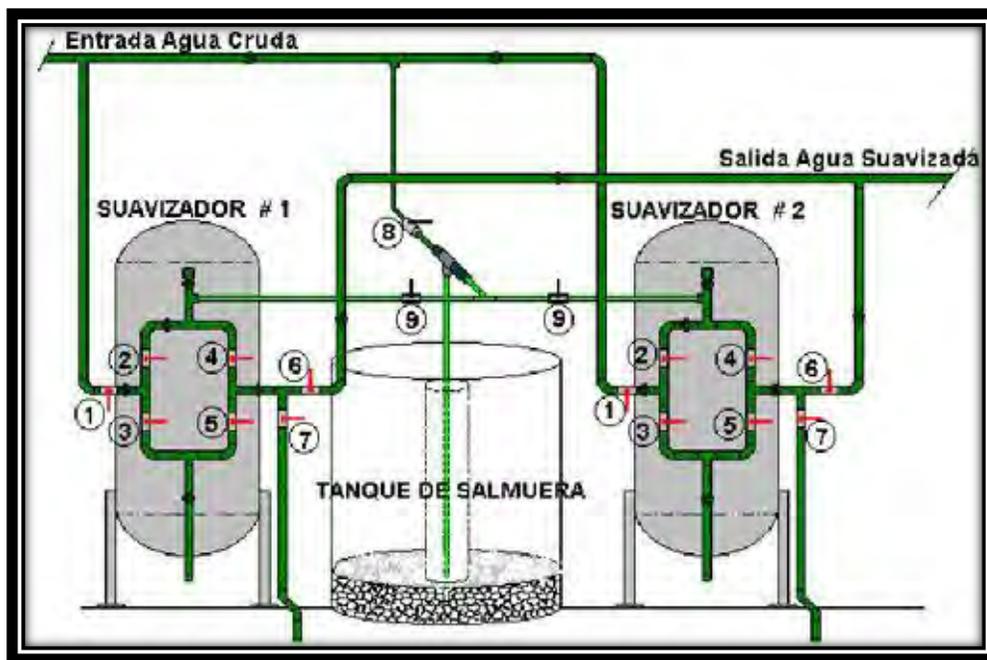


FIGURA 11 SUAVISADOR DE INTERCAMBIO IÓNICO

Como regla general, las grandes fábricas u operaciones industriales, son los lugares más adecuados para encontrar uno o más generadores de vapor en operación.¹⁹

El agua de alimentación es comúnmente almacenada en un tanque, con capacidad suficiente para atender la demanda del generador. Una válvula de control de nivel mantiene el tanque con agua, una bomba de alta presión empuja el agua hacia adentro

¹⁹ BABCOCK & WILCOX. Steam Its Generation and Use. 39ª. edición. Estados Unidos: The Babcock and Wilcox Company, 1978.

del generador, se emplean bombas de presión debido a que generalmente los generadores operan a presiones mucho más elevadas que las que encontramos en los tanques de agua.

Vapor limpio es agua pura en forma de gas, cuando el vapor se enfría se condensa en agua pura, normalmente conocida como “condensados”. Estos condensados contienen una gran cantidad de calor que puede ser empleada en el procesamiento del azúcar en bruto, y también, son casi perfectos como “make-up (agua de reposición)” para un generador una vez que ha sido desgasificada para eliminar los gases disueltos, como el oxígeno. Esto es posible, si los condensados son retornados al generador y colectados en un tanque conocido como “tanque de condensados”. Cuando el condensado es recuperado en un tanque de este tipo, generalmente se elimina del diseño el tanque de agua de reposición. En algunas instalaciones, el retorno de condensados puede llegar a ser del 99% casi supliendo el agua de reposición.²⁰ El mayor porcentaje de recuperación de condensados será menor que el agua de alimentación al generador o make-up. Hay otras instalaciones que probablemente requieran emplear el 100% de make-up, esto puede ser por varias razones; cuando el condensado no se puede recuperar o cuando el condensado está contaminado.

Actualmente el agua de alimentación para los generadores de vapor de la Industria Azucarera de Belice cuenta con las siguientes propiedades representadas en la siguiente tabla 3.

²⁰ www.econext.com.mx

TABLA 3 PROPIEDADES DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN			
Características	Rango requerido	Datos del 5 de abril 2003	Datos el 13 del abril 2003
pH	10-11	11.11	10.65
Azucres	0	0	0
Conductividad eléctrica	2500	1357	1387
TDS	1200	672	687
Dureza	0	16	10
P alcalinidad(ppm)	200-300	460	124
M alcalinidad(ppm)	200-300	590	260
Fosfato (ppm)	30-60	13	20
NaCl (ppm)	< 100	30	46
SO3 (ppm)	30-40	17	12

1.3 Combustibles Y Combustión

Los combustibles son sustancias que se oxidan para producir calor. El término combustible se limita, por lo general, a aquellas sustancias que arden fácilmente en aire u oxígeno emitiendo grandes cantidades de calor. Los combustibles se utilizan para calentar, y producir vapor con el fin de obtener calor y energía.

Esta definición se desprende de la propiedad fundamental de las sustancias combustibles; su poder calorífico, es decir, la cantidad de calor que puede desarrollarse por la combustión de una cantidad dada de combustible.

Los combustibles se clasifican de acuerdo a sus características tanto físicas como su composición. Uno de los principales parámetros a considerar para determinar el empleo de un compuesto, es su capacidad para generar calor. En la tabla 4 se enlistan los principales combustibles para generadores de vapor y su poder calorífico. La composición de los diferentes tipos de combustibles varían, pero en general, los elementos principales que los constituyen son: carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S), nitrógeno (N), vanadio (V), y cenizas.

TABLA 4 PODER CALORÍFICO DE COMBUSTIBLES TÍPICOS PARA GENERADORES DE VAPOR

<i>Combustible</i>	<i>Poder calorífico (kJ/kg)</i>
Carbón de madera	29,726.28
Antracita	26,376.88
Bituminoso	26,376.84
Lignito	12,560.40
Hulla	28,051.56
Carbón puro	33,829.34
Gas LP	47,582.98
Gas natural	41,449.32
Diesel	38,602.22
Combustible ligero	41,198.11
Combustible pesado	42,286.68
Licor negro	15,119.65
Desperdicio de café	23,261.00
Corteza de pino	22,097.95
Estiércol vacuno	17,213.14
Deshechos varios	22,097.95

Existen tres tipos de combustibles utilizados para la generación de vapor:

- Sólido
- Líquido
- Gaseoso

Para el estudio que se llevó a cabo se consideró el combustible sólido y líquido porque estos son los utilizados en la Industria Azucarera de Belice.

Las características de los combustibles son determinadas mediante la aplicación de dos tipos de análisis: el elemental y el inmediato el cual es el más simple.

A partir del análisis inmediato se determino los siguientes datos del bagazo: 52% de humedad, 40.2% de materia volátil, 6.1% de carbón y 1.7% de cenizas.

Mientras que el análisis elemental arroja los siguientes datos: 2.8% de hidrógeno, 23.4% de carbono, 0.1% de nitrógeno, 20% oxígeno, 42% de humedad, 1.7% de cenizas y rastros de azufre.²¹ También se determinó que el bagazo tiene un poder calorífico de 4,150 Btu/lb de bagazo.

Después de la combustión del bagazo se detectaron impurezas que afectan la eficiencia del generador de vapor. Se han detectado impurezas como: agua, azufre, oxígeno y nitrógeno. La humedad roba calor de la combustión para así poder evaporarse. El azufre y nitrógeno reaccionan con el oxígeno para formar óxidos de azufre y nitrógeno (SO_x y NO_x) que al ser emitido al ambiente causa lluvias ácidas.

También hay que tener cuidado en cuanto la temperatura de los gases de combustión, ya que si disminuye demasiado, habrá condensación, llegando al punto de rocío lo cual provocará que los óxidos de azufre y nitrógeno causen incrustaciones y erosión de la tubería u otros componentes.

²¹ BABCOCK & WILCOX. Steam Its Generation and Use. 39º. edición. Estados Unidos: The Babcock and Wilcox Company, 1978. p. 5-20

El aceite de grado #6 también es utilizado como combustible en el generador de vapor de la Industria Azucarera de Belice. Este combustible solamente se utiliza cuando se inicia la operación del sistema o en casos de emergencia.

A partir del análisis del aceite #6 se pudo determinar lo siguiente: 0.7 - 3.5% de azufre, 9.5 - 12% de hidrógeno, 86 – 90.2% de carbono, y 0.05% de cenizas. Este aceite tiene un poder calorífico de aproximadamente 17,410 Btu/lb_{aceite}.

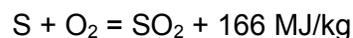
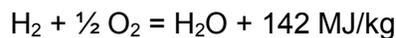
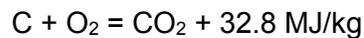
1.3.1 Combustión

Existen tres tipos de combustión:

- Completa
- Incompleta
- Neutra

1.3.2 Combustión completa

Todos los productos resultantes de la reacción están en el máximo grado posible de oxidación (CO₂, H₂O, SO₂,...). Combustible + oxidante = Productos



La cantidad de oxígeno teóricamente necesaria para que estas reacciones se lleven a cabo se denomina oxígeno teórico o estequiométrico. La combustión llevada a cabo en estas condiciones se denomina estequiométrica o teórica.

1.3.4 Combustión incompleta

En realidad, si solo se suministra el oxígeno teórico, la reacción no se lleva a cabo completamente o con la rapidez suficiente, dando origen a reacciones incompletas, como por ejemplo:



En este caso, parte de la energía calorífica de la combustión no se libera y permanece como monóxido de carbono (CO). Se entiende como combustión incompleta aquella en que algún componente del combustible no ha llegado al grado máximo de oxidación. En la combustión incompleta no se obtiene la máxima energía disponible en el combustible. Los productos que no se han oxidado totalmente se denominan inquemados: C, CO, hidrocarburos no oxidados CH. etc. Resulta, por lo tanto, necesario proporcionar un exceso de aire al combustible para aumentar la posibilidad de que reaccione con el oxígeno rápido y totalmente en combustión completa antes de que pase a una zona más fría donde la combustión no tendría lugar.

1.3.5 Oxígeno, aire teóricos y en exceso

Los siguientes términos se utilizan comúnmente para describir las proporciones de combustible y aire que se alimentan a un sistema de combustión:

- Oxígeno teórico: son los moles o la velocidad de flujo molar de oxígeno que se necesitan para efectuar la combustión completa de un mol de combustible en el reactor suponiendo que todo el carbono del combustible se oxida para formar bióxido de carbono y todo el hidrógeno para formar agua.
- Aire teórico: Es la cantidad de aire que contiene el oxígeno teórico. Por cada mol de oxígeno se requieren $1+x$ moles de aire atmosférico: $x = 3.78$ para 20.9% O_2 y 79.1 % de N_2 .
- Exceso de Aire: Es la cantidad en exceso del aire que alimenta el reactor con respecto al aire teórico. El porcentaje de aire atmosférico en exceso se define como:

$$e = \frac{(\text{moles_de_aire})_{\text{alimentacin}} - (\text{moles_de_aire})_{\text{teorico}}}{(\text{moles_de_aire})_{\text{teorico}}} \times 100\%$$

Si el número de los moles de aire de alimentación es menor que el de moles de aire teóricos utilizamos:

➤ Defecto de Aire:

$$d = \frac{(\text{moles_de_aire})_{\text{teorico}} - (\text{moles_de_aire})_{\text{alimentacion}}}{(\text{moles_de_aire})_{\text{teorico}}} \times 100\%$$

También se suele utilizar el término tasa de aireación, porcentaje de aire estequiométrico o riqueza de aire. En la práctica, los generadores trabajan con un exceso de aire comprendido entre el 10 y 40 % dependiendo del tipo de combustible.²² En la tabla 5, se presentan varios combustibles con la cantidad de exceso de aire necesario para la combustión completa. Si se conoce la velocidad de alimentación del combustible y la ecuación estequiométrica de su combustión completa, se puede calcular el oxígeno teórico y la velocidad de alimentación del aire teórico. Si además se conoce la velocidad de alimentación de aire real, se puede calcular el porcentaje de aire en exceso a partir de la ecuación anterior.

²² E. Hugot, Handbook of Cane Sugar Engineering. (12^a edición. Amsterdam: Editorial Elsevier, 1972), p.p 602-744

TABLA 5 CANTIDAD USUALES DE EXCESO DE AIRE PARA DIFERENTES TIPOS DE COMBUSTIBLES

Combustible	Exceso de aire % de peso
Carbón pulverizado	15-20
Carbón triturado	10-15
Carbón	15-50
Aceite combustible	5-10
Gas natural y horno de coke	5-10
Gas de alto horno	15-18
Madera	20-25
Bagazo	25-35
Licor negro	5-7

1.3.6 Aire de combustión

Es el oxígeno necesario en cada reacción de combustión. En la mayoría de los casos el oxígeno es suministrado por el aire el cual se considera con una composición de aproximadamente: 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno. Así cada mol de oxígeno está acompañado de 3.76 moles de nitrógeno. El aire considerado aquí no contiene agua. En caso contrario la combustión es húmeda y hay que incluir el vapor de agua cuando se escribe la ecuación de combustión.

1.3.7 Parámetros importantes

Cuantificación de cantidades de combustible y aire:

- Relación aire-combustible = cociente entre la cantidad de aire en una reacción y la cantidad de combustible, en base molar. (Masa molecular del aire 28.97)

$$\frac{m_{aire}}{m_{comb.}} = \frac{(n_{aire} \times M_{aire})}{(n_{comb.} \times M_{comb.})}$$

1.3.8 Productos de combustión

Cuando la combustión es completa, los productos que se manifiestan son CO₂, H₂O, N₂ y SO₂ con oxígeno presente, siempre y cuando, haya exceso de aire. Sin embargo, la combustión es el resultado de una serie de reacciones químicas muy complicadas y rápidas, y los productos que se forman dependen mucho de factores, tales como, la presión y temperatura del sistema y obviamente de la proporción de aire y combustible. Aunque la cantidad de aire suministrada en un proceso de combustión suele ser mayor que la estequiométrica, con frecuencia se tiene la aparición entre los productos del monóxido de carbono.

Cuando la cantidad de aire suministrado es inferior a la estequiométrica, los productos incluyen monóxido de carbono y combustible no quemado. Además, en el caso de combustibles sólidos siempre queda algo en forma de cenizas. Puesto que en la mayor parte de los procesos de combustión se forma agua, la fracción molar de vapor de agua en los productos de la combustión puede ser importante. Si los productos gaseosos de la combustión se enfrían, el vapor de agua empieza a condensar cuando se alcanza la temperatura de rocío, pudiendo producir la corrosión de zonas metálicas en contacto con los gases al depositarse el agua sobre ellos.

La composición de los gases de combustión puede darse en base húmeda, que incluye el vapor de agua, y en base seca con la que se denota la composición de los gases resultantes una vez que el agua se haya condensado.

La composición de los productos de una combustión real solamente se puede determinar experimentalmente, mediante la utilización de los siguientes equipos: analizador orsat, cromatógrafo de gases, analizador infrarrojo y un detector de ionización de flama.

1.3.9 Poder Calorífico

El poder calorífico de un combustible es el valor negativo del calor estándar de combustión, generalmente expresado por unidad de masa de sustancia. El poder calorífico superior (PCS) es el valor correspondiente del poder calorífico con agua líquida como producto de combustión. El poder calorífico inferior (PCI) es el correspondiente al caso en que el agua esté en fase de vapor. Para calcular el poder calorífico inferior a partir del superior se deben calcular los moles de agua que se producen cuando se quema una unidad de masa de combustible.

1.3.10 Bagazo de Azúcar como Combustible Renovable

Como se ha mencionado, el cultivo de caña y su procesamiento para obtener azúcar es la principal industria en el sector agrícola de Belice.

La Industria Azucarera produce un residuo llamado bagazo, el cual es una fibra de la caña de azúcar después de la extracción del azúcar. Una tonelada métrica de caña produce aproximadamente 704 libras de bagazo. El bagazo tiene un poder calorífico superior de 3,823.056 Btu/lb, el cual es mayor que el poder calorífico superior de muchos otros combustibles en el mundo, que son caros.

Comparándolo con combustibles fósiles oxidados en plantas termoeléctricas convencionales, el bagazo presenta varias ventajas sustanciales:

- bagazo es un producto secundario, por lo cual, su utilización como combustible resulta económicamente deseable ente otros combustibles.

- bagazo es considerado como un combustible renovable y las emisiones de CO_2 de su combustión son utilizados por el proceso de fotosíntesis cuando la caña de azúcar crece.
- el bagazo es libre de azufre, por lo tanto, no produce óxido de azufre durante su combustión.

CAPITULO 2. - METODOS DE CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE GENERADORES DE VAPOR

A partir de la revolución industrial se fueron evolucionando los generadores de vapor tecnológicamente. Estos avances provocaron el desarrollo de métodos empíricos para determinar la eficiencia de los generadores.

La eficiencia, puede ser calculada por medio de dos métodos: Método directo y Método indirecto o por pérdidas. De estos métodos el más simple es el directo puesto que solamente se utiliza la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{M_v \times (\Delta h)}{M_c \times PCS} \times 100\%$$

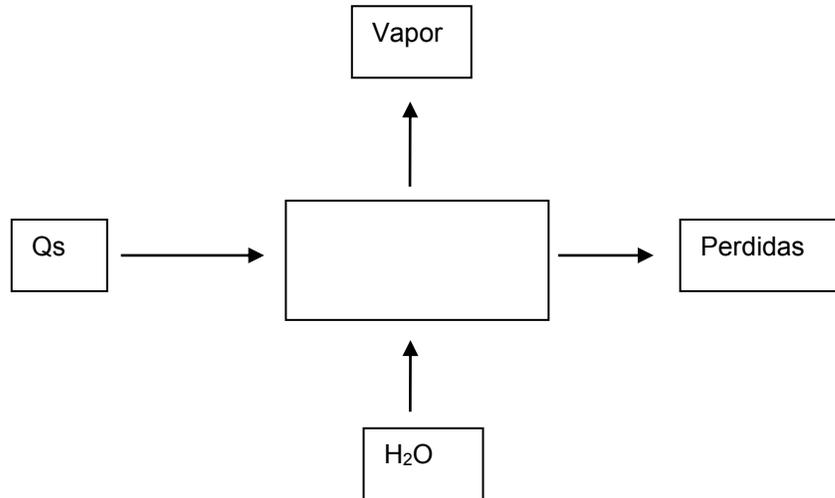
donde:

η	eficiencia
M_v	gasto de vapor (kg/hr)
M_c	consumo de combustible (kg/hr)
Δh	diferencias de entalpías (kJ/kg)
PCS	poder calorífico superior (kJ)

El método indirecto es un poco complejo porque se aplican una serie de fórmulas e incluso se debe realizar un análisis completo de los gases de combustión. Para este método se utiliza la siguiente fórmula:

$$\eta = (1 - \sum \text{perdidas}) \times 100\%$$

Para poder obtener la sumatoria de perdidas primero hay que realizar un balance de energía en el generador de vapor. El siguiente diagrama representa un simple esquema del balance de energía.



Este balance se logra haciendo varios cálculos preliminares, los cuales se logran mediante la aplicación de una variedad de fórmulas como son los siguientes:

a) Flujo de nitrógeno

$$W_{n_2} = \frac{28.02 \times N_2}{12.01 \times (CO_2 + CO)} \times \left(C + \frac{12.01S}{32.07} \right) \times 10^{-2}$$

donde:

W_{n_2} flujo de nitrógeno (kg./kg. combustible)

N_2 nitrógeno en los gases de combustión (%)

CO_2 bióxido de carbono en la combustión (%)

CO monóxido de carbono en la combustión (%)

C carbono en el combustible (%)

S Azufre en el combustible (%)

b) Flujo de aire seco

$$W_a = \left(W_{n_2} - \frac{N_{2comb}}{100} \right) \div 0.7685$$

donde:

W_a flujo de aire seco (kg. gas/kg. cq)

W_{n_2} flujo nitrógeno (kg. /kg. cq)

N_2 nitrógeno en el combustible (%)

c) Flujo de gases de combustión

$$W_g = \frac{(44.01 \times CO_2 + 32 \times O_2 + 28.02 \times N_2 + 28.01 \times CO) \left(C + \frac{12.015}{32.07} \right)}{12.01 \times (CO + CO_2) \times 100}$$

donde:

W_g flujo de los gases de combustión

Nota: los gases CO, CO₂, O₂, C son los gases de combustión en %

d) Relación carbono/hidrogeno

$$\frac{C}{H} = \frac{C}{H_2}$$

donde:

C carbono en combustible (%)

H₂ hidrógeno en combustible (%)

e) Presión parcial de la humedad en el flujo de gases de combustión

$$Mg = \frac{8.936 \times H_2}{100} + Wa \times Waw + \frac{M_F}{100} + Wz$$

donde:

Mg contenido de humedad en gases de combustión

H₂ hidrógeno en el combustible (%)

Wa flujo de aire seco (kg. as/kg. aq)

Waw humedad del aire (kg. agua/kg. as)

M_F humedad del combustible (%)

Wz flujo de vapor atomizado

f) Aire teórico

$$A_T = \left[(11.51 \times C) + 34.3 \times \left(H_2 - \frac{O_2}{7.937} \right) + (4.335 \times S) \right] \times 10^{-2}$$

g) Exceso de aire

$$Ea = \frac{100 \times (O_2 - CO/2)}{0.2682 \times N_2 - (O_2 - CO/2)}$$

h) Calor en el aire suministrado

$$Ba = Wa \times Cp_{as} \times (T_a - T_{ref})$$

donde:

Ba calor en el aire suministrado (kJ/kg. ca)

Cp_{as} calor específico del aire seco (kJ/kg. as °C)

Ta temperatura de aire suministrado (°C)

T_{ref} temperatura de referencia (°C)

PARA COMBUSTIBLES LIQUIDOS

i) Calor en el vapor de atomización

$$B_z = \frac{W_{va} \times (h_{va} - h_{vsat})}{W_f}$$

donde:

B_z calor en el vapor de atomizado (kJ/kg)

W_{va} Flujo de vapor atomizado (kg/s)

h_{va} Entalpía vapor atomizado (kJ/kg)

h_{vsat} Entalpía vapor saturado a temperatura referencia °F (kJ/kg)

W_f flujo de combustible (kg/s)

j) Calor sensible en el combustible

$$B_f = C_{p_f} \times (T_f - T_{ref})$$

donde:

B_f calor sensible combustible (kJ/kg_{coq})

C_{p_f} calor especifico combustible (kJ/kg °C)

T_f temperatura de combustible (°C)

k) Calor suministrado con la humedad del aire

$$B_m = W_a \times W_{aw} \times C_{pv} \times (T_a - T_{ref})$$

donde:

B_m calor suministrado con la humedad de aire (kJ/kg c_q)

C_{pv} calor específico del vapor (kJ/kg $^{\circ}C$)

l) Calor total suministrado

$$B = B_{at} + B_f + B_z + B_m$$

m) Calor que entra con el combustible

H_f = calor suministrado por combustible (poder calorífico) (kJ/kg)

n) Energía que entra al sistema

$$H_f + B \text{ (kJ/kg)}$$

o) Pérdidas por gases de combustión

$$L_g = W_g \times C_{p_g} \times (T_{gas} - T_{ref})$$

donde:

L_g pérdidas de energía por gases de combustión (kJ/kg c_q)

W_g flujo de gases de combustión (kg $_{gas}$ /kg c_q)

C_{pg} calor específico de gases de combustión (kJ/kg °C)

T_{gas} temperatura de gases de combustión (°C)

% de pérdidas por gases

$$Lg \times \frac{100}{H_f + B}$$

p) Pérdidas por formación de CO

$$Lco = \frac{\left(CO \times 10160 \times 1.0549 \times 2.205 \times \frac{C}{100} \right)}{CO_2 + CO}$$

$$\% = Lco \times \frac{100}{H_f + B}$$

q) Pérdidas por humedad producto de la combustión de H_2

$$Ln = \frac{8.936 \times H_2 \times (h_{pv} - h_{wsat})}{100}$$

donde:

Ln pérdidas por humedad producto de la combustión del H_2

H_2 hidrógeno en el combustible (%)

h_{pv} entalpía del vapor a la presión P_{ng} y T_{gas} (kJ/kg)

h_{wsat} entalpía del líquido saturado a T_{ref} (kJ/kg)

% de pérdidas

$$\% = Ln \times \frac{100}{H_f + B}$$

r) Pérdidas por humedad del aire

$$Lma = Wa \times Waw \times (h_{pv} - h_{vsat})$$

donde:

Wa flujo de aire seco (kg_{gas}/ kg_{cq})

h_{vsat} entalpía del vapor saturado a T_{ref} (kJ/kg)

% de pérdidas por humedad del aire

$$\% = Lma \times \frac{100}{H_f + B}$$

s) Pérdidas por humedad del combustible

$$Lmf = \frac{H_2O \times (h_{pv} - h_{vsat})}{100}$$

donde:

H₂O humedad en combustible (%)

t) Pérdidas por atomización

$$Lz = \frac{Wva \times (h_{pv} - h_{vsat})}{W_f}$$

donde:

Wva flujo de vapor de atomización exterior unidad (kg/s)

W_f flujo de combustible (kg/s)

% de pérdidas por atomización

$$\% = Lz \times \frac{100}{H_f + B}$$

u) Pérdidas por radiación y convección

% de pérdidas por radiación

$$\% = Lr \times \frac{100}{H_f \times B}$$

donde:

Lr pérdidas por radiación y convección

v) Pérdidas no determinadas

% de pérdidas no determinadas

$$\% = Li \times \frac{100}{H_f + B}$$

donde:

Li pérdidas no determinadas proporcionadas por el fabricante.
(Combustibles líquidos 1% y sólidos 1.5%)

w) Pérdidas totales en el Generador de vapor

$$L = Lg + Lco + Lma + Lmf + Lz + Lr + Li + Ln$$

Finalmente la eficiencia del generador de vapor queda expresado como

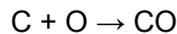
$$\eta = 100 - \left(\frac{L}{H_f + B} \right) \times 100\%$$

2.1 Combustión de bagazo mojado con exceso de aire

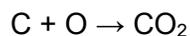
En la práctica no es posible quemar un combustible en condiciones industriales con la cantidad teórica de aire necesario: la combustión sería pobre e incompleta.

Para poder obtener una combustión completa, que todo el carbono sea quemado para formar bióxido de carbono se requiere el suministro de un exceso de aire. Una gran porción del calor será perdido si se permite la formación de monóxido de carbono.

Las reacciones:



libera solamente 4,450 Btu/lb de carbón, mientras que la combustión:



libera 14,650 Btu/lb.

FORMULAS CARACTERÍSTICAS PARA EL CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN DEL BAGAZO CON EXCESO DE AIRE:

- 1) Se tiene que el peso del aire utilizado por libra de bagazo (P_a) es igual a:

$$P_a = 5.75(1 - w)m$$

- 2) En consecuencia el peso de los gases de combustión (P_g) es:

$$P_g = 5.75(1 - w)m + 1$$

Como los productos de combustión consisten del:

- peso unitario del combustible estudiado
- aire de combustión, que sirve para quemar este combustible

- 3) Se obtiene el peso de los gases de combustión considerados secos (P_{gs}) por medio de la resta del peso de los gases de combustión (P_g) y el agua formada por la combustión de hidrógeno y la cantidad de humedad en el bagazo:

$$P_{gs} = P_g - 0.585(1 - w) - w$$

o

$$P_{gs} = (1 - w)(5.75m + 0.415)$$

- 4) Similarmente para obtener el volumen del aire utilizado por libra de bagazo (V_a):

$$V_a = 71.3(1 - w)m$$

Para calcular el volumen de gases de combustión (V_g) se tiene que notar:

- tener más oxígeno que lo estrictamente necesario para quemar todo el carbón e hidrógeno en el bagazo.
- que el volumen de CO_2 es igual al volumen de oxígeno del cual se forma y que el volumen del agua es igual al volumen del oxígeno del cual se forma, multiplicado por 2.

Por lo tanto, la combustión proporciona por libra de combustible seco son las cantidades que aparecen en la siguiente tabla 6:

TABLA 6 VOLUMEN DE PRODUCTOS DE GASES DE COMBUSTIÓN

Vg = volumen de aire introducido	aire
+ volumen de oxígeno originando del bagazo	+4.93
- volumen de oxígeno utilizado para formar agua	- 5.83
- volumen de oxígeno utilizado para formar CO ₂	-14.01
+ volumen de agua formado	+11.65
+ volumen de CO ₂ formado	<u>+14.01</u>
como total: el volumen de aire introducido	+10.75

También es necesario sumar la cantidad de vapor de agua que se origina de la humedad del bagazo. Finalmente se obtiene:

5) Volumen de gases de combustión (Vg) está dado por:

$$Vg = 71.3(1 - w)m + 10.75(1 - w) + 19.92w$$

simplificando

$$Vg = 71.3(1 - w)m + 9.17w = 10.75$$

6) Para obtener la cantidad de volumen de gases de combustión considerados secos (Vgs) es necesario la resta del volumen de gases de combustión (Vg) y la cantidad de agua en el combustible, 19.92w y el agua formado por la combustión, 11.65 (1-w). Por lo tanto:

$$V_{gs} = 71.3(1-w)m + 10.75(1-w) - 11.65(1-w)$$

simplificando

$$V_{gs} = 71.3(1-w)m - 0.9(1-w)$$

donde:

- w Humedad del combustible
- m Relación de peso de aire con el teóricamente necesario
- Pa Peso del aire utilizado por libra de bagazo
- Va Volumen del aire utilizado por libra de bagazo
- Pg Peso de gases de combustión
- Vg Volumen de gases de combustión
- Pgs Peso de gases de combustión considerados secos
- Vgs Volumen de gases de combustión considerados secos

NOTA: todos los volúmenes están en función de 32°F y 29.9 plg de mercurio (Hg).

Por lo tanto para obtener los volúmenes a cualquier temperatura, es necesario aplicar la siguiente fórmula:

$$V_t = v_o \frac{459.4 + t}{459.4 + 32}$$

donde:

- V_t volumen a temperatura (t)
- V_o volumen a 32 °F

COMPOSICIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN

Se sabe que el peso total de los gases es:

$$P_g = 5.75(1-w)m + 1$$

Los pesos de los gases individuales son:

Nitrógeno:

$$N_2 = 1.33 \times \frac{76.85}{23.15} (1-w)m$$

o

$$N_2 = 4.42(1-w)m$$

Oxígeno:

O ₂ derivado del aire	1.33 (1-w) m
+ O ₂ derivado del bagazo	0.44 (1-w)
- O ₂ usado para formar agua	-0.52 (1-w)
- O ₂ usado para formar CO ₂	-1.25 (1-w)

$$O_2 = 1.33(1-w)(m-1)$$

Agua

Agua formado	0.585(1-w)
+ Agua en bagazo	w

$$H_2O = 0.585(1-w) + w$$

Dióxido de carbono

$$CO_2 = 0.47 \times 3.67(1-w)$$

o

$$CO_2 = 1.72(1-w)$$

El volumen del bióxido de carbono en los gases de combustión puede ser obtenida de la siguiente fórmula:

$$Vol. = 1.72(1-w) \times 8.10$$

simplificando

$$Vol. = 14(1-w)$$

Como el coeficiente de expansión es igual para todos los gases, la porción calculada de volúmenes a 32 °F será igual a cualquier temperatura.

Por lo tanto, el contenido de bióxido de carbono en los gases de combustión es:

$$\gamma = \frac{14(1-w)}{V_{gs}} = \frac{14(1-w)}{71.3(1-w)m - 0.9(1-w)}$$

Por consiguiente, se puede derivar m:

$$m = \frac{0.196}{\gamma} + 0.0126$$

Como el segundo término es relativamente despreciable hacia el primero, se puede escribir:

$$m = \frac{0.196}{\gamma}$$

donde:

m peso de aire usado/ peso de aire teóricamente necesario

γ contenido de dióxido de carbono por unidad de volumen de gases seco

La máxima cantidad teórica de bióxido de carbono en los gases de combustión debe ser entre 12-14% si se desea una combustión completa, si se desea prevenir la formación de monóxido de carbono se debe operar con un de exceso de aire de aproximadamente entre 40-60%.

2.2 Pérdidas de calor en gases de combustión

Fórmula General:

$$q = moles \times Mcp \times (t_2 - t_1)$$

donde:

q calor sensible perdido en gases de combustión, en Btu/lb

t_2 temperatura de gases de combustión en °F

t_1 temperatura de los gases a temperatura ambiente 90°F

2.3 Cantidad de vapor obtenible

Ahora se debe calcular la cantidad de vapor que es obtenible por peso unitario del bagazo. Las pérdidas de calor en el hogar y del generador consisten de los siguientes:

- Calor latente del agua formado durante la combustión del hidrógeno en el bagazo
- Calor latente en el agua contenido en el bagazo
- Calor sensible en gases de combustión saliendo del generador
- Pérdidas en sólidos no quemados
- Pérdidas por radiación del hogar y especialmente del generador
- Pérdidas por mala combustión del carbón

También se deben considerar otras pérdidas muy importantes como son las siguientes:

- (β) coeficiente tomando en consideración las pérdidas por radiación; normalmente se considera el 8% de el calor entrante.
- (α) coeficiente tomando en consideración pérdidas por sólidos no quemados; se considera pérdidas del 5% como máximo.
- (η) coeficiente tomando en consideración pérdidas no contabilizadas; el cual también se considera como pérdidas del 5%.

La cantidad de calor disponible; transferida a vapor está dado por:

$$Mv = PCS - \sum(Perdidas)$$

donde:

Mv calor transferido a vapor por libra de bagazo quemado (Btu/lb)

2.4 Eficiencia del generador de vapor

$$\eta = \frac{\text{calor_aprovechad}}{\text{calor_su min istrado}}$$

Esta eficiencia generalmente varía entre el 50 y 56.7%.

2.5 Cálculo de temperatura de combustión

La temperatura (T) del hogar es rápidamente calculado, del factor de que el calor desarrollado en la combustión es recuperado en los gases pasando del hogar hacia los tubos.

Ya que el poder calorífico y todas las cantidades de calor están expresados con referencia a una temperatura de 32 °F, es necesario tomar en consideración el calor almacenado en el combustible y en el aire de combustión, a una temperatura ambiente de t grados.

$$\int_{32}^{t^{\circ}} 1 \times Cc \times dt + \int_{32}^{t^{\circ}} Pa \times Ca \times dt + Ni = \sum \int_{32}^{T^{\circ}} P \times C \times dt$$

Para una libra de combustible:

donde:

t° temperatura ambiente del aire y el combustible

- T° temperatura de combustión requerida
- Pa peso de aire usado por libra de combustible
- P peso de cada gas producto de combustión por libra de combustible
- Cc calor específico de combustible
- Ca calor específico del aire
- C calor específico de cada gas de combustión
- Ni poder calorífico inferior del combustible

Se utiliza el poder calorífico inferior ya que el vapor de agua contenido en los gases de combustión no se condensa.

La expresión $\sum \int_{32}^{T^{\circ}} P_c \times dt$ representa la suma de los calores específicos de los gases de combustión. Es necesario utilizar la integral porque el calor específico está en función de la temperatura. Podemos evitar el uso de las integrales por medio del uso de la gráfica 2.1, el cual suministra los calores específicos medios de varias sustancias, con el cual se tiene que trabajar, consideradas entre 32°F y cualquier temperatura ambiente del aire y el combustible (t°) o temperatura de combustión requerida (T°).

Por lo tanto, la ecuación se convierte en:

$$(1 \times C_c + P_a \times C_a)t + N_i = T \left[\sum P_c \right]_{32}^{T^{\circ}}$$

pero

$$1 + P_a = \sum P = P_g$$

y, como estos calores específicos de aire y gases no difieren mucho, tomamos:

$$1 \times C_c + P_a \times C_a = \sum P_c$$

Finalmente tomado en consideración las pérdidas:

$$T = t + \frac{\alpha\beta_o Ni}{\left[\sum Pc\right]_{32}^{T_o}}$$

donde:

- α coeficiente tomando en consideración sólidos no quemados
- β_o coeficiente tomando en consideración pérdidas por radiación en el hogar

Para hogar de bagazo se pueden considerar los siguientes valores:

- α 0.95 – 0.99 de acuerdo al tiro
- β_o 0.91 – 0.99.

Hay que considerar que:

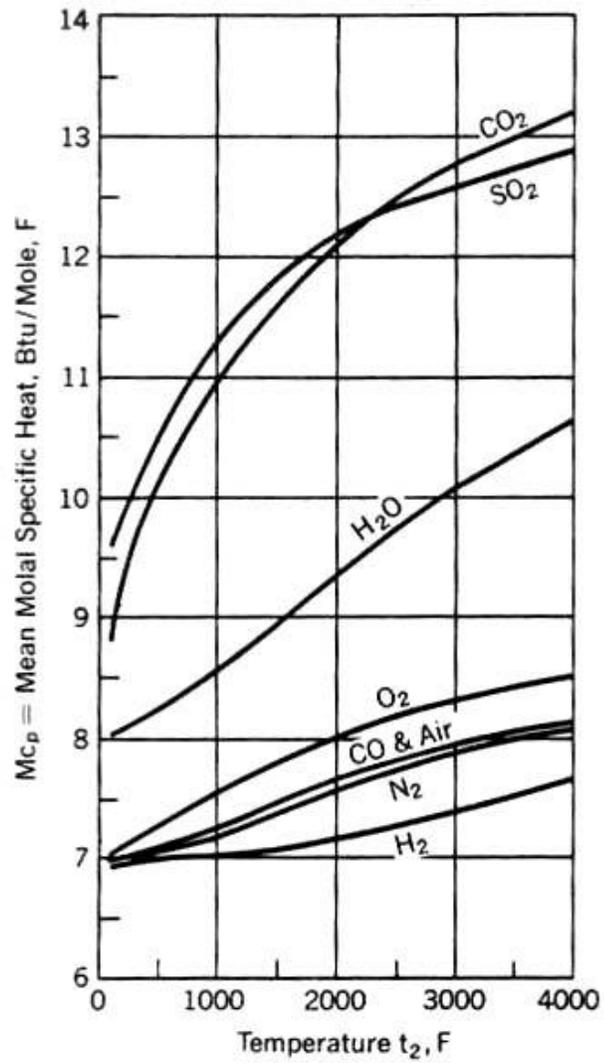
- la temperatura de combustión incrementa con un incremento de t .
- la temperatura disminuye cuando $\sum Pc$ incrementa.

En otras palabras el exceso de aire tiene una influencia directa en la temperatura de combustión.

De la misma manera, la humedad del bagazo disminuye la temperatura de combustión, también hay que considerar el vapor de agua presente, ya que el calor específico del vapor es dos veces mayor que el de los gases de combustión. No se debe olvidar que la cantidad de humedad en el combustible disminuye el Ni , y consecuentemente tiene un doble efecto en la temperatura de combustión.

2.6 Calor específico medio

Para poder determinar los valores de calor específicos medio, de los gases de combustión, se utilizó la gráfica 2.1



Grafica 2.1 Calor específico medio de gases de combustión

2.7 Método de cálculo de un precalentador de aire

Se tienen dos ecuaciones principales para llevar a cabo el cálculo del precalentador de aire:

$$\text{➤ } M = \alpha PC(T_o - T) = pc(t - t_o)$$

$$\text{➤ } T - t_o = (T_o - t) e^{\frac{-k(1-r)s}{\alpha PC}}$$

donde:

- M cantidad de calor transmitido al precalentador, en Btu/hr
- α coeficiente ≤ 1 ,
- P peso de gases pasando por el precalentador, en lb/hr
- C calor específico de los gases
- T_o temperatura de los gases entrando al precalentador, en °F
- T temperatura de los gases saliendo del precalentador, en °F
- p peso de aire a calentar, en lb/hr
- c calor específico del aire
- t_o temperatura del aire entrando al precalentador, en °F
- t temperatura del aire saliendo del precalentador, en °F
- k coeficiente de transferencia de calor para el precalentador
- S superficie de intercambio de calor, en ft²
- r razón

La razón "r" en un precalentador de aire depende de:

- el peso de los gases de combustión es mayor que el peso del aire
(Ya que $P_g = P_a + 1$)
- el calor específico de los gases es más alto que el del aire ($C > c$)

Entonces obtenemos, que la razón es:

$$r = \frac{\alpha PC}{pc} = \frac{t - t_o}{T_o - T}$$

Normalmente este valor es mayor de 1. Varía entre 1.2 y 1.6; pero su valor más frecuente es de 1.3. Es decir, por cada grado de temperatura que los gases de combustión disminuyan, la temperatura del aire aumenta por 1.3 grados.

Pero si:

$$r = \frac{t - t_o}{T_o - T} > 1$$

y sigue similarmente que:

$$r = \frac{T - t_o}{T_o - t} > 1$$

Así para que la expresión de S siempre tenga un signo positivo. Podemos escribir:

$$S = \frac{\alpha PC}{k(1-r)} \times \ln \frac{T_o - t}{T - t_o} = \frac{\alpha PC}{k(r-1)} \times \ln \frac{T - t_o}{T_o - t}$$

Como:

$$\ln \frac{a}{b} = -\ln \frac{b}{a}$$

Nota: para precalentadores de metal con circulación efectiva, se toma el valor de 0.90 para el coeficiente α .

El coeficiente de transferencia de calor en el precalentador es del orden de:

- de acuerdo a Tromp (p. 290) $k = 2 \text{ Btu/ft}^2/\text{hr}/^\circ\text{F}$
- de acuerdo a Clayton (I.S.J., (1939) p.389) k está en función de la velocidad de los gases de combustión:

Empresas Francesas toman un valor bajo: $k = 1 - 2.5 \text{ Btu/ft}^2/\text{hr}/^\circ\text{F}$

En general se puede utilizar $k = 1.6-2 \text{ Btu/ft}^2/\text{hr}/^\circ\text{F}$

Las velocidades normalmente utilizadas son las siguientes:

- para aire: 6-13 ft/seg; 13 ft/seg no se debe exceder. Estas velocidades están dadas para aire frío. Para aire caliente la velocidad no debe excederse de 33 ft/seg.
- Gases de combustión: 16-26 ft/seg

2.8 Estimación de la temperatura del hogar

La estimación de la temperatura del hogar se lleva a cabo con un instrumento llamado pirómetro. Pero también se puede estimar con un cierto grado de exactitud con la vista, particularmente si el observador está entrenado.

El color del hogar es más brillante mientras incrementa la temperatura. Las temperaturas obtenidas en la práctica son las siguientes en la tabla 7:

TABLA 7 TEMPERATURAS DE COMBUSTIÓN EN HOGARES DE BAGAZO

Humedad del bagazo	Exceso de aire		
	50% (m = 1.5)	75% (m = 1.75)	100% (m = 2)
40% (w = 0.40)	2,200	2,010	1,850
45% (w = 0.45)	2,100	1,920	1,780
50% (w = 0.50)	2,000	1,830	1,700

2.9 Método de cálculo para incrementar la temperatura de combustión

Si el aire es precalentado a la ecuación:

$$\int_{32}^{t'} 1 \times C_c \times dt + \int_{32}^{t'} Pa \times Ca \times dt + Ni = \sum \int_{32}^{T'} P \times C \times dt$$

se le sumará este calentamiento en ambos lados de la ecuación, resultando en:

$$\int_{t_o}^{t'} Pa \times Cadt = \sum \int_{T_o}^{T'} PC \times dt$$

O considerando el calor específico medio:

$$Pa[Ca]_{t_b}^t \times (t - t_b) = \sum P[C]_{T_o}^T \times (T - T_o)$$

Por lo tanto:

$$\frac{T - T_o}{t - t_b} = \frac{Pa[Ca]_{t_b}^t}{P[C]_{T_b}^T} = \frac{0.24Pa}{0.33Pg} = \frac{0.24 \times 5.75(1 - w)m}{[0.33 \times 5.75(1 - w)m] + 0.33}$$

O

$$\frac{T - T_o}{t - t_b} = \frac{1}{1.37 + \frac{1}{4.18(1 - w)m}}$$

Dándole valores críticos a w y m, se obtiene que la proporción sea:

$$\phi = \frac{T - T_o}{t - t_b}$$

Frecuentemente es un valor entre 0.55 a 0.64; Este valor indica el porcentaje de aumento de temperatura de combustión debido al precalentamiento del aire.

donde:

- t_b temperatura del bagazo a temperatura ambiente
- t temperatura del aire precalentado
- T_o temperatura de combustión obtenida con aire frío
- T temperatura de combustión obtenida con aire precalentado

CAPITULO 3. - DESARROLLO Y CASO DE ESTUDIO

3.1 Cálculo de la eficiencia térmica del generador de vapor de la Industria Azucarera de Belice

El Ingenio Azucarero de Belice cuenta con un sistema de control automático y manual, los cuales a su vez cuentan con medidores y sensores electrónicos que miden las variables más importantes del generador de vapor. A partir de estos dispositivos electrónicos y en condiciones normales de operación, a plena carga, se obtuvieron los siguientes datos:

DATOS OBTENIDOS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA DE BELICE DEL GENERADOR #2

1. Vapor Generado
 - Flujo de vapor: 110,000 lb/hr
 - Presión de vapor: 300 lb/plg²
 - Temperatura de vapor: 550 °F
2. Agua de Alimentación
 - Flujo de agua de alimentación : 110,000 lb/hr
 - Presión de H₂O: 400 lb/plg²
 - Temperatura del H₂O: 230 °F
3. Combustible Sólido (Bagazo)
 - Flujo del combustible : 15 toneladas/hr
 - Poder calorífico inferior: 4150 Btu/lb
 - Temperatura del combustible: 90 °F
4. Combustible Liquido (Aceite grado #6)
 - Flujo del combustible: 3 plg/hr (300 galones por pulgada)
 - Poder calorífico inferior: 17,420 Btu/lb
 - Poder calorífico superior: 18,400 Btu/hr
 - Temperatura del combustible: 220 °F

5. Composición del Combustible Sólido (bagazo)
 - Carbón: 47%
 - Hidrógeno : 6.5%
 - Oxígeno: 44%
 - Cenizas: 2.5%
 - Humedad: 50%
 - Nitrógeno: 0.1%

6. Composición del Combustible Líquido (Aceite grado #6)
 - Azufre: 0.7-3.5
 - Hidrógeno: 9.5-12.0
 - Carbón: 86.5-90.2
 - Cenizas: 0.01-0.50

7. Condiciones Ambientales
 - Temperatura Ambiental: 90 °F
 - Humedad relativa: 65 %

8. Temperatura de gases de combustión: 525 °F

9. Temperatura de aire para combustión: 90 °F

CASO DE ESTUDIO

Método Directo del Cálculo de la Eficiencia del Generador de Vapor:

Combustión de bagazo mojado con exceso de aire: (52% humedad en tiempos de lluvia)

- 1) Peso de aire utilizado por libra de Bagazo:

$$Pa = 5.75(1 - w)m$$

$$Pa = 5.75(1 - 0.52)1.18$$

$$Pa = 3.25 \frac{lb}{lb_bagazo}$$

2) Peso de gases de combustión:

$$Pg = 5.75(1 - w)m + 1$$

$$Pg = 5.75(1 - 0.52)1.18 + 1$$

$$Pg = 4.26 \frac{lb_gases_combustion}{lb_Bagazo}$$

3) Peso de gases supuestos seco:

$$Pgs = (1 - w)(5.75m + 0.415)$$

$$Pgs = (1 - 0.52)(5.75(1.18) + 0.415)$$

$$Pgs = 3.46 \frac{lb_gases}{lb_bagazo}$$

4) Volumen de aire utilizado por libra de bagazo:

$$Va = 71.3(1 - w)m$$

$$Va = 71.3(1 - 0.52)1.18$$

$$Va = 40.38 \frac{ft^3}{lb_bagazo}$$

5) Volumen de gases de combustión:

$$Vg = 71.3(1 - w)m + 9.17w + 10.75$$

$$Vg = 71.3(1 - 0.52)1.18 + 9.17(0.52) + 10.75$$

$$Vg = 55.9 \frac{ft^3}{lb_bagazo}$$

6) Volumen de gases secos:

$$Vgs = 71.3(1 - w)m - 0.9(1 - w)$$

$$Vgs = 71.3(1 - 0.52)1.18 - 0.9(1 - 0.52)$$

$$Vgs = 39.95 \frac{ft^3}{lb_bagazo}$$

Nota: Los valores de volúmenes están en función de 32°F y 29.92 en mercurio (Hg.). Hay que convertir a 525°F; por lo tanto, se debe aplicar la siguiente fórmula:

$$V_t = V_o \frac{459.4 + t}{459.4 + 32}$$

Donde t = 525°F

Aplicando la fórmula se obtiene los siguientes valores:

$$V_a = 80.89 \text{ ft}^3$$

$$V_g = 111.98 \text{ ft}^3$$

$$V_{gs} = 80.03 \text{ ft}^3$$

Composición de los gases de combustión:

Nitrógeno:

$$N_2 = 4.42(1 - w)m$$

$$N_2 = 4.42(1 - 0.52)1.18$$

$$N_2 = 2.51 \frac{lb}{lb_bagazo}$$

Oxígeno:

$$O_2 = 1.33(1 - w)(m - 1)$$

$$O_2 = 1.33(1 - 0.52)(1.18 - 1)$$

$$O_2 = 0.115 \frac{lb}{lb_bagazo}$$

Agua:

$$H_2O = 0.585(1 - w) + w$$

$$H_2O = 0.585(1 - 0.52) + 0.52$$

$$H_2O = 0.8 \frac{lb}{lb_bagazo}$$

Bióxido de carbono:

$$CO_2 = 1.75(1 - w)$$

$$CO_2 = 1.75(1 - 0.52)$$

$$CO_2 = 0.84 \frac{lb}{lb_bagazo}$$

Volumen de CO₂ en los gases de combustión es:

$$\gamma = \frac{14(1 - w)}{V_{gs}} = \frac{14(1 - w)}{71.3(1 - w)m - 0.9(1 - w)}$$

De donde se puede despejar m:

$$m = \frac{0.196}{\gamma} + 0.0126$$

Por lo tanto:

$$\gamma = \frac{0.196}{m}$$

$$\gamma = 0.166$$

$$\gamma = 16.6\%$$

La tabla 8 relaciona la cantidad de bióxido de carbono con la cantidad de exceso de aire.

TABLA 8 CANTIDAD DE BIÓXIDO DE CARBONO

<i>Relación entre el contenido de CO₂ y aire en exceso</i>												
Γ	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17
M	3.27	2.80	2.45	2.18	1.96	1.78	1.63	1.51	1.40	1.30	1.22	1.15

Hallar los valores de Mcp de los gases de combustión a la temperatura de salida.

Elemento	Mcp
CO ₂	10.4
O ₂	7.4
N ₂	7.2
H ₂ O	8.4
aire	7.2

Perdidas en los gases de combustión:

En el caso de CO₂:

$$Q_p = \text{moles} * M_{cp} * (t_2 - t_1)$$

$$Q_p = \frac{0.84}{12} \times 10.4 \times (525 - 90)$$

$$Q_p = 316.68 \text{ Btu/lb}_{comb}$$

Para nitrógeno:

$$Q_p = \frac{2.51}{28} \times 7.2 \times (525 - 90)$$

Para oxígeno:

$$Q_p = 280.76 \text{ Btu/lb}_{comb}$$

$$Qp = \frac{0.115}{32} \times 7.4 \times (525 - 90)$$

$$Qp = 11.26 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

Sumatoria de las pérdidas de los gases de combustión:

$$Q_{pt} = 316.68 + 11.2 + 280.76$$

$$Q_{pt} = 608.64 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

Pérdidas de calor sensible por la humedad del combustible:

$$Q_{ps} = moles \times Mcp \times (t_2 - t_1)$$

$$Q_{ps} = \frac{0.8}{18} \times 8.4 \times (525 - 90)$$

$$Q_{ps} = 162.4 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

Perdidas por calor latente por humedad del combustible:

$$Q_{pl} = moles \times 1040 \times 18$$

$$Q_{pl} = 0.044 \times 1040 \times 18$$

$$Q_{pl} = 823.68 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

Perdidas de calor sensible por la humedad del aire:

$$Q_{pa} = moles \times 0.018 \times Mcp \times (t_2 - t_1)$$

$$Q_{pa} = \frac{3.46}{29.12} \times 0.018 \times 7.2 \times (525 - 90)$$

$$Q_{pa} = 6.63 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

La cantidad de aire suministrado por libra de combustible es 3.427 lb. Como el aire consiste mayormente de nitrógeno y oxígeno el peso molecular del aire es de aproximadamente 29.12 lb/mol.

Perdidas por radiación se considera el 8% del calor entrante:

$$Q_{pr} = 0.08 \times 3823.056$$

$$Q_{pr} = 305.8 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

Perdidas por combustible no quemado se consideró el 5%.

$$Q_{pq} = 0.05 \times 3823.056$$

$$Q_{pq} = 191.16 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

Perdidas no contabilizadas se consideraron del 5%.

$$Q_p = 0.05 \times 3823.056$$

$$Q_p = 191.16 \text{ Btu/lb}_{comb}$$

Cálculo de poder calorífico del bagazo con una humedad del 52%.

$$PCS = 8280 \left(\frac{F}{100} \right) + 7120 \left(\frac{S}{100} \right)$$

$$PCS = 8280 \left(\frac{44.16}{100} \right) + 7120 \left(\frac{2.34}{100} \right)$$

$$PCS = 3823.056 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

$$PCI = PCS - 630 \left(\frac{100 - w}{100} \right) - 1080 \left(\frac{w}{100} \right)$$

$$PCI = 3823.056 - 630 \left(\frac{100 - 52}{100} \right) - 1080 \left(\frac{52}{100} \right)$$

$$PCI = 2959.056 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

Sumatoria de Perdidas de Calor

$$Q_{pT} = 608.64 + 162.4 + 823.68 + 6.63 + 305.8 + 191.16 + 191.16$$

$$Q_{pT} = 2289.47 \text{ btu/lb}_{comb.}$$

La eficiencia del generador de vapor:

$$\eta = \frac{3823.056 - 2289.47}{3823.056} \times 100\%$$

$$\eta = 40.1\%$$

Generalmente la eficiencia de los generadores tipo Bobcock & Wilcox tienen una eficiencia total del 56.7%. Esto sucede por altas pérdidas de radiación y principalmente por la humedad del combustible. La tabla 9 representa la eficiencia de tres tipos de generadores de vapor y la cantidad de vapor que se puede producir por libra de bagazo.

TABLA 9 EFICIENCIA DE GENERADORES DE VAPOR

Tipo de generador	lb. Vapor/lb. Bagazo	Eficiencia total
Thompson	2.3	53.1
B & W	2.4	56.7
Semi-tubular	1.8	42.2

Medida de ahorro:

Suponiendo que el aire de combustión sea precalentado a una temperatura de 250°F; la eficiencia del sistema aumentará porque incrementa directamente la temperatura de combustión.

Demostración:

$$\frac{T - T_o}{t - t_o} = \frac{1}{1.375 + \frac{1}{4.18(1 - 0.52)1.18}}$$

$$\frac{T - T_o}{t - t_o} = 0.556$$

El valor 0.556 significa que en un horno de bagazo, el aumento de la temperatura de combustión debido al precalentamiento del aire es del 55.6% del aumento de la temperatura del aire de combustión. Esto significa que la temperatura de combustión aumenta por 88.96°F. Por lo tanto, la temperatura de combustión es:

$$T = 0.556(t - t_o) + T_o$$

$$T = 0.556(250 - 90) + 1600^\circ F$$

$$T = 1688.96^\circ F$$

Las pérdidas en los gases de combustión serían:

(i) Hallar los Mcp de los gases de combustión a una temperatura de 409.8 °F en la gráfica anterior.

Elemento	Mcp
CO ₂	9.6
O ₂	7.1
N ₂	7
H ₂ O	8.01
Aire	7

(ii) Pérdidas en los gases de combustión:

En el caso de CO₂

$$Qp = \frac{0.84}{12} \times 9.6 \times (409.8 - 90)$$

$$Qp = 214.9 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

Para nitrógeno:

$$Qp = \frac{2.5}{28} \times 7 \times (409.8 - 90)$$

$$Qp = 199.87 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

Para el oxígeno:

$$Qp = \frac{0.115}{32} \times 7.1 \times (409.8 - 90)$$

$$Qp = 8.15 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

Sumatoria de pérdidas en gases de combustión:

$$Q_{pt} = 8.15 + 199.87 + 214.9$$

$$Q_{pt} = 422.94 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

(iii) Pérdidas por calor sensible por la humedad del combustible:

$$Q_{ps} = \text{moles} \times M_{cp} \times (t_2 - t_1)$$

$$Q_{ps} = \frac{0.8}{18} \times 8.01 \times (409.8 - 90)$$

$$Q_{ps} = 113.84 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

- (iv) Perdidas por calor latente por humedad del combustible:

$$Q_{pl} = \text{moles} \times 1040 \times 18$$

$$Q_{pl} = 0.043 \times 1040 \times 18$$

$$Q_{pl} = 804.96 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

- (v) Perdida de calor sensible debido a la humedad del aire:

$$Q_{pa} = \text{moles} \times 0.018 \times M_{cp} \times (t_2 - t_1)$$

$$Q_{pa} = \frac{3.46}{29.12} \times 0.018 \times 8.01 \times (409.8 - 90)$$

$$Q_{pa} = 5.47 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

La cantidad de aire suministrado por libra de combustible es 3.427 lb. Como el aire consiste mayormente de nitrógeno y oxígeno el peso molecular del aire es de aproximadamente 29.12 lb/mol.

- (vi) Perdidas por radiación se considera del 8% del calor entrante.

$$Q_{pr} = 0.08 \times 3823.056$$

$$Q_{pr} = 305.8 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

- (vii) Las perdidas por combustible no quemado se consideran del 5%.

$$Q_{pq} = 0.05 \times 3823.056$$

$$Q_{pq} = 191.16 \text{ Btu/lb}_{comb.}$$

(viii) Perdidas no contabilizadas se consideraron del 5%.

Sumatoria de Perdidas de Calor: $Q_{pq} = 0.05 \times 3823.056$

$$Q_{pT} = 422.94 + 113.84 + 804.96 + 5.47 + 305.8 + 191.16 + 191.16$$

$$Q_{pT} = 2035.33 \text{ Btu/lb}_{comb}$$

La eficiencia del generador de vapor:

$$\eta = \frac{3823.056 - 2035.33}{3823.056} \times 100\%$$

$$\eta = 46.7\%$$

Precautando el aire de combustión, la eficiencia del generador de vapor de la industria azucarera de Belice aumenta en un 6.6%.

Como se recomienda el precalentamiento del aire de combustión también se tiene que dimensionar el precalentador del aire. Estos cálculos son los siguientes:

Parámetros fundamentales:

- Cantidad de bagazo quemado = 15 toneladas por hora (33000 lb/hr)
- Humedad del bagazo = 52%
- Exceso de aire utilizado = 18%
- Temperatura de gases de combustión = 525°F
- Temperatura de gases requerido = 250°F

Cálculo para Pg:

$$Pg = 5.75(1 - 0.52)1.18 + 1$$

$$Pg = 4.26 \frac{lb}{lb_{bagazo}}$$

El peso total de los gases de combustión:

$$P_{gT} = 4.26 \frac{lb}{lb_{bagazo}} \times 33000 \frac{lb_{bagazo}}{hr}$$

$$P_{gT} = 140,580 \frac{lb}{hr}$$

El peso del aire teóricamente requerido Pa:

$$Pa = 5.75(1 - 0.52)1.18$$

$$Pa = 3.26 \frac{lb}{lb_{bagazo}}$$

Cantidad total de aire teóricamente requerido:

$$P_{aT} = 3.26 \frac{lb}{lb_{bagazo}} \times 33000 \frac{lb}{hr}$$

$$P_{aT} = 107,580 \frac{lb}{hr}$$

Cálculo para la temperatura de los gases que salen del calentador:

$$r = \frac{0.90 \times 140,580 \times 0.285}{107,580 \times 0.24}$$

$$r = 1.39$$

El valor 1.39 indica el incremento de la temperatura del aire, cuando la temperatura de los gases de combustión disminuye 1°F. Por lo tanto T:

$$T = 525^{\circ} F - \left(\frac{(250 - 90)^{\circ} F}{1.39} \right)$$

$$T = 409.89^{\circ} F$$

Cálculo de la superficie total de transferencia de calor:

$$S = \frac{0.9 \times 140,580 \times 0.285}{2(1.39 - 1)} \times \ln \frac{409.89 - 90}{525 - 250}$$

$$S = 6990.14 \text{ ft}^2$$

Se recomienda que la temperatura de los gases de combustión no exceda 930°F porque puede causar problemas de corrosión. También, es recomendable no calentar el aire de combustión a temperaturas mayores a 400°F porque esto dañaría el metal así como los refractarios del hogar.

Las velocidades de los gases de combustión y aire de combustión deben ser los siguientes representados en la tabla 10.

TABLA 10 VELOCIDADES	
Gases de combustión	16-26 ft/seg
Aire de combustión	6-13 ft/seg

CAPITULO 4. - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A través del estudio del generador de vapor de la Industria Azucarera de Belice se determinó que los principales factores involucrados en el bajo rendimiento del generador son los siguientes:

- Condiciones de combustión
- Falta de mantenimiento
- Transferencia de calor

En las condiciones de combustión, existen varios parámetros que perjudican la eficiencia de combustión en donde se involucran principalmente la mezcla aire-combustible. Los problemas derivados de una mala combustión, resultan en la mayor formación de productos nocivos al medio ambiente y por otra parte, facilitan la formación de sustancias corrosivas que atacan las superficies metálicas del generador, además de que se lleva a cabo un mal aprovechamiento del calor generado y como resultado se obtiene el bajo rendimiento de operación. También se determinó que una gran parte del calor generado se pierde como calor sensible en los gases de combustión. Actualmente, se pierde aproximadamente 657.22 Btu/lb de bagazo ya que la temperatura de estos gases es de 525 °F. Existen casos en donde la temperatura de los gases de combustión llega a los 651 °F lo cual representa pérdidas de aproximadamente 790.31 Btu/lb de bagazo, representando pérdidas del 9%. Estas pérdidas de energía térmica pueden ser recicladas por medio de la implementación de precalentadores de aire de combustión resultando en el aprovechamiento total de estas pérdidas y aumento en la eficiencia de la combustión. La humedad del combustible, es un factor indudablemente importante tanto para el diseño como para el funcionamiento.

Se encontró, que la humedad del combustible, bagazo, es un factor que varía espontáneamente debido principalmente a dos factores:

- Eficiencia de extracción de los molinos
- El clima

Estos factores causan que la humedad varíe entre 49% en tiempos de verano hasta una máxima de 52% en tiempos de lluvia. Estas variaciones afectan directamente la eficiencia de funcionamiento del generador de vapor. Cuando la humedad es de 52% el rendimiento es de aproximadamente 40.1%; para cada 3% de incremento de humedad la eficiencia del sistema disminuye aproximadamente 1.8%. Es obvio que el sistema es más eficiente cuando el combustible contiene menos humedad. También es importante notar que durante el tiempo de lluvias; el generador de vapor no solo se perjudica por la calidad del combustible sino que también causa serios problemas debido a los altos niveles de lodo que se encuentra en el bagazo. Estos altos niveles de lodo en el combustible causan la erosión de las tuberías del generador y dañan los ventiladores.

Otro de los factores que causan el bajo rendimiento del generador de vapor, de la industria azucarera de Belice, es el aire de combustión. Actualmente la industria suministra un total 104,034.3 lb_{aire}/hr; este aire no está precalentado causando pérdidas en calor sensible para el calentamiento del aire y agua y en calor latente para la evaporación de la humedad. Este factor también causa que no haya una combustión completa del bagazo resultando en grandes pérdidas en combustible no quemado y por la formación de monóxido de carbono en vez de dióxido de carbono.

El deterioro del equipo por falta de mantenimiento es un problema que hoy en día afecta drásticamente la operación del generador de vapor. Actualmente en el generador de vapor existen pérdidas de aproximadamente 5,000 lb_{agua}/hr debido principalmente a las malas condiciones de las válvulas y por otros equipos todavía no determinados. También se pierde aproximadamente 10,000 lb de agua o vapor saturado con una temperatura de 375 °F por medio de purgas continuas que deben ser realizadas siempre y cuando esté en operación el generador. Las pérdidas pueden ser

recuperadas utilizando dispositivos recuperadores de calor para así poder reciclarla al sistema de procesamiento de vapor o azúcar, ya que varias etapas de procesamiento de azúcar requieren vapor a bajas temperaturas para la evaporación del agua contenido en el jugo del azúcar; por ejemplo en los evaporadores.

Un problema menos importante en este caso, es la deficiencia en la transferencia de calor el cual es causado por las incrustaciones. Esto es causado principalmente por la formación de depósitos, de hollín, en las tuberías del generador de vapor los cuales son fusionados, a la tubería, por las elevadas temperaturas y presiones de operación. Este problema mayormente se encuentra por el lado de los gases de combustión los cuales son sopladados con vapor a 200 lb/plg² cada ocho horas. Este soplado de cada ocho horas causa que se cree una capa de hollín en el exterior de la tubería de aproximadamente 1/32 de pulgada resultando en una disminución de eficiencia del 2.5%. Aumentando el número de soplado por lo menos dos veces por turno, se puede aprovechar estos 2.5% en un aumento de eficiencia resultando en el incremento de producción del vapor.

En general, se determinó que las pérdidas pueden ser solucionadas con acciones precisas y rápidas ya que el estudio demostró que el funcionamiento del generador de vapor de la industria azucarera de Belice tiene una eficiencia de aproximadamente el 40.1% de los 56.7% que en realidad debería tener. A partir de los cálculos también se demostró que con las recomendaciones, el problema se soluciona parcialmente para poder aumentar la eficiencia del sistema por lo menos un 6.6%.

RECOMENDACIONES

Mientras la demanda de energía en el mundo incrementa drásticamente, el vapor toma posición en el primer lugar como el medio básico de transferencia de energía, para la generación de potencia, procesos industriales o calentamiento de espacios. A la misma vez, se hace un énfasis en la eficiencia y rentabilidad de los generadores de vapor.

El propósito fundamental de un generador de vapor es la producción la mayor cantidad de vapor utilizando la mínima cantidad de combustible; es decir, que funcionen eficientemente. En este caso, a fin de mejorar el rendimiento termodinámico del generador de vapor de la Industria Azucarera de Belice se hacen varias recomendaciones:

- 1) Aumentar la cantidad de exceso de aire para mejorar la combustión del bagazo. El bagazo es un combustible que requiere un exceso de aire de aproximadamente entre 25-35% para lograr una combustión completa, mientras que en la Industria Azucarera de Belice solamente suministra el 14%. Esto causa que el combustible tenga una combustión incompleta resultando en la producción de monóxido de carbono que solamente libera 4,450 Btu/lb de combustible. El aumento en el exceso de aire, provocará una combustión completa, y la producción de bióxido de carbono, el cual libera una cantidad de 14,650 Btu/lb de combustible. Este simple hecho mejora la combustión del bagazo aumentando la eficiencia del sistema generativo.
- 2) También se recomienda el precalentamiento del aire de combustión. El precalentamiento del aire es importante porque afecta positivamente la combustión del bagazo. Esto causa que la energía calorífica liberada por el combustible sea utilizado en la producción de vapor y no en el calentamiento del aire. Este aire de combustión puede ser calentado con los gases de combustión que salen de la chimenea a una temperatura de aproximadamente 525 °F. La recuperación de esta energía térmica

aumentará directamente la eficiencia de generación resultando en un incremento en la temperatura de combustión; mejorando la calidad y cantidad de vapor producido.

- 3) Es recomendable que también se mantengan limpias las superficies de transferencia de calor porque esto afecta directamente la eficiencia del generador. Esto causa que haya un aumento en el coeficiente de transferencia de calor resultando en la disminución de intercambio térmico hacia el vapor, provocando un aumento de temperatura en los gases combustión y la producción de vapor de baja calidad. La incrustación también causa el sobrecalentamiento de la tubería resultando en el rompimiento del mismo provocando paros innecesarios. Una capa de hollín de solamente 1/32 de una pulgada de espesor causa que haya una pérdida de eficiencia de aproximadamente un 2.5% mientras que un espesor de un 1/8 de pulgada resulta en una pérdida del 8.5% de eficiencia. Esta disminución en la transferencia aumenta drásticamente la temperatura de gases de combustión causando mayores pérdidas de eficiencia.
- 4) También se recomienda el mejoramiento del mantenimiento que se brinda al generador de vapor porque muchas válvulas se encuentran en pésimas condiciones de operación. Esto causa que haya fugas de vapor, así como, grandes pérdidas de agua de alimentación. La reposición de estas válvulas disminuirán el costo de operación.
- 5) Se recomienda que se implemente un proceso de secado del bagazo. Puede ser implementado un proceso de secado los cuales se mencionan posteriormente:
 - Aumentar la eficiencia de los molinos de caña para que haya una mayor extracción del jugo, resultando en una disminución en la humedad del bagazo por medio de la implementación de un sexto conjunto de molinos, lo cual por supuesto requiere una inversión muy grande.

- Implementando un sistema de secado el cual se derive del generador de vapor; este sistema utilizará los gases de combustión como fluido de trabajo. Cabe mencionar que este fluido después de calentar el aire de combustión a una temperatura de 250°F tiene teóricamente una temperatura de 106.98°F. Esta energía térmica puede ser utilizada para evaporar la humedad del combustible.

A partir de la implementación de las recomendaciones se puede lograr un aumento de eficiencia mayor del 6.6%. Esto causaría una disminución en el costo de operación y de igual forma aumentará la productividad del generador de vapor con una alta calidad de vapor con mínimas pérdidas de energía calorífica.

BIBLIOGRAFÍA

1. BABCOCK & WILCOX. Steam Its Generation and Use. 39^o edition. Estados Unidos: The Babcock and Wilcox Company, 1978.
2. E. Hugot, Handbook of Cane Sugar Engineering. 12^a edición. Amsterdam: Editorial Elsevier, 1972.
3. Rodríguez Hernández José, Tesis: Análisis del Calculo de la Eficiencia Térmica en Generadores de Vapor. Editorial ESIME, México, 1993.
4. Theodore Banmeister, Eugene A. Avallone, Theodore Banmeister III, Marks Manual del Ingeniero Mecánico. Octava edición, segunda edición en español, volumen 1, editorial McGraw Hill, 1986
5. B.M. Troyanovski, G.A. Filippov, A.E. Bulkin. Turbinas de Vapor y de Gas de las Centrales Núcleo eléctricas., Editorial Mir, Moscu, 1987
6. Rodríguez Hernández José, Mejoramiento del Consumo de Combustible en Función de la Eficiencia de los Generadores de Vapor., ESIME 1990.
7. Petrecca Giovanni, Industrial Energy Management: Principles and Applications., Kluwer Academia Publishers, 1982
8. B. K Hodge, R.P Taylor, Análisis and Design of Energy Systems., 3rd edition, Prentice may 1999.
9. Cruz Soto Juan José, Fundamentos sobre Ahorro de Energía., Edición de la Universidad Autónoma de Yucatán 1996.
10. CONAE, Bases Para el Ahorro de Energía en la Industria, México 1995.
11. V. Ya. Rizhkin, Centrales Termoeléctricas Volumen I y II, Editorial Mir Moscú, 1979.
12. Huang Francisco F. Ingeniería Termodinámica Fundamentos y Aplicaciones., CECSA México 2002.

13. Babcock & Wilcox, Manual de operación, 1984
14. Severns W., Degler H., Miles J., Energía Mediante Vapor, Aire o Gas, Reverte, México 1992.
15. Norman Magasiner, Bagasse-Fired Boilers with reference to Co-Generation, 1986
16. Joseph Kestin, A course in Thermodynamics, John Wiley & Sons, Inc., Waltham, Mass., 1966
17. Belize's Sugar Industry: A Synthesis of its current State, Challenges and Recommendations, Belmopan, Belize, 2001.
18. Budhram Dowlat, Sugar Policy and Strategy: Strategic Actions for the Belize Sugar Industry, Belmopan, Belize, 2002.
19. www.econext.com.mx
20. <http://www.bestpractices.com>
21. <http://www.Fao.org/docrep/t2363s/2363sOn.html>
22. <http://www.ccad.sgsica.org/documentos/erenovable/Berenovable.pdf>
23. http://www.mct.gov.br/clima/ingles/comunic_old/coperal3.html
24. <http://www.concise.britannica.com/ebc/article?eu=381660>
25. <http://www.energyconcepts.tripod.com/energyconcepts/bagasse.html>

GLOSARIO

Aire teórico	Peso teórico de aire necesario para quemar un kilogramo de combustible.
Aislamiento térmico	Material utilizado para prevenir la transferencia de calor hacia el exterior.
Bagazo	Residuo de caña de azúcar molida, saliendo del último molino, después de la extracción del jugo.
Calidad de vapor	Fracción o porcentaje en masa que es vapor.
Calor	La cantidad de energía que recibe o entrega un sistema durante el intercambio térmico.
Calor específico a presión constante	Cambio de entalpía para una unidad de masa entre dos estados de equilibrio a la misma presión por grado de cambio de temperatura.
Calor específico a volumen constante	Cambio de energía molecular interna por unidad de masa por grado de cambio de temperatura, cuando los estados finales son estados de equilibrio del mismo volumen.
Calor latente de condensación	Cantidad de calor necesario a extraerle a una sustancia para que haya un cambio de fase gas-líquido.
Calor latente de vaporización	Cantidad de calor que es necesario suministrar a una sustancia en el proceso isobarico-isotérmico en equilibrio para que pase del estado líquido al gaseoso.
Combustible	Sustancia de origen orgánico, derivados de petróleo o gas natural que al oxidarse emiten energía en forma de calor.
Combustión	Proceso en la cual la energía química contenida en un combustible es liberada.
Conducción de calor	Interacción molecular, en el cual el aumento del movimiento de una partícula a un nivel de energía, mas alto imparte energía a las moléculas adyacentes que se encuentran en niveles de energía más bajos.

Conductividad térmica	Facilidad con la cual un material conduce energía térmica.
Convección	Cambio de energía que ocurre entre una superficie y un fluido adyacente.
Calor latente	Energía necesaria para cambiar de fase a una sustancia.
Calor sensible	Energía necesaria para elevar la temperatura de un líquido o vapor sin que exista un cambio de fase.
Domos	Cuerpo cilíndrico utilizado para almacenar el agua de alimentación del generador de vapor.
Dámper	Placa metálica que controla el flujo de una sustancia gaseosa o líquida.
Generador de vapor	Equipo que consta de diferentes elementos destinados a la producción de vapor de agua o de cualquiera otra clase de vapor a partir de su fase líquida.
Golpe de ariete	Fenómeno ocasionado cuando una porción de condensado queda atrapado entre una corriente de vapor.
Humedad de vapor	Fracción o porcentaje en masa que es líquido.
Imbibición	Proceso de agregar agua al jugo de bagazo para diluir y mezclarse con el jugo.
Líquido saturado	Cantidad de líquido que existe en una mezcla de vapor saturado en la región líquido-vapor.
Líquido subenfriado	Líquido que se encuentra a cierta presión, es decir, es un líquido comprimido.
Masa	Cantidad absoluta de materia en un cuerpo.
Poder calorífico superior	Cantidad de calor liberada por la combustión de una cantidad específica de combustible.
Poder calorífico inferior	Cantidad de calor liberada por la combustión de una cantidad específica de combustible tomando en consideración solo la cantidad de materia volátil.

Presión absoluta	Fuerza real por unidad de área que ejerce un vapor en las paredes del recipiente que lo contiene.
Presión atmosférica	Fuerza ejercida por unidad de área por la columna de aire atmosférica. Varía de un punto a otro del planeta y según las condiciones meteorológicas.
Presión manométrica	Algebraicamente es la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica. Técnicamente, es la presión contenida en recipientes o conductos cerrados y esta es indicada por un manómetro.
Proceso isobárico	Proceso termodinámico que ocurre a presión constante.
Proceso isométrico (isócoro)	Proceso termodinámico que ocurre a volumen constante.
Proceso isotérmico	Proceso termodinámico que ocurre sin cambio de temperatura; a temperatura constante.
Punto crítico	Punto presión-temperatura más altos en el cual resulta imposible una transformación líquido-vapor.
Punto de ebullición	Temperatura a la cual un líquido empieza a hervir a una presión dada.
Punto de rocío	Punto en el cual un gas se empieza a enfriar a un líquido a presión constante causando la condensación, resultando en pequeñas gotas de líquido.
Radiación	Difiere de la conducción y de la convección en que no se necesita un medio para su propagación. La radiación de calor es máximo cuando las dos superficies que están intercambiando energía están separadas por un vacío perfecto.
Temperatura	Medida de la intensidad de la energía molecular almacenada en un sistema.
Trampa de Vapor	Válvula automática que realiza las funciones siguientes: drena el condensado formado en una tubería, elimina cualquier suciedad presente en el vapor y/o los condensados, no permite el escape del vapor.

Vapor de escape	Vapor saturado de baja presión.
Vapor saturado	Vapor que está en equilibrio con su fase líquida a una determinada presión y temperatura. Puede ser seco o húmedo.
Vapor saturado húmedo	Vapor saturado que lleva partículas de agua suspendidas en él.
Vapor saturado seco	Vapor saturado que está exento completamente de partículas de agua sin vaporizar.
Vapor sobrecalentado	Vapor que se encuentra a una temperatura mayor que la de saturación a una presión determinada.
Volumen específico	Recíproco de la densidad del vapor de agua saturado y varía inversamente con la presión.