

**USO DEL GAS NATURAL COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO
PARA LA GENERACION DE VAPOR EN LA INDUSTRIA Y
EMPRESAS DE SERVICIO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA**



**USO DEL GAS NATURAL COMO COMBUSTIBLE
ALTERNATIVO PARA LA GENERACION DE VAPOR
EN LA INDUSTRIA Y EMPRESAS DE SERVICIO**

GILDA NICTE ESTRADA GORDILLO

Modelo de trabajo profesional presentado para optar
al grado académico de

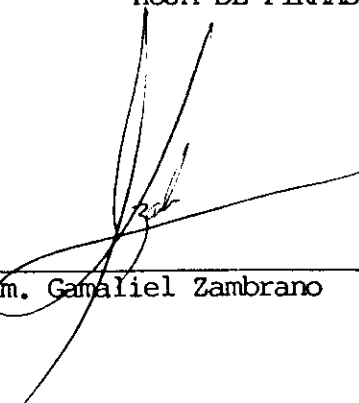
LICENCIATURA EN INGENIERIA QUIMICA

GUATEMALA
1999



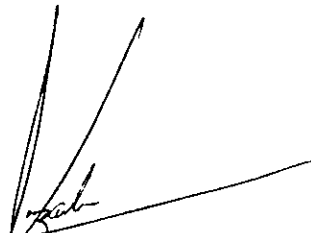
HOJA DE FIRMAS

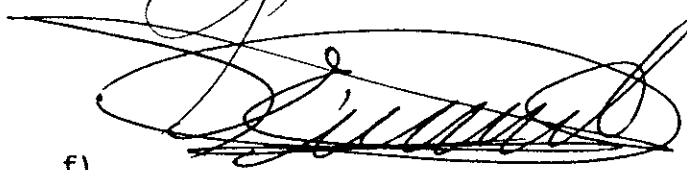
Vo. Bo.:

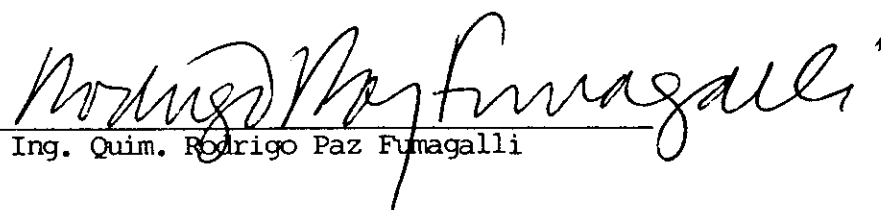
f) 
Ing. Quim. Gamaliel Zambrano
Asesor

TRIBUNAL EXAMINADOR

Vo.Bo.:

f) 
Ing. Quim. Gamaliel Zambrano

f) 
Ing. Quim. Eduardo Calderón

f) 
Ing. Quim. Rodrigo Paz Fumagalli

FECHA DE APROBACION: Guatemala marzo 29 de 1,999.

**A Dios, quien me ha colmado siempre de bendiciones,
a mi esposo,
a mis hijos,
a todos lo que me quieren y han apoyado siempre.**

RESUMEN

En este modelo de trabajo profesional se estudió la ventaja que tendría el uso del gas natural como combustible alternativo en la generación de vapor en Guatemala, considerando la ejecución en un futuro cercano del proyecto “ Construcción del Gasoducto México-Guatemala 1998”. Específicamente se abarcó el tema de combustión de pulso con gas natural para demostrar las ventajas que se encuentran en este método.

La combustión de pulso es un fenómeno acústico aplicado a la transferencia de calor y funciona exactamente como lo hace un motor de combustión interna pero espontáneamente; es decir que en lugar de que una bujía provea la ignición en cada ciclo, el mismo calor del ciclo anterior continúa el proceso. La caldera de pulso utiliza el principio de un resonador de Helmholtz en su diseño.

Se determinó que las características más importantes de este tipo de combustión radican en la sencillez del diseño de la caldera combinado con una tecnología que se basa en fenómenos acústicos que se utilizan desde el tiempo de la segunda guerra mundial. Dentro de estas características, se encuentra el hecho de que el quemador es parte integral del equipo, posee una ventilación y aspiración propias del aire, es altamente eficiente tanto en la combustión como en la transferencia de calor, utiliza una pre-mezcla para el combustible y aire de entrada y sus emisiones contaminantes son bajas.

Se realizó un análisis económico comparativo de los primeros cinco años de operación de este tipo de caldera respecto de una convencional (piro-tubular) que para un tamaño de 40 bhp, en iguales condiciones de trabajo, con el resultado de que la caldera de pulso representa un ahorro aproximado de US\$ 33,000.00. Básicamente este ahorro se encuentra en los gastos fijos como lo son los mantenimientos y, en la probabilidad de piezas que deben reemplazarse en el plazo de los cinco años. La comparación económica de combustible fue hecha con el búnker (aceite No. 6 o fuel-oil) por ser el combustible más económico que actualmente se utiliza en la industria guatemalteca y por lo tanto el de mayor demanda.

Se determinó que si el gas natural se utiliza en una combustión de pulso, sí es posible sustituir al búnker, representando ventajas tan importantes como el de la estabilidad en precio, limpieza en su manejo y por ser un combustible menos contaminante para el medio ambiente.

CONTENIDO

I	INTRODUCCION	1
II	ANTECEDENTES	2
	A) Combustibles	2
	B) Teoría del vapor	5
	C) Calderas	6
	D) Motores de combustión interna	6
	E) Quemadores	7
	F) Teoría del calor	10
III	OBJETIVOS GENERALES	14
IV	OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
V	PROBLEMA A RESOLVER	16
VI	METODOLOGIA	17
VII	JUSTIFICACION	18
VIII	CALDERA DE COMBUSTION DE GAS NATURAL	19
	A) Generalidades	19
	B) Instalación	21
	1) Introducción	21
	2) Seguridad y precauciones	21
	3) Suministro de agua	22
	4) Localización de la caldera	22
	5) Instalación de la tubería de agua de alimentación	23
	6) Instalación del muñeco del manómetro de vapor	24
	7) Instalación de la tubería de drenado de condensado	25
	8) Instalación de la tubería de gas	26
	9) Instalación eléctrica	26
	10) Instalación de la toma de aire	26
	11) Instalación de la tubería de escape de venteo	27
	C) Previo al arranque	29
	D) Lista de chequeo de la instalación	30
	E) Ajuste del regulador de presión de gas	31
	F) Operación	33
	G) Preparación al arranque	33
	H) Purga	35
	I) Pre-purga y post-purga	35
IX	MANTENIMIENTO	35
X	APLICACIONES	41
XI	DISCUSIONES	43
XII	CONCLUSIONES	48
XIII	RECOMENDACIONES	49
XIV	BIBLIOGRAFIA	50
XV	ANEXOS	51
	1) Anexo 1: Medidas de seguridad	52
	2) Anexo 2: Guía de problemas y respuestas	55
	3) Anexo 3: Cálculos y resultados	59

Contenido de Tablas

Tabla No. 1: Reservas de Gas Natural	3
Tabla No. 2: Análisis Económico Comparativo	42

Contenido de Figuras

Figura No. 1: Alternativa de ruta No. 1 Gasoducto	4
Figura No. 2: Resonador y quemador de Helmholtz	9
Figura No. 3: Válvulas medidoras de gas y aire (flappers)	19
Figura No. 4: Fases de operación	20
Figura No. 5: Localización de la caldera	23
Figura No. 6: Instalación de la tubería de alimentación de agua	24
Figura No. 7: Instalación del muñeco del manómetro de vapor	25
Figura No. 8: Instalación vertical y horizontal de venteo	28
Figura No. 9: Medición del flujo de gas	31
Figura No. 10: Ajuste de regulador de gas	32
Figura No. 11: Separación de los electrodos de la bujía	34

Contenido de Gráficas

Gráfica No. 1: Eficiencias de calderas con temperatura de gases de combustión y varios niveles de exceso de aire	63
---	-----------

I. INTRODUCCION

La elección de una caldera para un servicio determinado depende del combustible de que se disponga, tipo de servicio, capacidad de producción de vapor requerida y de otros factores de carácter económico. El problema más frecuente con el que el industrial y comerciante se encuentran durante un proceso que involucra la generación de vapor o agua caliente, es la economía o el gasto que el combustible pueda proporcionar. Actualmente en Guatemala, la generación de vapor se lleva a cabo a partir de combustibles como el diesel, búnker y propano. Sin embargo, estos derivados de petróleo no sólo dependen de un precio establecido mundialmente, sino además contribuyen a un ambiente más contaminado. De acuerdo a las últimas reuniones por parte de las Direcciones de Energía e Hidrocarburos de México y Guatemala, muy pronto será posible la comercialización de este combustible desde México a través de un gasoducto, que en principio suplirá las demandas locales para producir energía eléctrica y en un futuro para el uso comercial e industrial. En tal virtud, el presente trabajo presenta el aprovechamiento de este combustible para contribuir con el ahorro energético de los procesos que involucran generación de vapor y de esa manera hacer que los productos y servicios del mercado sean más competitivos.

Este trabajo se respaldó en los objetivos de este proyecto, dentro de los cuales está asegurar el suministro constante del gas natural para las actividades productivas del país y reducir substancialmente costos de transporte y comercialización del combustible.

II. ANTECEDENTES

COMBUSTIBLES

Los combustibles comerciales, ya sean en su estado natural o en formas preparadas, pueden ser sólidos, líquidos y gases. Los combustibles sólidos comprenden los carbonos, lignitos, coques, maderas y residuos de combustibles procedentes de muchos procesos de fabricación. Los combustibles líquidos comprenden el alcohol, petróleo y sus destilados y algunas veces, las breas. Los gases naturales salen de la tierra y los gases fabricados son productos obtenidos principalmente del carbón. Los elementos fundamentales de un combustible son: carbono (C) e hidrógeno (H). El azufre (S) se considera como cuerpo indeseable. (12)

Gas Natural

El gas natural es un combustible que se obtiene de rocas porosas del interior de la corteza terrestre y se encuentra mezclado con el petróleo crudo cerca de yacimientos del mismo. Como se trata de un gas, puede encontrarse sólo en yacimientos separados. En condiciones de alta presión se mezcla o se disuelve en aceite crudo. El metano (CH_4), con punto de ebullición de -154°C (-245°F) y el etano (C_2H_6), con punto de ebullición de -89°C (-128°F) son los principales constituyentes del gas natural. También puede estar presente el propano hasta en un 3%. (8)

El gas natural conocido como seco, tiene menos de 0.013L de gasolina/ m^3 (0.1gal/1000ft³). Cuando se excede esta cantidad, se le denomina húmedo. Los términos de gas natural dulce o amargo se emplean para denotar la ausencia o presencia de H_2S , respectivamente. (8)

El gas natural puede utilizarse alternativa o simultáneamente con aceite No. 2 (gas-oil) en motores de combustión interna, o con aceite No. 6 (búnker o fuel-oil) o carbón pulverizado en generadores de vapor. Algunas de las ventajas de los combustibles gaseosos son las siguientes:

- No contiene cenizas ni residuos.
- Se mezcla fácilmente con el oxígeno y como consecuencia no se necesita exceso de aire.
- Se adapta perfectamente al control automático.
- Responden rápidamente a las variaciones de la carga, reduciendo en consecuencia el capítulo de pérdidas. (12)

Y las más relevantes del gas natural como combustibles son las siguientes:

- Hidrocarburo abundante
- Bajo costo debido a que su procesamiento es mínimo.
- Conducción limpia, al reducir las emisiones tóxicas.

- Gases de combustión no corrosivos
- Combustible más seguro y fácil de transportar por gasoductos.
- Características antidetonantes (octanaje 120-130)
- Se reducen los altos niveles de contaminación proveniente de fuentes energéticas no renovables
- Sustituye a combustibles líquidos y forestales, y se reduce así la dependencia respecto a combustibles altamente contaminantes y caros. (9)

Bill Davis, vicepresidente del Grupo de Exploración Mundial de Amoco, empresa petrolera que desde hace muchos años tiene substanciales operaciones en algunos países de Latinoamérica opina que "Las reservas latinoamericanas de gas natural pueden abastecer holgadamente la demanda local durante los próximos 230 años", y que "Venezuela y México son las reservas más grandes de América Latina". Además opina que "Los recursos hidrocarburíferos de la América Latina son abundantes y, en su mayor parte, permanecen aun escasamente explorados" (2).

La siguiente tabla muestra las reservas comprobadas de gas natural en países vecinos y el tiempo en años de abastecimiento.

Tabla No. 1
Reservas y Producción de gas Natural (1994)

PAIS	RESERVAS COMPROBADAS (10 ⁹ m ³)	PRODUCCION ANUAL (10 ⁹ m ³)	TIEMPO Años
VENEZUELA	3,907	47.742	82
MEXICO	1,937	29.951*	65
COLOMBIA	214	5.422	39

*Producción total de gas menos GLP (7.145 x 10⁹ m³).

Nota: 133 m³ de gas natural equivalen a 1 barril de Diesel

Fuente: SIEE-OLADE-PEMEX, 1994. (9)

Descripción del Proyecto

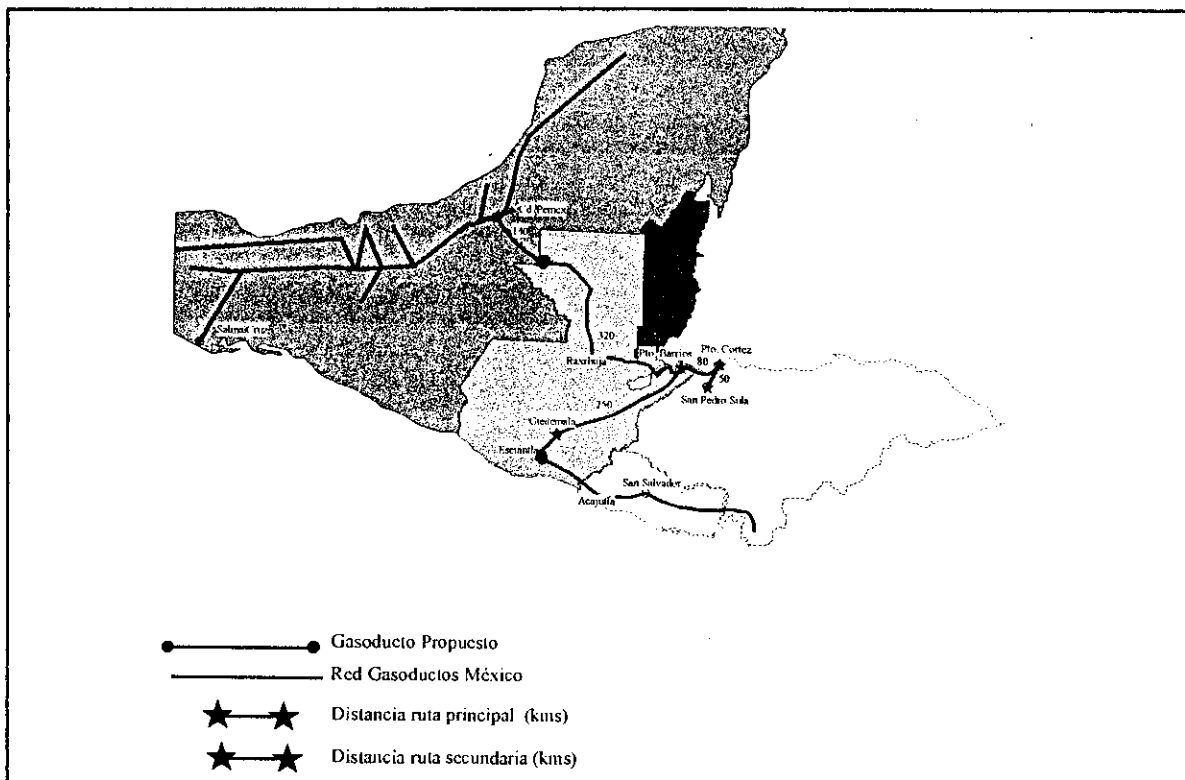
- Construcción de un gasoducto de 710 Km., que va desde Cd. Pemex, Tabasco, México hasta Cd. De Guatemala.
- Es un proyecto integrado que abarca los segmentos de:
 - Explotación y producción en México
 - El gasoducto

- Entrega del gas natural en las principales ciudades en Guatemala.
- Atenderá la generación de energía eléctrica y la producción industrial, en expansión.
- Eventualmente, podría transportar gas natural hasta los demás países centroamericanos.(9)

Descripcion y mapa de la posible ruta

- Longitud total aproximada: 710 km.
- Punto de origen: Cactus/Cd. Pemex-frontera México-Guatemala.
- Terminales de distrubución: Puerto Barrios, Guatemala
- Terminales de distribución opcionales: Escuintla, Puerto Cortés, San Pedro Sula, Acajutla, San Salvador.(9)

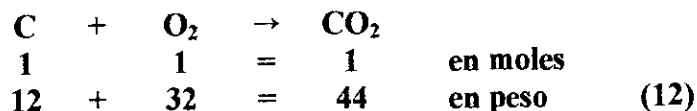
Figura No. 1
Alternativa de ruta No. 1 Gasoducto



Fuente: Ministerio de energía y minas. Sección de Proyectos. (9)

Química de la combustión:

Combustión es sinónimo de oxidación y consiste en la unión del oxígeno con una materia combustible. Los grados de la combustión varían ampliamente, al conocer la combustión lenta o la combustión rápida o detonación. De acuerdo con los fundamentos de la química la unión de carbono y oxígeno se expresa de la siguiente forma:



Para la combustión del gas natural se tiene la siguiente ecuación:



TEORIA DEL VAPOR

La ciencia de la termodinámica trata de las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía como calor en los cuerpos de materia. La ciencia de la transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor. Cuando se vaporiza una libra de agua o se condensa 1 libra de vapor, el cambio de energía en los dos procesos es idéntico, pero usualmente la vaporización es un fenómeno mucho más rápido que la condensación. (6)

Hay tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres. Estas son, conducción, convección y radiación. (6)

1. **Conducción:** La conducción es la transferencia de calor desde una parte de un cuerpo a otra del mismo cuerpo, o bien, desde un cuerpo a otro que esté en contacto físico con él, sin desplazamiento apreciable de las partículas del cuerpo. (8)
2. **Convección:** La convección es la transferencia de calor desde un punto a otro, dentro de un fluido, un gas o un líquido, mediante la mezcla de una porción del fluido con otra. En la convección natural, el movimiento del fluido se debe totalmente a diferencias de densidad como resultado de diferencias de temperatura; mientras que en la forzada, el movimiento se produce por medio de agentes mecánicos. (8)
3. **Radiación:** es la energía electromagnética en transporte. La radiación es la transferencia de calor desde un cuerpo a otro, que no se encuentra en contacto con él, por medio del movimiento ondulatorio a través del espacio. Este tipo de

transferencia de calor difiere de la conducción y la convección, en el hecho de que es más sensible a la temperatura. Los gases a temperaturas de una cámara de combustión pierden más del 90% de su energía mediante la radiación de dióxido de carbono, vapor de agua y materias en partículas. Tiene una importancia predominante en los hornos debido a su temperatura, y en el aislamiento criogénico, por el vacío que existe entre partículas. (8)

CALDERAS

Son aparatos tubulares calentados directamente, que por principio convierten la energía del combustible en calor latente de vaporización. Existen dos tipos generales de calderas generadoras de vapor. Las de paso de fuego por los tubos y las de paso de agua por los tubos. (12)

En las calderas de paso de fuego por los tubos, los gases calientes de combustión circulan por una serie de tubos, los cuales se hallan sumergidos en el agua de la caldera y actúan como un medio de transferencia de calor. A estas calderas se les conoce también como calderas pirotubulares. (8,12)

En las calderas de paso de agua por los tubos, los gases de combustión corren sobre y alrededor de los tubos que contienen agua para transferir el calor necesario al agua para subir su temperatura a la de ebullición. A estas calderas se les conoce también como calderas acuotubulares. (8,12)

MOTORES DE COMBUSTION INTERNA

Un motor de combustión interna (CI) consta en esencia de un cilindro, un émbolo y una manivela. El combustible se quema dentro del cilindro y al expanderse los productos gaseosos de la combustión se realiza trabajo; el movimiento rotativo se consigue por medio de la manivela. (12)

Los ciclos son una serie de operaciones después de las cuales el aparato o sustancias vuelven periódicamente a un determinado estado o configuración. En los motores el ciclo mecánico puede completarse con una revolución (ciclo de dos tiempos), o en dos revoluciones (ciclo de cuatro tiempos). A los motores de ciclo en el que el combustible y el aire se mezclan en un carburador y la mezcla explota mediante una chispa se les dio el nombre de motores de ciclo Otto; y en los motores en donde el combustible es inyectado mediante una bomba o por aire comprimido para luego arder por el calor de compresión, se les dio el nombre de motores de ciclo de Diesel, debido a sus constructores, Otto y Langen y Rodolfo Diesel, respectivamente. Ninguno de ellos cumple completamente el ciclo termodinámico, porque el medio no vuelve al punto-estado original, sino que es evacuado a través del escape, y una nueva carga de medio es introducida en el cilindro. Para el análisis termodinámico se supone idealmente que el ciclo es cerrado y que el mismo medio sufre el proceso del ciclo repetidas veces. (12)

Aunque un sistema de generación de vapor a partir de la combustión de gas natural no sigue el mecanismo de un motor de combustión interna, es importante conocer su funcionamiento ya que es parte del principio de diseño de una caldera de combustión de gas natural por ciclos.

QUEMADORES

La función principal en los quemadores es la de mezclar el aire y el combustible en una proporción adecuada para su combustión. Los átomos de hidrógeno y carbono en el combustible deben estar en contacto con el oxígeno presente en el aire de combustión de tal forma que el proceso de oxidación puede dar lugar a una zona de llama. Dado a que ningún quemador puede realizar la mezcla del combustible con una cantidad exacta de aire (oxígeno), siempre se requiere un exceso de aire para completar la combustión. (4)

Dependiendo del tipo y diseño, algunos quemadores pueden mezclar y quemar el aire y el combustible más eficientemente que otros. Los quemadores utilizados en la industria de calderas pueden catalogarse en tres clases:

1. Quemadores atmosféricos
2. Quemadores de potencia
3. Quemadores de pulso

Quemadores atmosféricos: Este tipo de quemador utiliza la presión de gas para mezclar el gas con el aire de combustión en el quemador. Como el volumen del combustible (gas) es relativamente pequeño comparado al del aire de combustión, la presión de gas accesible (en columna de agua) no es suficiente para producir una mezcla homogénea de aire y gas. La ineffectividad del método de mezcla que utiliza este quemador, requiere grandes cantidades de exceso de aire para la combustión completa del gas. (4)

Quemadores de potencia (de tiro forzado): En estos quemadores el aire de combustión toma una presión por encima de la atmosférica que hace una mezcla de aire-gas mucho más turbulenta y uniforme. Pueden alcanzar altas eficiencias de combustión y producen menos niveles de óxidos de nitrógeno (50-100 ppm) comparados a los que producen los atmosféricos. (4)

Quemadores de pulso: La combustión de pulso se refiere al proceso de combustión que varía periódicamente. El proceso repetitivo en los motores de combustión interna antes mencionado es en realidad un proceso de combustión de pulso forzado.(4)

En los motores de combustión interna, la periodicidad del proceso de combustión está controlado por la descarga eléctrica de la bujía (candela), mientras que en los quemadores de pulso, el proceso ocurre espontáneamente después de la primera ignición eléctrica. La periodicidad del proceso de combustión (frecuencia) en los

quemadores de pulso es totalmente dependiente de la geometría y es un fenómeno acústico, por lo que su operación está basada en este tipo de fenómenos. (4)

La combustión de pulso se realiza cuando el calor liberado por el proceso de combustión excita espontáneamente las ondas de presión. Estas ondas son sinusoidales con picos de amplitud (P_k) que oscilan por encima y por debajo de la presión atmosférica. El pico positivo es mayor que el negativo, ocasionando una presión positiva significativa (P_m) respecto al sistema. La interacción del proceso de combustión (calor liberado) con la oscilación de la presión (ondas de presión) da como resultado una liberación de calor periódica. (4,10)

El calor que se libera periódicamente debe estar en fase con las oscilaciones de presión del quemador. Esto significa que la entrada de energía en el quemador (o sea la explosión de la mezcla de aire-gas) debe ser en la fase positiva del ciclo de presión y en el régimen de presión alcanzada. Este fenómeno fue observado por primera vez por Lord Rayleigh, por lo que se conoce hoy día como el "Criterio de Rayleigh". (10)

Para mantener la oscilación, la energía que se suministra a las pulsaciones por el proceso de combustión debe ser compensada, ya que existe pérdida de energía por fricción (disipación viscosa), por transferencia de calor y por radiación de la energía acústica que sale del sistema (balance energético). (10)

Dentro de los quemadores de pulso que se han desarrollado para la industria con base en el sistema acústico en el que operan, se encuentra el del resonador de Helmholtz, el cual consiste en una cavidad rígida cerrada de volumen V , conectada al exterior por una abertura de diámetro D y longitud L . (4)

Cuando las dimensiones de longitud y el diámetro son pequeñas comparadas con la longitud de onda del sonido, el movimiento del medio en el sistema (gas) es análogo al sistema mecánico que agrupa elementos mecánicos de masa, dureza y resistencia. (4)

El gas en el extremo abierto se moviliza como una unidad y provee el elemento de masa del sistema. La presión del gas en la cavidad del resonador cambia en la medida alterna que se comprime y expande por el flujo que entra y sale de gas a través de la abertura, lo que correspondería al elemento de dureza. En la abertura, existe radiación de sonido dentro de los alrededores, lo que ocasiona disipación de la energía acústica dando así lugar al elemento de resistencia. Las fuerzas de viscosidad asociada con la entrada y salida del gas a través de la abertura, también contribuyen con el elemento de resistencia. (4)

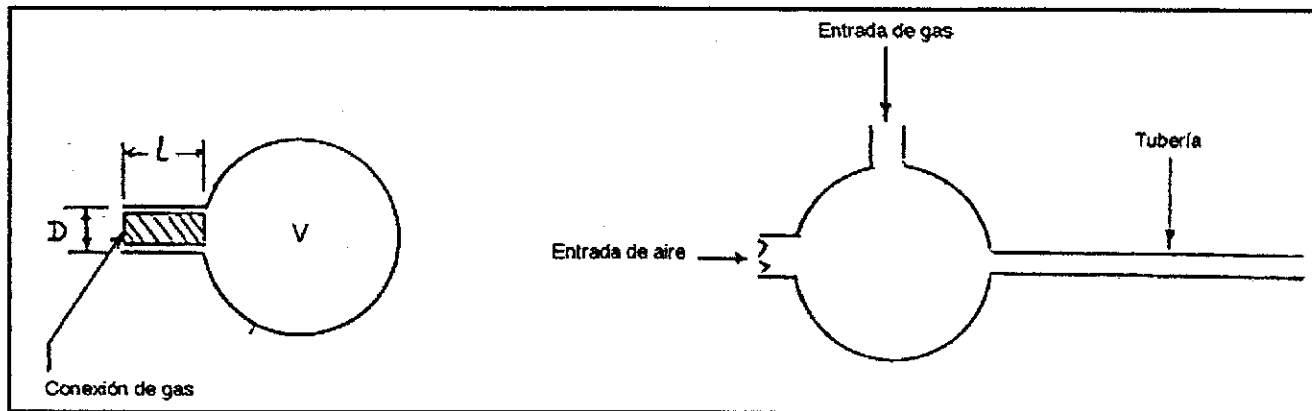
El quemador de Helmholtz consiste en una cámara de combustión comunicada al medio exterior a través de válvulas de aire y combustible con su respectiva tubería. (4)

El quemador de Helmholtz consiste en una cámara de combustión comunicada al medio exterior a través de válvulas de aire y combustible con su respectiva tubería.

(4)

La figura No. 2 ilustra al resonador y al quemador de Helmholtz.

Figura No. 2
Resonador y Quemador de Helmholtz



a) resonador de Helmholtz

b) quemador de Helmholtz

La frecuencia de resonancia de un quemador de Helmholtz es totalmente dependiente de la geometría y se representa por la siguiente ecuación:

$$F = \frac{C\sqrt{A/VL}}{2\pi}$$

En donde,

F= Frecuencia de Helmholtz (Hz)

C= Velocidad del sonido (a la temperatura de operación del quemador) (m/s)

V= Volumen de la cámara de combustión (m³)

A= Area transversal total de la tubería (m)

L= Largo de la tubería (m) (4)

El tipo de válvulas que se utilizan en este quemador es básicamente, de válvulas de cheque las cuales permiten el flujo del aire y del gas en dirección de la cámara de combustión; al mismo tiempo, son válvulas medidoras, que permiten que una pre-

determinada cantidad de aire y gas pasen por ellas. A estas válvulas se les ha dado el nombre de válvulas "flappers". (4,10)

TEORIA DEL CALOR

Si una sustancia absorbe calor, se produce un cambio de temperatura en la misma. La relación entre el calor absorbido y la variación de temperatura se denomina capacidad calorífica. Al considerar la unidad de masa de una sustancia, la cantidad de calor absorbido para conseguir un aumento de temperatura de 1 grado se denomina calor específico de la sustancia, que mejor debería llamarse capacidad térmica específica, puesto que el calor ha sido definido como energía en tránsito por virtud de una diferencia de temperatura. (3,10)

Así pues, la capacidad calorífica de una sustancia se define como la cantidad de calor necesaria para aumentar su temperatura en 1 grado. Las capacidades caloríficas de los gases (también conocidas como calores específicos) a presión constante, c_p , son funciones de la temperatura y, para cálculos de ingeniería puede suponerse que son independientes de la presión cuando se trata de pocas atmósferas.(3)

En el sistema internacional SI, la energía se expresa en joules (J) o kilojoules (kJ). La energía también se expresa en Btu, abreviatura de "British thermal units" o en calorías (cal), por lo que las unidades para calor específico son kJ/mol kg K en unidades SI o btu/mol lb.^oF en unidades inglesas (3)

El principio de la conservación de la energía constituye la primera ley de la Termodinámica, la cual afirma que la energía no puede crearse ni destruirse sino únicamente convertirse de una forma en otra. Existen solamente tres manifestaciones de la energía consideradas en la primera ley, a saber: calor, energía interna y trabajo. Aplicada a los cambios que ocurren en los sistemas cerrados, la primera ley puede escribirse de la siguiente manera:

$$\text{Energía del sistema} + \text{Energía de los alrededores} = 0$$

Las transformaciones de la energía de una forma a otra y su transferencia de un lugar a otro ocurren por los mecanismo de calor y trabajo. Si la frontera del sistema no permite la transferencia de masa entre el sistema y los alrededores, se dice que el sistema es cerrado y su masa es necesariamente constante. Para estos sistemas, toda la energía que intercambian el sistema y los alrededores se transfiere como calor y trabajo, así pues, la expresión anterior se transforma en:

$$\text{Energía de los alrededores} = \pm Q \pm W$$

La elección del signo empleado con el calor absorbido por el sistema (Q) y trabajo efectuado por el sistema (W) depende del sentido de la transferencia que se tome como positivo y sus dimensionales en unidades SI deben ser Joules. (12)

Según la teoría de la relatividad de Einstein, la masa y la energía se puede transformar una en otra. Esta ley establece una relación que debe satisfacerse en toda transformación de energía. (12)

La segunda ley de la termodinámica proporciona una información referente a la posibilidad de transformar una forma determinada de energía en trabajo mecánico. Clausius la establece así: “resulta imposible para una máquina automotriz sin cooperación de un agente externo, enviar calor de un cuerpo a otro a temperatura más elevada”. (12,13)

La segunda ley de la termodinámica afirma que el calor no pasa automáticamente de un cuerpo frío a otro más caliente. El calor puede ser obligado a pasar a un nivel más alto, pero únicamente a base de aplicarle un agente externo. Un motor térmico actúa dejando pasar calor a un nivel más bajo, desde un cuerpo caliente a otro más frío, no por conducción directa de uno a otro, sino haciendo que un medio tome alternativamente calor de un cuerpo caliente y lo ceda a otro frío. (12,13)

La ENTALPIA se define explícitamente para cualquier sistema por la expresión matemática

$$H = U + PV$$

donde

U= energía interna
P= presión absoluta
V= volumen

Las unidades de todos los términos de esta ecuación deben ser las mismas. En el sistema SI, la unidad de entalpía es el joule.(13)

Joseph Black (1728-1799), químico escocés colaborador de James Watt, demostró experimentalmente que diferentes sustancias de igual masa difieren en su capacidad para absorber calor cuando se calientan dentro de un mismo intervalo de temperaturas, llamándole calor latente.(12)

Cuando al agua se le comunica energía calorífica varía su entalpía y su estado físico. A medida que tiene lugar el calentamiento, la temperatura del fluido aumenta y por lo regular su densidad disminuye. La rapidez de la vaporización depende de la velocidad con la cual se transmite el calor al agua y de su movimiento en el recipiente en donde está confinado. (12)

La temperatura a la cual se produce la ebullición depende de la pureza del agua y de la presión absoluta ejercida sobre ella. Para el agua pura la temperatura de ebullición tiene un valor determinado para cada presión y varía directamente en forma proporcional a la presión. El vapor producido a la temperatura de ebullición

correspondiente a su presión (absoluta) se denomina vapor saturado. El vapor saturado puede estar exento completamente de partículas de agua sin vaporizar o puede llevarlas en suspensión. Por esta razón el vapor saturado puede ser seco o húmedo, respectivamente. Dicho de otra forma, el vapor húmedo está formado por vapor saturado y por líquido saturado en equilibrio. (12)

El vapor es el fluido más utilizado para transporte de calor, debido sobre todo a su naturaleza no tóxica, a que es estable, de bajo costo y tiene una gran capacidad calorífica. En la producción de vapor de agua saturado la absorción de energía (calor) por cada kilogramo de agua tiene lugar en dos etapas:

1. Adición de la entalpía del líquido, h_l y,
2. Adición de la entalpía de vaporización h_v

El número de kilocalorías necesaria para elevar 1 kilogramo de agua desde 0°C a su temperatura de ebullición a una presión absoluta determinada, se denomina entalpía del líquido, h_l . Esta cantidad es igual al producto del calor específico medio del agua por la temperatura de ebullición. (12)

La energía calorífica, en kilocalorías, necesaria para convertir 1 kilogramo de agua líquida en vapor seco a la misma temperatura y presión, se denomina entalpía de vaporización, h_v . Existen tablas para obtener valores de entalpía del líquido y de vaporización, las cuales pueden encontrarse en el Manual del Ingeniero Químico por Robert H. Perry, et al.

A la suma de estas dos entalpías se le conoce con el nombre de entalpía total:

$$H = h_l + h_v$$

en donde

H = entalpía total del vapor en kilocalorías por kilogramo

h_l = entalpía del líquido, en kilocalorías por kilogramo

h_v = entalpía del vapor o calor latente de vaporización, en kilocalorías por kilogramo

Si el vapor de agua saturado es húmedo, la expresión anterior es afectada únicamente en la entalpía de vaporización:

$$H_w = h_l + xh_v$$

en donde

H_w = entalpía total del vapor húmedo, en kilocalorías por kilogramo.

x = calidad, fracción en peso de vapor (decimal)

h_l = entalpía del líquido, en kilocaloría por kilogramo de vaporización del vapor saturado seco.

h_v = entalpía del vapor o calor latente de vaporización, en kilocalorías por kilogramo (3,8)

III. OBJETIVOS GENERALES

- **Utilizar las ventajas que el gas natural ofrece como combustible gaseoso para obtener vapor y agua caliente en forma más económica.**
- **Optimización de un sistema de generación de vapor o agua caliente basado en la eficiencia de la combustión del sistema y una tecnología diferente a la convencional.**

IV. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- **Trabajar sobre las ventajas económicas y ambientales que el gas natural ofrece sobre otros combustibles tradicionales para la generación de vapor o agua caliente.**
- **Realizar una guía práctica para el dimensionamiento, la instalación y el mantenimiento de una caldera de combustión de gas natural.**
- **Plantear las aplicaciones más relevantes de una caldera de combustión de gas natural.**

V. PROBLEMA A RESOLVER

Los combustibles que actualmente se utilizan en la industria y comercio de Guatemala para la generación de vapor, representan un costo muy alto en los procesos, fundamentalmente en los siguientes aspectos:

- **Combustión ineficiente que muchas veces incurre no sólo en utilizar más cantidad de combustible sino también en la instalación de accesorios más caros.**
- **Control de la emisión de gases de combustión tóxicos.**
- **Instalaciones, Operación y Mantenimientos más complejos.**

En este modelo de trabajo profesional se buscó comprobar que el futuro ingreso del gas natural a Guatemala representa una alternativa mucho más económica para la generación de vapor o agua, logrando así que los productos y servicios que utilizan esta fuente energética en su proceso sean más competitivos en el mercado interno y externo y, que pueda sustituirse por el búnker que es un combustible económico pero muy contaminante y difícil de manejar (es corrosivo para los equipos y además poco limpio en su uso)

VI. METODOLOGIA

Para realizar este trabajo se siguieron las siguientes etapas:

1. **PROCEDIMIENTO DE INSTALACION:** Aquí se describieron los pasos más importantes para la instalación de los suministros de la caldera y su tubería, y se sugirió una lista de pre-chequeo del arranque de este tipo de caldera.
2. **OPERACION:** Se sugirió una ruta para la preparación del arranque de la caldera en mención.
3. **MANTENIMIENTO:** Se sugirieron rutinas de mantenimiento y una guía de respuestas a los problemas más comunes que se dan en esta etapa.
4. **APLICACIONES GENERALES:** Se presentaron industrias y empresas de servicios guatemaltecos que apliquen a este sistema de generación de vapor o agua.
5. **ETAPA CUANTITATIVA:** En esta etapa se realizaron los cálculos pertinentes con base en la estequiometría de la combustión para comparar consumos de búnker y el gas natural. Se realizó un análisis comparativo de costos de operación para una caldera convencional con combustión de búnker y una de pulso con combustión de gas natural. También se comparó el tamaño de caldera requerido para una demanda establecida de vapor utilizando ambas opciones.
6. **DISCUSIONES Y CONCLUSIONES GENERALES:** Con la información obtenida en las etapas anteriores se procedió a discutir los aspectos más relevantes de la investigación para determinar y comprobar el por qué la combustión de pulso con gas natural representa una opción económicamente atractiva para el industrial y la empresa de servicio en Guatemala.

VII. JUSTIFICACION

La creciente competitividad del mercado obliga al industrial y comerciante que utiliza el calor como principal fuente de energía en su actividad, a la búsqueda de nuevas alternativas que reduzcan sus costos de operación.

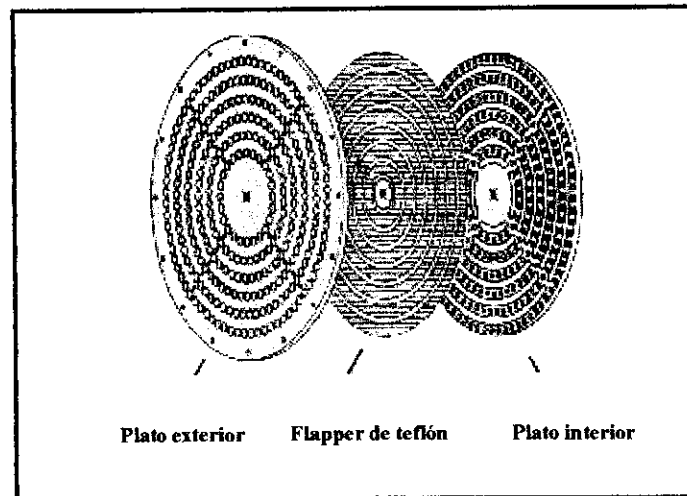
El ingreso a mediano plazo del gas natural a nuestro país permitirá que la industria opte por esta fuente de energía que provee ahorro en la generación de calor (vapor o agua) específicamente en el precio del combustible (comparativamente al aceite combustible No. 2 -diesel- y como sustituto del aceite No. 6 -búnker) y en la eficiencia de la combustión. Además contribuye con un ambiente menos contaminado dada la baja emisión de óxidos de nitrógeno (NOx), principal contribuyente al efecto invernadero. Este modelo de trabajo profesional, tuvo como fin la investigación de este sistema y sus ventajas como un aporte a la optimización de procesos en Guatemala.

VIII. CALDERA DE COMBUSTION DE GAS NATURAL

GENERALIDADES¹

La cámara de combustión en este tipo de caldera ocupa el largo interior total del recipiente presurizado. Además, las válvulas medidoras de aire y gas deben consistir en una válvula (flapper) de fibra de vidrio recubierto de teflón, con un plato exterior y, un plato interior para la toma de aire y entrada del combustible que debe estar sellado en la salida. La figura 3 muestra estas dos válvulas.

Figura No. 3
Válvulas Medidoras de Gas y Aire
(flappers)



La operación de estas calderas puede resumirse en tres fases:

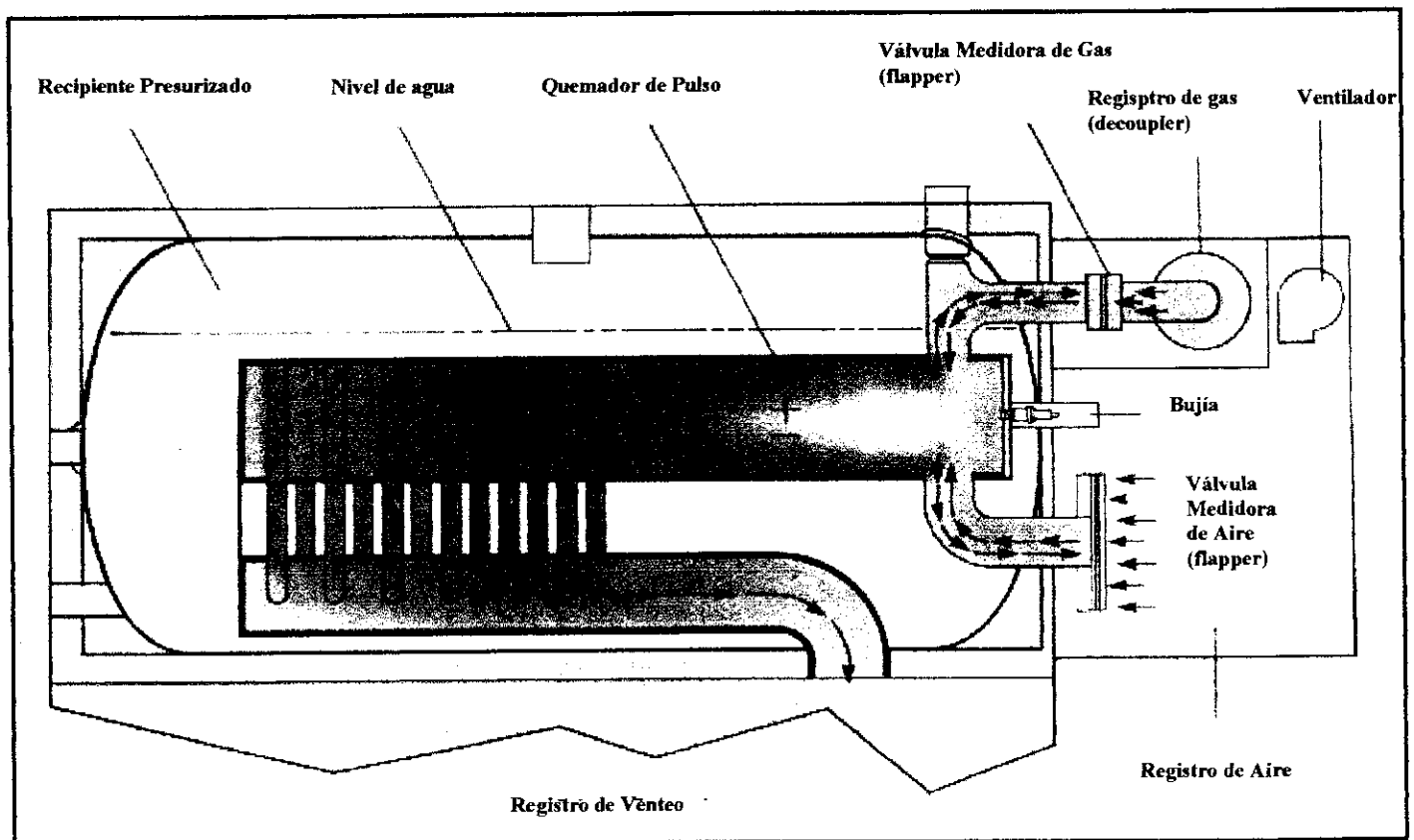
1. Fase 1: una carga de gas y aire entran a través de las válvulas (flapper) en el quemador, que está dimensionado y con la forma de un resonador de Helmholtz, el cual oscila a una frecuencia establecida. La carga es encendida inicialmente por una bujía (candela).
2. Fase 2: La presión aumenta y cierra las válvulas flapper. Los gases calientes se manejan hacia afuera por el final del quemador que está abierto. El momentum de salida de los gases calientes causa una caída de presión por debajo de la atmosférica

¹ El contenido de esta sección al igual que la de normas de seguridad fue extraído del manual "Fulton Gas Pulse Combustion Hydronic & Steam Boiler Systems" por The Fulton Companies, Pulasky, NY. USA.

3. Fase 3: Las válvulas flapper son forzadas a abrir para dejar entrar carga fresca de aire y gas. El calor que se encuentra todavía en la cámara de combustión inicia la ignición de la nueva carga. El ciclo se repite a una frecuencia natural que depende del diseño geométrico de la cámara de combustión. Por ello, de aquí en adelante, a este tipo de caldera se le denominará **Caldera de Pulso**.

La figura 4 ilustra estas tres fases.

Figura No. 4
Fases de Operación



INSTALACION

INTRODUCCION

La caldera de combustión de pulso es una caldera generadora de vapor con encendido de gas automático y ventilación directa. No requiere controles convencionales en el quemador, ni piloto de encendido, ni chimenea. Los componentes de la combustión se da de acuerdo a un diseño integral de un intercambiador de calor. Para la combustión, la caldera utiliza 100% aire exterior que pasa a través de tubería PVC cédula 40. Los productos de la combustión son ventilados a los exteriores por tuberías galvanizadas que pueden ser instaladas a través del techo o de las paredes laterales. Las conexiones eléctricas, de agua, y de gas son similares a las de las calderas convencionales.

Debido a que la caldera utiliza una fuente de energía externa, debe instalarse con tierra física de acuerdo a los requerimientos de la ley, o en su ausencia, con los Códigos Nacionales Eléctricos de los Estados Unidos, ANSI/NFPA 70-1987. De preferencia, debe insistirse en que la instalación cumpla con los estándares de seguridad para los controles y para los dispositivos de seguridad de calderas con encendido automático, de la American Society of Mechanical Engineers (ASME)-No. CSD-1-.

SEGURIDAD Y PRECAUCIONES

Durante los procedimientos de instalación, operación y mantenimiento de este tipo de calderas es recomendable atender a las medidas de seguridad que los fabricantes del equipo, suplidores de gas y leyes del país establecen.

En el anexo No. 1 se encuentran especificadas las Advertencias, Precauciones y Notas que deben tomarse en cuenta para evitar cualquier tipo de daño, personal o material, tanto en el equipo como en sus alrededores. Estas fueron clasificadas de la siguiente manera:

ADVERTENCIAS: deben ser atendidas para prevenir daño serio o muerte al personal.

PRECAUCIONES: deben ser atendidas para prevenir daño o destrucción al equipo o la pérdida de la efectividad de operación.

NOTAS: deben ser atendidas para que los procedimientos de operación y condiciones sean efectivos. Deben tomarse en cuenta como un renglón que debe subrayarse.

SUMINISTRO DE AGUA

La calidad del agua utilizada en la caldera afecta su vida útil. Es altamente recomendado que previa la instalación de la caldera, se consulte a alguna compañía competente que se dedique a tratamientos de agua.

Los suministros naturales de agua de alimentación contienen sólidos y gases disueltos que pueden promover las incrustaciones, espumas, sólidos en el vapor o corrosión. Para prevenir ésto, el agua de alimentación debe analizarse individualmente y tratarla en forma adecuada. Se recomienda que el agua de la caldera se trate para mantener los siguientes niveles:

Dureza: no arriba de 26 ppm expresada en términos de carbonatos de calcio.

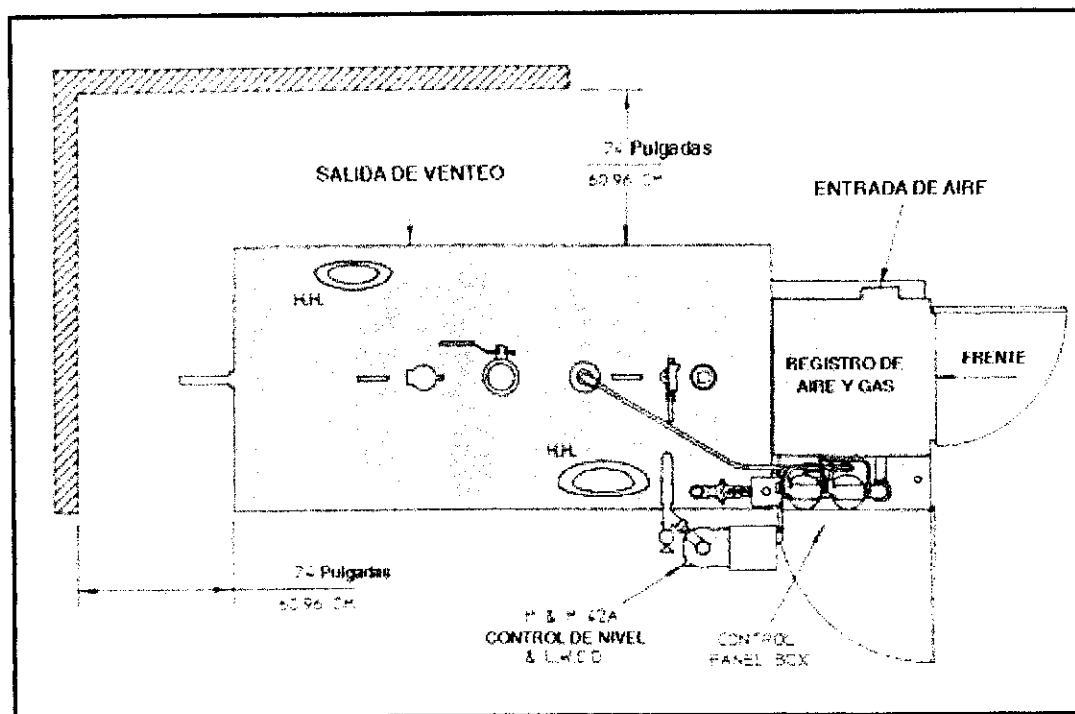
Sólidos totales Disueltos: 2,000 ppm máximo

Valor pH: 9-11

LOCALIZACION DE LA CALDERA

La caldera debe localizarse de tal forma que el suministro de aire y la tubería de escape entre la caldera y la pared o techo al exterior debe seguir los largos máximos y mínimos de ventilación horizontal o vertical, y se sugiere que el mínimo sea de 24 pulgadas (60.96 cms).

Figura No. 5
Localización de la caldera
Vista en planta



INSTALACION DE LA TUBERIA DEL AGUA DE ALIMENTACION

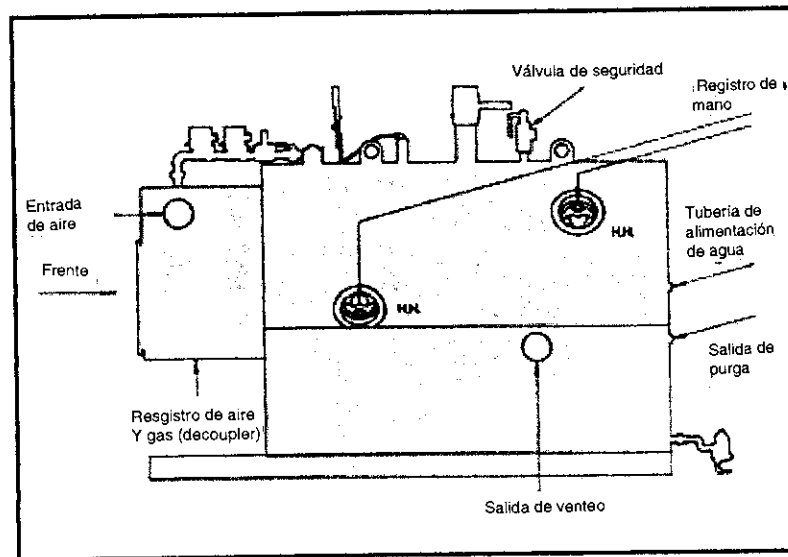
Debe conectarse una válvula de cierre (válvula de globo) en la conexión de entrada del agua de alimentación de la caldera seguida de una válvula de cheque. También se recomienda poner una segunda válvula de cheque.

La tubería de suministro de vapor debe instalarse en la parte de arriba de la caldera. La válvula colectora de vapor debe estar a 12 pulgadas (305mm) de la parte de arriba de la caldera.

La caldera debe tener una válvula de alivio dimensionada de acuerdo a los requerimientos de la ASME. La válvula de alivio de seguridad debe instalarse en posición vertical. El área interna transversal de la tubería de descarga no debe ser más pequeña que el área total de la descarga de la salida de la válvula. La tubería de descarga debe ser lo más corta y recta posible para evitar tensión sobre la válvula.

Cuando se coloca un codo en la válvula de seguridad de la tubería de descarga debe estar seguido de la salida de la válvula. La figura 6 muestra esta instalación.

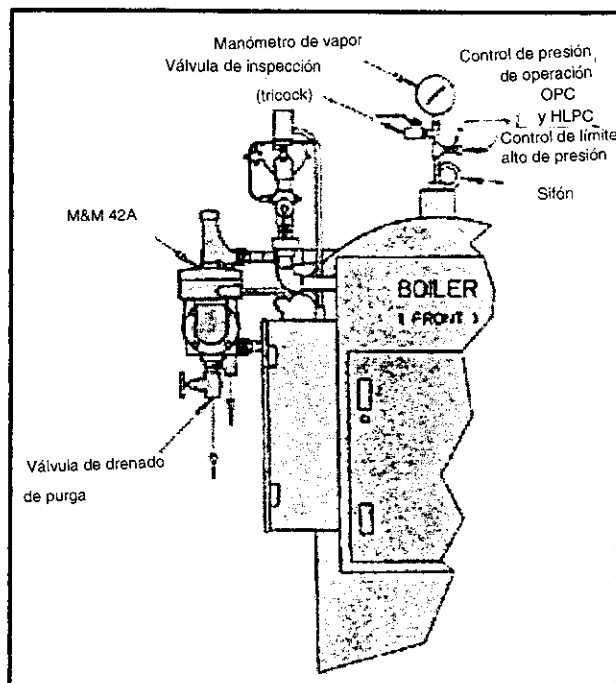
Figura No. 6
Instalación de la tubería de
alimentación de agua
(perfil)



INSTALACION DEL MUÑECO (ASSEMBLY) DEL MANOMETRO DE VAPOR

Instalar el manómetro de vapor y el sifón en el agujero de la parte superior de la caldera. Conectar los tubos de cobre de los controles de presión a las "t"s del sifón.

Figura No. 7
Instalación del muñeco del
manómetro de vapor



INSTALACION DE LA TUBERIA DE DRENADO DE CONDENSADO:

Para extraer el condensado que forma la caldera deben seguirse los siguientes pasos:

1. Debe rectificarse que las monturas de resorte están instalados debajo de cada pie de la caldera.
2. Debe instalarse una válvula automática de drenado del condensado en la parte de atrás de la caldera en donde drena el condensado.
3. Luego, debe instalarse una tubería que vaya de la salida del condensado de la caldera hacia el drenaje con una ligera inclinación.
4. Si no existe un drenaje en el piso, debe instalarse un tanque recolector de condensados con su respectiva bomba.
5. Todas las tuberías, codos y juntas utilizadas en la tubería del condensado deben ser de plástico que soporte temperaturas altas o bien, acero inoxidable.

INSTALACION DE LA TUBERIA DE GAS

La instalación debe ser realizada de acuerdo a las regulaciones del lugar. Tanto la tubería como las juntas deben ser siempre nuevas y libres de cualquier suciedad u otros contaminantes. Debe instalarse un filtro arriba de las válvulas de gas. La tubería debe ser del tamaño apropiado para asegurarse que exista un suministro de gas adecuado. La presión de gas en la entrada de gas debe ser de 7 pulgadas de columna de agua. La línea de suministro de gas debe estar conectada en la terminación abierta de una T. Al hacer uniones de las tuberías de gas, debe utilizarse un sellador que resista la acción de los gases licuados de petróleo. Después de haber concluido la instalación de esta tubería y antes de empezar la instalación eléctrica, debe chequearse cuidadosamente cualquier fuga de gas en todas las conexiones de la tubería (hechas de fábrica o en el lugar). Para ésto, se puede utilizar una solución jabonosa.

INSTALACION ELECTRICA

Se recomienda que un electricista autorizado realice esta instalación. Es preferible que se haga una línea de suministro eléctrico independiente para la caldera.

INSTALACION DE LA TOMA DE AIRE

Tanto la línea de toma de aire como la de escape deben ser instalados con una inclinación de por lo menos $\frac{1}{4}$ de pulgada por pie hacia la unidad. De no cumplirse esta inclinación, puede resultar una bolsa de condensado y ocasionar que no opere la caldera.

Como soporte de la tubería exterior o en el interior de paredes, siempre deben utilizarse eliminadores de vibración alrededor de la misma para prevenir la transmisión de pulsaciones. Deben utilizarse conexiones rígidas entre la tubería y la estructura del edificio.

Toda la tubería debe ser PVC cédula 40. Tanto la tubería como las uniones, el cemento y solventes deben cumplir con los estándares de la American National Standard Institute y la American Society for Testing and Materials (ANSI/ASTM). El cemento debe ser fluido libre y no debe contener partículas no disueltas o cualquier material extraño que afecte la fuerza de las uniones o su resistencia química. El cemento no debe mostrarse gelatinoso, estratificado, o separado de tal forma que una agitación no lo vuelva a unificar.

Después de ensamblar la tubería, debe limpiarse el exceso de cemento. Una buena unión debe estar lisa en todo su perímetro. Cualquier boquete demuestra que la tubería fue ensamblada defectuosamente por falta de cemento.

INSTALACION DE LA TUBERIA DE ESCAPE DE VENTEO

Las conexiones de la toma de aire y de escape deben localizarse al lado derecho de la caldera, o bien arriba y abajo respectivamente según el diseño. Ambas líneas deben tener un declive de por lo menos $\frac{1}{4}$ de pulgada por pie. De no hacerlo de esta forma, puede formarse una bolsa de condensados que no permita que opere la caldera. Así mismo, tampoco puede haber puntos bajos en cada tubería. Sin embargo, puede haber algún punto alto en cualquiera de las líneas, la declinación provista desde el punto alto se mantiene de regreso de la caldera al punto exterior de la toma del aire o del escape.

Para eliminar las transmisiones de pulsaciones siempre deben colocarse eliminadores de vibración alrededor de la tubería. Las conexiones entre la tubería y las estructuras del edificio deben ser rígidas. La tubería y accesorios de la línea de escape deben ser de plásticos que soporten alta temperatura, acero inoxidable o acero galvanizado de pared delgada. Los plásticos de tubería y accesorios de alta temperatura deben ser normados para temperaturas UL estimadas a un mínimo espacio libre entre ellos y cualquier combustible.

Debe utilizarse un silicone adhesivo o sellante resistente a altas temperaturas para unir las tuberías y accesorios y al finalizar la instalación debe formarse un anillo de material adhesivo ininterrumpido a todo alrededor de la unión. Después de 24 horas, la unión queda totalmente sellada. Para la tubería de galvanizado deben utilizarse coplas con tornillos apropiados ($\frac{5}{16}$ " , $\frac{1}{2}$ " de largo).

Debe utilizarse sellante adhesivo resistente a altas temperaturas en las juntas para prevenir posibles fugas de gases.

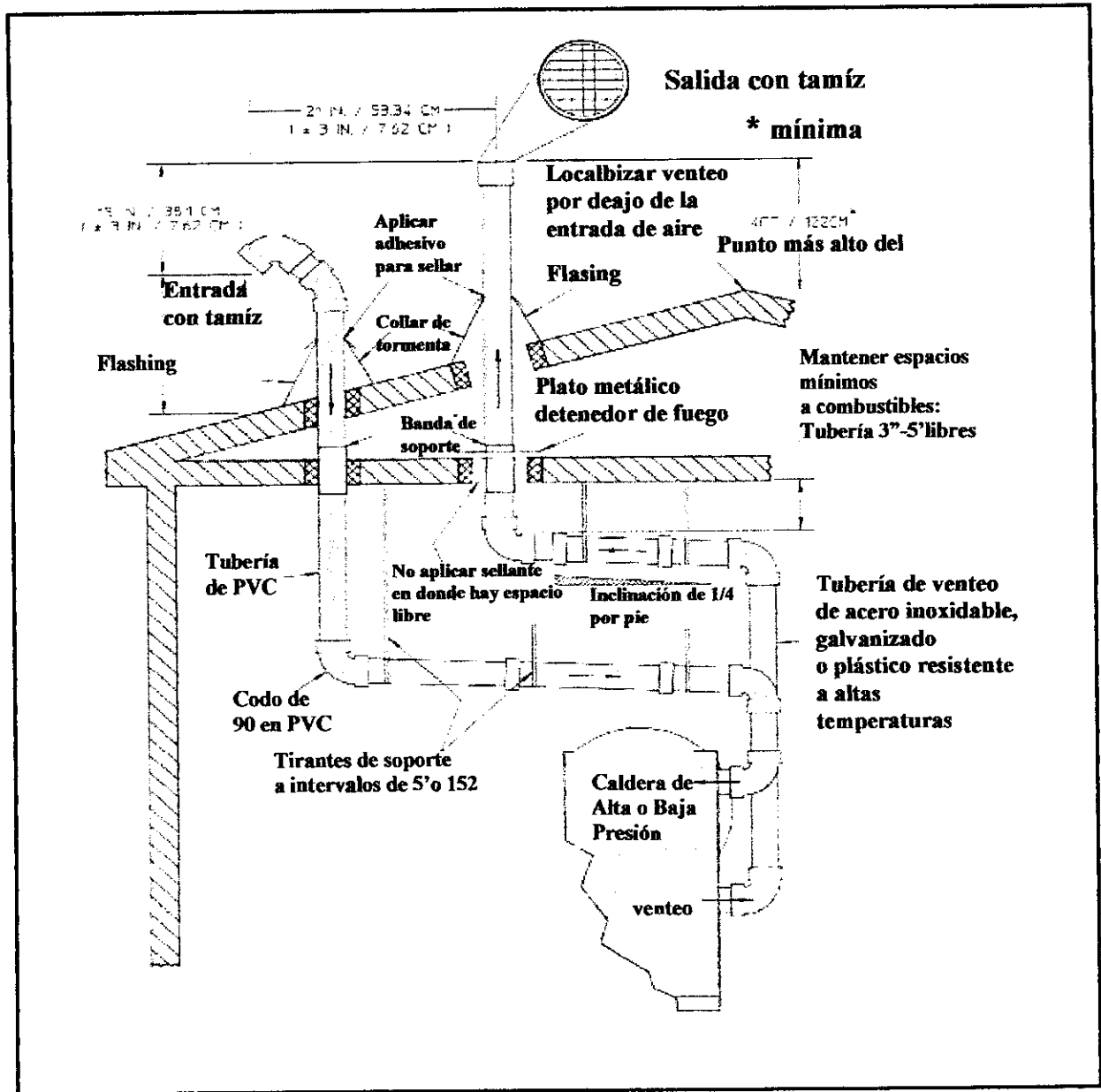
La tubería de suministro de aire de entrada y la de escape deben instalarse verticalmente desde el techo u horizontal desde una pared. La tubería de escape nunca debe canalizarse o pasar por otro tipo de venteo tal como alguna chimenea existente. Todo el sistema de venteo debe instalarse de acuerdo al fabricante y deben tener el espacio de aire libre apropiado entre ellos y los combustibles. Así mismo, debe dejarse ese espacio para cualquier material clasificado como combustible (incluyendo madera), instalaciones eléctricas o cualquier clase de aislantes en el edificio.

Como regla general puede aplicarse la siguiente relación de tubería y espacios libres:

Tubería 3" = 5" de espacio libre

Tubería 4" = 9" de espacio libre

Figura No. 8
Instalación vertical y horizontal de venteo



INSTALACION DEL VENTEO VERTICAL

La abertura del techo debe localizarse y dimensionarse de tal forma que el venteo sea vertical y que tenga el espacio requerido. La terminación del venteo debe tener un alto no menor de 2 pies de la superficie horizontal del techo.

La figura 15 muestra tablas de dimensionamiento para diferentes alturas de techo asumiendo que el venteo se encuentra a no menos 8 pies de cualquier pared.

INSTALACION DEL VENTEO LATERAL (A TRAVES DE UNA PARED)

Localizar el punto de venteo de tal manera que pueda mantenerse una pendiente de un mínimo de $\frac{1}{4}$ " por pie de tubería horizontal. Utilizar material adhesivo para sellar el venteo por los dos lados de la pared.

DESPUES DE LA INSTALACION/PREVIO AL ARRANQUE

Después de haber realizado la instalación y antes de poner en servicio la caldera, debe realizarse una limpieza al recipiente presurizado para eliminar cualquier película de aceite, suciedad u otras impurezas. Para hacerlo, deben seguirse los siguientes pasos:

1. Aislar la caldera de todo el sistema apagando la válvula principal de vapor.
2. Mezclar sosa cáustica de lavado en un contenedor de un galón, ponerlo en la caldera a través de la apertura de la válvula de seguridad de vapor (después de haber removido la válvula de seguridad). La cantidad de sosa puede variar según la capacidad de la caldera, que usualmente es entre 3 lbs (1.4kg) y 4 lbs. (1.8kg).
3. Reemplazar la válvula de seguridad de vapor; llenar la caldera con agua; generar vapor a una presión de 10 p.s.i. (0.07 kg/cm²) de vapor y apagar la caldera.
4. Permitir que esta solución caliente permanezca por 10 minutos en la caldera. Drenar y llenar la caldera 2 veces con agua fresca.
5. Para eliminar todo el aceite y suciedad de las líneas principales de vapor y retorno de condensado, debe permitirse que el retorno se vaya entre el drenaje del piso o en un punto de descarga seguro durante la primera semana de operación.

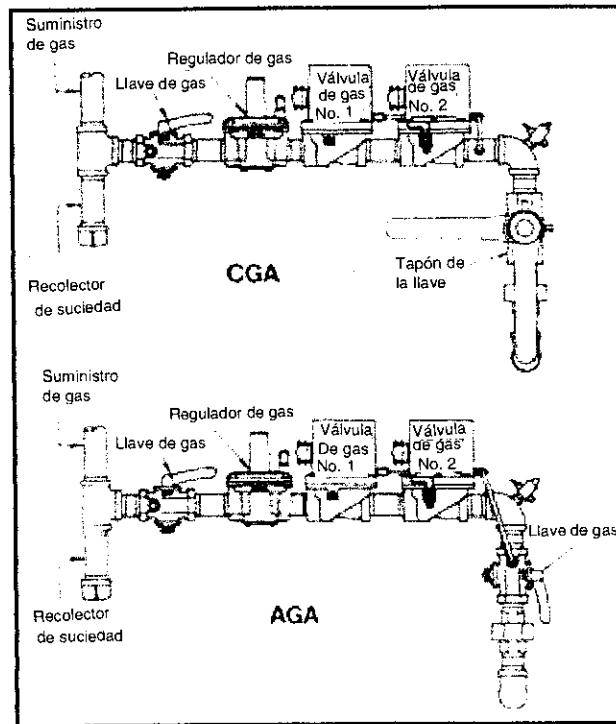
LISTA DE CHEQUEO DE LA INSTALACION

- 1. Antes de arrancar la caldera: No debe prenderse la caldera a menos que esté llena de agua hasta el nivel adecuado (puede verse a través de la mirilla).**
- 2. Chequear que la puerta delantera de la entrada de alimentación de aire esté cerrada.**
- 3. Chequear el seteo de los controles de presión (son dos).**
- 4. Abrir la válvula manual de gas.**
- 5. Cerrar el flipón . Conectar el flipón.**
- 6. Poner el interruptor de prendido/apagado en la posición de prendido.**

Después de que la caldera ha estado operando por 15 minutos, chequear el flujo de entrada de gas, para asegurarse que la caldera está operando a su capacidad de diseño.

Para medir el flujo de gas debe apagarse la caldera y cerrar la válvula manual de gas. Remover el tapón de testeo de presión del codo de 90o que está en el manifold. Reemplazar la conexión de 1/4"NPT por un adaptador de compresión de 1/4" y un pequeño pedazo de tubo. Conectar una pieza de manguera del tubo al manómetro. Abrir la válvula de gas, y prender la caldera. Leer la presión de gas en el manómetro (asegurarse de agregar ambas columnas de agua para obtener la medida del manómetro.).

Figura No. 9
Medición del flujo de gas
(vista del lado izquierdo)



Uno de los proveedores de este tipo de caldera sugiere las siguientes presiones para algunos de sus modelos, los cuales son sólo para referencia ya que éstas dependen del valor calorífico del gas y del largo de la tubería de toma y escape. La presión actual puede ser significativamente más grande o más pequeña.

PHW300	1.8" de columna de agua
PHW500	2.8" de columna de agua
PHW750	2.6" de columna de agua

(Fulton Boilers, Inc.)

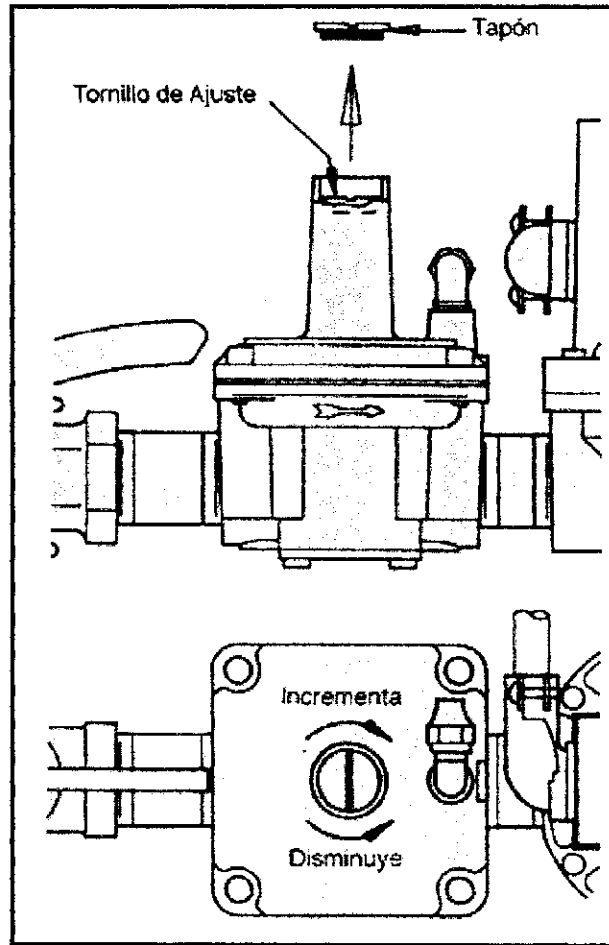
AJUSTE DEL REGULADOR DE PRESION DEL GAS

Para una correcta entrada del gas a la caldera debe seguirse el siguiente procedimiento:

Apagar la caldera y retirar el tapón del regulador:

Girar el tornillo de ajuste en la dirección de las manecillas del reloj para disminuir el flujo de gas. Volver a colocar el tapón antes de prender la caldera.

Figura No. 10
Ajuste del regulador de presión de gas



CHEQUEO DE ALTA PRESION DE GAS

Si se sospecha de alguna área con alta presión de gas, puede hacerse un chequeo de la línea con un manómetro, y atender las siguientes instrucciones:

1. La caldera y su válvula individual debe desconectarse del sistema de suministro de gas durante cualquiera prueba de presión de ese sistema que exceda en $\frac{1}{2}$ psig (3.5kPa). La caldera debe ser aislada del sistema de tubería de suministro de gas, cerrando la válvula manual durante las pruebas que den positivo.

2. Apagar la caldera y el suministro de gas por medio de la válvula manual de gas. Retirar el tapón de la válvula de gas. Reemplazarlo con un NPT de ¼" por un adaptador de compresión de ¼" (o flange) y un pedazo pequeño de tubería. Conectar una pieza de manguera de la tubería a uno de los lados del manómetro.
3. Abrir el suministro de gas y prender la caldera. Después de que la combustión inicie, el manómetro debe dar una lectura de 7" de columna de agua (de 114 mm a 178mm).
4. Si la lectura excede a 7.0" de columna de agua (178 mm) instalar un regulador después de la válvula de gas para reducir la presión. Si la presión es menos de 6" de columna de agua, es mejor que se consulte el proveedor de gas para ajustar la presión del suministro.

OPERACION

Como todo equipo, es obligación leer y seguir toda la información de seguridad, de colocar las instrucciones y manuales en un lugar adecuado cerca de la caldera y, mantenerlo en condiciones adecuadas de legibilidad.

Si el equipo deja de operarse por un período de tiempo largo, es conveniente apagar la válvula principal de suministro.

Para el inicio de la operación es conveniente realizar la siguiente rutina:

1. Colocar el control de presión de operación en la posición más baja.
2. Apagar el suministro eléctrico de la caldera.
3. Girar la manecilla del gas en sentido de las agujas del reloj para apagarlo. (Esta manecilla es también un dispositivo de apagado de emergencia).

Este tipo de caldera está equipada con un dispositivo automático de ignición que prende el quemador. Nunca se debe tratar de prender el quemador manualmente.

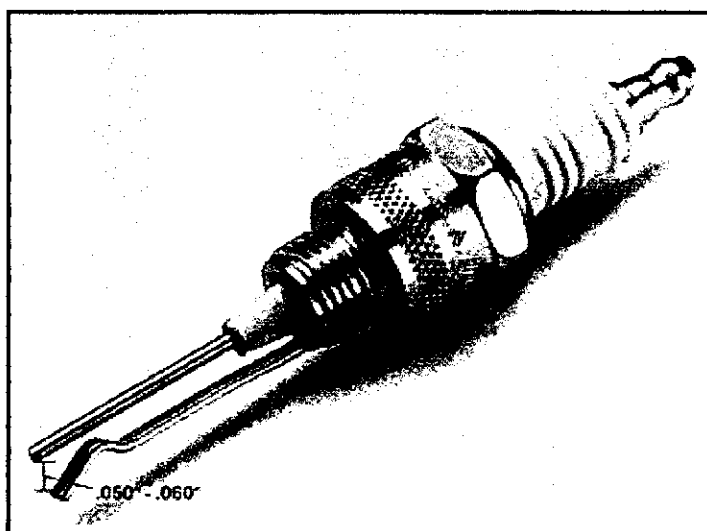
Debe esperarse cinco (5) minutos para limpiar cualquier gas del ambiente. Si aún continúa el olor a gas debe **PARARSE** y seguir instrucciones de seguridad. Si el olor a gas ha desaparecido, puede continuarse el trabajo de arranque.

PREPARACION AL ARRANQUE

1. Abrir la válvula de vapor en la parte de arriba de la caldera

2. Abrir todas las válvulas en la línea de alimentación del agua
3. Abrir las válvulas aisladas de columna de agua
4. Abrir las válvulas de la mirilla de control de nivel de agua
5. Cerrar las válvulas de ventilación en la caldera y en la columna de agua.
6. Prender el motor de la bomba de alimentación de agua.
7. Girar la manecilla del gas $\frac{1}{4}$ en contra del sentido de las agujas del reloj para que prenda.
8. Prender el suministro eléctrico de la caldera.
9. Poner el control de presión en la posición deseada.
10. Poner el interruptor de la caldera en la posición de **PRENDIDO**. La caldera es energizada y comienza una pre-purga de 35 segundos.
11. Después de 35 segundos, la bujía (candela) de ignición y la válvula de gas (2 segundos después) son energizados. Si en 4 segundos no se sensa presión en el housing de la válvula de aire, la bujía y la válvula son desenergizados, y el control reiniciará la pre-purga nuevamente, siempre y cuando el número de intentos no sea excesivo.
12. Si después de 37 segundos la válvula de gas se abre (se escucha un click), pero la caldera no arranca, debe chequearse que la bujía esté trabajando apropiadamente. La bujía o los alambres pudieron haberse dañado. Chequear la separación entre los electrodos de la bujía (claro). Este debe ser de 0.050" a 0.060"

Figura No. 11
Separación de los electrodos
De la bujía (claro)



Si la caldera no arranca:

1. Chequear que el control de presión esté arriba de la presión de la caldera.
2. Chequear si el flipón del circuito no está apagado o si algún fusible está quemado.
3. Chequear si no hay objetos, hojas, trapos, etc. que estén interrumpiendo el suministro de aire en la entrada o en la salida de escape en el exterior del edificio.
4. Chequear que el nivel de agua sea apropiado, un nivel bajo impide el arranque de la caldera.

Si aun así, la caldera no opera, apagar el gas y contactar al proveedor de gas siguiendo las siguientes instrucciones:

1. Colocar el termostato en la lectura más baja.
2. Apagar todo el suministro eléctrico de la caldera si requiere servicio.
3. Girar la manecilla de gas $\frac{1}{4}$ en sentido de las agujas del reloj para apagarla.

PURGA

Debe realizarse para sacar cierta cantidad de agua con el fin de extraer de la caldera los lodos que pueden depositarse en el fondo evitando que en el área afectada haya transferencia de calor, sedimentos y espumas que pueden ser arrastradas provocando un vapor sucio.

PRE PURGA –POST PURGA RUTINARIA DE ARRANQUE

La pre-purga es un procedimiento que debe realizarse antes de arrancar la caldera con el fin de eliminar los gases de combustión remanentes en la cámara de combustión para evitar explosiones en el momento de la primera ignición.

La post-purga debe realizarse al terminar la jornada y consiste únicamente en permitir el ingreso de únicamente aire (por medio del ventilador de purga) para limpiar el combustible que pudo quedar en el tren. Ambos procedimientos están a cargo del control programador.

IX. MANTENIMIENTO

Para asegurar la seguridad y eficiencia continua de la caldera de pulso, es necesario realizar un calendario de mantenimiento. La caldera debe ser inspeccionada anualmente. Todos los servicios debe hacerlos un personal calificado.

Antes de cada temporada de uso:

- Chequear la toma de aire y la salida de escape de venteo para prevenir cualquier bloqueo.
- Chequear la toma de aire y la tubería de venteo de escape de aflojamientos. Al estar corriendo la caldera, chequear auditivamente en las juntas y funiones si existen rajaduras.
- Chequear el nivel del agua en la mirilla de vidrio. (el nivel del agua debe estar por la mitad) para prevenir que la caldera trabaje en seco.

MANTENIMIENTO DIARIO RECOMENDADO

Realizar una inspección a la caldera y al sistema de fugas o cualquier condición inusual en la operación en los controles y la bomba de alimentación.

Para asegurar una operación segura, la fuente de poder de la caldera debe estar prendida durante la purga, de tal forma que pueda chequearse el relevo de aguas bajas. Mientras se esté purgando la caldera, la presión debe caer significativamente. También durante la purga con la caldera prendida, es normal escuchar a la bomba de alimentación de la caldera.

En este punto, no debe ocurrir la combustión. En caso ocurriera, debe apagarse la caldera y contactar al proveedor.

Unicamente si el sistema de vapor requiere agua de reposición (i.e. si es vapor de proceso), se recomienda seguir la siguiente rutina de purga:

Purgar la caldera cada mañana prendiendo la caldera y generando no más de 3 psi (0.25 Kg/cm²) de vapor. Luego apagarla. Prender la llave del agua al separador de purga (se supone que existe una alimentación de agua fría a la entrada del separador de purga para facilitar el enfriamiento de agua y por lo tanto la caída de presión). Abrir la válvula de purga por aproximadamente 10 segundos. Cerrar la válvula. Cerrar la llave del agua del separador de purga.

Purgar también el control de nivel de agua cada mañana, abriendo la válvula de control de purga por aproximadamente 10 segundos. Cerrar la válvula. Observar cuánto tiempo tarda en volver a llenarse la mirilla de agua.

Si la caldera es operada automáticamente con un contador de tiempo, la operación de purga puede realizarse al final del día.

Si el agua es tratada con compuestos, asegurarse que el tratamiento es llevado acabo continuamente de acuerdo a las instrucciones específicas del fabricante.

- Chequear que el nivel de agua en la mirilla y la operación de las válvulas tricoc.
- Chequear que la bomba de alimentación de agua está trabajando

MANTENIMIENTO MENSUAL RECOMENDADO

Chequear que el relay de bajo nivel de agua está operando correctamente de la siguiente manera:

Con la caldera operando, abrir la válvula de purga de la caldera. Cuando el agua cae por debajo del nivel requerido (ver el nivel en la mirilla de agua) la caldera de pulso deberá apagarse. Esto sucede cuando el nivel de agua cae por debajo del flote en control de nivel de agua y/o en el cuerpo de la caldera.

También debe limpiarse el vidrio y reemplazar los empaques si hay fuga.

MANTENIMIENTO CUATRIMESTRAL RECOMENDADO

Con la caldera trabajando a no más de 10 PSI de presión, debe chequearse que la válvula de seguridad de vapor está operando y alcanza el nivel. Apagar la caldera totalmente y drenarla.

Remover los registros de mano (handholes) e inspeccionar el interior del recipiente de incrustaciones y lodos. La cantidad de estos depósitos indica la eficiencia del tratamiento de agua que se ha estado utilizando. La frecuencia de esta inspección dependerá de la condición del agua de la caldera.

Inspeccionar la toma de aire y las tuberías de escape de venteo de rajaduras o de sellos rotos en las juntas.

Inspeccionar los sedazos de la toma de aire y de la terminal de escape de venteo y asegurarse de que están libres de suciedad o de materia extraña que puedan bloquear las terminales.

Purgar la caldera y el control de nivel de agua completamente como se describió en las recomendaciones de mantenimiento diario.

Limpiar la mirilla de agua. Si hay alguna fuga evidente, reemplazar los empaques. Siempre reemplazar el protector de plástico de alto impacto de la mirilla de vidrio.

Limpiar el filtro de la bomba de agua.

MANTENIMIENTO SEMESTRAL RECOMENDADO

- Con la caldera apagada y sin presión, drenar el agua hasta un nivel por debajo del nivel de la mirilla.

- **Remover el flote del control de nivel de agua removiendo los pernos del flange. Limpiar cualquier suciedad o sedimento que haya en el cuerpo y en el vidrio del control de nivel de agua.**
- **Remover la mirilla de vidrio. Inspeccionar el vidrio de cualquier picadura, o rajaduras y reemplazarlo si se encuentra dañado.**
- **Siempre deben instalarse nuevos empaques en la mirilla.**
- **Limpiar la caldera si es necesario según las instrucciones mencionadas en la sección de Instalación (previo al arranque). Debe consultarse cada seis meses al fabricante por la limpieza de la válvula flapper.**
- **Limpiar las trampas de agua y los filtros en la línea de gas.**
- **Chequear la operación de todas las trampas de vapor en el sistema de retorno de condensado.**
- **Remover la tapadera de la tubería que está en la conexión cruzada debajo del control de nivel de agua y limpiar el niple adentro de la caldera. La caldera debe estar fría y el nivel de agua debajo de la tubería.**

MANTENIMIENTO ANUAL RECOMENDADO

Se recomienda por lo menos una vez al año, limpiar los pasajes del flujo de gas (escape) y el de drenado de condensado. Para ello, puede seguirse el siguiente procedimiento:

1. **Apagar la caldera, el suministro de gas y desconectar la tubería de suministro de gas del sistema. Entonces,**
2. **Desconectar el tubo plástico del housing de la válvula de aire.**
3. **Sacar completamente el housing de la válvula de aire, girando en sentido contrario de las manecillas del reloj.**
4. **Conectar una copla de 3" a la tubería de 3" en donde estaba conectado el housing de la válvula de aire (flapper).**
5. **Conectar un niple de 3" y 24" de largo a la copla de 3".**
6. **Conectar un tapón de 3" al niple en el extremo abierto.**
7. **Retirar la bujía (candela) y el adaptador.**
8. **Conectar en el lugar de la bujía un conector sólido de ½"-14 N.P.T.**

9. Suspender el suministro de gas.
10. Desmontar el tren de alimentación de gas. (asegurarse que quede soportado para no cargar el peso sobre la tubería).
11. Desmontar la válvula flapper de gas.
12. Remover la copla de 2 ½ "(que se encuentra junto a la válvula flapper) de la tubería de gas que entra a la caldera.
13. Conectar un tapón de 2 ½" a la tubería de gas.
14. Remover el tapón de 2 ½" que se encuentra en la parte de arriba de la caldera (acceso al orificio).
15. Cuidadosamente, quitar el orificio.
16. Insertar un embudo de cuello largo en el tubo de acceso al orificio.
17. Mezclar 3 libras de detergente o hidróxido de sodio (NaOH) con 30 galones de agua tibia. Lentamente poner la solución en la cámara de combustión utilizando el embudo.
18. Colocar un contenedor lo suficientemente grande para recolectar 10 galones de la solución limpiadora debajo de la tubería de 3" que sale de la caja de registro de aire.
19. Desconectar el tapón de 3" y dejar que la solución limpiadora drene completamente de la cámara de combustión.
20. Reemplazar el tapón de 3".
21. Lavar los pasajes de flujo de gas con 20 galones de agua.
22. Remover el tapón de 3" y drenar.
23. Poner de nuevo el tapón y lavar de nuevo con 20 galones de agua.
24. Remover el tapón de 3" y drenar.
25. Remover el tapón de 2 ½" de la tubería de gas de 2 1/2" en el compartimiento de registro de gas.
26. Quitar el tapón de la abertura de la bujía.

27. Dejar alrededor de media hora que la humedad dentro del intercambiador se seque.

La limpieza de los pasajes en los tubos (flujo) de gas y de drenado de condensado están completos y se puede volver a armar y al terminar, debe chequearse que no haya fugas de gas con agua jabonosa y asegurarse que no hay olor a gas.

X. APLICACIONES

La caldera de combustión de pulso con gas natural puede ser utilizada en cualquier sistema de generación de vapor o agua caliente sobre todo cuando existen los siguientes atenuantes:

- 1. Limitación de espacio para su instalación y mantenimiento.**
- 2. Imposibilidad de instalación de chimeneas (por ejemplo en sótanos de edificios)**
- 3. Controles severos de contaminación ambiental.**
- 4. Procesos en los que se desee optimizar los recursos.**

Tabla No. 2

Analisis Comparativo de Costos de Operación para Calderas de 50 bhp
de Combustión de Búnker y de Gas Natural

	PIROTUBULAR		VECES		TOTAL		FULSO 50 RHP		VECES		TOTAL	
	US \$	AL AÑO	US \$	EN 5 AÑOS	GAS NATURAL	AL AÑO	US \$	EN 5 AÑOS	US \$	EN 5 AÑOS		
VALOR DE ACTIVOS FIJOS												
COSTO INICIAL EQUIPO	30,270.00	1	30,270.00	30,270.00	12,600.00	1	12,600.00					12,600.00
INSTALACION	4,805.88	1	4,805.88	4,805.88	2,941.18	1	2,941.18					2,941.18
SUAVIZADOR	1,350.00	1	1,350.00	1,350.00	1,350.00	1	1,350.00					1,350.00
CHIMENEA 20'	588.24	1	588.24	588.24								0.00
SILENCIADORES	0.00		0.00	0.00	477.75		477.75					0.00
Valor Total de Activos Fijos				37,014.12								16,891.18
GASTOS DE OPERACION												
Generación:												
Consumo de Combustible	18,220.58	5	91,102.89	91,102.89	16,884.34	5	84,421.675					84,421.68
Mantenimientos:												
MANTENIMIENTO MENSUAL	105.15	12	1,261.76	1,261.76	73.53	12	882.35					882.35
MANTENIMIENTO TRIMESTRAL	210.29	4	841.18	841.18	125.00	4	500.00					500.00
MANTENIMIENTO SEMESTRAL	0.00		0.00	0.00	162.00	1	162.00					162.00
MANTENIMIENTO ANUAL	0.00		0.00	0.00	300.00	1	300.00					300.00
Reparaciones:												
REFRACTARIO	2,458.82	1	2,458.82	2,458.82								0.00
MANO DE OBRA REFRACTARIO	514.71	1	514.71	514.71								0.00
TUBERIA	699.92	1	699.92	699.92								0.00
MANO DE OBRA DE TUBERIA	735.29	1	735.29	735.29								0.00
BUJIA	0.00		0.00	0.00	10.00	2	20.00					20.00
VENTILADOR	300.00	1	300.00	300.00	100.00		100.00					0.00
VALVULA FLAPPERS	0.00		0.00	0.00	90.00	1	90.00					90.00
Depreciación:												
Valor Total de Activos Fijos				37,014.12								16,891.18
Total Gastos de Operación				134,928.69								103,267.21

XI. DISCUSIONES

Debido al incremento del costo de la energía, muchos fabricantes investigan métodos para extraer todo el calor posible cuando se quema el gas natural. Como la mayoría del equipo tradicional que hoy día se consigue en el mercado extranjero puede extraer desde un 40 hasta un 80 por ciento de la energía, pueden lograrse mejoras en la reducción de costos de operación tanto en la generación de agua caliente como en la de vapor.

El método de combustión de pulso aquí presentado demuestra ser un método que mejora la eficiencia de los equipos que utilizan gas natural. Las presiones oscilantes asociadas a la combustión de pulso producen un campo de flujo oscilante que incrementa la transferencia de calor de los gases calientes a las paredes que están alrededor de ellos. Esto permite extraer más calor de los gases con la misma superficie. Además, uno de los fabricantes de este tipo de caldera garantiza que la temperatura de operación se alcanza en la mitad del tiempo que en los otros equipos, economizando así combustible.

El hecho de que un quemador de pulso controla por sí mismo su encendido y apagado y, que se autoabastece de aire de combustión, permite un mejor control de exceso de aire minimizando así las pérdidas.²

A pesar que la caldera de pulso de gas natural es un equipo innovador, el requerimiento de tratamiento de agua de suministro es el mismo que el de los equipos convencionales. Como es lo usual, en el anexo 3, se calculó el tamaño del suavizador que se requiere en los dos tipos de caldera, siendo el mismo en ambos casos. De la misma forma, los químicos que se utilizan para mantener los niveles mencionados en la sección de suministro de agua no difieren de los utilizados en las calderas convencionales con la ventaja de que los niveles en la de pulso no son tan rigurosos como en las convencionales, lo que es el resultado de no utilizar tubos en su diseño.

Inconvenientemente, el proceso de combustión de pulso es un proceso acústico, lo cual implica ruido en su operación. Este ruido está relacionado directamente con la presión de operación, por lo que los sistemas de baja presión son inherentemente menos ruidosos que los sistemas de alta presión. Al colocar cámaras de combustión y tuberías más grandes se logra reducir la presión de operación y consecuentemente el ruido.

Se ha determinado que el ruido es generado principalmente por:

a) El proceso de combustión propiamente (explosión de la mezcla aire/gas)

² En el anexo 4 se encuentra la Gráfica 1 que muestra el comportamiento de la eficiencia de un tipo de caldera para diferentes excesos de aire. Obsérvese cómo la eficiencia baja al aumentar el exceso de aire.

b) El impacto de las válvulas medidoras de gas y aire (flappers) con los platos.

Es por ello que el diseño de estas calderas tiene los llamados “registros” (decouplers), tal y como se mostró en la figura 4, que actúan como silenciadores (mufflers). Los materiales absorbentes de ruido utilizados en los registros de aire han demostrado que reducen significativamente su nivel. Aun así, es necesario utilizar silenciadores en los registros de aire y venteo hechos de acero al carbón y acero inoxidable respectivamente.

Ahora bien, aunque el diseño de esta caldera involucra un costo adicional en la eliminación de ruido, sus ventajas respecto de los equipos convencionales reducen enormemente el costo inicial de capital así como los de operación, mantenimiento e instalación; y los beneficios que se obtienen en materia de conservación del medio ambiente son aún más relevantes.

Por ejemplo, actualmente en Guatemala no existe ninguna legislación para el control de contaminación ambiental estacionario (equipo de industria), sin embargo, la Organización Panamericana de la Salud y la Organización Mundial de la Salud están en la capacidad de evaluar y determinar bajo sus parámetros, a aquellas industrias que representen peligro al medio ambiente ya sea por la naturaleza de sus desechos como por las emanaciones que resulten del proceso de combustión.

Por ahora, se empieza a discutir una legislación en este tema en el cual se involucra a la Cámara de Industria de Guatemala para beneficio final del ambiente. Si los parámetros que se lleguen a establecer obligan al industrial a realizar un control estricto de emanación de gases de combustión y al mantenimiento de ese tratamiento (i.e. chequeo y reemplazo del equipo necesario como los filtros o scrubbers), todos aquellos costos ocultos que éste conllevaría, serían lo suficientemente altos como para justificar el uso del gas natural en lugar del búnker.

En caso se diera una legislación más radical al extremo de prohibir el uso del búnker, la justificación de costos bajos en una caldera de gas natural sería mucho más real, pues la otra alternativa de combustible sería la del diesel con un costo casi dos veces mayor que el del búnker.

Dentro de las ventajas técnicas más significativas de este equipo, se consideran a las siguientes como las más relevantes:

El hecho de que el “quemador” es parte integral del intercambiador de calor en la caldera de pulso, reduce los problemas que usualmente se asocian con las calderas convencionales. El calor que se genera en la cámara de combustión, realiza el trabajo de un quemador, ya que es este mismo el que provoca la ignición del siguiente ciclo de combustión.

VENTILACION PROPIA: Las presiones oscilantes en la combustión de pulso que se generan por la liberación periódica del calor, permiten que los productos de combustión puedan ser ventilados hacia afuera a través de una tubería de diámetro

pequeño, eliminando así la necesidad de una chimenea y su alto costo en muchos casos.

ASPIRACION PROPIA DE AIRE: Las mismas oscilaciones de presión permiten que automáticamente entre aire fresco (limpio) de la naturaleza a través de una tubería de diámetro pequeño. Esto elimina la necesidad de hacer reposición del aire. También es importante para evitar daños prematuros debido a corrosión del intercambiador de calor por la presencia de contaminantes en el aire de combustión.

Esta misma característica, elimina la necesidad de un ventilador para ingresar el aire de combustión y por lo tanto los problemas asociados con los motores de los ventiladores.

ALTA EFICIENCIA DE COMBUSTION: Debido a que el diseño de este tipo de calderas permite que el aire de combustión se mezele con el combustible antes de entrar a la cámara de combustión, los átomos de Carbono y Oxígeno son combinados de una forma más homogénea, requiriendo así menos exceso de aire para realizar la combustión completa. Esto representa no sólo menos costos de operación sino también bajas emisiones contaminantes del ambiente de CO y NOx en los los gases de combustión.

ALTA EFICIENCIA TERMICA: La explosión de la mezcla de aire y gas en un flujo con oscilaciones, genera un flujo de alta turbulencia en el intercambiador de calor, lo cual rompe la capa límite laminar que permite una transferencia de calor alta por convección. Dependiendo de las condiciones de operación (temperatura del medio de transferencia de calor en el suministro, el retorno y el flujo de aire), la combustión de pulso puede alcanzar eficiencias térmicas del 96%.

En el anexo 3 también se calculó el requerimiento de caballaje para dos tipos diferentes de equipo, uno con la tradicional eficiencia del 85% quemando aceite No. 6 (búnker) y, el 96% que ofrece la generación con gas natural. El tamaño de la primera resultó ser más grande que el de la segunda por lo que el ahorro sería no sólo en combustible sino también en inversión del equipo.

Históricamente en los países que existe gas natural y búnker se ha determinado que el primero es siempre un 30% más barato que el segundo y que su precio es más estable.

El precio del gas natural se calculó promediando las tarifas comerciales que se ofrecen en el estado de Nueva York, EUA y un estudio realizado por el Ministerio de Energía y Minas para determinar el posible precio final en Guatemala, ya que aun no se encuentra establecido cuál será dicho precio final. Se consideró el de EUA ya que dentro de las proposiciones del proyecto está el aspecto de que Guatemala pueda comprar a EUA y ellos despachen a través de México.

BAJAS EMISIONES CONTAMINANTES: Debido a que el proceso de la combustión de pulso de estos equipos posee una pre-mezcla del aire de combustión y el combustible, ésta es uniforme, por lo que la formación de CO se mantiene en niveles bajos (menos del 50 pp.). El flujo de alto calor en la cámara de combustión da como resultado temperaturas bajas en la cámara de combustión que es esencial para mantener los niveles de formación de NOx bajos. También la oscilación de la presión (en la fase negativa del ciclo de presión) con el sistema, ocasiona que los productos de combustión fluyan de regreso a la zona de combustión (recirculación interna automática del flujo de gas), enfriando la llama y ayudando también a mantener la formación de NO x a bajos niveles.

Se encuentra documentado en el texto *The Design of Pulse Combustion* por J.C. Griffith y E.J. Weber, que experimentalmente en la combustión de pulso sin pre-mezcla, los niveles típicos de concentración de NOx van de los 35 a los 55 ppm, mientras que en los que sí poseen pre-mezcla, las concentraciones se mantienen entre 13 y 16 ppm.

La disponibilidad de espacio que requiere el cuarto de calderas debe ser mucho mayor al utilizar los equipos convencionales que los de pulso. Por ejemplo, en el caso de una caldera de 40 bhp, uno de los fabricantes de las calderas convencionales especifica un mínimo de 69 pulgadas entre el equipo y la pared lateral, mientras que el fabricante de la caldera de pulso especifica únicamente 24 pulgadas. Además debe considerarse que del lado de la puerta trasera, se requiere de más espacio en las convencionales por la manipulación de los tubos.

En la tabla No. 2 se analizan los renglones más relevantes para ratificar el por qué la caldera de pulso resulta más económica que las convencionales. Para ésto, se ausmió una caldera del mismo caballaje (50bhp) en las mismas condiciones de operación para los dos casos. El resultado fue el siguiente:

En el término de cinco (5) años una caldera de gas natural requiere de un total de US\$ 103,267.21 de gastos de operación versus la caldera convencional que requiere un total de US\$134,928.69. Esto hace una diferencia de más de US\$31,000.00. Debido a la constante investigación de este tipo de activo y por consecuencia los cambios tecnológicos a los que usualmente está sujeto, se asumió una depreciación lineal para cinco años (20% anual), a pesar de que se considera que la vida útil es de 15 años. Para fines prácticos, no se consideró el costo de vida, i.e. la tasa inflacionaria que podría ser un 4% ; ni los costos financieros, ya que indistintamente afectarían de igual forma a los dos activos analizados; ni los costos ocultos que se mencionaron anteriormente por falta de una legislación ambiental pero que pueden llegar a ser los más altos en los equipos convencionales. Por otro lado puede observarse que el mayor ahorro en la caldera de pulso está en los mantenimientos y reparaciones que ésta requiere.

Así pues, queda comprobado que el gas natural en una caldera de pulso es un combustible alternativo para poder reemplazar al búnker, contribuyendo en ahorros para el industrial y las empresas de servicios que generan vapor.

Finalmente, no importa cualquiera que sea el beneficio que un equipo generador de vapor ofrezca, si en el mejor de los momentos deben suspenderse operaciones debido a fallas o daños en el mismo. Hoy día el costo de oportunidad puede ser tan alto como ningún otro por lo que el diseño sencillo, eficiente e innovador de las calderas de pulso a gas natural reducen sustancialmente las probabilidades de que ésto suceda.

XII. CONCLUSIONES

- **El gas natural para la generación de vapor y agua caliente demuestra ser un combustible alternativo económicamente atractivo, siempre y cuando se utilice en un sistema de combustión de pulso.**
- **Las principales ventajas que este equipo ofrece respecto de los convencionales son su eficiencia térmica y la de combustión, la sencillez de su diseño, así como el de su instalación, operación y mantenimiento y a su vez, las bajas emisiones contaminantes.**
- **El impacto ambiental que pueda llegar a tener el uso del gas natural en una combustión de pulso es de suma importancia en el momento de existir una legislación ambiental en Guatemala ya que el industrial con equipos convencionales de generación de vapor sería obligado a un mejor control de las emanaciones de gases de combustión, involucrando una serie de costos ocultos que pueden llegar a ser tan altos como para reemplazar en definitiva equipos y combustibles (pulso y gas natural, respectivamente).**
- **La baja emisión de NOx y CO en un sistema de combustión de pulso con gas natural se debe básicamente a:**
 - **La pre-mezcla del aire de combustión con el combustible**
 - **Al ciclo de presiones, ya que los productos de combustión regresan a la zona de combustión para enfriar la llama.**
- **Debido a la naturaleza acústica de la combustión de pulso, las presiones de diseño son limitadas por la capacidad de aislamiento que pueda dársele al equipo en las áreas de alimentación de aire de combustión y del escape (o venteo).**

XIV. BIBLIOGRAFIA

- 1. EQUIPOS INDUSTRIALES: Guía Práctica para reparación y mantenimiento. 1990. McGraw Hill. 3era. Edición. México.**
- 2. GAS EN LATINOAMERICA: BUEN PORVENIR. Revista Petróleo Internacional. enero-febrero 1998.**
- 3. Geankoplis, Christie J. PROCESOS DE TRANSPORTE Y OPERACIONES UNITARIAS.1995. CECSA. 2ª. Edición. México.**
- 4. Griffith, J.C. and Weber, E.J. THE DESIGN OF PULSE COMBUSTION BURNER.**
- 5. Himmelblau, David M. 1988. BALANCES DE MATERIA Y ENERGIA. Prentice Hall Hispanoamericana. 4ta. Edición. México.**
- 6. Kern, Donald Q. 1986. PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR. Cía. Editorial Continental, S.A. de C.V.**
- 7. McCabe, Warren and Julian C. Smith. 1976. UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING. Section 3. Heat Transfer and its applications. McGraw-Hill Book Co. 3rd. edition. U.S.A.**
- 8. Perry, Robert H. 1992. MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO. Tomo III. McGraw-Hill. 3era. Edición. México.**
- 9. Proyecto: Construcción Gasoducto Mexico-1998. Ministerio de Energía y Minas. Guatemala.**
- 10. Pulse Combustion: A new approach. Heating, Piping, Air Conditioning. January, 1989.**
- 11. Pulse Combustion improves industrial process equipment. Conditioning, Heating & Refrigeration news. December, 1990.**
- 12. Severns, W.H., H.E. Degler y J.C. Miles. 1989. LA PRODUCCION DE ENERGIA MEDIANTE EL VAPOR DE AGUA, EL AIRE Y LOS GASES. Editorial Reverte, S.A. 6a. edición. México.**
- 13. Smith, J.M. and H.C. Van Ness. 1989. INTRODUCCION A LA TERMODINAMICA DE LA INGENIERIA QUIMICA. McGraw-Hill. 4ª. Edición. México.**

XV. ANEXOS

ANEXO 1

MEDIDAS DE SEGURIDAD

ADVERTENCIAS GENERALES

Este tipo de calderas no tienen piloto. Esta equipada con un dispositivo de ignición eléctrico que automáticamente prende el quemador. Nunca debe tartarse de prender el quemador manualmente.

Antes de operar la caldera debe de olerse los alrededores del área de la caldera (gas). Debe de olerse cerca al piso ya que algunos gases son más pesados que el aire y pueden asentarse en el piso.

SI EN CASO SE SIENTE OLOR A GAS

1. No tratar de prender ningún dispositivo eléctrico.
2. No tocar cualquier interruptor eléctrico: no utilizar ningún teléfono del local.
3. Llamar inmediatamente al suplidor de gas de un teléfono vecino. Seguir las instrucciones del suplidor del gas.
4. En caso de no localizar al suplidor de gas, debe llamarse a los bomberos.
5. Utilizar la mano para abrir la llave de control de gas. Nunca debe utilizarse herramientas. Si la llave no abre manualmente, debe de llamarse al servicio técnico calificado ya que el forzarla o tratar de repararla puede resultar en incendio o explosión.

ANTES DE RETIRARSE DE LA INSTALACION

1. Chequear todos los controles para asegurarse que estan operando apropiadamente. Subir y bajar varias veces la temperatura de operación de la caldera en el termostato.
2. Chequear el circuito de ignición: Cuando la caldera esta operando, desconectar el sensor de llama de prueba (120 V) de la respectiva terminal del panel de control automático.
3. La válvula de gas debe cerrarse y la unidad purgar. Apagar la fuente de poder y reconectar el sensor.
4. Asegurarse que la instalación cumple con todos los códigos y normas del caso.

MEDIDAS ESPECIFICAS

NOTA

- La concha de la caldera debe ser instalada de tal forma que los componentes del sistema de ignición estén protegidos de agua durante la operación y el servicio de la caldera.

NOTA

- La caldera de combustión de pulso no deber ser colocada directamente al piso de concreto dada la transferencia de vibraciones. Para la instalación cercana a áreas "sensitivas", tales como oficinas, salón de clases, cuartos de hospitales, etc., deben utilizarse monturas de resorte, las cuales se colocan debajo de cada esquina de la caldera como puntos de apoyo.

PRECAUCION

- La descarga de la valvula de alivio debe colocarse de tal forma que no ocasione escándalo al personal debido al repentino sónido que ésta produce al trabajar.

ADVERTENCIA

- Ningún tipo de válvula o tapón debe ser colocado entre los siguientes tramos:
 1. La válvula de alivio de seguridad y la caldera
 2. En la tubería de descarga entre la válvula de alivio y la caldera
 3. En la tubería de descarga entre la válvula de alivio y la atmósfera.De lo contrario, podría ocasionarse una explosión accidental por sobre presión.

NOTA

- La tubería de PVC de la entrada debe ser ensamblada con cemento para que quede hermética. Esto garantiza que el aire de alimentación no se contamine con el aire del cuarto de calderas.

PRECAUCION

- Algunos jabones que se utilizan para el chequeo de fugas son corrosivos para cierto tipo de metales. Toda la tubería debe de enjuagarse con agua limpia después de concluir el chequeo de fugas.

ADVERTENCIA

- No utilizar fósforos, candelas, llamas u otra fuente de ignición para chequear fugas de gas.

ADVERTENCIA

- No se pretenda arrancar la caldera para hacer un chequeo eléctrico si ésta no esta llena de agua y purgada. Una caldera arrancada en seco ocasionará un daño serio a la misma y puede resultar en daños serios a la propiedad o al personal.

PRECAUCION

- Los cementos en presentación de solventes para la tubería plástica son líquidos inflamables que deben permanecer lejos de cualquier fuente de ignición. Debe mantenerse una ventilación apropiada para reducir el peligro y minimizar la inhalación de vapores del solvente. Evitar el contacto del cemento con la piel y los ojos.

PRECAUCION

- Los codos y coplas pueden tener finales filosos. No debe utilizarse las yemas de los dedos para aplicar el sellantes.

PRECAUCION

- Utilizar ropa protectora adecuada al manejar la sosa cáustica. **NO DEBE PERMITIRSE** que la sosa cáustica entre en contacto con la piel.
- La sosa cáustica es un producto altamente alcalino y no es compatible con el bronce, aluminio, cobre o sus aleaciones.

NOTA

- Nunca utilice la caldera si cualquier parte de ella ha estado bajo agua. Inmediatamente debe de contactar técnicos de servicio calificado para inspeccionar la caldera, reemplazar cualquier parte del sistema de control y/o de los controles de gas que han estado bajo agua.

NOTA

- La bomba operara continuamente hasta que el agua alcance el nivel correcto en la caldera. Este nivel es aproximadamente el centro de la mirilla de vidrio.

PRECAUCION

- Si ocurriera un sobrecalentamiento o el suministro de gas cae, no debe de apagar o desconectar el suministro eléctrico a la bomba. En lugar de ello, debe suspenderse el suministro de gas de la caldera externamente.

NOTA

- Si la caldera se opera automáticamente bajo un horario, debe realizarse la purga al final del día.

ADVERTENCIA

- Siempre debe mantenerse el área de la caldera limpia y libre de materiales combustibles, gasolina u otros vapores y líquidos inflamables.

NOTA

- Si por alguna razón, la entrada de aire o la tubería de escape es desarmada, debe volver a armarse de acuerdo con el procedimiento adecuado de instalación.

ANEXO 2

GUIA DE PROBLEMAS Y RESPUESTAS

La siguiente es una guía que puede ayudar en diagnosticar y corregir problemas menores en la caldera. De cualquier forma debe utilizarse siempre con el diagrama eléctrico. Para cualquier otra asistencia, es mejor consultar al proveedor.

PROBLEMA	CAUSA	CHEQUEAR
Falla en el arranque o purga	Suministro de energía	Chequear los fusibles y flipones. Reiniciar o reemplazarlo.
	Fallo en el interruptor del aire	Tratar de ajustar sensibilidad del interruptor o reemplazarlo.
	Interruptor de aire desalineado	Realinear el niple de tubería de ¼".
	Falla en el ventilador	Chequear la operación del ventilador. Reemplazar si es necesario.
	Control principal	Chequear la tierra física o el control. Reemplazar el control si es necesario.
	Conexión del aire de entrada	Chequear si hay bloqueo en la línea de aire de entrada y removerla.
	Termostato	Si es parte del sistema, chequear si hay algún desajuste o daño al termostato.
	Candela (bujía)	Chequear si se ha formado carbón, humedad, roturas en la porcelana. Chequear que el claro sea apropiado (0.050" a 0.060" en marca Champion). Limpiar o reemplazar si es necesario.
	Fallo en el control de nivel de líquido	Chequear si hay potencia en las terminales 2 y 4 cuando la mirilla muestre el nivel bajo. Si hay potencia en estas terminales, el control está dañado y debe reemplazarse.
	Pérdida de conexión eléctrica	Chequear conexiones en todos los componentes.
	Control de presión	Desconectar el suministro de energía al controlador. Desconectar los alambres del controlador. Conectar un potenciómetro entre las terminales. Setear al mínimo el controlador. El interruptor deberá funcionar o interrumpirse. Repetir de nuevo. Si el control opera inapropiadamente debe reemplazarse.
	Calibración del Control de Presión	Chequear que la presión de operación del control esté calibrada más alta que la de la caldera.
	Reiniciar el interruptor	Apagar el interruptor, esperar 5 segundos y luego encenderlo de nuevo. Consultar los manuales.

	Tubo desconectado	Chequear si el tubo que va al housing de la válvula de aire está bien conectado.
Fallo en la llama	Suministro de energía	Chequear fusibles o flippers. Reiniciar o reemplazar, según se necesite.
	Control principal o cerebro electrónico	Chequear la tierra física o el control. Reemplazarlo si es necesario
	Prueba en el interruptor de llama	Chequear el ajuste del interruptor No. 2 de presión (de seguridad). Debe estar seteada en 1.5" de columna de agua. Reemplazar si es necesario.
	Termostato	Chequear si hay un mal ajuste en el termostato o si está dañado.
	Conexión eléctrica mala	Chequear conexiones en todos los componentes.
	Toma bloqueada	Chequear la presión seteada en el interruptor No. 1, corroborar el dato con el manual.
	Flappers de gas	Chequear si el flapper en el plato de la válvula de gas está puesto correctamente (cubriendo todos los agujeros).
	Línea de venteo bloqueada	Chequear si hay algún bloqueo en la tubería de venteo y removerlo.
Combustión pobre	Flappers de aire	Chequear si los flapper en el plato de la válvula de aire están puestos correctamente (cubriendo todos los agujeros)
	Flappers de gas	Chequear al igual que los flappers de aire
	Entrada de aire bloqueada	Chequear si hay algún bloqueo en la línea de entrada y removerla.
Fuegos en la caldera	Línea de venteo bloqueada	Chequear si hay algún bloqueo en la línea de venteo y removerla.
	Válvula de gas rota	Cambiar la válvula de gas
	Mal tiempo de purga	Chequear que el control principal purgue 35 segundos. Si el tiempo es menor, reemplazar el control.
	Candela (bujía)	Chequear que la bujía este libre de carbón, humedad o roturas en la porcelana. Chequear que el claro sea apropiado (0.050" a 0.060" en marca Champion), limpiar o reemplazar.
La caldera no mantiene la presión	Suministro de gas	Chequear la presión en el sistema de gas. Si es bajo, contactar al proveedor. Deberá ser de 7"WC. Chequear la corriente en la válvula de gas con un amperímetro. Reemplazarlo si está dañado. Chequear el seteo del regulador de gas y reajustar si es necesario.
	Control de presión	Desconectar todo el suministro de energía al controlador. Desconectar los alambres del controlador. Poner un

		potenciómetro entre los interruptores terminales. Setear el controlador a lo mínimo. El interruptor deberá funcionar o interrumpirse. Repetir la operación. Si el controlador no opera apropiadamente, debe reemplazarse.
	Incrustraciones en la caldera	Consultar al distribuidor autorizado o proveedor de la caldera
	Fuga en trampas de vapor	Chequear las trampas, limpiarlas o reemplazarlas según sea necesario.
El nivel de agua de la caldera sube y baja.	Fuga en trampas de vapor	Chequear trampas, limpiar o reemplazar según sea necesario.
	Perc (La caldera tiene solvente limpiador)	Limpiar la caldera con soda limpiadora, según las instrucciones del manual. Inspeccionar el sistema de vapor de otros contaminantes.
	Incrustraciones o depósitos de calcio	Contactar al distribuidor autorizado o proveedor de la caldera
	Muchos compuestos en el sistema de tratamiento de agua	Vaciar el tanque de retorno, lavar el sistema o parar el tratamiento por una semana.
	Bomba cavitando	Permitir que el sistema se enfríe. Chequear las trampas de vapor y chequear que las líneas de retorno no estén aisladas. Chequear la temperatura del tanque de retorno, si es arriba de 180°F, ocurrirá obstrucción de vapor en la bomba.
	Alto pH	Alternar el uso de agua cruda con el suavizador.
	Carga alta	Chequear los hp total que requiere el equipo con los hp usándose en la caldera. Disminuir la carga del equipo utilizada.
	Caldera nueva	Limpiar la caldera según instrucciones del manual.
Caldera acarrea agua con el vapor	Trampas de vapor	Chequear, limpiarlas o reemplazarlas
	Altos compuestos	Vaciar el tanque de retorno, lavar el sistema y parar el tratamiento por una semana.
La bomba no corta el vapor	Retransmisor quemado	Reemplazar el retransmisor (relay)
	Conexión de tierra física	Chequear que esté bien conectada y limpia
	Tubería de la columna de agua bloqueada	Limpiar la tubería de la columna de agua.
La bomba trabaja pero no hombea agua a la caldera	Bomba cavitando	Chequear que las trampas de vapor no estén dañadas, asegurarse que las líneas de retorno no estén aisladas y que la temperatura del tanque no esté por encima de 180°F. Reducir la temperatura del tanque.
	Ajuste del impelente (rotor)	Chequear el ajuste en el manual

	Baja presión en la bomba	Repararla
	Niple de alimentación de agua bloqueado	Chequear y limpiar si es necesario
Bomba de agua no trabaja a tiempo	Mal contactor	Chequear si el contactor ha sido prendido. Chequear la corriente. Reemplazar si es necesario
	Bomba dañada	Chequear la energía que va a la bumba. Si hay energía pero el motor no funciona, reemplazar el motor.
Presión baja de combustible	Regulador de presión de tamaño inapropiado o defectuoso	Chequear y reemplazarlo

ANEXO 3 CALCULOS Y RESULTADOS

1. Cálculos de consumo de combustible anual.

a) combustión de pulso de gas natural

$$\frac{50 \text{ bhp}}{\text{h}} * \frac{33,500 \text{ BTU}}{\text{bhp}} * \frac{1}{0.96} * \frac{\text{US\$ } 0.3877^3}{100,000 \text{ BTU}} = \text{US\$ } 6.7656/\text{h}$$

Si se asumen 8 horas de trabajo, 6 días a la semana y 52 semanas al año, ésto hacen:

$$\frac{\text{US\$ } 6.7656}{\text{h}} * \frac{8 \text{ horas}}{\text{día}} * \frac{6 \text{ días}}{\text{semana}} * \frac{52 \text{ semanas}}{\text{año}} = \text{US \$ } 16,884.34$$

b) caldera convencional: (poder calorífico del búnker: 142,000 BTU/gal)

$$\frac{50 \text{ bhp}}{\text{h}} * \frac{33,500 \text{ BTU}}{\text{bhp}} * \frac{1}{0.85} * \frac{\text{galón}}{142,000 \text{ BTU}} * \frac{\text{Q. } 3.577^4}{\text{galón}} * \frac{\text{US\$ } 1.00}{\text{Q. } 6.80}$$

US\$ 7.30

Si se asumen 8 horas de trabajo, 6 días a la semana y 52 semanas al año, ésto hacen:

$$\frac{\text{US\$ } 7.300}{\text{h}} * \frac{8 \text{ horas}}{\text{día}} * \frac{6 \text{ días}}{\text{semana}} * \frac{52 \text{ semanas}}{\text{año}} = \text{US \$ } 18,220.58$$

³ Precio tomado del estudio realizado por el Ministerio de Energía y Minas.

⁴ Precio cotizado en Texas Petroleum Co. Enero 99

2. Tratamiento de agua: Suavizador

- a) Con una dureza promedio de 100 ppm en la ciudad de Guatemala
 Un caballaje requerido de 350 bhp para la generación con gas natural
 Un retorno del 50% del condensado,
 Se requieren:

$$350\text{bhp} \quad \times \quad \frac{34.5 \text{ lb-h agua}}{\text{h}} \quad = \quad 12,075 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \text{ vapor-hh bhp}$$

1 libra de vapor = 1 libra de agua, entonces:

$$12,075 \text{ lb/h} \quad \times \quad 1 \text{ gal}/8.337 \text{ lb} \quad = \quad 1,778.36 \text{ galón/h}$$

$$1,778.36 \frac{\text{gal}}{\text{h}} \quad \times \quad \frac{50 \text{ gal nuevos}}{100 \text{ gal}} \quad = \quad 724.18 \text{ galón de agua nueva/h}$$

por lo que:

$$100 \text{ ppm} \quad \times \quad \frac{1 \text{ grano/gal}}{17.1 \text{ ppm}} \quad = \quad 5.85 \text{ granos/gal}$$

Con esto:

$$724.118 \text{ gal/H} \quad \times \quad 5.85 \text{ granos/gal} \quad = \quad 4,236.45 \text{ granos /h}$$

Con 8 horas diarias, el consumo de granos es de:

$$4,236.45 \text{ granos/h} \quad \times \quad 8 \text{ horas} \quad = \quad 33,891 \text{ granos/diario}$$

1 pie³ regenerará 30,000 granos, por lo que se requieren en este caso 1.2 pie³

- b) Con una dureza promedio de 100 ppm en la ciudad de Guatemala
 Un caballaje requerido de 400 bhp para la generación con aceite No. 6
 Un retorno del 50% del condensado,
 Se requieren:

$$400\text{bhp} \quad \times \quad \frac{34.5 \text{ lb-h agua}}{\text{h bhp}} \quad = \quad 13,800 \frac{\text{lb}}{\text{h}} \text{ va por-h}$$

1 libra de vapor = 1 libra de agua, entonces:

$$13,800 \text{ lb/h} \quad \times \quad 1 \text{ gal}/8.337 \text{ lb} \quad = \quad 1,655.27 \text{ galón/h}$$

$$1,655.27 \frac{\text{gal}}{\text{h}} \quad \times \quad \frac{50 \text{ gal nuevos}}{100 \text{ gal}} \quad = \quad 827.64 \text{ galón de agua nueva/h}$$

por lo que:

$$100 \text{ ppm} \times \frac{1 \text{ grano/gal}}{17.1 \text{ ppm}} = 5.85 \text{ granos/gal}$$

Con esto:

$$827.64 \text{ gal/H} \times 5.85 \text{ granos/gal} = 4,841.67 \text{ granos /h}$$

Con 8 horas diarias, el consumo de granos es de:

$$4,841.67 \text{ granos/h} \times 8 \text{ horas} = 38,733.36 \text{ granos/diario}$$

1 pie³ regenerará 30,000 granos, por lo que se requieren en este caso 1.29 pie³

4. Comparación de requerimientos de caballaje según eficiencias:

Se asumirá una demanda de calor hipotética de 10×10^6 But/hora tomando como combustible a comparar al aceite No. 6.

3. Cálculos de bhp requeridos según eficiencia garantizada por los fabricantes de dos tipos de caldera a) convencional con aceite No. 6 y b) combustión de pulso de gas natural:

a) Se requieren quemar los siguientes Btu/h para una eficiencia del 85%

$$10 \times 10^6 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \times \frac{1}{0.85} = 11,764,705.90 \text{ Btu/h}$$

lo que hacen:

$$\frac{11,764,705.90 \text{ Btu/h}}{33,500 \text{ Btu/h/hp}} = 351.18 \text{ bhp}$$

El caballaje a elegir por rangode fabricación debería ser de: 400 bhp

b). Se requieren quemar los siguientes Btu/h para una eficiencia del 96%:

$$10 \times 10^6 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \times \frac{1}{0.96} = 10,416,666.70 \text{ Btu/h}$$

lo que hacen:

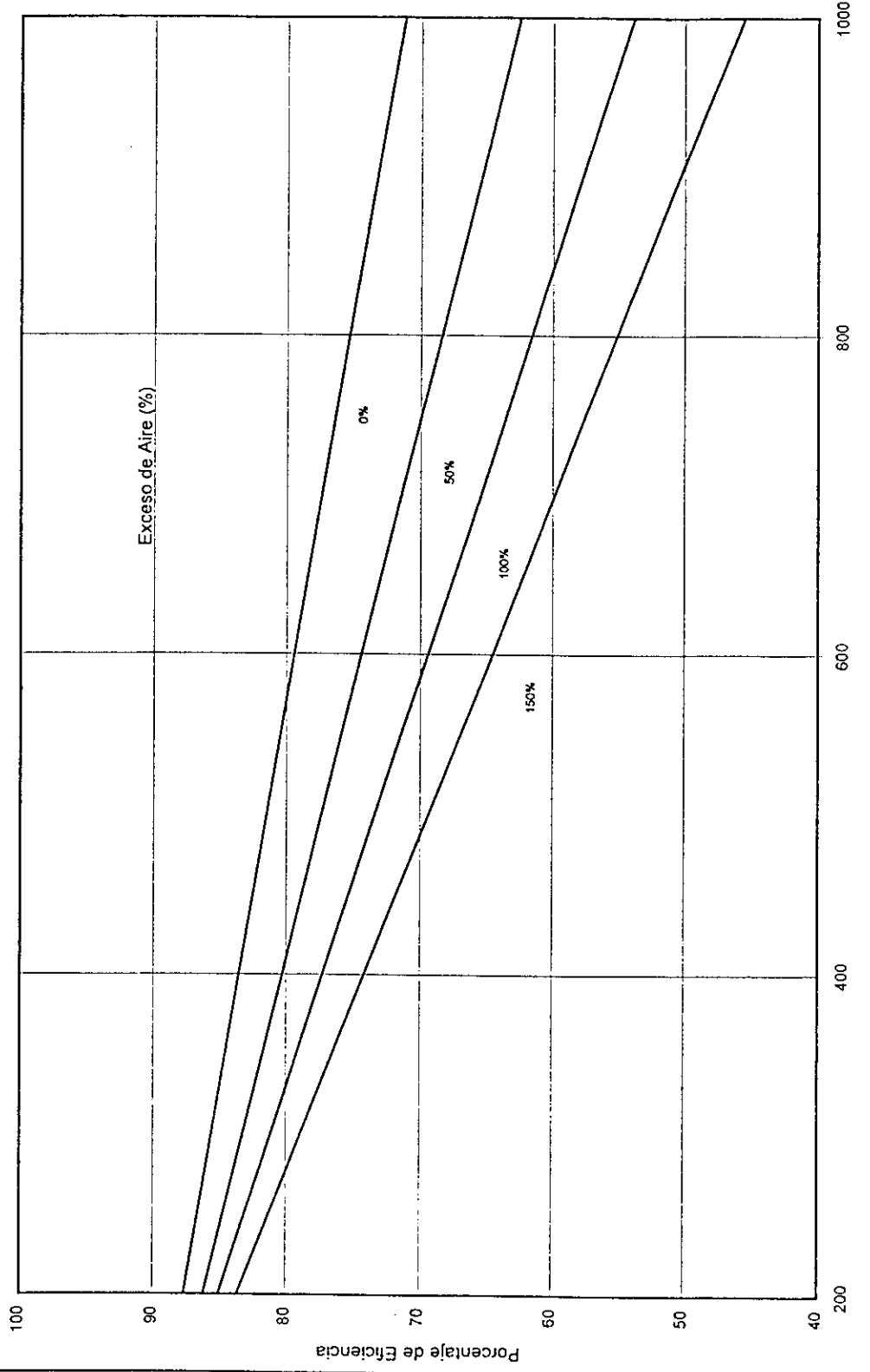
$$\frac{10,416,666.70 \text{ Btu/h}}{33,500 \text{ Btu/hp}} = 310.95 \text{ bhp}$$

El caballaje a elegir por rango de fabricación debería ser de: 350 bhp

A partir de 150 bhp, los fabricantes de calderas usualmente las hacen de 50 en 50 bhp.

Gráfica No. 1

Eficiencia de Calderas con Temperatura de Gases de Combustión y Varios Niveles de Exceso de Aire



Gráfica utilizada para obtener la eficiencia de la caldera dado el exceso de aire y la temperatura de los gases de combustión
Fuente: Steam Boiler Operating Efficiency