

## CALENTAMIENTO DE FLUIDOS CON TUBOS INMERSOS: UNA ALTERNATIVA EFICIENTE PARA USO A NIVEL INDUSTRIAL

Jaime A. Hernández Velez<sup>1</sup>, Jaime H. Cortes Torres<sup>2</sup> y Andrés Amell Arrieta<sup>3</sup>

### Resumen

Debido a la introducción del gas natural como combustible a nivel comercial e industrial, es conveniente la asimilación de nuevas tecnologías que permitan su uso eficiente, económico y seguro. Se presenta el sistema de tubos inmersos para calentamiento de fluidos con potenciales aplicaciones industriales y comerciales. El sistema consiste en un tubo metálico por dentro del cual circulan gases calientes producto de la combustión. La combustión es sostenida por un quemador atmosférico de premezcla que funciona a medianas y altas presiones de suministro de gas. Con este sistema se pueden alcanzar eficiencias del 68% en procesos que requieran la elevación de temperatura de fluidos (alcanzándose temperaturas de hasta 100°C en fluidos acuosos y de hasta 300°C en aceites). A continuación se presentan los parámetros fundamentales que intervienen en el diseño y montaje de este sistema de calentamiento.

### Abstract

Due to gas natural introduction as fuel in commercial and industrial applications, it's important know and use new technologies for efficiency, economic and safety use of this fuel. It's present immersion tube heating technology for commercial and industrial applications. The system is a metallic tube immersed on the bottom of a tank and inside of it, high temperature fumes are circulating. A atmospheric high pressure burner (medium and high supply pressure up 100mbar to 1 bar) maintain the combustion inside of it. This system can reach 68% efficiency and can rise high fluid temperature, up 100°C to 300°C. Next, you can find the principal feature that are involve in design and assembling of this heating system.

### 1. Introducción

Los recursos hídricos en nuestro país se han perfilado como la fuente para la generación de energía eléctrica durante muchos años, fuente motriz primaria no solo en las industrias, sino en millones de hogares. Sin embargo los cambios climáticos que se hacen presente a lo largo y ancho del planeta y en especial en Colombia, hacen que la confiabilidad en este recurso

fluctúe a lo largo del año; recordemos el apagón vivido en 1992 producido por el fenómeno del Pacífico.

En la actualidad, los yacimientos de gas natural, junto con el programa de distribución y masificación de este combustible, proporciona una alternativa que no presenta problemas de

<sup>1</sup> Ing. Mecánico. Miembro del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Universidad de Antioquia. Dirección: Ciudad Universitaria. Bloque 20, Oficina 435. E-mail: jaherman@udea.edu.com

<sup>2</sup> Ing. Mecánico. Miembro del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Universidad de Antioquia.

<sup>3</sup> Ing. Mecánico. Coordinador del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía. Universidad de Antioquia.

suministro al no verse afectado por ningún fenómeno atmosférico y que ofrece beneficios a la hora de realizar un balance económico y energético con los sistemas convencionales de energía, sumado a las ventajas ambientales que representan su uso. Sin embargo el empleo eficiente y seguro de este energético requiere el acceso a otros tipos de tecnología, tanto a nivel industrial como residencial y comercial. (AMELL et al, 1996).

Dadas estas condiciones, la tecnología del calentamiento de fluidos con tubos inmersos empleando quemadores atmosféricos de gas a alta presión, se puede perfilar como una opción eficiente y económica. Dicho sistema de calentamiento se caracteriza por la localización de la combustión en el seno mismo del líquido a calentar tal como se ve en la Figura 1. Como principio fundamental se observa la transferencia de calor entre los productos de la combustión y las paredes del tubo inmerso, y este a su vez transfiere calor al fluido a calentar. Según esto podemos deducir las siguientes ventajas de este sistema:

- El calor suministrado para elevar la temperatura del líquido se transfiere mucho más rápido al estar en contacto directo con los tubos fabricados de un material conductor.
- El fluido a ser calentado no se contamina con los humos de la combustión.
- Las pérdidas desde la fuente de alta temperatura son reducidas, debido a la ubicación del quemador y su llama dentro del tubo.
- Bajos costos de montaje y mantenimiento de la instalación.
- Fácil recolección de humos.
- Por el empleo de quemadores atmosféricos de alta presión, no requiere un gasto de energía externo para suministrar aire para la combustión ó para evacuar los humos (ventilador ó extractor).

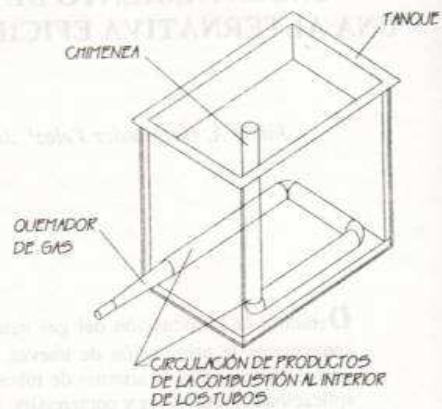


Figura 1. Esquema de un sistema de calentamiento con tubos inmersos

## 2. Configuración del sistema

### 2.1 Tubos inmersos

Se podría decir que los tubos son el medio a través del cual el calor se transfiere al líquido. Partiendo de esto, el comportamiento físico de este sistema esta regido por una ecuación semi - empírica la cual comenzó a deducirse a mediados de 1944 por la Asociación Americana de Gases (A.G.A.), siendo este el primer estudio serio que se realizó al respecto (AGA, 1944).

En 1958 científicos ingleses obtuvieron la ecuación que mas se acercó al comportamiento de este sistema. En dicha ecuación se presenta la eficiencia térmica del proceso como función única de la geometría de la instalación: longitud y diámetro de tubería. Dicha ecuación se define como:

$$\eta = 80.9 - 28.3 \exp(-0.24 L_e/d) \quad (1)$$

Donde:

$\eta$ : eficiencia térmica [%].

$L_e$ : longitud efectiva [pie].

$d$ : diámetro del tubo [pulg].

Esta expresión desvirtuó las ecuaciones anteriores, ya que eran imprecisas al comparar sus resultados con datos tomados de instalaciones reales. El desarrollo de la ecuación (1) partió de la deducción de una expresión básica del comportamiento del sistema, empleando la teoría de mecánica de fluidos y transferencia de calor, para luego unirla mediante un análisis de regresión con datos medidos en instalaciones existentes (PATRICK, THORTON, 1958) y así obtener una ecuación semi-empírica.

Del comportamiento de las dos variables implicadas en la ecuación (1) se encontró que la eficiencia es más sensible a cambios en la dimensión del diámetro que a cambios en la longitud del tubo.

La eficiencia aumenta con disminuciones en el diámetro y con aumentos en la longitud del tubo. Sin embargo, no se puede pensar en aumentos indefinidos de la longitud debido a las dimensiones geométricas que posee el tanque ó depósito donde se hará la instalación. Tampoco la disminución indefinida del diámetro es solución al requerimiento de eficiencia; existe una relación entre el diámetro de tubo y la potencia del quemador máxima que puede introducirse dentro de este.

No obstante, si las dimensiones geométricas del tanque permitiesen un aumento de eficiencia por aumento en longitud, la gráfica de la ecuación (1) enseña que existe también un valor para el cual, los aumentos de esta no representan diferencias apreciables en la eficiencia térmica (aproximadamente por encima de 60 pies de longitud efectiva). Ver Figura 2.

En la Tabla 1 se puede observar la relación entre potencia térmica de entrada y diámetro de tubo para quemadores atmosféricos y quemadores con aire soplado (ATIG, France, 1983).

## 2.2 Quemador atmosférico de gas a alta presión

En términos generales los quemadores de inducción de aire atmosférico de alta presión se distinguen de los quemadores de baja presión debido a la obtención de mayores valores de potencia gracias a la alta presión de alimentación del gas y a su vez de una disminución en el tamaño. La Tabla 2 muestra valores de potencia térmica y caudal de gas a diferentes condiciones de presión de suministro y diámetro de inyector. Las potencias oscilan entre 4 y 50 kW para gas natural, y

entre 7 y 76 kW para GLP.

**Tabla 1. Relación potencia del quemador diámetro de tubería**

Diámetro del Tubo (pulg)	Quemador Atmosférico (kW)	Quemador Aire Forzado (kW)
2	-	30
3	23	70
4	38	110
5	58	180
6	76	250

La inducción del gas a alta presión, le confiere un mayor arrastre de aire y unas condiciones notablemente diferentes para la estabilización de la combustión. Las principales diferencias de estos dos tipos de quemadores se presentan en la Tabla 3.

Como partes principales de un quemador de inducción de aire atmosférico podemos señalar: el mezclador, en el cual se homogeniza una mezcla inflamable de gas y aire, y una cabeza donde se debe garantizar la estabilización del frente de llama para una amplia gama de potencias y presiones de suministro.

El mezclador gracias a su geometría venturi (convergente - divergente) aprovecha al máximo la energía cinética del gas a presión suministrado a través de un inyector para arrastrar el aire del ambiente. En la Figura 3 se presenta el esquema de arrastre de aire de este tipo de quemadores.

Como características de funcionamiento estos quemadores operan bajo presiones de suministro desde 0.1 hasta 0.8 bares para el rango de mediana presión y desde 0.8 bares en adelante para el rango de alta presión.

Su uso para este tipo de sistemas de calentamiento ofrece la ventaja que tienen en cuanto al arrastre de una buena cantidad de aire, lo que se ve representado en ratas de aireación mayores ó iguales a 1.

Este parámetro es fuente de beneficios en el análisis de los humos de la combustión, dado que se presentan bajos niveles de emisiones de CO (significa una combustión completa, sin desperdicio de combustible) y niveles de CO<sub>2</sub> normales.

La metodología del diseño óptimo de estos quemadores y sus respectivos ensayos de rangos de ratas de aireación arrastradas, monitoreo de gases de combustión, eficiencia de combustión, flexibilidad de

trabajo a diferentes presiones de suministro, incidencia de los parámetros geométricos y de flujo en la rata de aireación y emisiones y el fenómeno de intercambiabilidad de gases, es estudiado en la actualidad por el Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas de la Universidad de Antioquia (AMELL et al, 1999).

**Tabla 2. Potencias y caudales obtenidos en quemadores atmosféricos de mediana y alta presión, según la presión de suministro, el diámetro del inyector y el gas utilizado**

<i>Presión Suministro</i> [Bares]	<i>Diámetro</i> <i>Inyector [mm]</i>	<i>Potencia [kW]</i>		<i>Caudal [m<sup>3</sup>(n)/hr]</i>	
		<i>Gas Natural</i>	<i>G.L.P.</i>	<i>Gas Natural</i>	<i>G.L.P.</i>
0.4	D1: 0.8	4.84	7.47	0.48	0.29
	D2: 1.0	7.56	11.66	0.76	0.46
	D3: 1.4	14.83	22.90	1.49	0.89
	D4: 1.8	24.52	37.75	2.46	1.48
0.8	D1: 0.8	6.67	10.00	0.67	0.39
	D2: 1.0	10.43	15.67	1.05	0.61
	D3: 1.4	20.45	30.74	2.05	1.21
	D4: 1.8	33.74	50.70	3.39	1.99
1.0	D1: 0.8	7.89	11.96	0.79	0.47
	D2: 1.0	12.32	18.70	1.23	0.73
	D3: 1.4	24.18	36.65	2.43	1.44
	D4: 1.8	39.90	60.45	4.00	2.38
1.5	D1: 0.8	9.85	15.19	0.99	0.59
	D2: 1.0	15.38	23.73	1.54	0.93
	D3: 1.4	30.17	46.60	3.03	1.83
	D4: 1.8	49.80	76.80	4.99	3.00

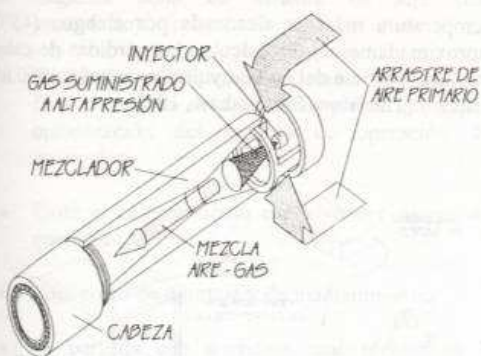


Figura 3. Arrastre de aire en un quemador atmosférico de mediana y alta presión

Tabla 3. Comparación entre quemadores atmosféricos de baja y alta presión

Parámetros	Baja Presión	Alta Presión
Presión de Suministro	<100 mbar	100-800mbar Media Presión >800 mbar Alta Presión
Para una potencia constante, el tamaño del quemador...	Aumenta	Disminuye
Costos de Fabricación	Mayores	Menores
Regulación y control del proceso (seguridad)	Normas Exigentes	Normas muy Exigentes.
Rata de aireación primaria	n<1	n>1
Campo de Aplicación	Residencial y Comercial	Industrial
Usos	Cocción de Alimentos Calentamiento de agua	Calentamiento de Fluidos

### 3. Cálculo de la potencia requerida por el quemador para un sistema de tubo inmerso

El cálculo de esta potencia se basa en la expresión de eficiencia térmica de la ecuación (1), pero expresando a su vez el requerimiento de calor del

proceso:

$$\eta = \text{Calor Proceso} / \text{Potencia Quemador} \quad (2)$$

Igualando las expresiones (1) y (2) se obtiene una ecuación en función del requerimiento térmico del proceso, potencia del quemador, longitud equivalente y diámetro del tubo.

El procedimiento comienza calculando el calor a proceso. Dependiendo del proceso debe existir un calor para suministrar al líquido y otro calor adicional, si se sumerge carga dentro de dicho líquido (Thornton, Robertshaw, 1965). La expresión general para calcular este calor es:

$$q = \frac{m \times c \times (T_f - T_i)}{t} \quad (3)$$

Donde:

- q: calor a proceso (el requerido para elevar la temperatura + el requerido para calentar la carga. Se calculan de la misma forma) [Btu/h].
- m: masa del líquido y/o carga, [lb].
- c: calor específico del líquido y/o carga, [Btu/lb.(F)].
- Tf: temperatura final, [°F].
- Ti: temperatura inicial, [°F].
- t: tiempo, [hr].

Adicional a este calor, se deben considerar unas pérdidas adicionales de calor por evaporación y por paredes. La eficiencia es un dato de entrada en la ecuación (2) y como se dijo anteriormente depende únicamente de las dimensiones geométricas de la instalación

### 4. Verificación de la eficiencia del calentamiento con tubos inmersos

Gracias a la construcción de un prototipo similar al esquema de la Figura 1, se pudieron efectuar una serie de ensayos buscando comparar la eficiencia del sistema calculada con la ecuación (1), es decir,

empleando solamente la geometría del tanque prototipo; y la eficiencia medida, midiendo el calor suministrado a la carga sobre la potencia térmica de entrada al sistema. Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El volumen de prueba debe cubrir la totalidad de los tubos y su valor será constante para la mayoría de las pruebas. El líquido a calentar será agua.
- El montaje del quemador debe permitir el acceso a una segunda zona de arrastre de aire, la cual servirá para complementar el aire arrastrado por el chorro de gas.
- Se emplearán dos diámetros de tubería (1 ½ y 2 pulgadas) para verificar su importancia en el cambio de la eficiencia.
- La temperatura del agua se aumentará en un gradiente constante de 20°C a partir de la temperatura ambiente medida en el tanque prototipo.
- Se va a monitorear la temperatura y la composición de los humos en la chimenea para determinar la eficiencia de la combustión (Amell et al, 1996); también se monitorea el porcentaje de O<sub>2</sub> en la premezcla para determinar los valores de rata de aireación primaria.
- Se mide el caudal de gas que se introduce al sistema con el fin de garantizar la potencia del quemador.
- El 80% de los ensayos se realizó con gas natural, preparado por la empresa AGAFANO, con un contenido de metano de 93%. Para el resto de las pruebas se empleo GLP comercial.

El montaje y los equipos utilizados para estos ensayos se ilustra en la Figura 4.

#### 4.1 Descripción del experimento

El tanque prototipo utilizado alberga una masa de agua igual a 129.8 libras, las cuales serán elevadas 20°C por encima de la temperatura ambiente. El tanque está recubierto en fibra de vidrio con un espesor de 1 pulgada; con este dato y con la

temperatura máxima alcanzada por el agua (45°C aproximadamente), se calculan las pérdidas de calor por la superficie del tanque y por las paredes (560.05 Btu/hr) (Thornton, Robertshaw, 1965).

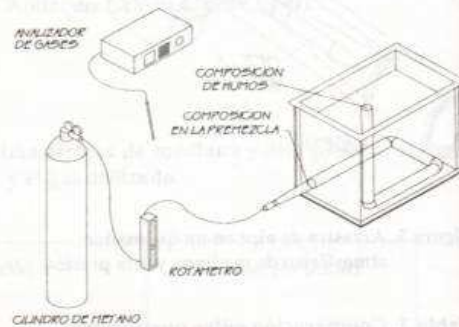


Figura 4. Esquema del montaje para los ensayos de verificación de eficiencia

Teniendo estos datos y reemplazando en la ecuación (3) se obtiene una expresión de la potencia del quemador en función del tiempo de calentamiento y de la eficiencia térmica del sistema.

$$Q_{QUEM.} = (4672.8 / t_{CALENT.} + 560.05) \times (1/\eta) \quad (4)$$

Como datos de diseño para los quemadores se consideraron eficiencias térmicas entre el 70 y 78% y para un tiempo crítico de calentamiento de 15 minutos se puede concluir que la potencia del quemador varía entre 7 y 8 kW, dato de partida para su cálculo y su dimensionamiento. (Hdez, Cortes, 1998). El cálculo y diseño geométrico de este quemador se realizó inicialmente con GLP, pero permite también el uso de gas natural como combustible, energético utilizado en los ensayos gracias a su limpia combustión y a su bajo índice de Woobe que permite un mayor de arrastre primario en la zona de inyección de combustible (Amell et al. 1996).

El acople del quemador en el tanque se aprecia en la Figura 5. Consiste de un elemento porta quemador, una brida que ajusta en el tanque por medio de pernos y una unión universal que permite el intercambio de tubos al interior del tanque. Este montaje permite las siguientes ventajas:

- Segunda zona de arrastre de aire (aire secundario).
- Facilita la estabilidad de la llama dentro del tubo, fácil encendido del quemador y fácil montaje y optimización del espacio de operación del quemador.
- Evita el calentamiento excesivo del cuerpo del quemador.
- Bajo costo de montaje y de mantenimiento.
- Se permite una medición mas precisa de la eficiencia térmica del sistema (la fuente de alta temperatura esta al interior de los tubos inmersos en agua).

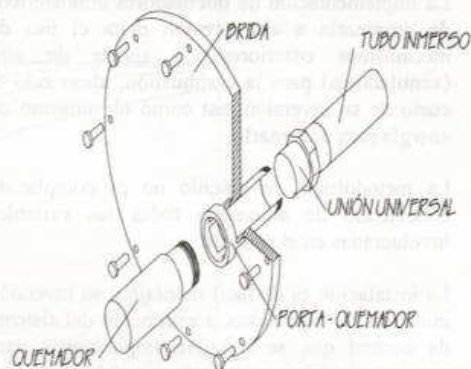


Figura 5. Montaje del quemador en tanque

## 5. Resultados obtenidos

Reemplazando la longitud del tubo dentro del tanque y el valor del diámetro en la ecuación (1), se obtienen que las eficiencias teóricas usadas fueron de 73.88% y 72.84% para los diámetros de 1½ y 2 pulgadas, respectivamente. Como se midió la potencia real del quemador (con el caudal de gas medido) y se tiene el valor del calor a proceso (ecuación 3) se calcula la eficiencia real; esta fue del orden de 67.76% y 66% para los diámetros de 1½ y 2 pulgadas. Se observa que la diferencia entre los valores teóricos y los experimentales no es considerable. En la Figura 6 se enseña la incidencia del diámetro del tubo en la eficiencia del sistema.

Las ratas de aireación primaria se mantuvieron entre el 1 y el 1.1. La rata de aireación secundaria se hizo importante cuando las condiciones de flujo (aumento en la presión de suministro) hacían caer la rata primaria. Lo anterior se presenta en la Figura 7 y en la Tabla 4.

Las emisiones monitoreadas fueron en promedio CO<sub>2</sub>: 11.5%, CO: 0.0%, CH<sub>4</sub>: 0.01% y O<sub>2</sub>: 1.5%; valores realmente aceptables dentro de las normas ambientales.

No obstante, se observaron diferencias entre las emisiones en función del gas empleado, aumentando en sus porcentajes cuando se empleó G.L.P. (específicamente las emisiones de CO). Las Figuras 8 y 9 ilustran un ejemplo.

Tabla 4. Influencia de las condiciones de presión de suministro ( $P_{sum}$ ) en las ratas de aireación primarias y secundarias

$\varnothing$ Tubo (pulg)	$P_{sum}$ (psi)	Aireación primaria	Aireación secundaria
1 ½	6	1.08	0.01
1 ½	12	1.05	0.03
1 ½	14.25	0.95	0.06
2	6	0.92	0.24
2	12	0.84	0.25
2	15	0.754	0.276

Vale la pena anotar que el porcentaje de aire secundario arrastrado no es importante en el aspecto de la combustión ya que el aire primario arrastrado es suficiente para una eficiente combustión y bajas emisiones; sin embargo esta zona es de vital importancia en el aspecto de estabilidad de llama dentro del tubo. El hecho de obstruir esta área trae como consecuencia el apagado inmediato del quemador dentro del tubo (Hdez, Cortes, 1998).

## 6. Conclusiones

El sistema de calentamiento con tubos inmersos representa una alternativa eficiente y de viable acceso a la industria actual, en particular por los siguientes aspectos:

- La implementación de quemadores atmosféricos de premezcla a alta presión evita el uso de mecanismos exteriores de aporte de aire (ventiladores) para la combustión, ahorrando el costo de su inversión, así como el consumo de energía para accionarlo.
- La metodología de cálculo no es complicada conociendo de antemano todas las variables involucradas en el proceso.
- La instalación es de fácil montaje y su inversión inicial es de bajo costo, a excepción del sistema de control que se requiera implementar para manejar el proceso vía potencia del quemador, regulando el caudal de gas a utilizar.
- El uso de gas como combustible y dadas las políticas actuales de distribución y masificación de este energético, hacen que este sistema sea más económico comparado con otros mecanismos convencionales de calentamiento, que emplean energía eléctrica (resistencias sumergidas).
- Las eficiencias térmicas medidas fueron del 68% y las calculadas del 73%.
- Las eficiencias de combustión alcanzadas fueron del orden de 85%.

### Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Vicerrectoría de Investigación, al Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI), y al Centro de Investigaciones Ambientales (CIA).

### Referencias

RESEARCH BULLETIN #24. AGA. "Research in Fundamentals of Immersion Tube Heating with Gas". Mar. 1944.

PATRICK E. A., THORNTON E. "Immersion Tube Heating of Aqueous Liquids". Gas Council Research Communication GC47. 1958.

CORTÉS T. J., HERNÁNDEZ V. J. "Calentamiento de Fluidos con Tubos inmersos". Tesis de Grado. Universidad de Antioquia. Nov. 1998.

ELÉMENTS DE CALCUL DES BRÛLEURS. Association Technique de l'industrie du Gaz en France (ATIG). Collection des Techniques Gazières. Calcul, Conception et Utilisation des Brûleurs Industriels a Gaz. 1983.

AMELL A., CORTÉS J., HERNÁNDEZ J. "Incidencia de los Parámetros Geométricos y de Flujo en la Rata de Aireación y Emisiones de CO en Quemadores Atmosféricos de Alta Presión". Reporte del proyecto. Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas. CODI y UdeA. Sep. 1999.

THORNTON E., ROBERTSHAW G. "Thermal Design of Gas Fired Tubular Immersion Heaters". Journal of the Institute of Fuel. Vol 58. 1965.

AMELL A., GIL E., MAYA R. "Diagramas de Combustión y Eficiencia Teórica de los Gases Colombianos". Reporte del Proyecto. Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas. CODI y U de A. 1996.

AMELL A., BARRAZA L., GOMEZ E. "Tecnología de la Combustión de los Gases y Quemadores Atmosféricos de Premezcla". Módulo 1: Propiedades y Clasificación de los Combustibles Gaseosos. Centro de Extensión Académica, CESET. U de A. 1996.



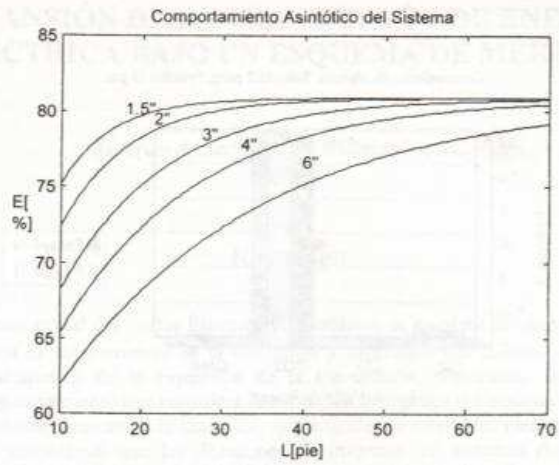


Figura 2. Gráfica de la Ecuación de Eficiencia. Las eficiencias medidas se encuentran un 8% por debajo de los valores calculados teóricamente

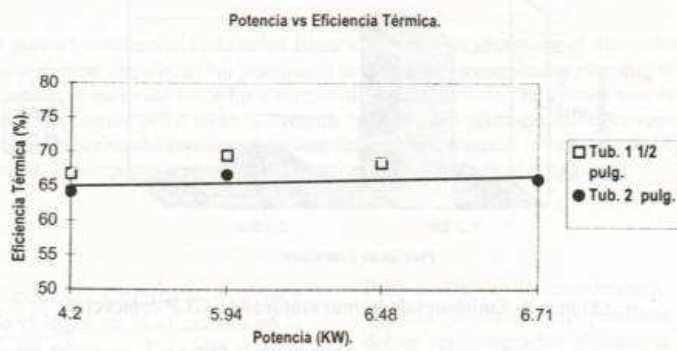


Figura 6. Potencia vs eficiencia térmica

PRESIÓN DE SUMINISTRO vs RATA DE AIREACIÓN PRIMARIA.

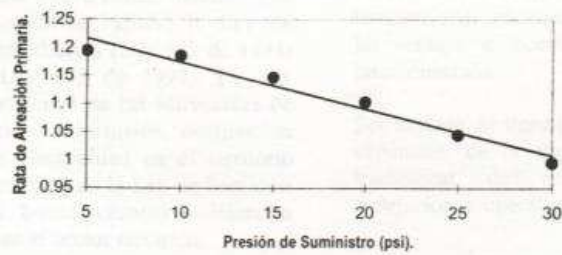


Figura 7. Caída de la rata de aireación primaria con el aumento en la presión de suministro

Composición de Humos. Tubería 2 pulg. Presión 15 psi.

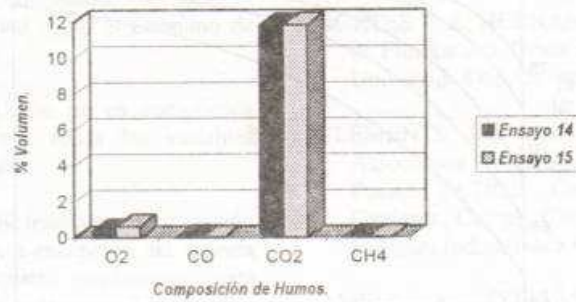


Figura 8. Emisiones de humos empleando gas natural preparado

Composición de Humos. Tubería 2 pulg. GLP. Rango de Presiones.

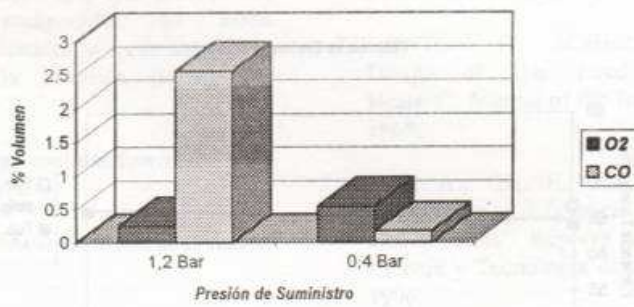


Figura 9. Emisiones de humos empleando GLP comercial

Referencias

RESEARCH IN L.L. STAN 194, "The Effect of  
 Proportions of Inertness on the  
 Gas", NBS, 1961.

