

Efecto de la altitud sobre el desempeño de los calentadores de paso en Colombia



ALEXANDER VALENCIA ALVARÁN

*ASESOR:
José Ignacio Huertas, ME, MSc, DSc.*

Proyecto de grado Maestría en Ingeniería Mecánica
Departamento de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de los Andes
Febrero del 2004

Tabla de contenido

	CAPITULO 1	
	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES DEL PROYECTO PARA EVALUACIÓN DE CALENTADORES	1
1.2	EVALUACIÓN DE CALENTADORES EN SITIO	2
1.3	OBJETIVO	3
1.4	ALCANCE	3
1.5	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	3
	CAPITULO 2	
	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TUTOR DE PRUEBAS	4
2.1	ADECUACIÓN DEL TUTOR ORIGINAL	4
2.1.1	Descripción del tutor original	4
2.1.2	Modificaciones realizadas	5
2.2	EQUIPOS ADICIONALES	11
	CAPITULO 3	
	EVALUACIÓN CALENTADORES DE PASO	13
3.1	PROTOCOLO DE MANEJO DEL TUTOR DE PRUEBAS	13
3.1.1	Conexión sistema de gas	14
3.1.2	Conexión sistema de agua	14
3.1.3	Conexión sistema evacuación de gases	15
3.1.4	Instrucciones de uso	15
3.1.5	En caso de emergencia	16
3.2	PRUEBAS DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO Y AMBIENTAL EN CALENTADORES DE PASO A GAS NATURAL	17
3.2.1	Determinación del consumo calorífico nominal y mínimo	18
3.2.2	Determinación de la potencia útil y eficiencia térmica nominal y mínima	19
3.2.3	Pruebas de combustión	20
3.2.4	Pruebas en condiciones nominales de funcionamiento	21
3.2.5	Pruebas en condiciones máximas de funcionamiento	21
3.2.6	Explicación formato registro de pruebas y ensayos calentadores en diferentes altitudes	21
3.3	CALIBRACIÓN ROTÁMETRO Y CONTADOR DE GAS	24
	CAPITULO 4	
	REALIZACIÓN DE PRUEBAS Y ANÁLISIS DE DATOS	27
4.1	CARACTERÍSTICAS DEL GAS UTILIZADO DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN	27
4.2	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS CALENTADORES DE PASO EVALUADOS	31
4.3	POTENCIA ÚTIL	31
4.3.1	Resultados obtenidos en calentadores de capacidad menor o igual a 10 kW	32
4.3.2	Resultados obtenidos en calentadores de capacidad superior a 10 kW	34
4.4	CONSUMO CALORÍFICO	38
4.5	EFICIENCIA TÉRMICA	42
4.6	COMBUSTIÓN	49

	CAPITULO 5	
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
5.1	CALENTADOR BOSCH 5 LT	58
5.2	CALENTADOR VANWARD 5.5 LT	59
5.3	CALENTADOR CHALLENGER 5 LT	59
5.4	CALENTADOR CHALLENGER 11 LT	60
5.5	CALENTADOR CENTRALES 11 LT	61
5.6	CALENTADOR SUECO 10 LT	62
5.7	CONCLUSIONES GENERALES	62
5.8	RECOMENDACIONES PARA SEGUIR CON ESTE ESTUDIO	63
	BIBLIOGRAFÍA	64

Lista de Figuras

<i>Figura 2.1</i>	<i>Tutor de pruebas para calentadores de paso a gas natural</i>	5
<i>Figura 2.2</i>	<i>Bomba de agua con válvula de alivio</i>	6
<i>Figura 2.3</i>	<i>Instrumentación sistema de suministro de Agua</i>	6
<i>Figura 2.4</i>	<i>Sistema de regulación de presión de gas en tres etapas</i>	7
<i>Figura 2.5</i>	<i>Congelamiento regulador de alta presión</i>	8
<i>Figura 2.6</i>	<i>Contador de gas con acople a la salida del gas</i>	8
<i>Figura 2.7</i>	<i>Conector en cobre acoplable a la entrada de gas</i>	9
<i>Figura 2.8</i>	<i>Manómetro en U con agua destilada y colorante</i>	9
<i>Figura 2.9</i>	<i>Detalle escala en milibares del manómetro en U</i>	9
<i>Figura 2.10</i>	<i>Conducto recto para evacuación y evaluación de gases en calentadores tipo B</i>	10
<i>Figura 2.11</i>	<i>Soportes en madera para evaluación de las emisiones en calentadores Tipo A</i>	10
<i>Figura 2.12</i>	<i>Ubicación del soporte de madera con el respectivo deflector en el calentador tipo A.</i>	11
<i>Figura 2.13</i>	<i>Tutor de pruebas para calentadores de paso a gas natural luego de las modificaciones</i>	11
<i>Figura 2.14</i>	<i>Campana invertida para la calibración y comparación de instrumentos para flujo de gas</i>	12
<i>Figura 3.1</i>	<i>Formato registro de pruebas y ensayos calentadores en diferentes altitudes</i>	21
<i>Figura 3.2</i>	<i>Campana invertida para calibración de equipos y tablero de instrumentos del tutor</i>	25
<i>Figura 3.3</i>	<i>Formato para calibración de rotámetro y contador de gas</i>	26
<i>Figura 4.1</i>	<i>Tanques almacenamiento de gas vehicular</i>	28
<i>Figura 4.2</i>	<i>Instalaciones lugar de experimentación de los calentadores en Chinchiná</i>	30
<i>Figura 4.3</i>	<i>Instalaciones de las pruebas para calentadores en Manizales</i>	31
<i>Figura 4.4</i>	<i>Evaluación de la potencia útil nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador BOSCH 5 lt</i>	33
<i>Figura 4.5</i>	<i>Evaluación de la potencia útil nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador VANWARD 5.5 lt</i>	33
<i>Figura 4.6</i>	<i>Evaluación de la potencia útil nominal (azul) a calentador CHALLENGER.5 lt</i>	34
<i>Figura 4.7</i>	<i>Evaluación de la potencia útil nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador CHALLENGER 11lt</i>	35
<i>Figura 4.8</i>	<i>Evaluación de la potencia útil nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador CENTRALES 11lt</i>	36
<i>Figura 4.9</i>	<i>Evaluación de la potencia útil nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador SUECO 10 lt</i>	36
<i>Figura 4.10</i>	<i>Comportamiento del consumo de gas sin corregir, corregido según ecuación 3.5 (consumo corregido) y corregido según ecuación 3.2 (consumo con corrección radical) en diferentes altitudes para calentador VANWARD 5.5 LT</i>	39
<i>Figura 4.11</i>	<i>Evaluación del consumo calorífico nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador BOSCH 5 lt</i>	39
<i>Figura 4.12</i>	<i>Evaluación del consumo calorífico nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador VANWARD 5.5 lt.</i>	40
<i>Figura 4.13</i>	<i>Evaluación del consumo calorífico nominal (azul) a calentador CHALLENGER 5 lt</i>	40
<i>Figura 4.14</i>	<i>Evaluación del consumo calorífico nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador CHALLENGER 11 lt</i>	40

Figura 4.15	Evaluación del consumo calorífico nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador CENTRALES 11 lt	41
Figura 4.16	Evaluación del consumo calorífico nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador SUECO 10 lt	41
Figura 4.17	Evaluación del consumo calorífico nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador HACEB 10 lt	41
Figura 4.18	Evaluación de la Eficiencia térmica nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador BOSCH 5 lt utilizando formula 3.5 para la corrección del consumo de gas natural.	43
Figura 4.19	Evaluación de la Eficiencia térmica nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador VANWARD 5 lt utilizando formula 3.5 para la corrección del consumo de gas natural.	43
Figura 4.20	Evaluación de la Eficiencia térmica nominal (azul) a calentador CHALLENGER 5 lt utilizando formula 3.5 para la corrección del consumo de gas natural.	44
Figura 4.21	Evaluación de la Eficiencia térmica nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador BOSCH 5 lt utilizando formula 3.2 para la corrección del consumo de gas natural.	45
Figura 4.22	Evaluación de la eficiencia térmica nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador VANWARD 5.5 lt utilizando formula 3.2 para la corrección del consumo de gas natural.	45
Figura 4.23	Evaluación de la eficiencia térmica nominal (azul) a calentador CHALLENGER 5 lt utilizando formula 3.2 para la corrección del consumo de gas natural	46
Figura 4.24	Evaluación de la Eficiencia térmica nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador CHALLENGER 11 lt utilizando formula 3.2 para la corrección del consumo de gas natural.	46
Figura 4.25	Evaluación de la Eficiencia térmica nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador CENTRALES 11 lt utilizando formula 3.2 para la corrección del consumo de gas natural.	47
Figura 4.26	Evaluación de la Eficiencia térmica nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador SUECO 10 lt utilizando formula 3.2 para la corrección del consumo de gas natural	47
Figura 4.27	Dispositivo de falla en la llama que actúa cuando existe un sobrecalentamiento en el intercambiador de calor en el calentador BOSCH 5 lt	49
Figura 4.28	Evaluación de las emisiones de monóxido de carbono en la posición de mínimo consumo del calentador BOSCH 5 lt.	50
Figura 4.29	Evaluación del comportamiento de la relación aire/combustible para el mínimo consumo (rojo) y el consumo nominal (azul).en calentador BOSCH 5 lt	50
Figura 4.30	Evaluación de las emisiones de monóxido de carbono (CO) en posiciones de evaluación de consumo mínimo de gas (rojo) consumo nominal de gas (azul) y las pruebas de combustión (verde) en calentador VANWARD 5.5 lt	51
Figura 4.31	Resultados de la relación aire/combustible en posiciones de consumo nominal (azul) y de consumo mínimo (rojo) en calentador VANWARD 5.5 lt	51
Figura 4.32	Evaluación de las emisiones de CO en consumo nominal (azul) y combustión (verde) en calentador CHALLENGER 5 lt	52
Figura 4.33	Evaluación de la relación aire combustible en consumo nominal (azul) y combustión (verde) en calentador CHALLENGER 5 lt	53
Figura 4.34	Evaluación de las emisiones de monóxido de carbono (CO) consumo nominal (azul), y las pruebas de combustión (verde) en calentador CHALLENGER 11lt	54
Figura 4.35	Evaluación de la relación aire/combustible en consumo nominal (azul) y pruebas de combustión (verde) en calentador CHALLENGER 11 lt.	54
Figura 4.36	Evaluación de las emisiones de monóxidos CO en consumo nominal (azul) y en pruebas de combustión (verde) en calentador CENTRALES 11 lt	55
Figura 4.37	Evaluación de la relación aire combustible en consumo nominal (azul) y en pruebas de combustión (verde) en calentador CENTRALES 11lt	55
Figura 4.38	Evaluación de las emisiones de CO para el consumo nominal (azul) y para las pruebas de combustión (verde) en calentador SUECO 10 lt	56
Figura 4.39	Evaluación de la relación aire combustible en el consumo nominal (azul) y pruebas de combustión (verde) en calentador SUECO 10 lt	56

<i>Figura 4.40</i>	<i>Evaluación de las emisiones de monóxido de carbono en consumo nominal (azul) y pruebas de combustión (verde) en calentador HACEB 10 lt</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.41</i>	<i>Evaluación de la relación aire combustible en consumo nominal (azul) y pruebas de combustión (verde) en calentador HACEB 10 lt</i>	<i>57</i>

Lista de Tablas

Tabla 1.1	Evaluación de calentadores de paso a gas natural, de diferentes marcas instalados en la ciudad de Bogotá.	2
Tabla 4.1	Composición volumétrica del gas natural utilizado en la experimentación	28
Tabla 4.2	Propiedades del gas natural empleado durante las pruebas	28
Tabla 4.3	Índices de Wobbe para gas natural y el gas de referencia que debe ser utilizado en las pruebas	29
Tabla 4.4	Lugares donde se realizan las diferentes pruebas	30
Tabla 4.5	Características técnicas principales de los calentadores evaluados	31
Tabla 4.6	comparación de la variación de la potencia útil declarada contra la obtenida, el porcentaje de variación de pérdida de potencia útil para cada 300 metros de altitud y el porcentaje de pérdida de potencia entre Bogotá y el nivel del mar en los calentadores evaluados	37
Tabla 4.7	Consumos de gas sin corregir utilizados para calcular la eficiencia térmica en calentador de paso VANWARD 5.5 lt, consumo de gas corregido utilizando ecuación 3.2 que incluye radical y consumo de gas corregido utilizando ecuación 3.5 utilizada actualmente por los fabricantes de calentadores para el cálculo de la eficiencia térmica	38
Tabla 4.8	Consumos caloríficos corregidos evaluados en Bogotá y a nivel del mar, comparados con los consumos caloríficos nominales declarados por los fabricantes, para los calentadores evaluados.	42
Tabla 4.9	Eficiencia térmica evaluada a nivel del mar y en Bogotá para la corrección utilizando la fórmula 3.5 y para la propuesta utilizando la fórmula 3.2.	49

Agradecimientos

A José Ignacio Huertas asesor y amigo de ayuda incondicional

A mis amigos compañeros de penas por su apoyo en los momentos más difíciles

Al Ingeniero Andrés Soto de la empresa GAS NATURAL S.A. por dar a conocer este proyecto en el comité de normalización ICONTEC.

Al Ingeniero Armando Orbezo de la empresa SUDELEC S.A. por brindar su apoyo y conocimiento en el desarrollo de esta investigación.

A la empresa CHALLENGER S.A. y sus colaboradores en especial a Jairo Chavarro por brindar apoyo en el desarrollo de las pruebas.

A German Ríos de la empresa MABE Colombia S.A. por brindar apoyo en la fase final de este proyecto.

Al señor Roberto Arias Gerente de la empresa VEHIGAS S.A. por su gran colaboración en el préstamo de equipos fundamentales en el desarrollo del proyecto

Dedicación

A Dios y su grupo de colaboradores por dar la fuerza para seguir cada día
A mis padres, A nenita y mi hermana por tener fe en mi

Capítulo 1

Introducción

Entre los productos de combustión del gas natural en los calentadores de paso se encuentra el monóxido de carbono (CO), el cual es un gas incoloro e inodoro. Él (CO) cuenta con una afinidad 200 veces mayor a la hemoglobina que el oxígeno. Por tanto en presencia de (CO) la hemoglobina reacciona formando carboxihemoglobina, inhibiendo el paso de oxígeno hacia los diferentes órganos del cuerpo humano. Bajo exposiciones prolongadas a concentraciones superiores a 50 ppm de (CO) hay pérdida de conciencia y hasta muerte por asfixia. En Bogotá se han reportado varios casos de niños que han muerto por esta causa en baños donde los calentadores de paso no han sido instalados adecuadamente.

Debido a la toxicidad del (CO), algunas empresas productoras de calentadores de paso a gas natural conscientes de este problema han adoptado modificaciones en sus diseños. Fabricando calentadores para funcionar a la mayor altitud donde son comercializados. Entre los cambios realizados a los artefactos se encuentran la disminución del diámetro de los inyectores, el aumento del número de quemadores y restrictores de paso para el gas entre otros.

Puesto que no todas las empresas han adoptado medidas de control, la Superintendencia de Industria y Comercio se ha visto en la obligación de elaborar resoluciones que buscan especificar el rango de funcionamiento de los equipos sin exceder los niveles de (CO) exigidos por la Norma Técnica Colombiana existente para estos dispositivos [ref 3].

1.1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO PARA EVALUACIÓN DE CALENTADORES

Inicialmente este proyecto se realiza con el fin de determinar una metodología para controlar el efecto de la altitud en las emisiones de monóxido de carbono (CO). Para ello se construyó el tutor de pruebas en el desarrollo del proyecto de grado del ingeniero Juan Carlos Serrano [ref 1]. Adicionalmente la Ingeniera Maria Margarita Gutiérrez en el desarrollo de su proyecto de grado [ref 2]. Realizó pruebas preliminares del comportamiento del flujo de gas a través de inyectores y como segunda parte realizó un análisis preliminar de las razones por las cuales se produce una alta concentración de monóxido de carbono (CO) en altitudes como las de Bogotá.

1.2 EVALUACIÓN DE CALENTADORES EN SITIO.

Como punto de partida para este proyecto se realizó una serie de evaluaciones en diferentes viviendas de la ciudad de Bogotá donde se encontraban instalados calentadores de paso a gas natural. En la mayoría de los casos no se alcanzaron los caudales de agua nominales, por lo tanto se realizaron las pruebas operando los calentadores a las condiciones máximas que la instalación podía dar. Los resultados de la experimentación realizada en calentadores de diferentes marcas se muestran en la [tabla 1.1].

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que el funcionamiento de algunos calentadores no satisface los niveles máximos recomendados para emisiones de (CO). Sin embargo no se puede determinar en que proporción los calentadores funcionan adecuadamente o cuales son los que a pesar de las diferentes restricciones establecidas por el gobierno se están comercializando sin ningún tipo de control.

*Tabla 1.1
Evaluación de calentadores de paso a gas natural, de diferentes marcas instalados en la ciudad de Bogotá.*

Marca	ppm de (CO) diluido		Relación Aire / Combustible	
	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar
Challenger 1	84	32.4	2.6	0.26
Challenger 2	25	8.0	2.2	0.13
Challenger 3	5045	770.4	1.9	0.05
Challenger 4	112	63.8	2.2	0.15
Shimasu 1	83	42.3	2.5	1.33
Shimasu 2	687	291.2	2.1	0.12
Haceb HA - 50	40	18.9	2.3	1.20
Fagor FA - 50	1417	1615.4	1.6	0.07
Paloma PH – 5W	9	8.12	9.9	9.75
Sakura	Superior a 8000 ppm (CO)		2.7	0.82

Identificación de la necesidad

La tabla 1.1 confirma la necesidad de evaluar a condiciones atmosféricas variadas, una muestra de calentadores de marcas diferentes que abarquen a la gran mayoría de fabricantes y comercializadores del país, con el fin de obtener el comportamiento energético y ambiental de los mismos.

Estas pruebas deben llevarse a cabo controlando y midiendo el mayor número de variables posibles, con el ánimo de obtener los datos necesarios para tomar decisiones acerca de futuras adaptaciones o cambios que puedan ser implementados en los calentadores.

En respuesta a estas necesidades la presente tesis de maestría en ingeniería mecánica busca cumplir los objetivos listados a continuación.

1.3 OBJETIVO

Evaluar el efecto de la altitud sobre la potencia, eficiencia, consumo de combustible y emisiones de los calentadores de pasos comercialmente disponibles en Colombia.

Objetivos específicos

- Adecuar y poner en funcionamiento el tutor de pruebas de calentadores de paso disponible en la Universidad de los Andes.
- Evaluar el desempeño energético y ambiental de diferentes marcas de calentadores de paso a altitudes comprendidas entre los 300 y 2700 metros sobre el nivel del mar.
- Elaborar recomendaciones para los fabricantes de los calentadores de paso evaluados sobre alternativas para controlar las emisiones de CO.

1.4 ALCANCE

La norma técnica colombiana en vigencia exige que las pruebas de evaluación de calentadores de paso sean realizadas con un gas de referencia. El gas de referencia recomendado es metano (CH₄). Por razones de costo se usa gas natural. Se reporta la composición del gas usado y el respectivo análisis de similitud al gas de referencia.

1.5 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El presente informe presenta los resultados obtenidos sobre la evaluación del comportamiento energético y ambiental para cuatro diferentes altitudes. El capítulo 2 presenta los resultados de la adecuación del tutor de pruebas. El capítulo 3 describe los parámetros a evaluar, la metodología para realizar las diferentes pruebas y la metodología para calibrar los equipos e instrumentos usados. El capítulo 4 muestra los resultados y el análisis de los parámetros evaluados a 7 calentadores de seis marcas diferentes. Finalmente el capítulo 5 muestra las conclusiones y recomendaciones a los fabricantes de los calentadores evaluados.

Capítulo 2

Diseño y construcción del tutor de pruebas

La diversidad topográfica de Colombia permite con gran facilidad la elaboración de estudios que impliquen variación en las condiciones atmosféricas, ya que al desplazarse en un radio menor de 350 kilómetros se pueden obtener altitudes comprendidas entre los 300 y los 3500 metros sobre el nivel del mar.

Para el desarrollo de este proyecto es de vital importancia contar con un dispositivo que permita evaluar las condiciones de desempeño energético y ambiental de calentadores de paso a gas natural en diferentes altitudes. Este dispositivo debe facilitar la realización de adaptaciones y mejoras con el fin de cumplir la mayor cantidad de requisitos exigidos por la norma técnica Colombiana para evaluación de calentadores de paso [ref 3].

2.1 ADECUACIÓN DEL TUTOR ORIGINAL

La realización de las pruebas a calentadores de paso exige un dispositivo portátil capaz de simular al máximo las condiciones de operación de laboratorio, este fue desarrollado en un lapso de un año por dos estudiantes de pregrado de la Universidad de los Andes [ref 1,2] logrando obtener importantes avances en la consecución de instrumentos para la evaluación del comportamiento de estos artefactos.

2.1.1 Descripción del tutor original

Al tutor de pruebas de la Universidad de los Andes era necesario realizar varias adaptaciones, para realizar pruebas de campo en calentadores de paso a gas natural. En la figura 2.1 se muestra el tutor como se encontró al inicio de este trabajo. Las principales razones que describen los cambios necesarios para usar este equipo son:

- Las oscilaciones en la presión de suministro de gas no dejan que el sistema sea lo suficientemente estable para realizar pruebas, con el flujo de gas indicado por el fabricante.
- El regulador para bajas presiones no proporciona una fácil variación de ésta.
- El rotámetro para agua cuenta con una resolución muy baja.
- No se tiene un sistema independiente de suministro de agua.
- Y finalmente el sistema de evacuación de gas se diseñó con una norma que actualmente es obsoleta.



Figura 2.1.
Tutor de pruebas para calentadores de paso a gas natural

2.1.2 Modificaciones realizadas

Los cambios realizados al tutor de pruebas para calentadores de paso se basan en la norma técnica colombiana que rige este tipo de gasodomésticos [ref 3], las sugerencias y exigencias de los fabricantes y comercializadores del producto. Para poder permitir la realización de pruebas a las diferentes marcas de calentadores, evitando al máximo la inclusión de variables no deseadas por el uso de una instrumentación no adecuada y por ultimo ser fácilmente adaptable a las diferentes marcas. Todas las anteriores fueron las principales razones por las que se realizaron las siguientes adaptaciones al tutor de pruebas.

Suministro de agua

Una de las modificaciones más importantes hechas al tutor de pruebas, para permitir la realización de experimentación a diferentes altitudes consistió en incluir un sistema independiente de agua. De esta manera el sistema no necesita abastecerse de las redes de agua disponibles en los lugares donde se realizan las pruebas. Para suplir esta necesidad se incluyó junto con el tutor una bomba de agua de $\frac{1}{2}$ HP, con una válvula de alivio para regulación de caudal y de la presión en el suministro de agua al calentador (ver figura 2.2) y un tanque de 250 litros (ver figura 2.14). El sistema es capaz de proporcionar caudales de agua entre 2.5 y 11 litros por minuto a una presión de 2 bares. El agua que es calentada no-se recircula para evitar recalentamientos y alteraciones en las mediciones.



Figura 2.2
Bomba de agua con válvula de alivio

Como parte de la instrumentación se ubicaron 2 termocuplas de inserción tipo K, para medir la temperatura del flujo de agua a la entrada y a la salida del gasodoméstico en las mismas posiciones para evitar variaciones por ubicación de estos sensores garantizando que las medidas sean tomadas siempre de la misma manera (ver figura 2.3). Adicionalmente se agregó un manómetro para medir la presión del agua de suministro (ver figura 2.3) y garantizar la presión que exigen las diferentes pruebas. Para los calentadores de potencia modulante es sumamente importante la presión de funcionamiento ya que la presión en el quemador varía dependiendo de la presión de entrada de agua. Por último se cambió el rotámetro de medición de caudal de agua por un contador de agua con una resolución de 0.02 litros para medir el flujo (ver figura 2.3).

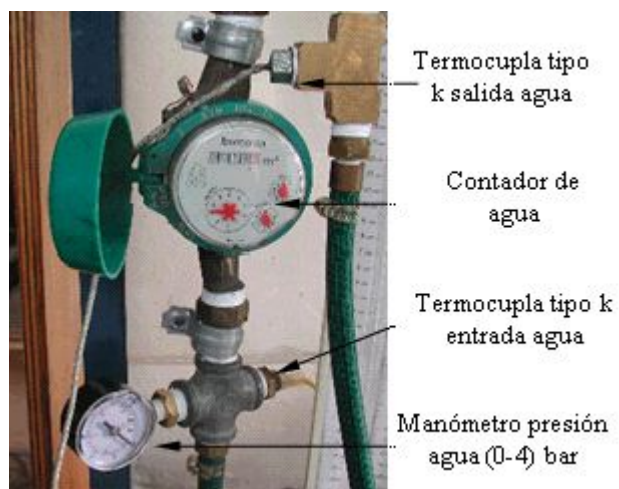


Figura 2.3
Instrumentación sistema de suministro de Agua

Suministro de gas

Las variaciones en el suministro de presión de gas obligaron a realizar una regulación en tres etapas conformadas por: un regulador de alta presión para disminuir la presión de salida del tanque de almacenamiento, dos reguladores de baja presión y finalmente la ubicación de un tanque acumulador con un volumen de un litro colocado en serie con el sistema de suministro de gas (ver figura 2.4). El acumulador esta diseñado para eliminar las fluctuaciones en la presión de trabajo que se presentan durante la experimentación, por la alta expansión del gas así como evitar el congelamiento del regulador de alta (ver Figura 2.5), provocado por expansiones muy drásticas.

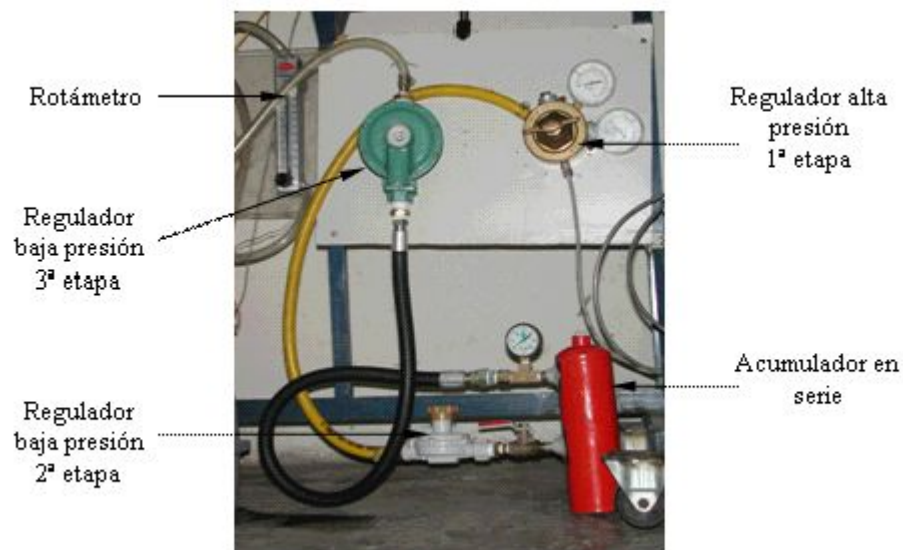


Figura 2.4
Sistema de regulación de presión de gas en tres etapas

La regulación en tres etapas normalmente funciona de la siguiente manera: La primera etapa genera una expansión del gas de 2500 a 40 psi siendo esta la mas crítica de las tres al ser la que presenta mayores problemas por congelamiento (ver figura 2.5) y oscilaciones en el suministro de gas., La segunda etapa en el regulador de baja presión se mantiene siempre en la misma posición para regular de 40 psi a 2 psi y la tercera etapa regula la presión de salida entre (15- 40) milibares ya que esta presión se puede ajustar en el tornillo central del regulador para las diferentes pruebas



Figura 2.5
Congelamiento regulador de alta presión

También se ubicó una termocupla tipo K para medir la temperatura del gas a la salida del contador tal como lo exige la norma técnica Colombiana [ref 3] (ver figura 2.6). En posición paralela se ubico un racor para determinar la presión en el contador. El flujo de gas se mide usando un contador de gas convencional y un rotámetro con el que inicialmente ha contado el tutor, mejorando así la facilidad en la medición (figura 2.6).

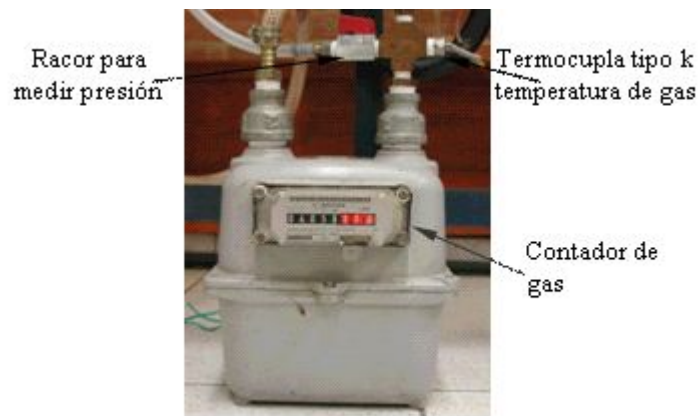


Figura 2.6.
Contador de gas con acople a la salida del gas

Con estos tres últimos datos se realizan las correcciones para llevar el flujo de gas a condiciones estándar. Estos son tomados estableciendo primero la presión de trabajo en el calentador, por las pérdidas ocasionadas durante el recorrido del gas.

Muchos de los calentadores cuentan con acople para medir la presión de trabajo del calentador antes de la entrada al quemador. Sin embargo en caso de no contar con una conexión apropiada por parte del calentador, se utiliza una conexión en cobre (ver figura 2.7) a la entrada del calentador, similar a la que suministran los fabricantes, con una adaptación para conectar un manómetro en U (ver figura 2.8)



Figura 2.7.
Conector en cobre acoplable a la entrada de gas

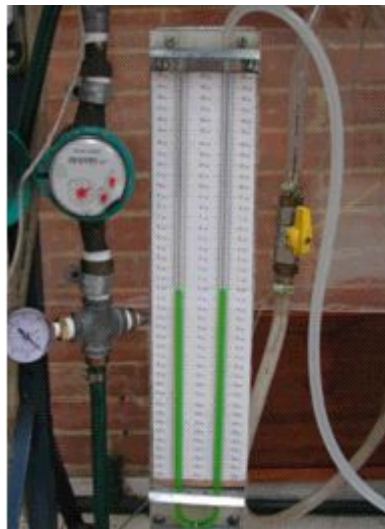


Figura 2.8
Manómetro en U con agua destilada y colorante



Figura 2.9.
Detalle escala en milibares del manómetro en U

El contador en la línea de suministro de gas se ubico, con el ánimo de evitar las variaciones que se dan durante las mediciones, a veces imposibles de controlar con el rotámetro de gas y también para obtener una mayor resolución en la toma de datos

Evacuación de gases

El sistema de evacuación de gases con el cual contaba el tutor estaba basado en la norma técnica colombiana 3833 del año 1997 [ref 4] que actualmente ha tenido varias actualizaciones. Se decidió cambiar el sistema de medición de gases para calentadores Tipo B por un ducto de cincuenta centímetros de alto con una perforación de 3/8" a 10 centímetros de la salida de las emisiones (ver figura 2.10) según [ref 3], y para los calentadores tipo A se crearon soportes en madera (ver figura 2.11) para asegurar que durante las mediciones la sonda siempre este ubicada en la misma posición



Figura 2.10.
Conducto recto para evacuación y evaluación de gases en calentadores tipo B

Los soportes de madera deben ir ubicados con los respectivos deflectores de cada artefacto (ver figura 2.12), para evitar excesos de aire durante la toma de muestras y garantizar un análisis lo más cercano a la realidad.

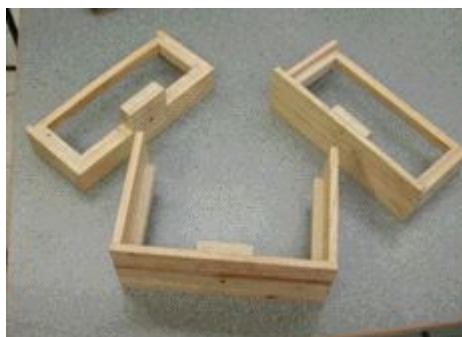


Figura 2.11.
Soportes en madera para evaluación de las emisiones en calentadores Tipo A



*Figura 2.12.
Ubicación del soporte de madera con el respectivo deflector en el calentador tipo A.*

Luego de todas las modificaciones anteriores el tutor de pruebas para calentadores de paso finalmente puede verse en la figura 2.13



*Figura 2.13
Tutor de pruebas para calentadores de paso a gas natural luego de las modificaciones*

2.2 EQUIPOS ADICIONALES

El uso de un dispositivo adicional que permita la calibración del rotámetro y la comparación de las medidas tomadas con el contador de gas es esencial para el estudio, ya que no se conoce la

variación real de la densidad del gas en las diferentes altitudes donde se realizan las pruebas. Es por esto necesario el uso de una campana invertida (ver figura 2.14) como instrumento para la calibración del medidor de flujo de gas.

Su funcionamiento se basa fundamentalmente en cuantificar el volumen desplazado en la campana invertida en un lapso de tiempo a la presión en la cual opera normalmente el rotámetro y contador de gas. Esta operación se debe realizar causando la menor oposición posible al movimiento asegurando que la presión interna del recipiente sea igual a la atmosférica antes de iniciar la calibración.

Se diseñó un protocolo con el fin de adaptarlo al tutor de pruebas y la operación adecuada de este dispositivo. (Ver capítulo 3)



Figura 2.14
Campana invertida para la calibración y comparación de instrumentos para flujo de gas

Capítulo 3

Evaluación de calentadores de paso

La evaluación de los calentadores de paso a gas natural desarrollada en este proyecto se rige bajo los parámetros establecidos en la norma técnica Colombiana [ref 3], en la cual se especifican las diferentes variables que se deben tener en cuenta, como son, las temperaturas de entrada del agua, adecuación del lugar donde se deben realizar las pruebas, el tipo de chimenea utilizada y otros parámetros importantes.

Con el fin de normalizar la experimentación se hace necesario utilizar protocolos de pruebas en que se indique la forma en que se deben realizar la experimentación para determinar el comportamiento energético y ambiental que es afectado directamente por el cambio de altitud y así evitar al máximo variaciones ajenas a las pruebas. Es importante anotar que la elaboración de estas pruebas conlleva un riesgo. Por esto es necesario conocer bien el funcionamiento del tutor de pruebas antes de realizar cualquier operación.

Por ultimo la elaboración de pruebas a diferentes altitudes implica un cambio volumétrico en el flujo de gas, siendo necesario realizar calibraciones de los medidores de flujo volumétrico de gas en cada lugar donde se realizan las pruebas.

3.1 PROTOCOLO DE MANEJO DEL TUTOR DE PRUEBAS

La principal función de este protocolo es conocer el funcionamiento del tutor que permita realizar las conexiones de todos los dispositivos donde va a ser utilizado, el modo de uso general del tutor y las medidas de seguridad a tomar en caso de alguna emergencia.

Objetivo específico

Conocer el funcionamiento del tutor de pruebas siguiendo las normas de seguridad

Requerimientos físicos

- Tutor de pruebas para calentadores de paso a gas natural.
- Cinta de teflón.
- Herramienta.
- Calentador de paso.

3.1.1 Conexión sistema de gas

Conexión del tubing

- Aplicar cinta de teflón en la válvula roscada del tanque de gas.
- Si la tuerca de sujeción se encuentra trabada en la punta de la férula es necesario golpearla con él animo de que se destrabe. Absténgase de girarla o presionarla.
- Luego de retirar la tuerca se aplica teflón en la férula, tratando de cubrir toda la parte cónica de este conector sin que se formen abultamientos.
- Al apretar esta tuerca es importante realizar la mayor fuerza posible, debido a que es la parte mas critica del tutor y es de mucha importancia, no contar fugas en esta parte del sistema.

Conexión acople al calentador

- Como primera medida se revisa si el calentador cuenta con dispositivo para medir la presión de trabajo. En caso de contar con este se utiliza él acople normal de conexión, en caso contrario se conecta el acople con salida para medir presión.
- Se verifica que se cuente con los empaques adecuados para la conexión de gas, por lo general son fabricados de material prensado.
- Se realizan los ajustes necesarios a la entrada de gas del calentador, percatándose de colocar adecuadamente los empaques respectivos.
- Evitar al máximo quiebres que se formen en las mangueras.

Conexión de manómetros

- Revisar si el calentador cuenta con acople para medir la presión en el quemador, de ser así es necesario utilizar el manómetro digital con el que cuenta el analizador de gases TESTO. Si no es difícil medirlo ya que es necesario la adaptación por parte del fabricante.
- Colocar los diferentes manómetros en U en su respectivo nivel de cero, de ser posible con agua destilada y con colorante para facilitar la lectura.
- Ubicar el manómetro de lectura en milibares, de tal manera que pueda medir la presión del contador.
- El manómetro de lectura en milímetros se ubica al lado izquierdo del calentador y es utilizado para medir la presión de trabajo.

3.1.2 Conexión sistema de agua

Conexión bomba de agua

- Conectar la manguera flexible de 1/2" entre la salida de la válvula de alivio y la entrada del contador de agua.
- Las abrazaderas deben ir bien apretadas ya que debe soportar al menos 4 bares de presión de agua.
- Limpiar el filtro ubicado en la etapa de succión de la bomba.

Conexión acoples al calentador

- Se revisa el tipo de conectores a la salida del calentador, se hacen los cambios necesarios en los acoples.
- Ubicar los empaques antes de conectar
- Al terminar de apretar las diferentes roscas, ninguna de estas debe girar con la mano.
- Se debe confirmar visualmente la conexión de entrada de agua y salida de esta en el calentador, ya que tienen diferentes posiciones entre ellos.

- Eliminar quiebres en las mangueras con el fin de evitar burbujas.

3.1.3 Conexión sistema evacuación de gases

Conexión para calentadores tipo A

- Los calentadores tipo A son aquellos que cuentan con solo un deflector y no se les puede adaptar conducto alguno para la evacuación de gases.
- Se selecciona el tipo de soporte en madera a ser ubicado en la parte superior del calentador.
- Se fija de la estructura del tutor, para evitar que se caiga con el peso de la sonda.
- Se coloca el soporte, el deflector y la sonda en la perforación más cercana a la salida de los gases.

Conexión para calentadores tipo B

- Este tipo de calentador trae un sistema para adaptar un conducto en la parte superior del calentador por lo general son de 5” de diámetro.
- Se ubica la chimenea en la parte superior de manera que este quede fijo sin posibilidad de caerse, por algún movimiento brusco que se le pueda ocasionar al tutor.
- La sonda se ubica en la perforación, tratando de formar un ángulo de 90 grados entre el conducto y la sonda, esto se realiza con el fin de evitar que entre agua en exceso a la trampa.

3.1.4 Instrucciones de uso

Verificación de fugas en la línea de agua

- Ceba la bomba de agua, quitando la malla protectora ubicada en la válvula anti-retorno y cerrando la válvula de alivio ubicada en la parte superior de la bomba
- Dirija la manguera de salida de agua caliente al tanque de almacenamiento mientras no este encendido el calentador.
- Conecte la bomba de agua y verifique que no existan fugas en cada una de las conexiones.
- En caso de existir fugas de agua, apague la bomba y elimine la fuga
- Repita este procedimiento hasta que no existan fugas.

Verificación de fugas en la línea de gas

- Compruebe que la válvula del regulador de alta presión, se encuentre totalmente abierta (girándola en sentido contrario a las manecillas del reloj).
- Abra la válvula del rotámetro de gas.
- Coloque la manija de la válvula del tanque en posición de cerrado.
- Ponga a cada una de las conexiones de la línea de gas un poco de espuma de una solución de agua-jabón.
- Verifique fugas en la línea de gas abriendo lentamente la válvula del tanque.
EN CASO DE EXISTIR FUGAS SIGA LAS INSTRUCCIONES (“EN CASO DE EMERGENCIAS”).

Encendido del calentador

Gire poco a poco la válvula del regulador de alta presión en el sentido de las manecillas del reloj, cuidando que el manómetro no sobrepase los 40 psi.

- Dependiendo de la presión de trabajo que exija el tipo de prueba, se ajusta el tornillo en el regulador de la última etapa del sistema de regulación de presión.
- Asegúrese que cualquier tipo de alimentación que requiera el calentador, se supla con baterías en buen estado.
- Gire la perilla del calentador a la posición de encendido del piloto.
- Deje pasar un poco de gas a través del piloto con el ánimo de eliminar colchones de aire y facilitar el encendido de este.
- Dependiendo de las instrucciones de encendido de cada calentador, encienda el piloto y el calentador estará listo para cualquier tipo de prueba a ser aplicada.

Apagado del calentador

Cierre la válvula del tanque de gas.

- Espere hasta que la llama del calentador se apague sola, luego apague el calentador girando la perilla a la posición de cerrado total.
- Desconecte la bomba de agua.
- Verifique que la presión en el regulador esté en ceros, sólo si es necesario desconecte la tubería que conecta el tanque con el regulador de alta presión.
- Verifique que las mangueras de agua estén vacías y retírelas del drenaje.

3.1.5 En caso de emergencia

Fugas

- Cierre inmediatamente la válvula del tanque de gas natural y encienda el calentador al máximo nivel de llama.
- Verifique que los manómetros del regulador de alta se encuentren en cero.
- Cuando las llamas del calentador se apaguen significará que se ha evacuado todo el gas contenido en la línea.
- Desconecte la tubería del regulador de alta presión, ajustada a la válvula del tanque de gas.
- Desconecte la bomba de agua.
- Determine las posibles causas de la falla, soluciónelas y vuelva a comenzar.

Llamas

- Si el tutor esta en funcionamiento, cierre inmediatamente la válvula del tanque.
- Si es posible aleje el tanque de las llamas.
- Aléjese y espere hasta que las llamas se extingan.

3.2 PRUEBAS DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO Y AMBIENTAL EN CALENTADORES DE PASO A GAS NATURAL

Con el fin de evaluar el desempeño energético y ambiental de los calentadores de paso se deben realizar las pruebas de consumo calorífico, potencia útil,

Objetivo Especifico

Evaluar el comportamiento energético y ambiental de los calentadores de paso a gas natural en las diferentes altitudes donde se realicen las pruebas.

Requerimientos físicos

- El sitio donde se realiza la experimentación debe ser un espacio suficientemente ventilado, pero sin corrientes de aire superiores a 1 m/s.
- Tanque de 250 litros previamente acondicionado.
- Conexión eléctrica a 110 V y 60 Hz.
- Abastecimiento constante de agua.
- Tanque con gas natural.

Requerimientos de instrumentación

- Tutor de pruebas para calentadores de paso a gas natural.
- Contador de agua ABB
- Termocuplas tipo k
- Rotámetro de gas.
- Contador de gas Schumberger.
- Sistema de regulación de presión.
- Analizador de gases TESTO 300 XL-I.
- Termómetro digital OMEGA HH23.
- Lector digital de humedad y temperatura EXTECH instruments 4465CF.
- Cronometro con 0.1 segundos de resolución.
- Barómetro digital.
- Manómetro en U y digital.
- Manómetro de carátula.

Aspectos a verificar antes de la prueba

- Contar con toda la instrumentación necesaria para realizar las pruebas a los calentadores de paso a gas natural.
- Es sumamente importante que el lugar donde se realicen las pruebas este bien ventilado y libre de corrientes de aire.

Puesta a punto del tutor de pruebas

- Revisar y aplicar el protocolo (Manejo del tutor de pruebas) antes de realizar cualquier prueba.
- Encienda la instrumentación a utilizar durante la prueba, ubíquela en las diferentes posiciones de trabajo y actualice las variables que han cambiado para la experimentación.

3.2.1 Determinación del consumo calorífico nominal y mínimo

El objetivo principal de esta prueba es determinar el consumo calorífico en las condiciones de operación establecidas en la norma técnica Colombiana [ref 3]

- Se fija el mínimo caudal de agua que permite el calentador de paso a una presión de 2 bares. Algunos calentadores cuentan con perilla para realizar esta operación. Otros en cambio solo tienen un tornillo restrictor a la entrada del agua.
- Se ubica la perilla en la máxima posición de consumo, encendiendo de esta manera el calentador.
- Es necesario ubicar la presión de trabajo del calentador en 20 milibares (204 mm H₂O), ajustando el tornillo que se encuentra en el regulador de la última etapa.
- Colocar la salida de agua caliente en el sistema de desagüe, evitando circulación de agua caliente en el circuito.
- Se registran al menos tres veces los mismos datos, en el formato de evaluación de calentadores el cual se explica más adelante.
- En los calentadores que cuentan con la opción de dos posiciones de llama, se pasa a la posición de menor consumo de gas y se repiten los pasos del numeral 3 al 5.
- Al terminar las mediciones se apaga el calentador y se ubica la manguera de salida de agua caliente en el tanque donde se extrae el agua.

Con los anteriores datos se calcula el consumo calorífico nominal y mínimo.

Consumo calorífico

Producto del consumo volumétrico, o másico, por el poder calorífico inferior del gas conducido a las mismas condiciones de referencia.

$$Q = 0,278 V \cdot LHV \quad (3.1)$$

Donde:

- Q Consumo calorífico expresado en kW
 V Valor del consumo de gas indicado por el fabricante, correspondiente a las condiciones de funcionamiento, expresado en las condiciones de referencia. En m³/h.
 LHV Poder calorífico inferior expresado en MJ/m³

$$V = V_{med} \times \sqrt{\left(\frac{1013,25 + p}{1013,25}\right) \times \left(\frac{p_a + p}{1013,25}\right) \times \left(\frac{288,15}{273,15 + t_g}\right) \times \frac{d}{d_r}} \quad (3.2)$$

Donde:

- V_{med} Es el volumen obtenido y expresado bajo las condiciones de prueba en m³/h
 P_a Presión atmosférica, en milibares
 P Presión nominal de trabajo en milibares, medida en contador
 d Es la densidad relativa del gas seco.
 d_r Densidad relativa del gas de referencia.
 T_g Temperatura del gas en °C, medida en el contador

3.2.2 Determinación de la potencia útil y eficiencia térmica nominal y mínima

En esta prueba se cambian algunas condiciones de operación del calentador, ya que es necesario establecer un incremento de temperatura de 40 °C entre la temperatura de entrada y la salida de agua al variar el caudal de agua y en condiciones normales de consumo de gas.

- Se establece inicialmente un caudal de agua, que pueda generar una diferencia de temperatura de 40 K, un valor aproximado se establece con los datos registrados en las pruebas para consumo calorífico, con el caudal de agua y la diferencia entre la temperatura de entrada y salida del agua, usando una simple regla de tres se genera un caudal provisional de agua a establecer.
- Establecer el caudal de agua provisional ajustando las perillas o tornillos de regulación de caudal de agua a una presión de 2 bares.
- Encender el calentador, retirar la salida del agua caliente hacia el desagüe.
- Ubicar la posición de la perilla en la de consumo máximo, dando una estabilización térmica de cinco minutos aproximadamente, a 20 milibares de presión de trabajo.
- Dependiendo de la diferencia entre la temperatura de salida y de entrada de agua se ajusta el caudal de agua para obtener una diferencia de temperatura de 40 ± 1 K
- Se registra al menos tres veces los mismos datos, en el formato de evaluación de calentadores.
- En los calentadores que cuentan con la opción de dos posiciones de llama, se pasa a la posición de menor consumo de gas y se repiten los pasos del numeral 6 al 7.
- Al terminar las mediciones se apaga el calentador y se ubica la manguera de salida de agua caliente en el tanque donde se extrae el agua.

Potencia útil

Cantidad de calor transmitida al agua por unidad de tiempo.

$$P_u = \rho_{H_2O} \times Q_{H_2O} \times Ca \times (T_{sal} - T_{ent}) \quad (3.3)$$

Donde:

P_u	Potencia útil (Kw)
ρ_{H_2O}	Densidad del agua. Expresada en kg/lt
Q_{H_2O}	Caudal del agua. En lt/s
Ca	Calor específico del agua líquida a condiciones estándar en kJ/(kg.K)
T_{sal}	Temperatura salida del agua en °C
T_{ent}	Temperatura entrada del agua en °C

Eficiencia térmica

Cociente de la potencia útil por el consumo calorífico expresado en porcentaje

$$\eta_{Térmica} = \frac{\rho_{H_2O} \times Q_{H_2O} \times Ca \times (T_{sal} - T_{ent})}{V_{std} \times LHV} \quad (3.4)$$

Donde:

ρ_{H_2O}	Densidad del agua. Expresada en kg/lt
Q_{H_2O}	Caudal del agua. En lt/s
Ca	Calor específico del agua líquida a condiciones estándar en kJ/(kg.K)

T_{sal}	Temperatura salida del agua en °C
T_{ent}	Temperatura entrada del agua en °C
V_{std}	Flujo volumétrico del gas en condiciones estándar.
LHV	Poder calorífico inferior del gas.

$$V_{std} = V_{med} \times \left(\frac{p_a + p - p_w}{1013,25} \right) \times \left(\frac{288,15}{273,15 + t_g} \right) \quad (3.5)$$

Donde:

V_{std}	Volumen corregido a condiciones de referencia a 1013,25 milibares y 15 °C en m ³ /h
V_{med}	Es el volumen obtenido y expresado bajo las condiciones de prueba en m ³ /h
P_a	Presión atmosférica, en milibares
P	Presión nominal de trabajo en milibares, medida en contador
t_g	Temperatura del gas en °C, medida en el contador
P_w	presión parcial de vapor.

3.2.3 Pruebas de combustión

- Se establece inicialmente un caudal de agua, que pueda generar una diferencia de temperatura de 40 K.
- Encender el calentador, retirar la salida del agua caliente hacia el desagüe.
- Ubicar la posición de la perilla en consumo máximo, dando una estabilización térmica de cinco minutos aproximadamente, a una presión de trabajo de 25 milibares o en el caso de ser calentadores modulantes se aumenta la presión en el quemador a 1,05 veces la de funcionamiento normal.
- Dependiendo de la diferencia entre la temperatura de salida y de entrada de agua se ajusta el caudal de agua para obtener una diferencia de temperatura de 40 ± 1 K.
- Se registra al menos tres veces los mismos datos, en el formato de evaluación de calentadores.
- Al terminar las mediciones se apaga el calentador y se ubica la manguera de salida de agua caliente en el tanque donde se extrae el agua.

Combustión

El criterio utilizado para diferenciar una combustión denominada “higiénica” de una combustión denominada “no higiénica”, es el contenido de Monóxido de Carbono CO existente en los productos de la combustión exentos de aire y de vapor de agua.

$$CO_{Sin\ diluir} = \frac{21}{21 - O_2\%} \times ppm\ CO \quad (3.6)$$

Donde:

$CO_{sin\ diluir}$: Partes por millón de monóxido de carbono libres de aire.

3.2.4 Pruebas en condiciones nominales de funcionamiento

- Se establece inicialmente el caudal de agua para el que está diseñado el calentador, ajustando la perilla o el tornillo restrictor de caudal a una presión de 2 bares.
- Encender el calentador, retirar la salida del agua caliente hacia el desagüe.
- Ubicar la posición de la perilla en consumo máximo de gas, dando una estabilización térmica de cinco minutos aproximadamente, a la presión de funcionamiento especificada por el fabricante.
- Se registra al menos tres veces los mismos datos, en el formato de evaluación de calentadores.
- Al terminar las mediciones se apaga el calentador y se ubica la manguera de salida de agua caliente en el tanque donde se extrae el agua.

3.2.5 Pruebas en condiciones máximas de funcionamiento

Estas pruebas son condiciones esporádicas que se presentan en el calentador, o cambios que han estado obligados a realizar los fabricantes para poder cumplir en altitudes mayores.

En general se sigue el mismo protocolo de evaluación que en los anteriores casos, modificando la condición alterna que no es muy común encontrar.

3.2.6 Explicación formato registro de pruebas y ensayos calentadores en diferentes altitudes

Con el fin de estandarizar la realización de las pruebas y la colección de la información obtenida se elaboró el formato mostrado en la figura 3.1.

En este formato se almacena la información necesaria para evaluar el comportamiento del calentador de todos los parámetros presentados en este protocolo. A continuación se explica el contenido de dicho formato.

Descripción del dispositivo: Se especifica la identificación del calentador y la ciudad donde se realizan las pruebas.

Condiciones ambientales

T_{amb}: Temperatura ambiente lugar donde se realizan las pruebas en °C.

P_{atm}: Presión atmosférica en milibares.

Hum rel %: Humedad relativa en %

Hora inicio: Hora inicio de la prueba.

Hora finalización: Hora en la que culmina la prueba.

Equipos

Equipos utilizados: Se especifica la instrumentación usada durante la prueba.

Res: Cada instrumento se le especifica la resolución a la que esta capacitado para medir.

Descripción de la prueba: Se da una breve descripción de los tipos de pruebas a realizar al calentador de paso a gas natural.

Registro de datos

Tipo de prueba: Tipo de ensayo a realizar al calentador

Presión Quem: Presión a la cual se encuentra la flauta donde están ubicados los inyectores, Mientras se encuentra en operación, en milibares.

Presión Sum: Presión de trabajo del calentador en milímetros de H₂O

Seg.: Se registra el tiempo que demora en pasar un litro de agua en segundos.

Presión agua: Presión de circulación del agua en bares.

Presión Cont: Presión en contador en milibares.

Flujo Rot: ..Valor indicado en el Rotámetro. Este valor es dado en ft³/h.

Flujo Cont:

Seg: Tiempo en dar una vuelta de 10 lt de volumen en segundos.

Temp. Gas: Temperatura del gas en contador en °C.

Temp. Ent: Temperatura entrada de agua en °C.

Temp. Sal: Temperatura salida de agua en °C.

Consumo: Se indica el consumo que tiene cada barrido de datos, en litros.

MEM Testo: Registro en memoria analizador de gases.

3.3 CALIBRACIÓN ROTÁMETRO Y CONTADOR DE GAS

Al variar las altitudes el flujo de gas puede aumentar o disminuir dependiendo de la variación en la presión atmosférica, por esto en cada altitud donde se realizan las pruebas se calibran los equipos de medición de gas para permitir que los datos presentados sean acordes con la realidad

Objetivo Especifico

Calibrar el rotámetro de gas a la presión en la que se desarrollan las pruebas en cada altitud donde se lleven a cabo las pruebas.

Requerimientos físicos

- El sitio donde se realiza la calibración debe ser un espacio suficientemente ventilado, pero sin corrientes de aire superiores a 1 m/s.
- La superficie de apoyo donde se realiza la calibración no debe tener inclinaciones superiores a 1°.

- Tanque de 250 litros previamente acondicionado.
- Estructura metálica para el sostenimiento del recipiente invertido.

Requerimientos de Instrumentación

- Recipiente de 50 litros con una resolución de ± 1 litro, además cuenta con dos salidas en la parte inferior de este, una de estas es una válvula de bola usada para el escape de los gases cuando termina la calibración de un punto y la otra es un acople rápido para tubing.
- Manómetro en U con agua destilada y una resolución de $\pm 0,05$ mbar.
- Sistema de abastecimiento de gas a las presiones de ensayo del calentador. Conformado por Tanque de gas natural, regulación en tres etapas y acumulador.
- Cronometro con $\pm 0,05$ segundos de resolución.

Aspectos a verificar antes de la prueba

- Verificar fugas de gas en el sistema de abastecimiento de este según protocolo (Manejo del tutor de pruebas).
- Verificar que el acople rápido del recipiente de 50 lt este conectado al manómetro en U y este se encuentre sin diferencia de presiones.

Puesta a punto del sistema de calibración

- Llenar el tanque de agua de 250 litros sin tapan la entrada de gas. (Figura 3.2).
- Conectar la manguera saliente del tanque de agua a la salida del gas de baja presión (figura 3.2).
- Ubicar la estructura metálica sobre el tanque de agua (figura 3.2).
- Colocar el recipiente de 50 lt invertido sobre el tanque de 250 lt (figura 3.2).
- Abrir la válvula de bola y bajar lentamente el recipiente. (figura 3.2).
- Cerrar la válvula de bola.
- Equilibrar el peso del recipiente con una pesa al otro lado de la cuerda.
- Conectar la manguera desde el manómetro (figura 3.2), hasta el acople rápido ubicado en el recipiente de 50 lt (figura 3.2).

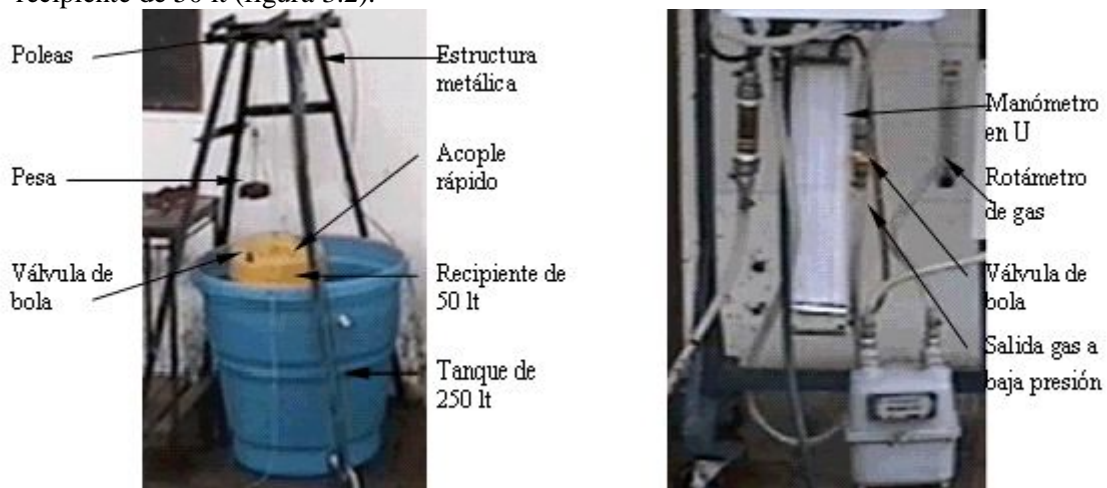


Figura 3.2
Campana invertida para calibración de equipos y tablero de instrumentos del tutor

Procedimiento calibración rotámetro

- Alimentar el sistema con gas como se estipula en el protocolo (Uso del tutor de prueba de calentadores)
- Asegurar que la presión a la cual se encuentra el gas es similar a las condiciones de ensayo del calentador.
- Abra la válvula del rotámetro de gas hasta fijarlo en un valor de fácil lectura e interrumpa el paso de gas cerrando la válvula de bola (figura 3.2).
- Bajar el recipiente de 50 lt con la válvula de bola (figura 3.2) abierta hasta equilibrarlo en la parte mas baja usando los niveles de burbuja que se encuentran en la parte superior del recipiente.
- En el estado de reposo se cierra y se abre la válvula de bola (figura 3.2) hasta que la presión interna del recipiente sea igual a la atmosférica. Se usa el manómetro en U.
- Se deja pasar gas y a medida que el recipiente sube y alcance la primera denominación se anota el valor en campana, en contador de gas y se comienza a tomar el tiempo con cronometro.
- Se debe tratar que alcance a ingresar la mayor cantidad de gas al recipiente sin que este alcance a voltearse o que no exista denominación que leer.
- Cerrar el paso de gas con la válvula de bola (figura 3.2) y parar el cronometro.
- Nivelar el recipiente con diferentes pesos y tomar la medida del nivel indicado por el agua.
- Repetir el procedimiento para el mismo flujo una vez. Anotando la diferencia de volumen que se ve en el recipiente de 50 lt, así como el registrado en el contador.
- Aumentar el caudal de gas que pasa a través del rotámetro abriendo más la válvula que existe en este hasta obtener un valor de fácil lectura. Repetir el proceso nuevamente mínimo tres veces abarcando la mayor parte del rotámetro.
- Los anteriores datos se especifican en el formato para calibración de rotámetro y contador de gas (ver figura 3.3)



Condiciones ambientales		Equipos utilizados			Resolución		Equipos utilizados		Resolución	
Fecha:										
Hora:										
Patm										
Tamb										
RH %										
Flujo Rotámetro	Volumen Inicial	Volumen Final	Volumen Total	Tiempo Desplazamiento	Volumen Inicial Cont	Volumen Final Cont	Volumen Total Cont			
ft ³ /h	lt	Lt	lt	Seg	lt	lt	Lt			

Figura 3.3
 Formato para calibración de rotámetro y contador de gas

Explicación formato calibración rotámetro

Flujo rotámetro:	valor que indica rotámetro (figura 3.2) al variar válvula de admisión de gas, se debe ubicar en un valor de fácil lectura Ej: 20 ft ³ /h, 40 ft ³ /h.
Volumen Inicial:	Valor de la marca inicial donde se inicia el conteo del tiempo.
Volumen final:	Valor donde se estabiliza la campana luego de parar flujo de gas y cronometro.
Volumen Total:	Indica la diferencia entre el volumen final y el volumen inicial.
Tiempo desplazamiento:	Tiempo en segundos que demora la operación de llenado del tanque.
Volumen inicial Cont:	Indica el valor inicial en el cual se encuentra el contador de gas.
Volumen final Cont.:	Indica el valor final en el que quedo el contador de gas.
Volumen total Cont.:	Indica la diferencia entre el valor final y el valor inicial del contador de gas.

Capítulo 4

Realización de pruebas y análisis de datos

El apoyo de los fabricantes de gasodomésticos permitió la consecución de 7 calentadores de paso de seis marcas, de diferentes capacidades y con diferentes formas de operación,. Se destacan las diversas formas de operación de los quemadores, los diferentes dispositivos de seguridad con los que cuentan, el sistema de operación del calentador y los dispositivos de evacuación de gases que presentan.

En este capítulo se presenta una descripción del gas utilizado durante las pruebas y la respectiva analogía con el gas de referencia exigido por la norma técnica Colombiana [ref 3], además se realiza el análisis de los resultados de las pruebas de desempeño energético y ambiental de los diferentes calentadores en cuatro altitudes diferentes comprendidas entre los 300 y los 2700 metros sobre el nivel del mar.

4.1 CARACTERÍSTICAS DEL GAS UTILIZADO DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN

El gas de referencia cuenta con características especiales que lo hacen costoso para la realización de pruebas con altos índices de consumo, el gas natural es una excelente opción para realizar las pruebas por su fácil consecución y el costo mínimo que representa para la elaboración de las pruebas además se especifica por medio de cromatografía de gases la composición y la repercusión que tiene esta en el análisis final de los datos.

Cantidad de gas para la elaboración de pruebas

El diseño experimental obliga a realizar las pruebas con el mismo tipo de gas. El recargar los tanques implica cambiar las condiciones de operación. Por tanto fue necesario solicitar en calidad de préstamo 2 tanques adicionales para almacenamiento del gas natural. La empresa VEHIGAS Bogotá suministro los tanques mostrados en la figura 4.1. Estos 2 tanques, junto con el tanque prestado por la empresa hidrocarburos de Colombia permitieron contar con 57.6 m³ de gas natural a una presión de 2400 psia para la realización de estas pruebas.



Figura 4.1
Tanques almacenamiento de gas vehicular

Composición del gas

La composición volumétrica del gas se determinó por medio de cromatografía de gases (ver tabla 4.1) proporcionada por la empresa Gas Natural SA ESP. Nuevamente se resalta que las pruebas se deben realizar con gases de referencia. Sin embargo aquí se realizaron con gas natural por lo costoso que resultaría la realización de estas pruebas.

Tabla 4.1
Composición volumétrica del gas natural utilizado en la experimentación

Sustancia	Composición	Composición volumétrica del gas natural (%)
Metano	CH ₄	78.18
Etano	C ₂ H ₆	10.047
Propano	C ₃ H ₈	3.969
I - Butano	C ₄ H ₈	0.625
N - Butano	C ₄ H ₁₀	0.687
I - Pentano	C ₅ H ₁₀	0.013
N - Pentano	C ₅ H ₁₂	0.081
Hexanos	C ₆ H ₁₄	0.024
Nitrógeno	N ₂	0.551
Dióxido de carbono	CO ₂	5.10

Tabla 4.2
Propiedades del gas natural empleado durante las pruebas.

Propiedad	Valor	Unidad
Gravedad específica	0.718	Adimensional
Poder calorífico inferior	37,99	MJ/m ³
Poder Calorífico superior	41,95	MJ/m ³

Ínter cambiabilidad de gases

Las condiciones de ensayo de los calentadores dependen principalmente de los gases que puedan ser manejados por el calentador, pero para efectos normativos es necesario realizar las pruebas con gas de referencia cuya composición volumétrica equivale a un 100 % de metano (CH₄)

Para realizar una analogía en los resultados se trabaja con el índice de Woobe (ver 4.1) [ref 5] el cual permite determinar la ínter cambiabilidad de gases y se puede apreciar que tan alejado pueda estar la representación de los datos con respecto a los especificados por los fabricantes.

$$W_i = \frac{LHV}{\sqrt{d}} \quad W_H = \frac{HHV}{\sqrt{d}} \quad (4.1)$$

Donde:

W_i: Índice de Woobe inferior

W_H: Índice de Wobbe superior

LHV: Poder Calorífico inferior

HHV_ Poder Calorífico superior

d: densidad relativa del gas

Con los valores del índice de Wobbe para el gas de referencia y el gas natural utilizado, se determina que existe una diferencia de potencia entre ambos gases de solo 2,4 % para índices de wobbe superiores y de 1,8% para los índices de Wobbe inferiores, con los cuales se realizan los análisis de los resultados bastante cercanos al gas con que se deben realizar las pruebas, esta comparación se aprecia en la tabla 4.3

Tabla 4.3

Índices de Wobbe para gas natural y el gas de referencia que debe ser utilizado en las pruebas

Índice de Wobbe	Gas natural	Gas referencia	% Variación
Inferior	44,83	45,67	1,84
Superior	49,51	50,72	2,39

Condiciones atmosféricas de los lugares donde se realizan las pruebas

Las pruebas realizadas en las diferentes altitudes son hechas en espacios confinados, con corrientes de aire menores y a la sombra, todos estos requisitos son exigidos por la norma técnica Colombiana [ref 3]

Los lugares donde se realizan las pruebas se encuentran entre los 323 msnm y los 2700 msnm como se especifica en la tabla 4.4

Tabla 4.4
Lugares donde se realizan las diferentes pruebas

Lugar	Presión atmosférica (mbar)	Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Altitud (msnm)
Melgar	971-974	25-35	40 - 65	323
Chinchiná	864-868	20 - 25	60 - 75	1378
Manizales	790 - 794	17- 22	65 - 85	2150
Bogotá	751- 754	15 - 20	40 -55	2650

La tabla 4.4 refleja la gran variedad de condiciones atmosféricas donde fueron realizadas las pruebas. Obligando a que la experimentación realizada no sea en condiciones isotérmicas, para poder establecer unos parámetros de funcionamiento muy similares a las reales.

Recintos donde se realizaron las pruebas

Los lugares donde se realizaron las pruebas se muestran a continuación con el ánimo de confirmar que son espacios confinados.

En Bogota (ver figura 2.11) se utilizaron las instalaciones del centro de investigación de la universidad de los Andes. En Manizales (ver figura 4.3) se contó con la colaboración de MABE Colombia en la realización de las pruebas en el laboratorio de gasodomésticos. En Chinchiná (ver figura 4.2) se realizaron las pruebas en una casa con el patio cubierto.



Figura 4.2
Instalaciones lugar de experimentación de los calentadores en Chinchiná



Figura 4.3
Instalaciones de las pruebas para calentadores en Manizales

Las pruebas a todos los calentadores se realizaron a 20 milibares de presión de suministro y las presiones de funcionamiento de algunos son diferentes a las establecidas por la norma para la realización de ensayos.

4.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS CALENTADORES DE PASO EVALUADOS

Tabla 4.5
Características técnicas principales de los calentadores evaluados

Marca	Potencia útil nominal (kW)	Consumo nominal (kW)	Presión mínima agua (bar)	Presión máxima agua (bar)	Presión conexión gas (mbar)	Caudal nominal (lt/min)
Bosch 5 lt	8.7	10,14	0.3	10	18	5
Vanward 5.5 lt	9.6	11,05	0.2	10	20	5.5
Challenger 5 lt	8.7	10,90	0.2	10	20	5
Challenger 11 lt	18	21,20	0.5	10	20	11
Centrales 11 lt	19.1	23,40	0.2	10	18	11
Sueco 10 lt	17.5	21,06	0.3	10	18	10
Haceb 10 lt	17.5	23,40	0.2	10	17.6	10

4.3 POTENCIA ÚTIL

La resolución 26308 del 2002 de la superintendencia de industria y comercio establece que se debe especificar en los calentadores de paso la potencia útil y esta se debe mantener en cualquier lugar donde sea instalado el artefacto..

Actualmente los fabricantes tan solo pueden asegurar que existe una disminución en la potencia útil con la altura, pero no pueden especificar cual es su comportamiento en diferentes altitudes.

La norma técnica colombiana en vigencia [ref 3] exige que la potencia útil calculada no se desvíe en más del 5 % a la declarada por el fabricante en condiciones de referencia.

La potencia útil se evalúa mediante la ecuación (3.3). Descrita en el capítulo anterior. A continuación se presentan los resultados obtenidos midiendo la potencia útil de los calentadores de paso evaluados.

4.3.1 Resultados obtenidos en calentadores de capacidad menor o igual a 10 Kw

La característica general de estos artefactos es que son calentadores tipo A, los cuales no necesitan evacuación de gases a través de chimeneas y son fácilmente instalables. Por lo general son los calentadores con más dispositivos de seguridad.

- ***Evaluación potencia útil del calentador BOSCH 5 lt.***

Este calentador es de fabricación China. Su clasificación es de tipo (A) pertenecientes a los calentadores con capacidades inferiores a 10 kW y sin dispositivo para adaptar chimenea de evacuación de gases. La principal diferencia de este tipo de calentador con los evaluados más adelante son los sistemas de protección, encendido y la geometría de los quemadores atmosféricos. Este último es el más relevante en esta evaluación ya que el comportamiento del calentador se ve afectado directamente por la tecnología de este dispositivo.

La evaluación de la potencia útil nominal y mínima al calentador BOSCH 5 lt mostrada en la figura 4.4, hace ver una alta correlación de los datos con incertidumbres muy bajas de la potencia útil por cada altitud. La que genera un comportamiento totalmente lineal de la potencia útil con respecto a la presión atmosférica donde se evaluó el artefacto.

La pérdida de potencia en este calentador no es tan alta como se puede apreciar con los demás calentadores (ver tabla 4.6) pero su potencia nominal es menor a la declarada por el fabricante (-4.25 %). Además la pérdida de potencia de Bogotá con respecto al nivel del mar es de un 10 %, superando los valores exigidos por la norma.

Al tomar una variación constante de la altitud, la pérdida de potencia para este calentador por cada 300 metros de altitud solo alcanza un valor de 1.26% en promedio (ver tabla 4.6)

En calentadores que cuentan con dos posiciones de llama, la potencia útil mínima se realiza con la de menor consumo de gas

Se observa que la potencia útil mínima se comporta en forma similar a la potencia útil nominal del mismo calentador. Su comportamiento es lineal, pero la pendiente de variación de potencia es menor.

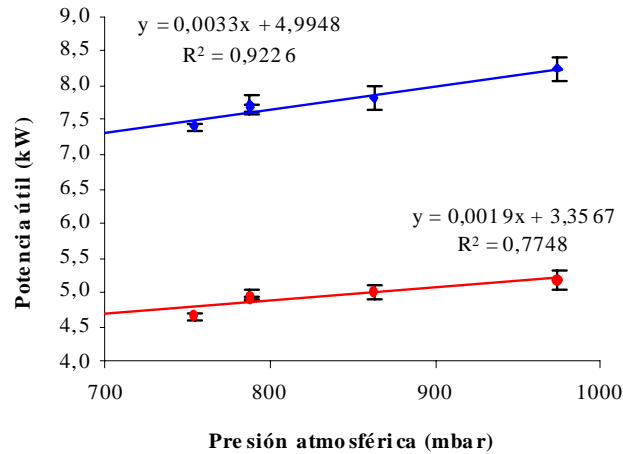


Figura 4.4

Evaluación de la potencia útil nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador BOSCH 5 lt

- Evaluación potencia útil del calentador VANWARD 5.5 lt

El funcionamiento y constitución de este calentador es muy similar al calentador BOSCH de 5 lt, Su principal similitud se encuentra en la geometría de los quemadores y los diferentes dispositivos de seguridad. Al igual que en el calentador anteriormente evaluado la disminución de la potencia útil (ver figura 4.5) con la altitud corresponde a un 10.7% entre Bogotá y el nivel del mar (ver tabla 4.6). Tiene la misma característica negativa del anterior calentador y es no poder alcanzar la potencia útil nominal declarada por el fabricante, estando por debajo de esta en un (3.22%)

De igual forma la potencia útil mínima se comporta como un reflejo de la potencia llevando casi a la mitad los valores de la potencia útil en cada altitud.

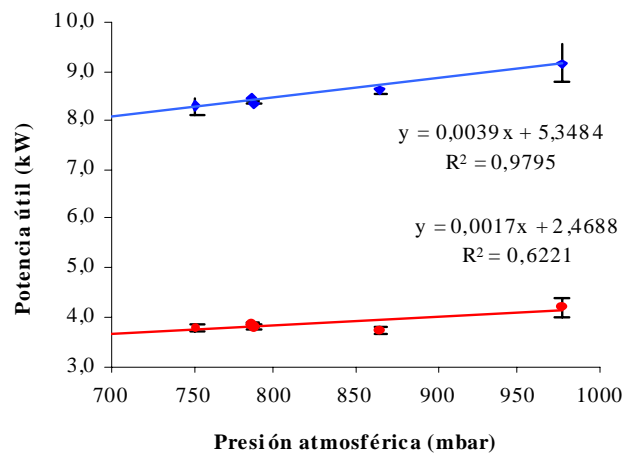


Figura 4.5.

Evaluación de la potencia útil nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador VANWARD 5.5 lt.

- *Evaluación potencia útil del calentador CHALLENGER 5 lt*

Este tipo de calentador pertenece a otro tipo de tecnología que incluye regulador interno de presión para el suministro de gas a la flauta donde se encuentran los inyectores, además el tipo de quemador varía con respecto a los anteriores, siendo estos de una fabricación más simple.

A este tipo de calentador no se le realizaron adaptaciones para poder funcionar adecuadamente en Colombia. Solo se modificaron las condiciones de reglaje del regulador interno, disminuyendo la presión en la flauta

En la figura 4.6 se aprecia que la variación de la potencia es mas alta con la altitud debido a la pendiente que presenta la recta que describe el comportamiento para este tipo de calentador. Su pérdida de potencia es mayor con la altitud que los calentadores anteriormente mostrados pero su potencia útil calculada es mayor que la declarada a condiciones de referencia en un 8.22 % (ver tabla 4.6). La pérdida de potencia entre Bogotá y el nivel del mar corresponde a un 12.1% (ver tabla 4.6)

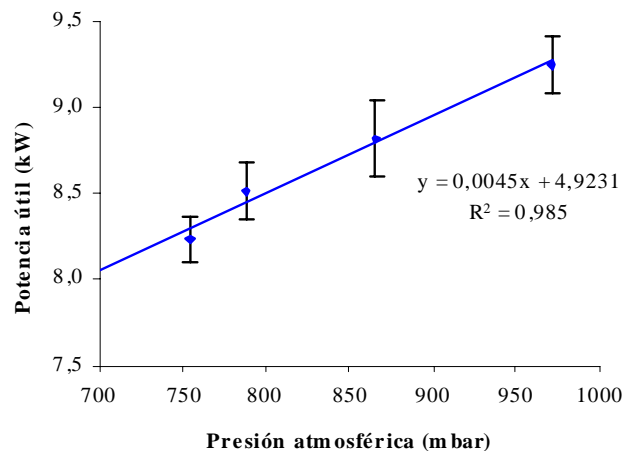


Figura 4.6. Evaluación de la potencia útil nominal (azul) a calentador CHALLENGER.5 lt

4.3.2 Resultados obtenidos en calentadores de capacidad superior a 10 Kw

Por definición los calentadores de esta capacidad no pueden tener evacuación de gases sin chimenea, la mayoría de los calentadores están diseñados para una presión de suministro a 18 milibares, pero los ensayos se realizan a 20 milibares como lo especifica la norma técnica.

- *Evaluación potencia útil del calentador CHALLENGER 11 lt.*

El calentador de la figura 4.7 es de la misma empresa fabricante del calentador de la figura 4.6. Se puede ver una gran similitud entre la variación de la potencia en estos calentadores ya que el ultimo calentador cuenta con el doble de quemadores que el anterior (12 en total).

Debido a que las condiciones de funcionamiento son muy similares se puede establecer que la potencia en las diferentes altitudes es siempre el doble del calentador de menor capacidad. Si se

asume que los resultados de la potencia del calentador de más baja capacidad se doblaran y se compararan con los resultados obtenidos al utilizar la ecuación que describe la potencia útil en la figura 4.7. Estos tendrían una diferencia de máximo un 3 %, fácilmente explicables por variaciones en el volumen de la cámara de combustión. El sistema de evacuación de gases también ayuda en esta diferencia, pero identificar la influencia de estas diferencias no es tan fácil como parece. Indicando de esta manera que el funcionamiento no solo depende de los inyectores sino de todo el conjunto, y que el establecer una constante en la variación de la potencia para todos los calentadores no es tan sencilla como parece.

La pérdida de potencia entre Bogotá y el nivel del mar es del 12.5 % muy similar al calentador del mismo fabricante de menor potencia 12.1%, pero la variación entre la potencia útil nominal declarada y la potencia obtenida solo muestra una diferencia del 2.7% entre ellas.

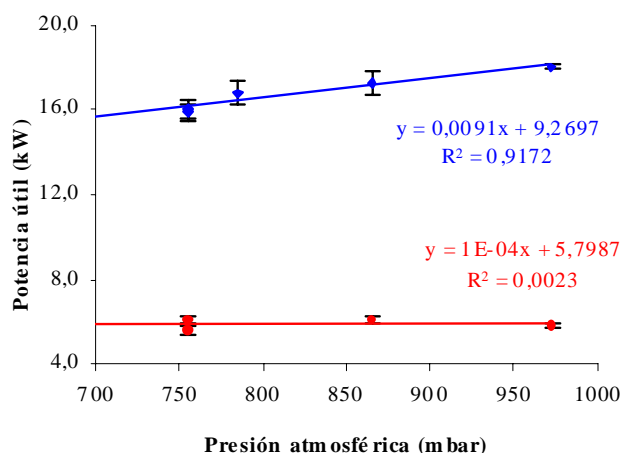


Figura 4.7.
Evaluación de la potencia útil nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador CHALLENGER 11lt.

- *Evaluación potencia útil calentador CENTRALES 11 lt.*

El calentador de la figura 4.8 es el que cuenta con la construcción más sencilla por no contar con regulador de presión de agua a la entrada de esta, las partes son muy fáciles de desmontar, se nota también que el diámetro de la tubería del serpentín es mucho mayor que en los demás calentadores.

Presenta la variación de potencia más alta con respecto a los demás calentadores, debido a que la pendiente de la recta que describe el comportamiento de este parámetro es la más alta de todos los calentadores evaluados. La pérdida de potencia de Bogotá con respecto al nivel del mar alcanza niveles del 13.06 %, un valor muy alto considerando que solo es permitido un 5 %.

La diferencia entre la potencia útil y la potencia útil mínima es muy grande por las diferencias en el consumo de gas entre estas dos posiciones.

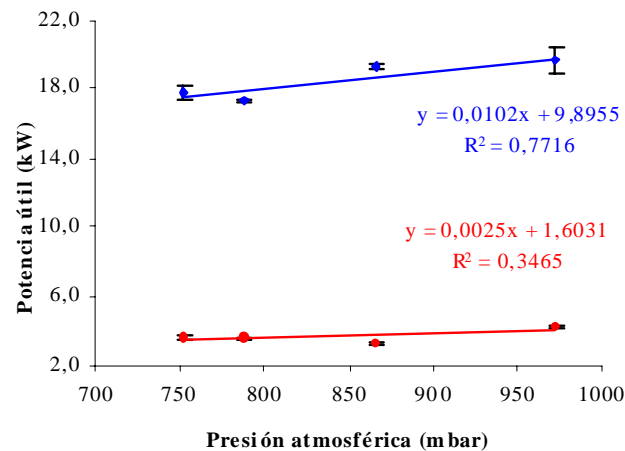


Figura 4.8.

Evaluación de la potencia útil nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador CENTRALES 11lt.

- Evaluación potencia útil del calentador SUECO 10 lt.

Se aprecia que la correlación en las pruebas de potencia para este calentador es muy alta para ambos tipos de potencia: la nominal como la mínima, debiéndose principalmente a que el consumo de gas en la posición de máxima llama solo tiene una diferencia en porcentaje del 8,5% con respecto a la de mínimo consumo.

Presenta una pérdida de potencia muy similar a los calentadores de tecnología china. Este comportamiento es el más lineal de todos. La pérdida es tan solo de un 10,04% entre Bogotá y el nivel del mar. Cabe anotar que existe una diferencia alta entre la potencia calculada y la declarada por el fabricante, correspondiente a 9,32% (ver tabla 4.6).

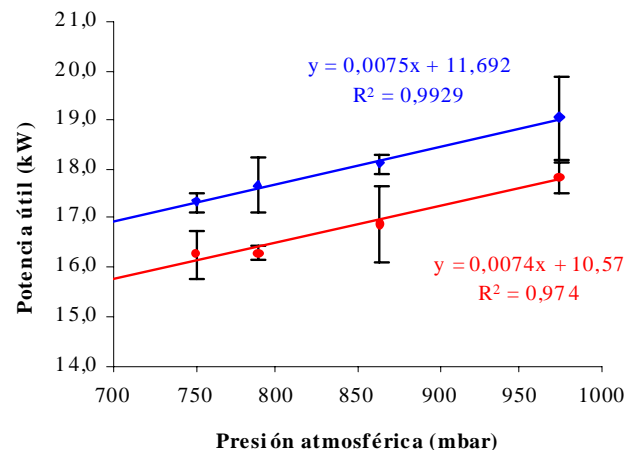


Figura 4.9.

Evaluación de la potencia útil nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador SUECO 10 lt.

Conclusión de la evaluación potencia útiles los calentadores evaluados

Las comparaciones entre las diferentes clases de calentadores que se evaluaron se muestran en la tabla 4.6. Se muestra la variación del comportamiento con una determinada altitud, la diferencia entre la estipulada por el fabricante en condiciones de referencia (1013 milibares a 15 ° C) y la dada realmente bajo condiciones de prueba, y la pérdida de potencia total entre Bogota y la altitud del nivel del mar

Tabla 4.6 comparación de la variación de la potencia útil declarada contra la obtenida, el porcentaje de variación de pérdida de potencia útil para cada 300 metros de altitud y el porcentaje de pérdida de potencia entre Bogota y el nivel del mar en los calentadores evaluados

Referencia o marca	Potencia útil nominal declarada	Potencia útil calculada nivel del mar	% diferencia entre calculada y declarada	% pérdida con respecto a Bogotá	% pérdida cada 300 metros de altitud	Presión funcionamiento
Bosch 5 LT	8.7 kW	8.33 kW	- 4.25 %	10.20 %	1.26 %	18 mbar
Vanward 5.5 lt	9.6 kW	9.29 kW	- 3.22 %	10.73 %	1.34 %	20 mbar
Challenger 5 lt	8.7 kW	9.48 kW	8.22 %	12.10 %	1.52 %	20 mbar
Challenger 11 lt	18 kW	18.5 kW	2.7 %	12.51 %	1.59 %	20 mbar
Centrales 11 lt	19.1 kW	20.2 kW	5.44 %	13.06 %	1.63 %	18 mbar
Sueco 10 lt	17.5 kW	19.3 kW	9.32 %	10.04 %	1.23 %	18 mbar
Haceb 10 lt	17.5 kW	18.8 kW	4.35 %	4.66 %	0.59 %	17.6 mbar

** Todas las pruebas se realizaron a 20 milibares de presión de suministro*

De la tabla 4.5 se aprecia que el rango de variación de pérdida de potencia cada 300 m es de 1.23 % hasta 1.63 % dependiendo del tipo de calentador. En ninguno de los casos este porcentaje de pérdida de potencia es mayor al establecido en la norma canadiense la cual establece una pérdida de potencia del orden del 4% para cada 1000 ft de diferencia [ref 6].

Igualmente se ve que el cambio en la potencia calculada con respecto a la potencia declarada por el fabricante no es muy elevada en la mayoría de los casos. Esto se debe a que existe diferencia en el tipo de gas utilizado y a que las presiones de ensayo en la anterior norma estaban establecidas en 18 mbar. La norma actual [ref 3] exige que las pruebas se realicen a 20 mbar.

Otros porcentajes elevados se pueden dar debido a que la potencia estimada de estos calentadores no es la que se cree tener esta puede ser mayor que la declarada por el fabricante.

En cambio en calentadores de tecnología china se declara una potencia nominal útil determinada y este valor nunca es alcanzado durante estas pruebas, obligando de esta manera al incumplimiento de la potencia útil.

4.4 CONSUMO CALORÍFICO

El consumo calorífico nominal es el valor máximo del producto del consumo volumétrico o másico por el poder calorífico inferior del gas declarado por el fabricante, este valor solo se obtiene al realizar los ensayos en condiciones de referencia.

El cálculo del consumo calorífico en los ensayos especificados en la norma técnica Colombiana [ref 3] implica el uso del poder calorífico inferior del gas de referencia cuyo valor corresponde a 34.01 MJ/m³ y en este caso se emplea gas natural con un poder calorífico inferior igual a 37,99 MJ/m³. (ver tabla 4.2)

Adicionalmente el volumen de gas medido requiere del uso de una fórmula de segundo orden (ver ecuación 3.2) que permite llevar el flujo volumétrico del gas en cualquier altitud a condiciones de referencia. (Presión atmosférica 1013.25 milibares a 15°C) El uso de esta fórmula aplica correcciones al consumo de gas más cercanas a la realidad tal como se ve en la figura 4.10 donde se representa bajo el nombre de consumo corregido radical, en cambio al ser llevado a condiciones estándar el consumo de gas utilizando la ecuación 3.5 este indica un comportamiento contradictorio ya que a mayor altitud la corrección que realiza esta fórmula genera valores por debajo del valor obtenido en condiciones de referencia, el comportamiento de esta corrección se muestra en la figura 4.10 bajo el nombre de consumo corregido. Normalmente se utiliza en el cálculo de la eficiencia térmica cuya ecuación es la 3.4.

Por último se indica en la figura 4.10 el consumo de gas sin corrección para cuatro altitudes diferentes en el calentador VANWARD 5.5 lt bajo condiciones similares de prueba, bajo el nombre de consumo sin corregir, todos los valores representados en la figura 4.10 se encuentran representados en la tabla 4.7.

Tabla 4.7 Consumos de gas sin corregir utilizados para calcular la eficiencia térmica en calentador de paso VANWARD 5.5 lt, consumo de gas corregido utilizando ecuación 3.2 que incluye radical y consumo de gas corregido utilizando ecuación 3.5 utilizada actualmente por los fabricantes de calentadores para el cálculo de la eficiencia térmica

Lugar de la prueba	Presión atmosférica (mbar)	Consumo corregido (m ³ /h)	Consumo corregido radical (m ³ /h)	Consumo sin corrección (m ³ /h)
Melgar	977	0,993	1,039	1,064
Chinchina	865	0,947	1,045	1,128
Manizales	787	0,888	1,017	1,138
Manizales	786	0,901	1,029	1,150
Bogotá	752	0,885	1,026	1,165

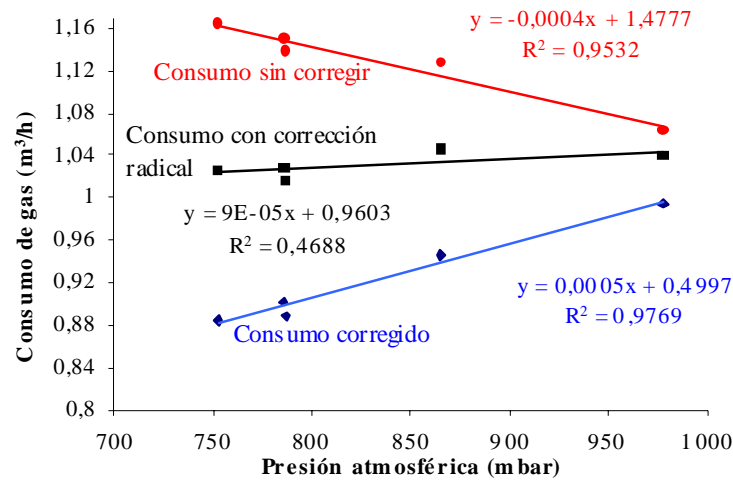


Figura 4.10

Comportamiento del consumo de gas sin corregir, corregido según ecuación 3.5 (consumo corregido) y corregido según ecuación 3.2 (consumo con corrección radical) en diferentes altitudes para calentador VANWARD 5.5 LT

Evaluación del consumo calorífico corregido a los diferentes calentadores evaluados

Teniendo en cuenta que el consumo calorífico lleva una corrección por altitud, es de suponer que los resultados deben ser reportados de manera que se vean constantes en cualquier condición atmosférica. Las figuras del 4.11 a la 4.17 muestran el comportamiento del consumo calorífico corregido de los diferentes calentadores evaluados.

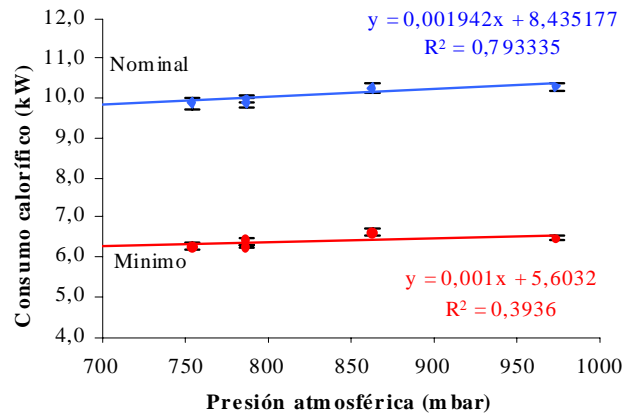


Figura 4.11.

Evaluación del consumo calorífico nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador BOSCH 5 lt

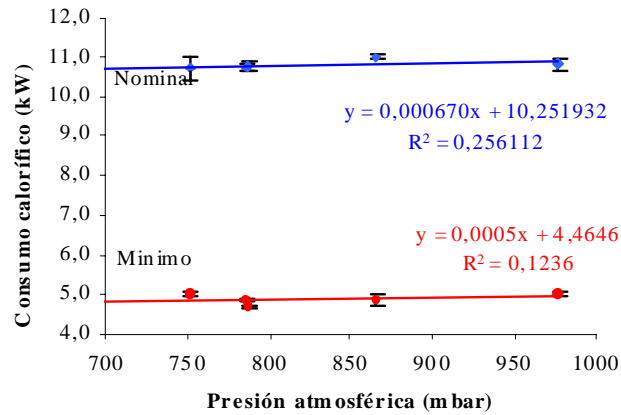


Figura 4.12
Evaluación del consumo calorífico nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador VANWARD 5.5 lt.

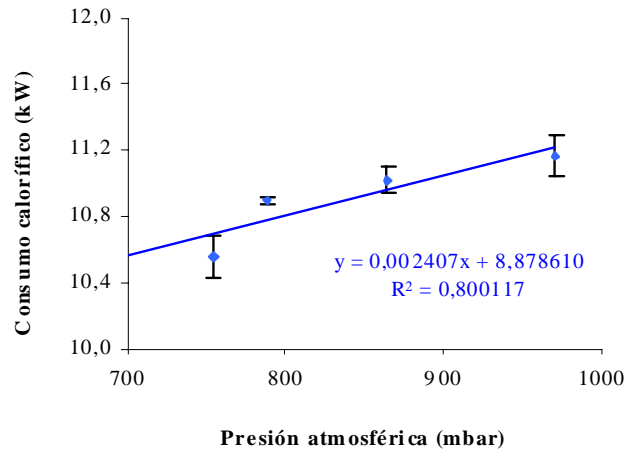


Figura 4.13
Evaluación del consumo calorífico nominal (azul) a calentador CHALLENGER 5 lt

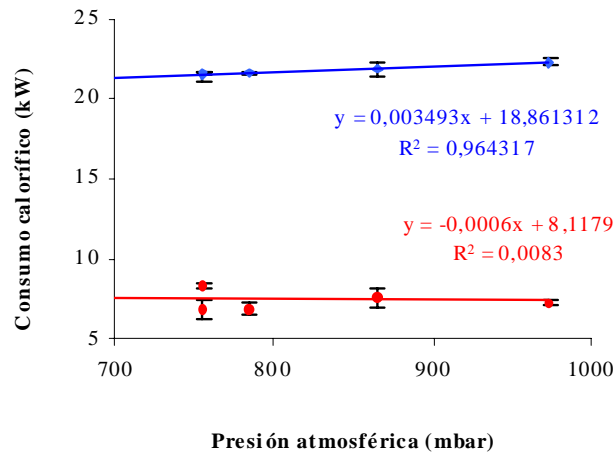


Figura 4.14
Evaluación del consumo calorífico nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador CHALLENGER 11 lt

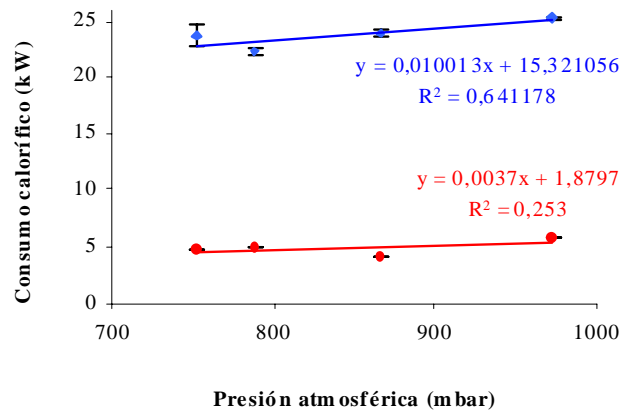


Figura 4.15.
Evaluación del consumo calorífico nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador CENTRALES 11 lt

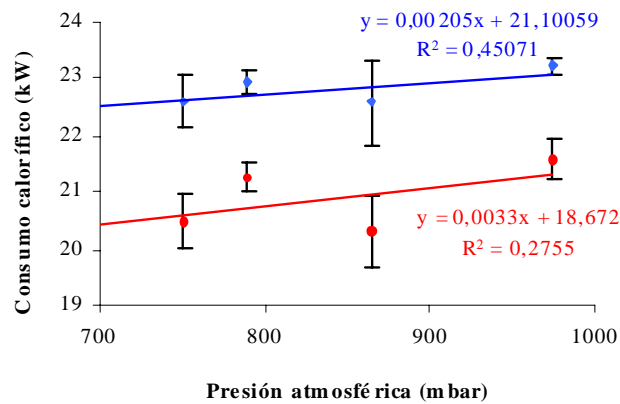


Figura 4.16.
Evaluación del consumo calorífico nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador SUECO 10 lt

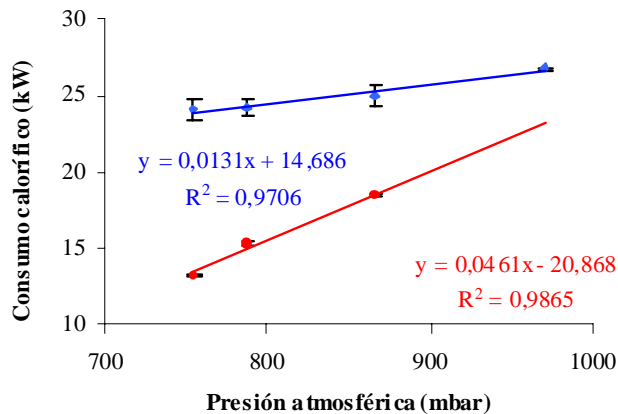


Figura 4.17
Evaluación del consumo calorífico nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador HACEB 10 lt

En los calentadores de baja potencia se alcanza a notar pendientes positivas que indican un aumento en el consumo calorífico en condiciones de referencia, pero esto se debe principalmente al error implicado en la corrección del flujo volumétrico.

De los tres calentadores de baja potencia presentados el CHALLENGER de 5 lt es el calentador que presenta más variación del consumo calorífico con la altitud, pero no son muy diferentes con respecto a los calentadores anteriormente mostrados

En la tabla 4.8 se observa el cambio de valores entre el consumo calorífico a nivel del mar y en Bogotá, determinando que para calentadores HACEB y CENTRALES las diferencias en porcentaje alcanzadas entre estas altitudes es muy alta (entre un 10 y un 12%), mientras para los demás calentadores se encuentran valores entre el 1 y 5.5 %, los cuales se consideran con un comportamiento constante a lo largo de las diferentes altitudes en las que se hizo la respectiva corrección.

También se observa que la diferencia entre los consumos caloríficos declarados por el fabricante y los consumos caloríficos obtenidos con este gas natural no son muy elevados. Solamente los casos en los cuales se presentan problemas entre el consumo calorífico declarado y el calculado es con los calentadores, HACEB y CENTRALES, al alcanzar niveles del 16 al 18%. En cambio para los demás calentadores las diferencias son inferiores al 5%, indicando que tanto en las condiciones del gas de referencia como el del gas natural empleado son muy similares y que la corrección aplicada al consumo calorífico es adecuada para este tipo de pruebas. Es importante anotar que la variación entre Bogota y el nivel del mar influye directamente en los resultados de la eficiencia térmica, ya que un valor con mayor diferencia implica un mayor error en los cálculos del valor mencionado.

Tabla 4.8 consumos caloríficos corregidos evaluados en Bogota y a nivel del mar, comparados con los consumos caloríficos nominales declarados por los fabricantes, para los calentadores evaluados.

Marca	Consumo calorífico calculado nivel mar (kW)	Consumo calorífico Bogotá (kW)	Porcentaje entre nivel del mar y Bogotá	Consumo calorífico declarado por el fabricante	Porcentaje de diferencia entre declarado y corregido
Bosch 5 lt	10,40	9,90	4,84 %	10,14	2,53 %
Vanward 5.5 LT	10,93	10,76	1,59 %	11,05	-1,09 %
Challenger 5 lt	11,32	10,69	5,51 %	10,90	3,69 %
Challenger 11 lt	22,40	21,50	4,04 %	21,20	5,36 %
Haceb 10 lt	27,96	24,56	12,15 %	23,40	16,31 %
Centrales 11 lt	25,47	22,87	10,19 %	21,06	17,30 %
Sueco 10 lt	23,18	22,65	2,29 %	23,40	-0,96 %

4.5 EFICIENCIA TÉRMICA

La definición de rendimiento según la norma técnica Colombiana [ref 3] es el porcentaje descrito entre la relación entre la potencia útil y el consumo calorífico.

Según lo establecido en la norma técnica colombiana [ref 3], el rendimiento o eficiencia térmica al consumo calorífico nominal será como mínimo del 84 % para los artefactos de consumo calorífico nominal superior a 10 kW y del 82% para los artefactos de un consumo calorífico nominal inferior o igual a 10 kW.

Para poder obtener estos porcentajes es necesario realizar las pruebas en condiciones de referencia debido a que la variación de la potencia útil no es un factor que pueda ser corregido con la altitud.

Se analizan los calentadores de más baja potencia o inferior a 10 kW de consumo calorífico dos de 8.7 kW y uno de 9.6 kW

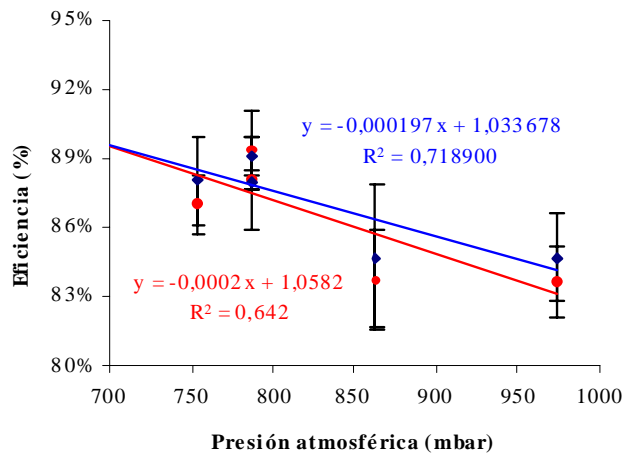


Figura 4.18

Evaluación de la Eficiencia térmica nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador BOSCH 5 lt utilizando formula 3.5 para la corrección del consumo de gas natural.

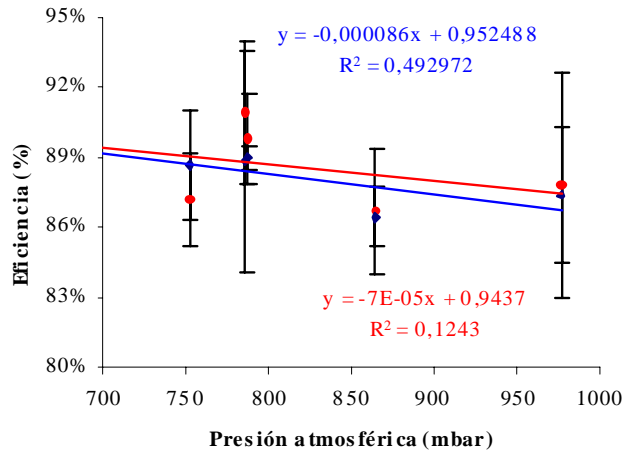


Figura 4.19

Evaluación de la Eficiencia térmica nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador VANWARD 5 lt utilizando formula 3.5 para la corrección del consumo de gas natural.

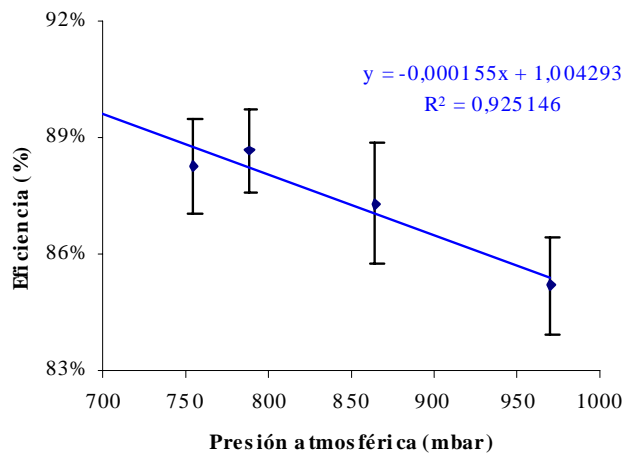


Figura 4.20

Evaluación de la Eficiencia térmica nominal (azul) a calentador CHALLENGER 5 lt utilizando formula 3.5 para la corrección del consumo de gas natural.

Al evaluar los resultados de las (ver figuras 4.18, 4.19, 4.20) pruebas utilizando la ecuación 3.5 para corregir el consumo volumétrico a utilizar en él calculo de la eficiencia térmica (ecuación 3.4), se aprecia que la eficiencia térmica aumenta con la altitud, a pesar de la disminución de la potencia útil en estos calentadores, se esperaba que la eficiencia térmica disminuyera con la altitud y no los resultados que se muestran en los que la eficiencia térmica aumenta con la altitud. Además es importante anotar que en la mayor altitud evaluada en los tres calentadores se alcanzan eficiencia superiores al 90%, es como si el calentador no se viera afectado por la pérdida de potencia útil con la altitud, por el contrario se premia con eficiencias tan altas como las expuestas en las figuras (4.18, 4.19, 4.20).

Análisis de los resultados de las pruebas de eficiencia térmica con la formula aplicada para llevar el flujo volumétrico a utilizar en el consumo calorífico a condiciones estándar

En la figura 4.10 se puede apreciar que con la corrección aplicada al flujo de gas aplicando la formula 3.2, este se mantiene muy constante con variaciones inferiores al 3% para el flujo volumétrico del consumo en las pruebas realizadas al calentador VANWARD DE 5 LT, en todas las altitudes donde se realizo la experimentación.

Evaluación de la eficiencia térmica a calentador BOSCH 5 lt

Al apreciar un cambio notorio en el comportamiento de la eficiencia térmica en este calentador con respecto a los anteriormente expuestos, ya que la eficiencia térmica aumenta al ir disminuyendo con la altitud, hasta alcanzar valores muy cercanos a los exigidos por la norma técnica Colombiana [ref 3], para este calentador a nivel del mar su eficiencia térmica es del 81.1% (ver figura 4.21) un valor inferior al exigido, pero cabe anotar que la presión de ensayo en este calentador fue de 20 mbar y la de funcionamiento especificada por el fabricante es de 18 mbar

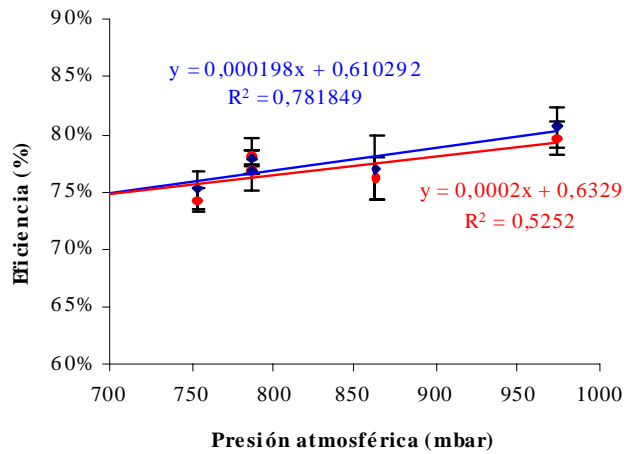


Figura 4.21.

Evaluación de la Eficiencia térmica nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador BOSCH 5 lt utilizando formula 3.2 para la corrección del consumo de gas natural.

Evaluación de la eficiencia térmica a calentador VANWARD 5.5 lt.

Para este calentador (ver figura 4.22) en particular se obtiene una eficiencia térmica del 83.9% a condiciones de referencia, la cual se encuentra dentro de los parámetros exigidos por la norma técnica Colombiana [ref 3] y para la ciudad de Bogota se tiene una eficiencia térmica del 75.9%, (ver tabla 4.9) obteniendo una diferencia del 8.9% entre eficiencias

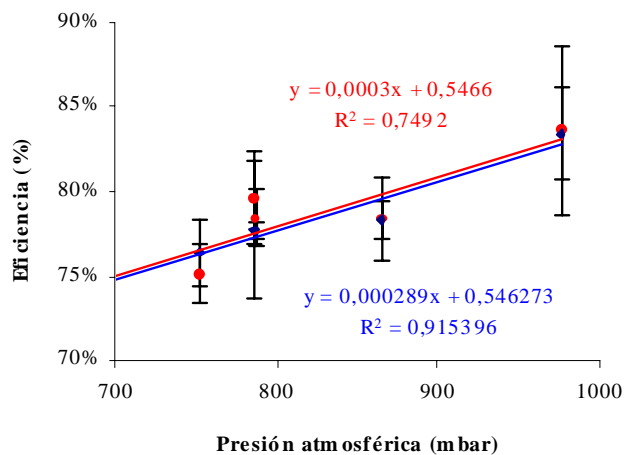


Figura 4.22.

Evaluación de la eficiencia térmica nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador VANWARD 5.5 lt utilizando formula 3.2 para la corrección del consumo de gas natural.

Evaluación de la eficiencia térmica a calentador CHALLENGER 5 lt.

Para el calentador de la figura 4.23 la eficiencia térmica del calentador en condiciones de referencia cumple con lo exigido en la norma técnica Colombiana [ref 3] ya que a nivel del mar le correspondería una eficiencia del 82.7% y en la ciudad de Bogota 76.2% (ver tabla 4.9) con una diferencia entre eficiencias del 7.8%.

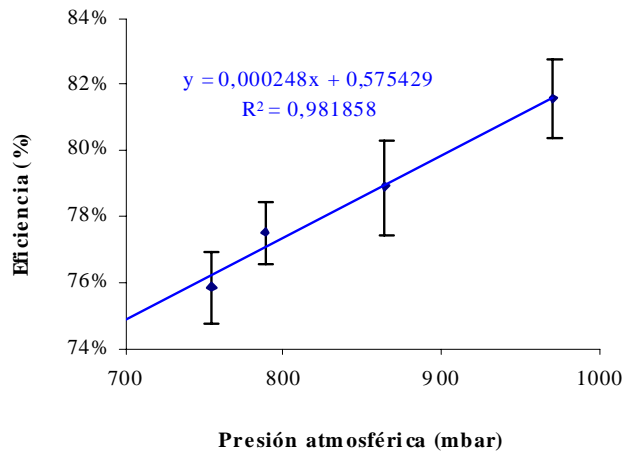


Figura 4.23.

Evaluación de la eficiencia térmica nominal (azul) a calentador CHALLENGER 5 lt utilizando formula 3.2 para la corrección del consumo de gas natural.

Evaluación de la eficiencia térmica a calentador CHALLENGER 11 lt.

En la figura 4.24 se aprecia el comportamiento de la eficiencia térmica nominal y mínima. Al igual que en los anteriores calentadores la eficiencia térmica nominal decrece con el incremento de altitud. Se aprecia que la pendiente es mucho menor a la eficiencia térmica nominal, dado que la potencia útil mínima en la figura 4.7 es casi constante en todas las altitudes donde fue evaluada.

De igual manera la eficiencia térmica estimada para el nivel del mar es correspondiente a un 81.6% contra la de Bogota con un 75.5% con una diferencia entre ambas eficiencias del 7.4%.

Este calentador no cumple con la eficiencia exigida por la norma técnica Colombiana [ref 3], pero es importante anotar que la presión de trabajo en el regulador de presión interna establecida para Colombia es menor a la presión para la cual está diseñado.

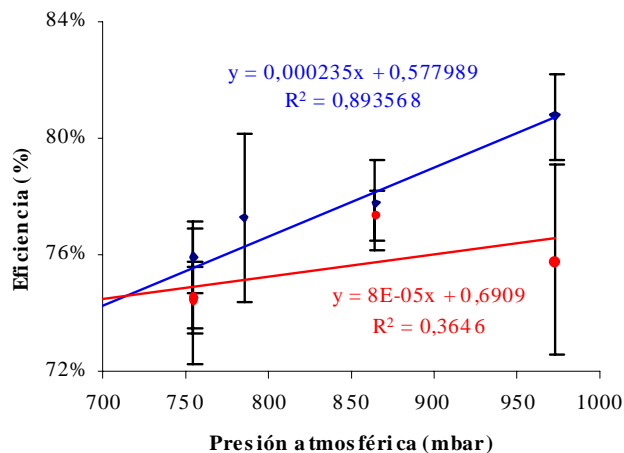


Figura 4.24.

Evaluación de la Eficiencia térmica nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador CHALLENGER 11 lt utilizando formula 3.2 para la corrección del consumo de gas natural.

Evaluación de la eficiencia térmica a calentador CENTRALES 11 lt.

Al parecer en este calentador (ver figura 4.25) las evaluaciones en melgar se afectaron drásticamente por las temperaturas de entrada del agua ya que alcanzaron a ser de 33°C, disminuyendo de manera considerable la eficiencia térmica obtenida a esta altitud, alterando así el comportamiento que venía presentando en las diferentes altitudes.

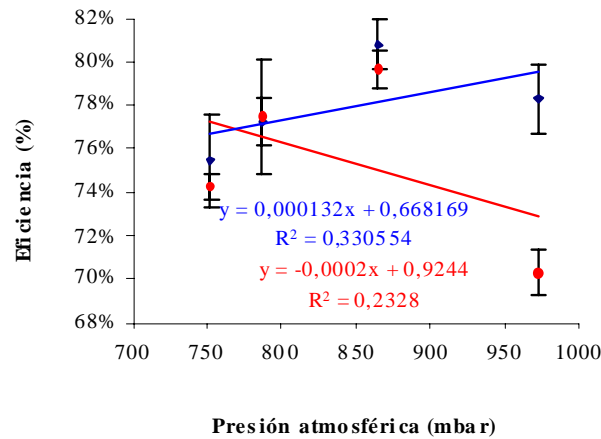


Figura 4.25.

Evaluación de la Eficiencia térmica nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador CENTRALES 11 lt utilizando formula 3.2 para la corrección del consumo de gas natural.

Evaluación de la eficiencia térmica a calentador SUECO 10 lt

En la figura 4.26 el comportamiento de la eficiencia térmica nominal a nivel del mar tienen un valor del 80.1% y para la ciudad de Bogotá su valor corresponde al 77.3% con una diferencia entre eficiencias del 3.4 %, aunque su valor a nivel del mar no alcanza al mínimo exigido por la norma, indicando para este calentador un sostenimiento de la eficiencia térmica en las diferentes altitudes.

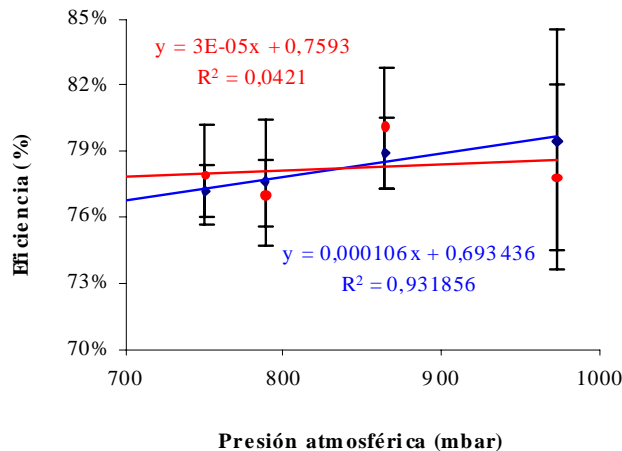


Figura 4.26

Evaluación de la Eficiencia térmica nominal (azul) y mínima (rojo) a calentador SUECO 10 lt utilizando formula 3.2 para la corrección del consumo de gas natural.

Recopilación general de la evaluación de la eficiencia térmica a los calentadores evaluados.

En la tabla 4.9 se aprecia el cálculo de la eficiencia térmica, utilizando la norma actual [ref 3] y la eficiencia utilizando la definición dada en norma como la relación entre la potencia útil y el consumo calorífico, con la norma en vigencia se puede ver que los calentadores de mas baja potencia a nivel del mar, como lo son BOSCH, VANWARD Y CHALLENGER, alcanzan niveles del 83 al 85 % pero en condiciones atmosféricas como las de Bogotá, estas eficiencias superan el 88%, con una exigencia de solo el 82%, para ambos casos cumpliría la exigencia de la norma actual.

Al revisar las eficiencias calculadas utilizando la corrección de la formula 3.2, para el nivel del mar esta hace que den valores de 81 al 84 % cumpliendo las exigencias, pero para Bogotá las eficiencias solo alcanzan valores del 76%.

Para los calentadores restantes de mayor potencia al calcular la eficiencia con la norma vigente dan valores desde el 78% hasta el 83% para nivel del mar y en Bogota comprende desde el 86% hasta el 90% y la norma solo exige el 84%, en la menor altitud difícilmente se cumple, pero en niveles como Bogotá esta eficiencia aumenta. Y no cumpliría la exigencia de la norma ya que lo hace para condiciones de referencia [ref 3].

En cambio con las eficiencias calculadas utilizando la formula 3.2 para corregir el volumen de gas consumido, dan valores a nivel del mar desde el 78 hasta el 82% y para Bogotá dan valores de eficiencia desde el 78 hasta el 84 %, en ninguno de los casos los calentadores de mayor potencia cumplen con la eficiencia exigida por la norma técnica Colombiana [ref 3] la cual debe ser como mínimo del 84%.

Algunos de los factores influyentes en que los resultados no sean los esperados, se deben a que las condiciones de prueba son diferentes para las que esta diseñado el calentador, ya que en la prueba se estipula la presión de ensayo a 20 milibares, pero la mayoría de estos calentadores han sido diseñados para 18 milibares, también puede influir el hecho que en la ciudad de Melgar no se pudieron cumplir los requisitos de temperatura de entrada del agua, que la norma exige con respecto a esta ya que la máxima temperatura de entrada del agua permitida sea de 25°C y en la mayoría de las pruebas se tenían temperaturas de entrada de 29 a 33 °C.

Tabla 4.9

Eficiencia térmica evaluada a nivel del mar y en Bogotá para la corrección utilizando la formula 3.5 y para la propuesta utilizando la formula 3.2.

Marca	Eficiencia Térmica corrección ecuación 3.2		Eficiencia según norma actual ecuación 3.5		Eficiencia Exigida en la norma técnica 3531
	nivel mar 1013 (mbar)	Bogotá 754 (mbar)	nivel mar 1013 (mbar)	Bogotá 754 (mbar)	
Bosch 5 lt	81,1%	75,9%	83,4%	88,5%	82 %
Vanward 5.5 lt	83,9%	76,4%	86,5%	88,7%	82 %
Challenger 5 lt	82,7%	76,2%	84,7%	88,7%	82 %
Challenger 11 lt	81,6%	75,5%	83,2%	87,9%	84 %
Haceb 10 lt	78,9%	74,1%	78,9%	86,3%	84 %
Centrales 11 lt	80,2%	76,8%	82,7%	88,9%	84 %
Sueco 10 lt	80,1%	77,3%	83,0%	89,3%	84 %

4.6 COMBUSTIÓN

Las emisiones de (CO) son la principal preocupación que tienen en la actualidad los fabricantes, ya que dependiendo del comportamiento de las emisiones en grandes altitudes se puede afectar vidas humanas. La gran mayoría de calentadores cuentan con sistemas de protección ante este hecho, como son la evacuación de gases a través de chimenea, dispositivos de corte del suministro de gas por excesos de temperaturas en la zona de revoco, protectores contra inestabilidad de llama y otro sin numero de protecciones. Muchos de estos dispositivos han sido diseñados y construidos para trabajar a bajas altitudes. Uno de los artefactos con mayor numero de dispositivos de protección es el BOSCH de 5 lt, el cual cuenta con protección de recalentamiento que evita que el intercambiador de calor se recaliente o sufra el llamado “quemado en seco” (ver figura 4.27). Este dispositivo cierra la válvula de gas automáticamente al apagarse la llama y así evitar fugas de gas.



Figura 4.27

Dispositivo de falla en la llama que actúa cuando existe un sobrecalentamiento en el intercambiador de calor en el calentador BOSCH 5 lt

Evaluación de la combustión para calentador BOSCH 5 lt

En la figura 4.28 se presenta el comportamiento de las emisiones de (CO) en la posición de mínimo consumo de gas al igual que la relación aire combustible en la figura.4.29

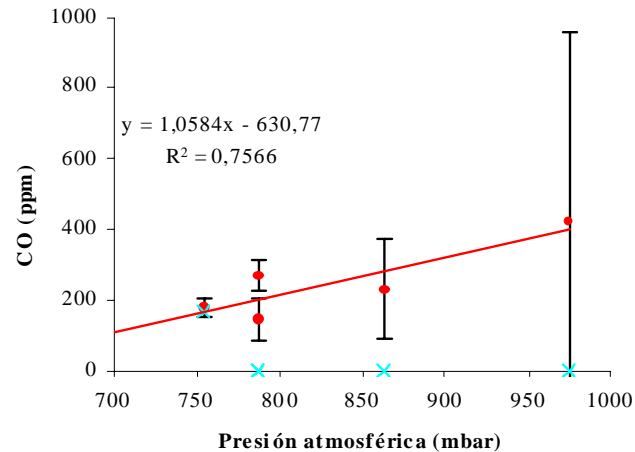


Figura 4.28

Evaluación de las emisiones de monóxido de carbono en la posición de mínimo consumo del calentador BOSCH 5 lt.

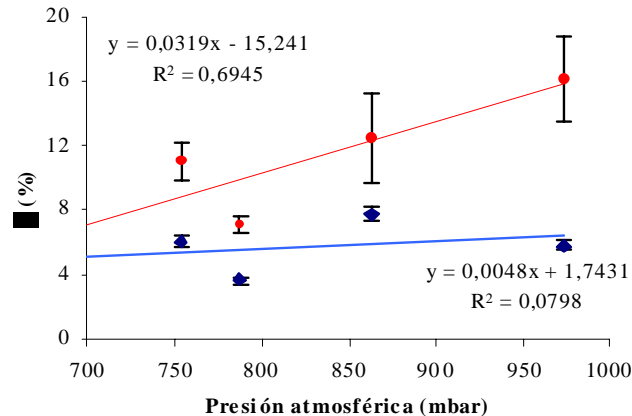


Figura 4.29

Evaluación del comportamiento de la relación aire/combustible para el mínimo consumo (rojo) y el consumo nominal (azul).en calentador BOSCH 5 lt

La condición más destacable de este calentador es el comportamiento inverso al esperado frente a las emisiones de monóxido de carbono (CO), ya que en la posición mínima de consumo de gas se da que estas emisiones aumentan a medida que disminuye la altitud (ver figura 4.28), igualmente la relación aire combustible muestra una tendencia al aumento a medida que la altitud disminuye (ver figura 4.29) alcanzando niveles entre 9 y 11 para la menor altitud.

Se debe en gran parte a las altas relaciones de aire combustible, que generalmente se ocasiona por una circulación excesiva de aire durante la etapa de combustión ocasionando turbulencias que no permiten la quema de todo el combustible utilizado.

El funcionamiento en condiciones nominales es óptimo para este tipo de calentador ya que presentan niveles de emisión iguales a cero, en las mayores altitudes y valores despreciables en las altitudes menores, con un comportamiento que presenta tendencia alterna de las relaciones aire combustible pero con valores mucho menores a los obtenidos en la posición de consumo menor

Evaluación de la combustión para calentador VANWARD 5.5 lt

En el próximo análisis se presenta el calentador de construcción similar al BOSCH DE 5 lt.

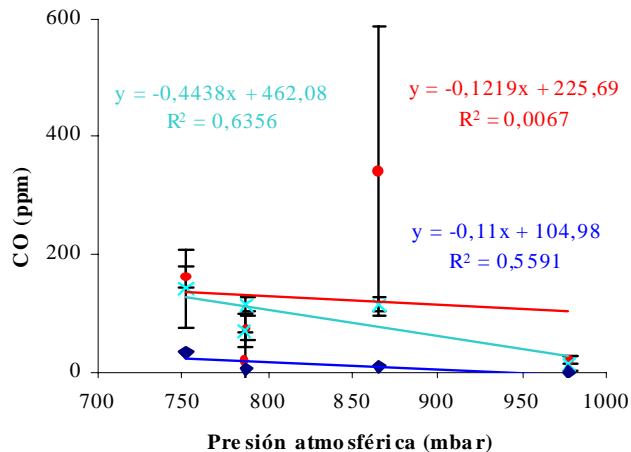


Figura 4.30

Evaluación de las emisiones de monóxido de carbono (CO) en posiciones de evaluación de consumo mínimo de gas (rojo) consumo nominal de gas (azul) y las pruebas de combustión (verde) en calentador VANWARD 5.5 lt

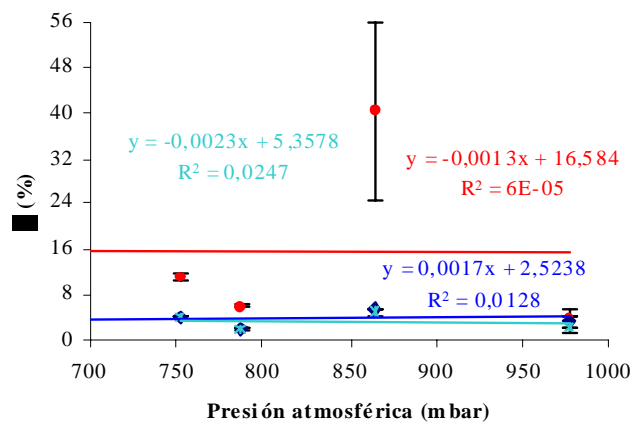


Figura 4.31

Resultados de la relación aire/combustible en posiciones de consumo nominal (azul) y de consumo mínimo (rojo) en calentador VANWARD 5.5 lt

En este calentador el comportamiento de las emisiones de CO en las condiciones de consumo nominal de gas (ver figura 4.30) presenta bajas emisiones y un comportamiento constante de las relaciones aire combustible en todas las altitudes donde se realizo la evaluación (ver figura 4.30). En las pruebas de combustión a una presión de suministro de 25 milibares las emisiones de (CO) aumentan con la altitud sin sobrepasar los limites exigidos por la norma técnica Colombiana [ref 3] (1 %). Además el comportamiento de la relación aire combustible es similar a la presentada en las pruebas a condiciones nominales.

De forma similar al calentador BOSCH 5 lt, este presenta niveles de emisión de CO mas altos en la posición de consumo mínimo de gas igualmente la relación aire combustible aumenta en todas las altitudes pero en ningún momento sobrepasa las exigencias de la norma.

Pero la gran diferencia con el calentador BOSCH 5 lt es que los niveles de emisión de CO aumentan con la altitud

Evaluación de la combustión en calentador CHALLENGER 5 lt

Para los calentadores CHALLENGER las adaptaciones hechas para operar en el país son más sencillas que las que tienen que realizar los demás fabricantes de calentadores.

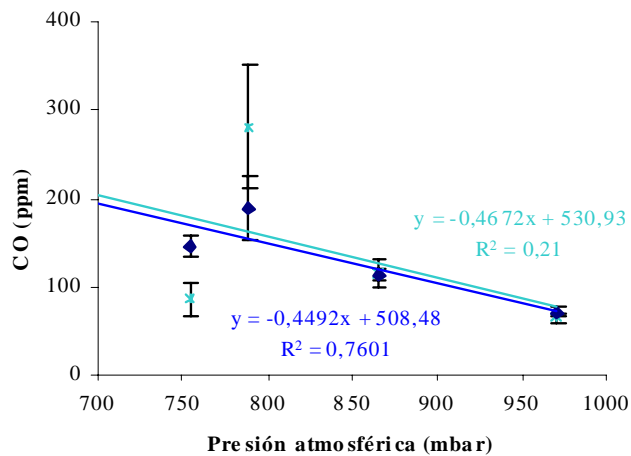


Figura 4.32

Evaluación de las emisiones de CO en consumo nominal (azul) y combustión (verde) en calentador CHALLENGER 5 lt

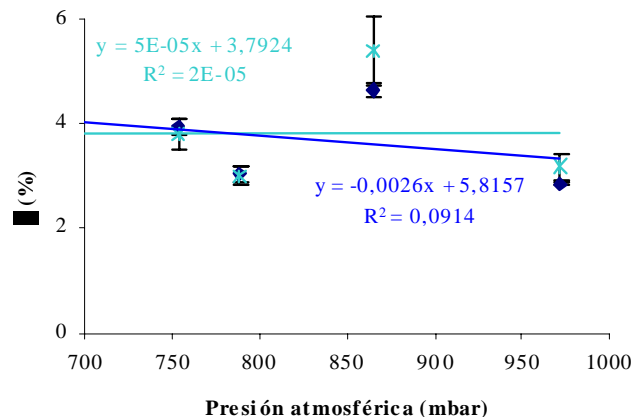


Figura 4.33

Evaluación de la relación aire combustible en consumo nominal (azul) y combustión (verde) en calentador CHALLENGER 5 lt

Debido a que solo necesitan ajustar el regulador de presión con el que cuentan sus artefactos, para que la presión de trabajo en el quemador sea la apropiada para las condiciones de Colombia.

Las disminuciones de la relación aire combustible en altitudes mayores llevan a incrementos en las emisiones de CO, que no consideran únicamente la variación de la presión atmosférica.

En este calentador es fácil apreciar que las relaciones aire/ combustible no se mantienen constantes durante el desarrollo de las pruebas, presenta bajas relaciones en menor altitud y aumenta a medida. Que la altitud se incrementa, pero hay lugares intermedios en que esto no se cumple. Se aprecia que es de gran influencia el recinto donde se realicen las pruebas, ya que en Manizales este tiene un volumen bastante pequeño, generando que la relación aire/ combustible disminuya mucho más que en cualquiera de las altitudes llevando a un aumento de las emisiones de CO para esta altitud.

En las pruebas de combustión el comportamiento de las emisiones fue un poco alto en Bogotá, aunque para este tipo de calentador por no contar con evacuación de gases a través de chimenea, puede llegar a ser peligroso ya que el ser humano empieza a verse afectado a partir de emisiones de 50 ppm de CO y en este se alcanzan niveles de hasta 300 ppm de CO

Evaluación de la combustión en calentador CHALLENGER 11 lt

Al pasar a los calentadores de mayor potencia se evalúa el calentador CHALLENGER de similar comportamiento hasta el momento que el de 5 lt de la misma marca.

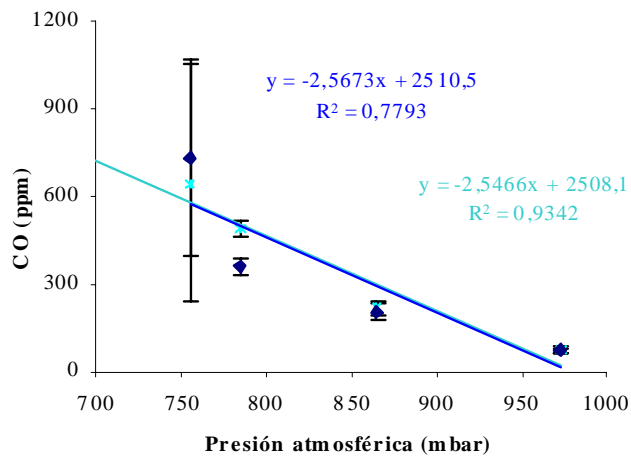


Figura 4.34
Evaluación de las emisiones de monóxido de carbono (CO) consumo nominal (azul), y las pruebas de combustión (verde) en calentador CHALLENGER 11lt

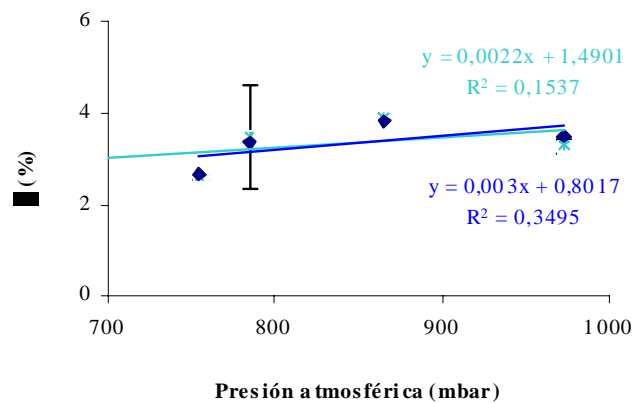


Figura 4.35
Evaluación de la relación aire/combustible en consumo nominal (azul) y pruebas de combustión (verde) en calentador CHALLENGER 11 lt.

En el calentador CHALLENGER de 11 lt se puede apreciar, un comportamiento lineal, en el cual a menor altitud las emisiones de CO disminuyen y a una mayor altitud como en Bogotá va aumentando dependiendo de la relación aire/combustible, ya que esta varía disminuyendo con la altitud y donde se presentan grandes disminuciones se incrementan los niveles de emisiones de CO

En general el comportamiento es normal ya que se incrementa las emisiones de CO a medida que aumenta la altitud y la relación aire combustible disminuye con el incremento de esta.

Evaluación de la combustión en calentador CENTRALES 11 lt

En la evaluación al calentador CENTRALES de 11 lt se aprecia las siguientes características más destacables.

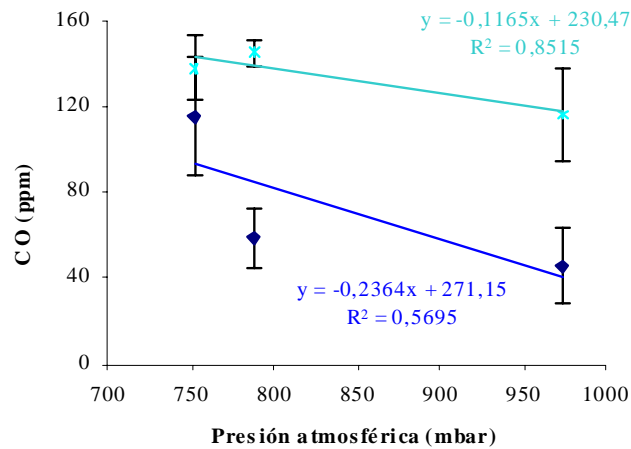


Figura 4.36

Evaluación de las emisiones de monóxidos CO en consumo nominal (azul) y en pruebas de combustión (verde) en calentador CENTRALES 11 lt

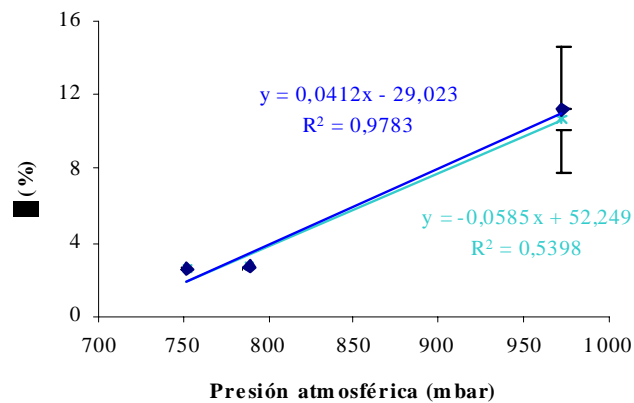


Figura 4.37

Evaluación de la relación aire combustible en consumo nominal (azul) y en pruebas de combustión (verde) en calentador CENTRALES 11lt

El comportamiento en condiciones nominales de funcionamiento es el normalmente esperado ya que las emisiones en altitudes menores son bastante pequeñas y al incrementar la altitud se aumenta directamente las emisiones de CO. Se puede apreciar también que la relación aire combustible en las altitudes que ha sido evaluada presenta disminución al incremento de la altitud presentando valores desde 2 a 10.

Al efectuar la corrección para aire no diluido en las emisiones de CO con relaciones aire combustible mayores, implica un factor multiplicativo muy alto, aumentando considerablemente los valores de las emisiones.

Se presenta una condición crítica para este calentador en las situaciones de posición mínima de consumo de gas porque hay relaciones aire combustible excesivamente altas del orden de 200 veces el valor que se da y esto genera valores de corrección muy elevados que disparan el resultado de las emisiones de CO corregido

Evaluación de la combustión del calentador SUECO 10 lt

El comportamiento de las emisiones de CO en este calentador es totalmente lineal con respecto a la presión atmosférica para las pruebas de combustión (ver figura 4.38)

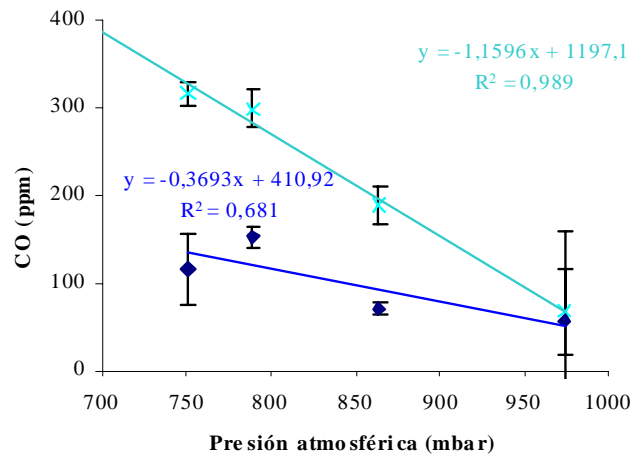


Figura 4.38

Evaluación de las emisiones de CO para el consumo nominal (azul) y para las pruebas de combustión (verde) en calentador SUECO 10 lt

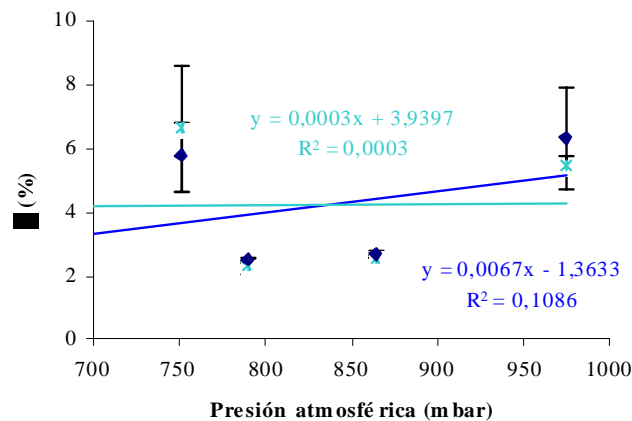


Figura 4.39

Evaluación de la relación aire combustible en el consumo nominal (azul) y pruebas de combustión (verde) en calentador SUECO 10 lt

Su comportamiento es relativamente normal en la mayoría de las altitudes muestra lo que los calentadores han dado hasta el momento en las menores altitudes las emisiones de CO bajas y en las condiciones mas altas alcanzan niveles de 300 ppm, cumpliendo así la normatividad vigente. Se puede ver también que en condiciones normales de operación la relación aire combustible a medida que va aumentando la altitud esta va disminuyendo

Se puede notar también que en las condiciones mínimas las relaciones aire combustible no son tan altas como en los anteriores calentadores, es un comportamiento muy similar al nominal del mismo calentador, ya que el consumo de gas no disminuye en más de un 10 % con respecto al nominal.

Evaluación de la combustión en calentador HACEB 10 lt

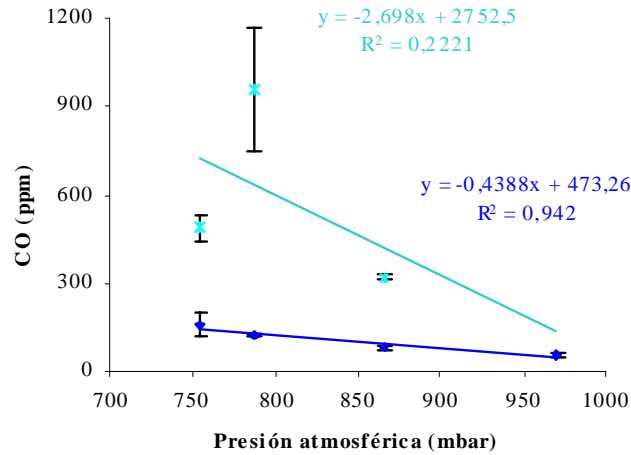


Figura 4.40

Evaluación de las emisiones de monóxido de carbono en consumo nominal (azul) y pruebas de combustión (verde) en calentador HACEB 10 lt

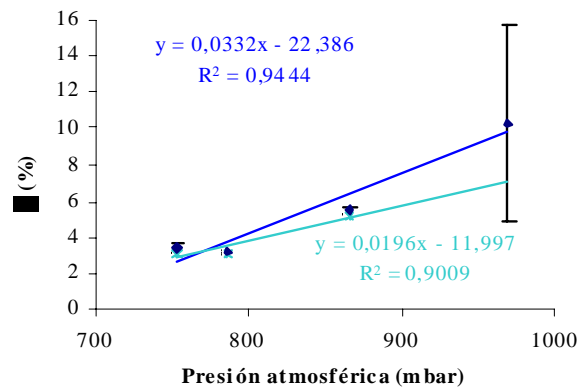


Figura 4.41

Evaluación de la relación aire combustible en consumo nominal (azul) y pruebas de combustión (verde) en calentador HACEB 10 lt

El comportamiento en las condiciones nominales es muy similar al de SUECO ya que presenta a mayor altitud altas emisiones de CO presenta igualmente se presenta una disminución de la relación aire/combustible con la altitud

En los casos de Manizales presenta mayores emisiones y relaciones aire combustible menores, pero un indicio de esto es el recinto donde se realizaron las pruebas por ser un espacio bastante pequeño.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

La variación de la potencia útil con la altitud es un aspecto aun desconocido por los fabricantes de calentadores de paso a gas natural en Colombia. Los fabricante tan solo declaran en las instrucciones de instalación que estos calentadores pierden potencia con la altitud pero no cuantifican esta perdida..

Igualmente la determinación de la eficiencia térmica no se realiza adecuadamente y se emplean factores de corrección que obligan a que la eficiencia térmica aumente con la altitud.

A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas evaluando cada calentador y las respectivas recomendaciones para los fabricantes.

5.1 CALENTADOR BOSCH 5 LT

Conclusiones

La pérdida de potencia útil entre Bogotá y el nivel del mar es inferior a la mayoría de los calentadores ya que solo pierde un 10.0% pero la potencia evaluada para condiciones nominales es inferior a la declarada por el fabricante creando un comportamiento de menor capacidad en toda altitud evaluada.

El nivel de emisiones de este calentador en condiciones normales de funcionamiento presenta valores muy bajos en todas las altitudes, pero en condiciones de consumo mínimo las emisiones aumentan considerablemente en toda altitud evaluada especialmente en las menores altitudes debido principalmente a la presencia de relaciones altas de aire combustible.

Las relaciones aire combustible disminuyen a medida que aumenta la altitud, generando un mayor valor de corrección para el CO.

Por ultimo, el valor de la eficiencia térmica en este calentador presenta valores inferiores a los mínimos exigidos por la norma técnica colombiana [ref 3] para condiciones de referencia. Se obtuvieron valores de 81% a nivel de mar y de 76% para la ciudad de Bogotá

Recomendaciones

La seguridad que tiene este calentador en nivel de emisiones de CO es de las mas altas, pero esto significa un gran sacrificio en la potencia útil del calentador ya que se generan restricciones mayores en los quemadores de gas a las presentadas normalmente en los artefactos de otras marcas.

Por esto se recomienda revisar los quemadores atmosféricos con el fin de que permitan una menor restricción a la salida del gas y así aumentar así la potencia útil de este calentador.

También se recomienda aumentar la entrada de consumo de gas en la posición mínima para evitar relaciones de aire combustible muy altas que originen una combustión incompleta.

5.2 CALENTADOR VANWARD 5.5 LT

Conclusiones

Al igual que el calentador anterior, la variación en potencia entre Bogotá y el nivel del mar es inferior a la mayoría de los calentadores con un 10.7% la potencia declarada por el fabricante es menor a la obtenida en esta experimentación.

El nivel de emisiones de CO en este calentador aunque es bajo presenta un ligero incremento con la altitud bajo condiciones normales de operación. Bajo condiciones de operación mínima, las emisiones de CO de este calentador superan a las presentadas en la posición de consumo nominal en todas las altitudes llegando a niveles perjudiciales para la salud humana (>50 ppm de CO).

El consumo calorífico al ser llevado a condiciones de referencia se comporta de manera constante para todas las altitudes con niveles de variación inferiores a un 1.6 % entre Bogotá y el nivel del mar.

Por ultimo la eficiencia térmica para este calentador bajo condiciones nominales cumple con lo exigido por la norma técnica colombiana para los artefactos de esta capacidad [ref 3] al llegar a niveles del 84% y para la altitud de Bogotá estos niveles alcanzan valores del 76 %. Es importante recordar que la presión de ensayo es la misma que la presión de trabajo del artefacto

Recomendaciones

Se recomienda aumentar un levemente el consumo de gas en la posición mínima con él animo de disminuir la relación aire combustible y así eliminar la posibilidad de una combustión inapropiada.

5.3 CALENTADOR CHALLENGER 5 LT

Conclusiones

La perdida de potencia presentada entre bogota y el nivel del mar en este calentador es mayor a los calentadores de similar capacidad llegando a un 12.1 %. Los valores de potencia útil en el nivel del mar obtenidos experimentalmente sobrepasan los declarados por el fabricante en un 8.22%.

La eficiencia térmica utilizando la corrección aplicada al consumo calorífico para este calentador en condiciones nominales alcanza un 82.7 % y para la ciudad de Bogotá un 76% cumpliendo con lo mínimo exigido por la norma técnica Colombiana para condiciones nominales.

El consumo calorífico declarado por el fabricante presenta una diferencia con respecto al calculado al ser sobrepasado en un 3.69%. Además presenta una diferencia de 5.51% entre el consumo calorífico corregido para Bogotá y el nivel del mar, indicando que aunque se corrige a condiciones estándar la diferencia entre consumos es alta.

Por último este calentador presenta emisiones altas alcanzando 200 ppm para condiciones de Bogotá, disminuyendo linealmente las emisiones a medida que se aumenta la presión atmosférica. Además se afecta en mayores altitudes si la relación aire combustible es baja. Este valor es considerable dado que es un calentador tipo A y con estos niveles es peligroso para la salud humana en espacios confinados.

Recomendaciones

Ya que la potencia útil en este calentador sobrepasa fácilmente a la declarada por el fabricante y como el nivel de emisiones de monóxido de carbono es elevado se recomienda estudiar la posibilidad de disminuir la presión de trabajo a la cual es instalado el calentador. De esta forma se sacrifica un poco potencia útil por seguridad

Además la eficiencia térmica en este calentador es superior a la exigida por la norma técnica colombiana [ref 3] para condiciones nominales, creando una gran posibilidad de disminuir la potencia útil sacrificando un poco esta eficiencia sin necesidad de dar incumplimiento en ningún parámetro evaluado.

5.4 CALENTADOR CHALLENGER 11 LT

Conclusiones

La variación de la potencia útil entre Bogotá y el nivel del mar alcanza niveles de pérdida de 12.5%. La diferencia entre la potencia útil declarada por el fabricante y la obtenida experimentalmente es de 2.7 %. Este calentador tiene una de las más altas pérdidas de potencia en comparación con los demás calentadores, pero el valor obtenido experimentalmente es el que más se acerca de todos los calentadores al declarado por el fabricante

La eficiencia térmica de este calentador bajo condiciones nominales alcanza valores de un 82% y de 75% para la ciudad de Bogotá lo cual infringe lo establecido en la norma técnica Colombiana [ref 3] ya que esta exigen un mínimo del 84% bajo condiciones de referencia.

El consumo calorífico tiene variaciones de un 4 % entre nivel del mar y la ciudad de Bogotá. Además presenta una diferencia de un 5.3% entre el valor declarado por el fabricante y el obtenido en experimentación.

Las emisiones en este calentador alcanzan niveles supremamente elevados de hasta 600 ppm para la mayor altitud evaluada. La relación aire combustible disminuye a medida que la altitud aumenta.

Aunque este calentador presenta una leve caída de las relaciones aire combustible a medida que aumenta la altitud, pero el comportamiento en general es aleatorio, dependiendo el comportamiento de las emisiones de CO en su gran mayoría de la presión atmosférica.

Recomendaciones

Optar por disminuir la presión de trabajo en el regulador interno del calentador, no es viable dado a que la pérdida de potencia útil es una de las mayores en los calentadores evaluados y el consumo calorífico nominal calculado es muy cercano al declarado.

Disminuir la presión en el regulador del quemador significaría bajar el valor del consumo calorífico e incumplir el valor declarado. La principal recomendación es revisar el diseño del quemador atmosférico y el diámetro de salida de los inyectores, buscando disminuir la velocidad de salida del gas en este dispositivo. Además la eficiencia calculada en condiciones nominales hace pensar que es necesario realizar una revisión en el sistema de quemado de combustible dado que no satisface lo especificado en la norma técnica Colombiana [ref 3].

5.5 CALENTADOR CENTRALES 11 LT

Conclusiones

La pérdida de potencia presentada por este calentador es la mas alta de todos los calentadores evaluados alcanzando niveles de pérdida del 13% entre Bogotá y el nivel del mar, con una diferencia de 5.44% entre la potencia útil para condiciones de referencia y la declarada por el fabricante.

El comportamiento de la eficiencia térmica para este calentador es similar a los demás calentadores. Sin embargo la eficiencia en condiciones nominales es menor a la exigida por la norma ya que solo alcanza un valor del 80.2% y para la ciudad de Bogotá la eficiencia alcanza un valor del 76.8%, estando por debajo del valor exigido en casi un 4%. Es necesario anotar que las pruebas realizadas en melgar influyeron de manera contundente en el desarrollo de la curva que describe el comportamiento de este calentador al presentar eficiencias térmicas muy bajas en esta altitud, debido principalmente a las altas temperaturas de entrada del agua.

El consumo calorífico presente en este calentador es el mas alto de los evaluados al presentar una diferencia mayor entre el obtenido en experimentación y el declarado por el fabricante de un 17.3%. Además la variación de volumen corregido entre nivel del mar y la ciudad de Bogota alcanza una diferencia del 10.2%, significando que este valor puede afectar el valor de la eficiencia térmica.

Los niveles de emisión de este calentador en las mayores altitudes son relativamente bajos ya que alcanzan valores máximos de 160 ppm de CO y de manera similar a los demás calentadores las relaciones aire combustible disminuyen con la altitud llegando a relaciones con valor de dos para la mayor altitud. Cabe anotar que este calentador en la posición de consumo mínimo para la menor altitud evaluada presenta relaciones aire combustible muy altas, provocando que las correcciones aplicadas al CO sean excesivamente altas y disparen este valor.

Recomendaciones

El disminuir el consumo calorífico en este calentador puede significar una disminución de la potencia útil, y el incumplimiento del valor declarado.

Pero una restricción en el flujo de gas que permita que todo el gas sea quemado puede disminuir el consumo calorífico y aumentar la eficiencia térmica.

5.6 CALENTADOR SUECO 10 LT

Conclusiones

La pérdida de potencia de este calentador es de las más bajas, llegando solo a una pérdida del 10.0%. Además sobrepasa el valor declarado de potencia útil nominal en el orden del 9.3%. Si se evaluara la potencia útil obtenida en Bogotá y se comparara con la potencia útil declarada solo se tendría una diferencia del 0.7%

Aunque en este calentador la eficiencia térmica en condiciones nominales tampoco alcanza el valor exigido por la norma técnica Colombiana [ref 3] ya que solo llega a 80.1% es de los calentadores que presenta menos pérdida de eficiencia entre la ciudad de Bogotá y el nivel del mar.

El consumo calorífico nominal de este calentador presenta un valor 0.96% inferior al declarado, Y la variación del consumo calorífico corregido solo presenta un 2.3% entre la mayor altitud corregida y el nivel del mar, indicando la existencia de un comportamiento constante en las diferentes altitudes donde se realizó la experimentación

Recomendaciones

En este calentador la presión de ensayo le favoreció bastante ya que se aumento notablemente la potencia útil calculada para condiciones nominales.

Una recomendación general es cambiar la condición de operación de este calentador para 20 milibares que es a la que se realizaron las pruebas y se demuestra que le fue bastante bien a este calentador.

5.7 CONCLUSIONES GENERALES

No se puede esperar obtener una ecuación que describa la variación de la potencia útil con la altitud para todos los calentadores de paso de gas natural disponibles comercialmente en Colombia dado las variaciones en el diseño, procesos de fabricación. Por tanto es necesario que cada fabricante realice las pruebas que le permitan determinar realmente cual es el comportamiento del calentador a diferentes altitudes.

Tampoco es adecuado asumir una pérdida del 4% en la potencia útil por cada 300 metros de altitud que es el valor especificado en la norma [ref 6]. En este estudio se encontró que los porcentajes de pérdida varían entre un 1.26% y un 1.63%. En el caso de asumir el valor inicial se obtendrían pérdidas de un 34% para la ciudad de Bogotá con respecto al nivel del mar, mientras que el porcentaje de pérdidas obtenido en este estudio vario entre un 10% y un 13%.

Actualmente los fabricantes utilizan una formula para calcular la eficiencia térmica de los calentadores que conlleva a que la eficiencia térmica aumente con la altitud. Por tal razón se

debe estudiar la posibilidad de analizar la formula que se propone este documento para realizar las correcciones pertinentes al consumo volumétrico de gas y que mantiene constante este valor en las diferentes altitudes.

Para algunos calentadores, pequeñas variaciones en la presión de suministro ocasionan consumos caloríficos muy altos que repercuten en la disminución de la eficiencia térmica, aumentos en la potencia útil y aumentos considerables en el nivel de emisiones .

Algunos fabricantes han alcanzado niveles óptimos de emisiones de CO para grandes altitudes. Los niveles de emisiones tan bajos se logran principalmente restringiendo el flujo de gas a la salida del quemador. Esto limita la velocidad de salida permite la combustión completa del combustible.

Los calentadores de paso evaluados no presentan problemas de altas emisiones de CO a gran altitud. Sin embargo se resalta que no se tuvo acceso a todas las marcas comercialmente disponibles ni se evaluó el funcionamiento de los calentadores bajo condiciones anormales de funcionamiento (como alta presión de suministro del gas, bajo caudal de agua, instalaciones inadecuadas, etc). Los problemas que se encontraron están relacionados con el desconocimiento en la cuantificación de la pérdida de potencia de los calentadores con la altura.

5.8 RECOMENDACIONES PARA SEGUIR CON ESTE ESTUDIO

Estudiar la posibilidad de optimizar los quemadores atmosféricos para trabajar en grandes altitudes, sin necesidad de realizar pruebas en altitudes menores, ya que obtener condiciones optimas de funcionamiento en estas altitudes generan una ganancia en comportamiento energético y ambiental en las demás altitudes.

Obtener un modelamiento numérico del comportamiento de las emisiones de CO al variar la presión atmosférica en los calentadores de paso, puede ayudar a entender el funcionamiento de estos calentadores.

Restringir la salida del gas en los quemadores atmosféricos genera una mayor pérdida de potencia, pero los niveles de emisión de CO son muy bajos, investigar la posibilidad de restringir la salida del gas sin disminuir la potencia útil notoriamente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Serrano, J.C. “Efecto de la altitud sobre las emisiones de CO en calentadores de paso a gas natural”, “Universidad de los Andes 2001”.
- [2] Gutiérrez, M.M. “Control de emisiones de CO en calentadores de paso”, “Universidad de los Andes” 2002.
- [3] NTC 3531 Gasodomésticos “Artefactos Domésticos que emplean gases combustibles para la producción instantánea de agua caliente para usos a nivel doméstico. Calentadores de paso continuo. Segunda actualización 2003.
- [4] NTC 3833 Conductos de gas. “Especificaciones para el diseño e instalación de sistemas para la evacuación de los productos de combustión de los artefactos de gas para uso domestico, comercial e industrial”. 1997.
- [5] Veyretout, F y Gaurier L. “Combustión characteristics of gas fuel”, Gaz de france direction des etudes et techniques nouvelles, 1993.
- [6] CGA 2.17-M91 (R1999), “ Gas Fired Appliances for use at high altitudes”, 1999