

EFICIENCIA TÉRMICA DE CALEFACTORES A GAS DE TIRO BALANCEADO

L. Juanicó *¹, A.D. González **¹, S. Gortari *

* Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro, Av. Bustillo 9500, 8400 Bariloche, Río Negro. e-mail: juanico@cab.cnea.gov.ar, gortari@cab.cnea.gov.ar

** Conicet, y Centro Regional Universitario Bariloche, Universidad Nacional del Comahue, e-mail: agonzalez@crub.uncoma.edu.ar

Resumen: Se investigó experimentalmente el comportamiento térmico de un calefactor comercial a gas de tiro balanceado. Para un modelo de uso domiciliario se estudiaron distintas potencias de llama y de configuraciones de chimenea: tiro vertical con distintas longitudes, y tiro horizontal. Se encontraron eficiencias térmicas de calor transferido al ambiente entre el 40% y el 60%, siendo la configuración de bajo tiraje (horizontal) la que presenta mayor eficiencia. Este comportamiento se explica con la variación observada del caudal de aire en la cámara de combustión: desde 2 hasta 8 veces mayores al estequiométrico requerido por la combustión completa del gas. Se identifica la importancia de este parámetro en la optimización de la eficiencia de calefactores de tiro balanceado, el cual es soslayado por las normas vigentes como los diseños industriales actuales. Se discute la eficiencia en el uso del gas y la emisión de gases contaminantes en el uso de este tipo de calefactores.

Palabras clave: calefacción – gas – uso residencial – tiro balanceado – eficiencia térmica

INTRODUCCIÓN

La calefacción constituye una parte importante de la energía utilizada en forma directa en el sector residencial. El total del uso directo lo constituye la energía utilizada en artefactos domésticos, iluminación, refrigeración, calefacción, calentamiento de agua sanitaria, cocción de alimentos, y transporte (Reinders et al., 2003). La incidencia de cada rubro depende del clima, del estilo de vida y de los ingresos del grupo familiar; obteniéndose además distintos porcentajes de uso indirecto y directo de energía residencial (Cohen et al., 2005). En lo que sigue definimos al uso directo de energía como la energía directa total usada en una vivienda residencial excluido el transporte.

Una magnitud ambiental que caracteriza la necesidad de calefacción es la cantidad de grados-día de calefacción, que puede describirse en forma sucinta como la diferencia entre un umbral standard (18,3 °C) y la temperatura media de cada día. De esta manera se acumulan grados-día anuales, y se ha demostrado que estos son proporcionales al requerimiento energético domiciliario (Eto, 1988). De todos modos, la constante de proporcionalidad depende de otros factores no ambientales, como ser, principalmente: calidad térmica de la envolvente de la vivienda, estilo de vida de los ocupantes y eficiencia de los equipos usados en calefacción. Por ejemplo, la comparación de dos localidades con distinto clima, las ciudades de Bariloche (temperatura media anual 8,3°C) y La Plata (temperatura media anual 15,9°C), muestra la relevancia en cada uso. En Bariloche, en viviendas unifamiliares conectadas a la red de gas natural se utiliza más del 80 % de la energía directa en calefacción (González et al., 2006), mientras que en La Plata el porcentaje en calefacción es de 27% (Rosenfeld et al., 2003). Siendo en ambas localidades similares los cerramientos y los sistemas de calefacción, la diferencia se debe principalmente al factor climático. Otra localización con clima frío y similar número anual de grados-día es Estocolmo (Suecia), en donde el 62% de la energía residencial directa se usa en calefacción. Considerando valores de energía utilizada en calefacción por metro cuadrado, en Estocolmo el consumo es tres veces menor al de Bariloche. En estos últimos, dados los climas similares, las diferencias observadas en el uso de la energía deben atribuirse a los factores no ambientales, entre los cuales, aunque no el principal, se encuentra la eficiencia de los equipos de calefacción.

Por su impacto ambiental inmediato, la eficiencia térmica de los equipos domiciliarios ha sido estudiada extensamente, tanto para el uso de recursos renovables como de no renovables. Para la obtención de los rendimientos deben seguirse procedimientos bien definidos, y contarse con el equipamiento adecuado que permita una precisión aceptable, con resultados verificables y reproducibles. Recientemente, otros autores publicaron estudios detallados de calefactores a gas y eléctricos usados en California (Lutz et al., 2006), con énfasis en el aumento de la eficiencia térmica y en distintas posibilidades para que el usuario residencial actualice sus equipos.

¹ Investigador del Conicet

En Argentina, aproximadamente el 60% de los hogares se encuentra conectado a la red de gas natural (Enargas, 2006). En estos el sistema de calefacción generalizado es de tiro balanceado. Este equipo consiste en una cámara de combustión estanca que intercambia aire y gases de combustión con el ambiente exterior, y sólo calor con el ambiente interior de la vivienda a través de sus superficies. De esta forma, estos equipos tienen la ventaja de no consumir oxígeno ni aportan gases de la combustión al ambiente interior. En viviendas unifamiliares, un porcentaje menor cuenta con dispositivos tipo caldera de calentamiento de agua y circulación de la misma en radiadores. Estos dispositivos en general presentan eficiencias térmicas más altas, aunque su costo inicial de compra e instalación es mayor al de tiro balanceado. En investigaciones en la ciudad de Bariloche, se obtuvo un consumo residencial promedio anual de 169 GJ provenientes del gas (4.780 m³/año) y de 8 GJ de electricidad (2.200 kWh/año), en 70 viviendas conectadas al gas natural (González et al., 2006). Del análisis de datos se obtuvo que el 84% de la energía proveniente del gas se usa en calefacción, esto significa un promedio de 142 GJ o el equivalente de cerca de 4.000 m³ de gas natural. Si se usara gas envasado se requerirían para el mismo nivel de equipamiento y confort 3.100 kg de gas envasado, vale decir una cantidad de 310 garrafas de 10 kg por año y por vivienda (González et al., 2005). Dadas estas cantidades de uso de recursos energéticos no renovables es relevante realizar estudios minuciosos de aislación térmica de las viviendas y de eficiencia de los equipos utilizados.

En el presente trabajo medimos la eficiencia térmica de un mismo equipo de tiro balanceado, para dos intensidades de llama, y tres configuraciones de chimenea, para las cuales se comprobó que el tiraje natural es muy distinto. En la sección 2 se describe en detalle el dispositivo experimental y los conceptos fluidodinámicos usados en el cálculo de la eficiencia. En la sección 3 se muestran los resultados obtenidos. Se analiza el perfil de temperaturas y su influencia en la producción de óxidos de Nitrógeno (NO_x) (Andrés, 2006), y se discuten las implicancias de las bajas eficiencias encontradas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Dispositivo experimental

Para el estudio se eligió un calefactor convencional de potencia nominal 3.000 kcal/h (3,48 kW), marca EMEGE modelo 9030, línea Patagónica. Para el mismo calefactor existen dos opciones comerciales de circulación de gases de entrada y salida: una, a través de dos tubos horizontales (de entrada y salida) de 0,5 m de largo, concéntricos, conocido técnicamente como TB (“Tiro Balanceado”); dos, con chimenea de entrada y salida verticales paralelas, de largo variable de acuerdo a los requerimientos de la vivienda, denominado TBU (“Tiro Balanceado en U”). El TBU se conecta al mismo calefactor (diseñado inicialmente para su uso como TB) a través de una caja de adaptación comercial, provista por el fabricante junto con un sombrero exterior específico para este uso. De acuerdo a EMEGE, del total de calefactores vendidos, el 85% corresponde al tipo TB, el 7% al de chimeneas verticales TBU, y el 8% a tiro natural, el cual tiene chimenea de salida pero consume aire interior de la vivienda (no autorizados por Enargas para ser instalados en baños o dormitorios, y no estudiados aquí).

Se construyó un dispositivo experimental para la medición de parámetros de funcionamiento térmicos del calefactor. Este permite medir la distribución de temperaturas sobre el equipo y la de los gases de salida de combustión, los caudales de gas y aire circulantes dentro de la cámara de combustión, y las condiciones atmosféricas (temperatura, presión, humedad) del ambiente exterior e interior. El sistema de termometría se basa en el uso de termocuplas tipo K envainadas marca Omega de 1mm de diámetro conectadas por alambres compensados (de Cromel y Alumel) a un lector de termocuplas y multiplexor marca FLUKE, el cual asegura errores en la lectura de $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ o menores en todo el rango de medición utilizado, tal como fue verificado mediante su ensayo en un calibrador de termocuplas. A través de una fijación adecuada para garantizar el contacto térmico, se instaló un conjunto de 10 termocuplas en diversas posiciones, mostradas en el esquema de la Figura 1.

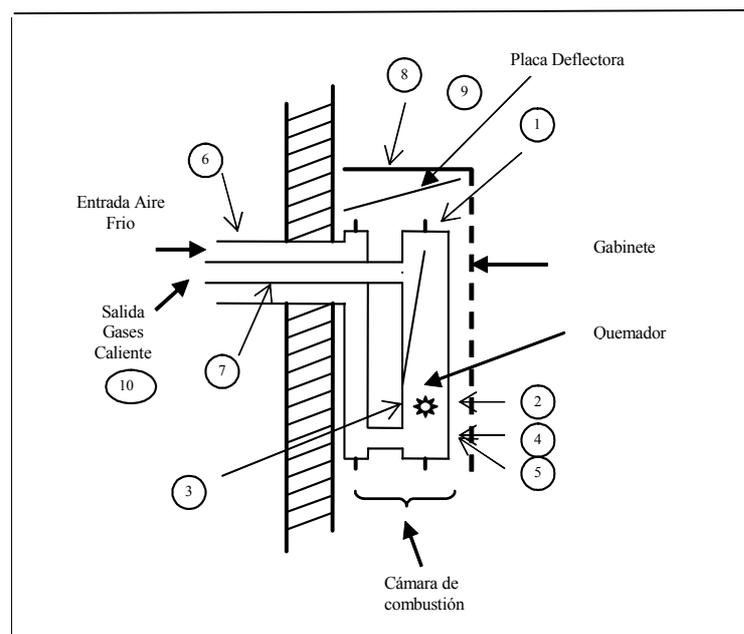


Figura 1: Esquema del calefactor estudiado, con detalle de los lugares donde se midió la temperatura

Sobre la cámara de combustión:

- 1) solapa (pestaña) de soldadura superior,
- 2) zona central frente donde impacta directamente la llama del quemador,
- 3) zona cercana a la llama en pared posterior (orientada hacia la pared),
- 4) zona debajo de la línea de llama, en centro del frente,
- 5) zona sobre un costado, debajo de la línea de la llama,
- 6) pared exterior del tubo de admisión de aire frío, cerca del calefactor
- 7) pared exterior tubo de salida de gases calientes,
- 8) tapa superior del gabinete o carcasa envolvente del calefactor,
- 9) chapa deflectora bajo gabinete,
- 10) temperatura de gases calientes sobre boca de salida del calefactor (caja distribuidora)

La temperatura de gases calientes es una magnitud crítica para la determinación de la eficiencia térmica del equipo, según la metodología internacionalmente utilizada (Enargas, British Standard 1250), que consiste en calcular la potencia de calefacción útil indirectamente, como diferencia entre la potencia total de gas consumido y la potencia desperdiciada al exterior por chimenea. Debido a la baja transferencia de calor entre el gas y la termocupla, se desarrolló una técnica experimental especial para aumentar la transferencia de calor, y reducir este error sistemático por defecto. Para esto se fijó una placa de absorción de calor solidaria a la termocupla, construida en material de alta conductividad (Al) y de gran área de contacto térmico. Este absorbedor solidario a la termocupla integra el perfil de temperaturas sobre la sección del tubo, y minimiza el posible error sistemático. Sin este dispositivo, comprobamos que la medición dependía de la posición en la sección del tubo de salida de gases calientes, debido al perfil transversal de temperaturas que se establece en el flujo interior del caño, y se obtenían lecturas apreciablemente menores. Con el dispositivo se verificó una lectura consistente al mover la termocupla a través de la sección del tubo, y se verificaron lecturas entre 50°C y 100°C mayores que sin él. En funcionamiento estacionario, las temperaturas obtenidas con los restantes 9 puntos de medición se compararon con fotografías infrarrojas de toda la cámara de combustión, que nos brindaron valiosa información acerca de su comportamiento térmico y de la fluidodinámica de combustión, que luego detallaremos. Para esto se usó una cámara infrarroja Digicam modelo IR.

Para medir el caudal de gas usado por el quemador se instaló un medidor comercial de bajo caudal (máximo 2,5 m³/h), marca Elster AMCO modelo BK-G1.6, calibrado por el fabricante (a pedido) a una precisión mejor que el 0,5% y aprobado por Enargas. También se monitoreó la presión de gas manométrica a la entrada del calefactor, con un manómetro de agua de vasos comunicantes, verificándose que para todas las experiencias fue de 180mm de columna de agua, como establece la normativa del Enargas. Para obtener el caudal de aire que circula por el calefactor se midió la velocidad del aire dentro del tubo de entrada, utilizando un anemómetro de hilo caliente (*hot wire*) marca Airflow modelo TA 2, el cual, con escala analógica logarítmica, permite una lectura mínima de 0,05 m/s y máxima de 10 m/s, con un error de medición de ±5%.

Para el caso de sistema de circulación TBU, la velocidad del aire se midió directamente intersectando el flujo de aire dentro del tubo de entrada. En el caso del sistema TB, concéntrico, esta medición directa del flujo no es posible: la alta temperatura debida a la presencia del tubo de salida caliente altera la distribución de velocidades con respecto a la posición en la sección del paso de aire de entrada. Entonces, para este caso, diseñamos un dispositivo de entrada de aire alternativo por el cual se tapa la entrada original y se abre una derivación situada en la parte inferior. En esta se instaló un tubo de 75 mm de diámetro (similar al estándar usado en el TBU) en donde sí se puede medir la velocidad del aire. Se analizaron las distribuciones de temperatura entre la chimenea original y la derivación alternativa, para estimar el grado de perturbación introducido por este montaje *ad hoc* experimental, observándose comportamientos similares, pero con temperaturas siempre levemente más altas para la chimenea original, lo cual nos lleva a calcular eficiencias levemente más altas (dentro del 2%) para la configuración experimental que la comercial, siendo esta modesta diferencia casi dentro de los márgenes de error experimental.

Obtención de la eficiencia térmica

La eficiencia térmica se calcula en (1) como el cociente entre la potencia útil P_{cal} , entregada al ambiente y la potencia total consumida en la combustión del gas natural, P_{comb} , debiendo descontarse en ésta el término de cambio de fase del agua producida en la reacción de combustión del metano (2) cuando utilizamos el calor de combustión superior:

$$\eta(\%) = \frac{P_{cal}}{(P_{comb} - \dot{m}_{agua} * H_{f,agua})} \quad (1)$$

donde $H_{f,agua}$ es la entalpía de cambio de fase del vapor de agua y \dot{m}_{agua} es el caudal másico de agua producido en la reacción de combustión del gas (metano) (2), calculado por estequiometría a partir del caudal másico de gas \dot{m}_{gas} conocido a partir del caudal volumétrico \dot{V}_{gas} y la densidad ρ_{gas} del gas medidos.



La potencia total P_{comb} se calcula del calor superior de combustión del gas natural H_{comb} , ρ_{gas} y \dot{m}_{gas} , según (3):

$$P_{comb} = \frac{H_{comb} * \dot{m}_{gas}}{\rho_{gas}} \quad (3)$$

Cabe mencionar que H_{comb} se conoce de datos oficiales del Enargas, basados en mediciones normalizadas realizadas sobre el fluido entregado en la zona por el distribuidor local, Camuzzi. Este valor medio mensual usualmente viene incluido en la factura al usuario.

En el gasoducto cordillerano que abastece a Bariloche es común encontrar valores H_{comb} un poco superiores a los del metano puro (9.500 y 9.300 kcal/Nm³, respectivamente), por la presencia de cantidades menores de etano, siendo que por ejemplo en Buenos Aires, la composición del gas es 100% metano por la extracción previa de “hidrocarburos pesados” realizada en el polo petroquímico de Ing. Cerri por TGS. En el circuito céntrico de Bariloche se viene realizando además una importante inyección (5%) de gas propano-aire en época invernal de máximo consumo, que produce distorsiones en la calidad del gas antes mencionada. En nuestro beneficio, el Centro Atómico se encuentra conectado sobre otro circuito independiente, no alcanzado por esta inyección.

La potencia útil P_{cal} se puede calcular indirectamente del balance de energía (4), estimando los términos de pérdidas al exterior según las distintas especies formadas en la combustión (2) y el oxígeno no quemado por exceso del flujo de admisión, como:

$$P_{cal} = P_{comb} - (P_{agua} + P_{co_2} + P_{aire}) \quad (4)$$

Se calculan cada uno de los términos de pérdidas por su balance de entalpía:

$$P_{agua} = \dot{m}_{agua} * \{ C_{p,vapor}^{sal} * (T_{gas}^{sal} - T_{aire}^{ent}) + H_{vapor} \} \quad (5)$$

$$P_{aire} = \dot{m}_{aire}^{exceso} * C_{p,aire}^{sal} * (T_{gas}^{sal} - T_{aire}^{ent}) \quad (6)$$

$$P_{co_2} = \dot{m}_{co_2} * C_{p,co_2}^{sal} * (T_{gas}^{sal} - T_{aire}^{ent}) \quad (7)$$

donde $C_{p,x}$ y \dot{m}_x denotan genéricamente el calor específico a presión constante y el caudal másico del componente x , para condiciones a la entrada (^{ent}) o salida (^{sal}) de la cámara, determinadas con las temperatura del aire de entrada y de los gases calientes de salida, ambas medidas en cada experimento.

Como muestran las ecuaciones anteriores, deben conocerse a priori los caudales de los distintos gases para estimar correctamente la potencia perdida por la chimenea. Su medición directa es engorrosa, dada la alta temperatura de los gases de combustión, y quizás por esto las normas actuales (Enargas, British Standard) soslayan este inconveniente, asumiendo que el caudal de gases que atraviesa la cámara de combustión es estrictamente el estequiométrico fijado por la combustión (2). Como hemos demostrado aquí, esta aproximación no es nunca buena en las condiciones estudiadas, y en algunos casos hasta grosera. Lo que es peor, siendo que esta aproximación sistemáticamente subestima el caudal de gases calientes (y por ende, la potencia perdida), sobreestima en otro tanto la potencia útil, y la eficiencia de los calefactores. Cabe mencionar aquí que según la reglamentación vigente, todos los modelos vendidos en el país deben certificar una eficiencia superior al 70% antes de ser liberados a su comercialización.

En este trabajo resolvimos la medición de gases calientes, calculando ésta por balance de masa en la cámara de combustión por suma de ambos caudales (de aire frío y de gas), medidos en forma sencilla con errores razonables.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Distribución de temperaturas y emisividad radiativa

En las Figuras 2 y 3 se muestran dos fotografías infrarrojas de la cámara de combustión del equipo funcionando en llama máxima (sin gabinete) para configuración TBU (5m tiraje) y TB, respectivamente. Se aprecia en la comparación un menor gradiente de temperaturas total en el segundo caso (300°C vs. 400°C), y una zona central (sobre el quemador) más homogénea que refleja el menor exceso de aire hacia la cámara, respecto del TBU en el cual, como veremos, la combustión se realiza con gran exceso de aire. Otra utilidad de la termometría es el permitir determinar experimentalmente las emisividades de radiación infrarroja. Para la determinación de la emisividad total hemisférica de la cámara de combustión promedio a la temperatura media de trabajo, se recalibraron las lecturas de los distintos puntos medidos por emisión infrarroja contra las temperaturas medidas por las termocuplas, usando a la emisividad como variable de ajuste. La emisividad puntual es una magnitud espectral (se define sobre una longitud de onda) y direccional. La técnica de fotografía

infrarroja integra sobre las longitudes de onda en la dirección (normal en este caso) que llega a la célula infrarroja sensible; midiendo por lo tanto la emisividad total normal. Para superficies no metálicas la emisividad hemisférica es similar, dentro del 10% de error, al valor normal medido (Incropera y De Witt, 2002). El valor de emisividad promedio obtenido es de 0.18, el cual se encuentra en el rango esperado (Incropera y De Witt, 2002) para el tipo de pintura de color plateado (óxido de aluminio) provista en la cámara de combustión en el modelo estudiado.

En la Figura 2 pueden apreciarse dos zonas de muy alta temperatura, la parte superior de la cámara, y la zona cercana a la llama en el frente de la cámara. Los valores en esta última son cercanos a 600°C en llama máxima y 300°C al mínimo, como se indica en la Tabla 1 para distintas configuraciones de llama y chimenea. Valores altos similares se obtuvieron en una zona también cercana a la llama pero en la pared posterior de la cámara. De acuerdo a investigaciones previas (Andrés et al., 2006), se encontró que la generación de óxidos de Nitrógeno (NOx) por calefactores de tiro balanceado puede llegar a ser un 30% mayor al valor máximo permitido para ambientes según la regulación vigente. Siendo sabido que el NOx se puede generar (aún en estos equipos de cámara estanca) por oxidación del nitrógeno del aire en contacto con superficies a altas temperaturas, como la cámara de combustión, los resultados aquí encontrados corroboran los del Andrés et al. (2005). Y lo que es aún más importante, de confirmarse esta hipótesis, tendríamos también una forma de reducir esta contaminación: bajando las temperaturas de la cámara por medio de mejoras en el diseño térmico.

En los casos de chimenea vertical, en las paredes de la cámara de combustión se obtuvieron menores temperaturas que en el caso de tiraje horizontal. En ambos, sin embargo, las altas temperaturas están relacionadas, en parte, a la escasa emisión de radiación de la cámara del calefactor, como consecuencia del color plateado elegido. Consultados algunos fabricantes, se entendió que esta es una elección motivada en criterios de marketing. Los especialistas en comercialización suponen que el color plateado es más atractivo para el comprador, y que un color oscuro sugeriría un equipamiento antiguo. Para maximizar la transferencia de calor por radiación el color más adecuado sería negro, o estrictamente hablando, un emisor negro en el espectro infrarrojo en que trabajan estos equipos. Siguiendo esta elección se podría bajar la temperatura de la cámara, lo cual, por una parte, disminuiría la producción de gases contaminantes NOx, y por otra, aumentaría la transferencia térmica hacia el interior de la vivienda, y con esto, la eficiencia en el uso del gas.

La comparación de ambas fotografías infrarrojas (ver Figuras 2 y 3) con llama máxima en ambas configuraciones estudiadas (TB y TBU) nos permite encontrar una distribución de temperaturas mas homogénea en el TB. Esto concuerda con los diferentes caudales de tiraje observados. En el TBU el excesivo caudal establecido “sopla” la llama, que no alcanza a calentar adecuadamente la pared de la cámara; en cambio en el TB el tránsito de gases calientes dentro de la cámara se establece a velocidades menores, logrando transferir una tasa de calor mayor a la misma. Teniendo presente que la gran mayoría de estos equipos se venden bajo la configuración TB, podemos conjeturar que estos equipos son diseñados para TB, y pobremente adaptados para su uso como TBU.

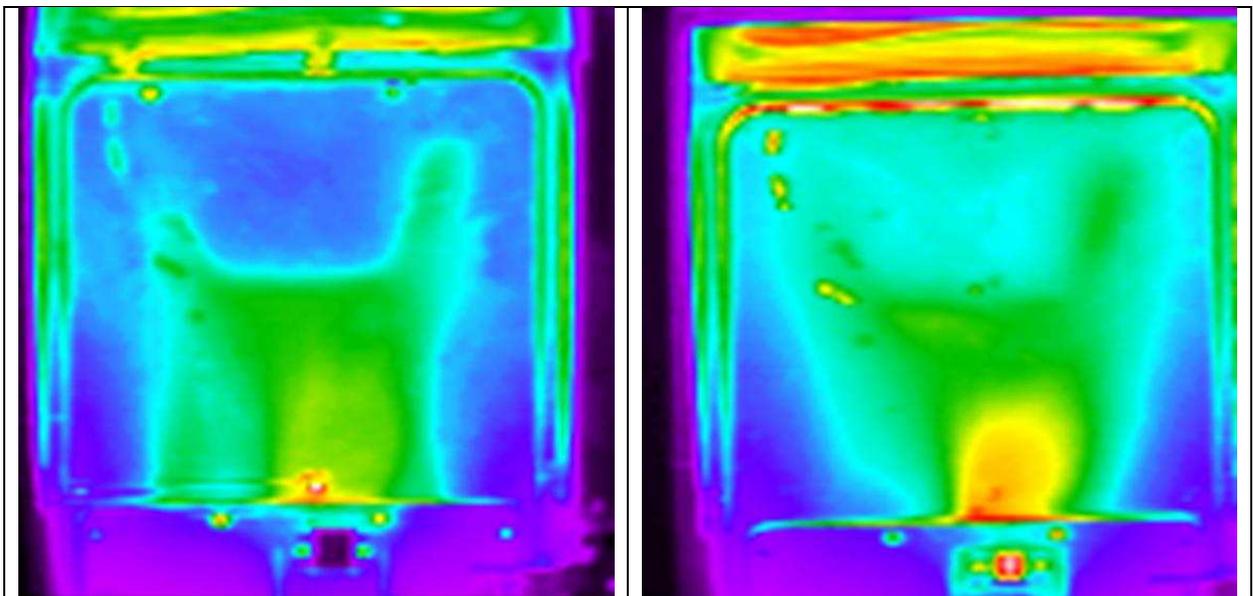


Figura 2. Fotografía infrarroja del TB, temperaturas desde 200 °C (violeta) hasta 570°C (rojo)(con visor tapado)

Figura 3. Fotografía infrarroja del TBU, temperaturas desde 150 °C (violeta) hasta 550°C (rojo)

Eficiencias térmicas

La Tabla 1 resume los resultados de las mediciones para la obtención de las eficiencias térmicas de calefacción. Los casos N° 1 al 4 son para sistemas de chimenea vertical TBU. Para investigar la influencia del tiraje, en los casos 1 y 2 se dispusieron los tubos de entrada y salida sobre techo y de 5 metros de desplazamiento vertical; y en cambio en los casos 3 y 4 de sólo 1 metro también vertical. Los casos N° 5 y 6 corresponden al sistema de tubo horizontal de entrada y salida concéntricas. En cuanto al tiraje para el funcionamiento del calefactor, con la conexión horizontal se tiene sólo la altura interna de la cámara

de combustión, en la cual la entrada es por la parte inferior y la salida por la superior. Vale decir, aquí la altura de efecto chimenea (tiraje) es la mínima, con una distancia similar a la altura de la cámara, de cerca de 40cm.

Vaire representa la velocidad del aire en metro/segundo en el tubo de entrada de aire. En el caso del modo TB se midió de acuerdo al procedimiento detallado en la sección 2.1. Nótese que las velocidades de flujo de aire, como era de esperar, disminuyen a medida que se reduce la altura de chimenea. Como consecuencia de este cambio en caudal de aire la relación con respecto al caudal teórico estequiométrico se reduce al aumentar el tiraje. El caudal estequiométrico es el necesario para alimentar de oxígeno a la combustión del gas suministrado. En estas experiencias, el caudal de gas que usa el quemador se mide con precisión, entonces se conoce la cantidad de oxígeno requerida en la combustión. Con estas mediciones se obtiene la relación del caudal de aire real relativo al estequiométrico. En todos los casos investigados la relación obtenida es mayor a 1,8, y es siempre mayor para llama mínima que para máxima. Por otro lado, se observa que cuanto mayor es la altura de la chimenea mayor resulta la desviación con respecto al caudal estequiométrico requerido por la combustión. Estos hechos demuestran que el calefactor de tiro balanceado opera con exceso de aire, y mayor es el exceso cuanto mayor es la altura de la chimenea.

Nº	Tiraje	Llama	Temp. Máxima pared cámara	Vaire (m/s)	Caudal relativo al estequiométrico	Tgases salida (°C)	Eficiencia (%)
1	TBU, 5 metro	Máxima	556	0,8	3,5	434	39
2	TBU, 5 metro	Mínima	252	0,65	8,1	197	44
3	TBU, 1 metro	Máxima	560	0,7	2,8	443	50
4	TBU, 1 metro	Mínima	267	0,55	5,9	229	53
5	TB, horizontal	Máxima	568	0,5	1.8	487	63
6	TB, horizontal	Mínima	330	0,4	3.6	287	61

Tabla 1. Configuraciones de uso y valores obtenidos para calefactores de tiro balanceado

Es interesante observar las consecuencias en las temperaturas de los gases de salida y en las eficiencias térmicas. En la Tabla 1 se resumen las temperaturas medidas para cada caso. En forma consistente, las temperaturas de los gases de salida aumentan al disminuir la altura del tiraje y, como consecuencia del menor caudal de aire caliente hacia el exterior, las eficiencias térmicas mejoran hasta un máximo de 63 % en el equipo con tubos horizontales TB. El error en la medición de la temperatura es menor a 0,5 °C, y en la velocidad del aire en 0,05 m/s, lo cual permite acotar el error en las eficiencias medidas al $\pm 5\%$.

Para los casos con chimenea horizontal concéntrica nuestras mediciones fueron obtenidas con una entrada de aire alternativa, como se explicó en la sección 2.1. La sección de paso y los caudales con la conexión original son mayores. Comparando uno y otro arreglo experimental encontramos que la temperatura para la chimenea original es un poco mayor, del orden del 2%. Entonces, nuestras mediciones para esta configuración representan valores de cota máxima para la de eficiencia térmica obtenida. Por otro lado, la pequeña diferencia encontrada tampoco afecta el funcionamiento del equipo, ya que la cantidad de aire circulante en todos los casos es mayor al doble de la requerida por la relación estequiométrica de la combustión.

Así como para las temperaturas de los gases de salida, la conexión de chimenea horizontal TB conlleva las temperaturas máximas obtenidas en todos los puntos medidos del calefactor. Esto es consistente con la disminución del caudal de aire, el cual actúa como refrigerador del equipo. Las altas temperaturas obtenidas, tanto para la configuración TB como TBU, muestran el efecto combinado de la baja emisividad de la cámara (color plateado, $\epsilon = 0,18$), y el intercambio de calor deficiente con el ambiente que se intenta calefaccionar.

La transferencia de calor hacia el ambiente interno se realiza (en parte) por convección natural, la cual se ve obstaculizada tanto en el frente de la cámara como en la parte posterior. En el frente, el gabinete que rodea a la cámara no presenta aberturas y deflectores que faciliten la salida de aire. La rejilla anterior presenta una visual reducida a menos del 40% a través de planchuelas decorativas, las que a su vez están instaladas con un ángulo opuesto en 90° a aquel que favorecería la circulación de aire. Cabe notar que el modelo estudiado aquí presenta uno de los gabinetes más abiertos al paso de aire, y por ende, relativo a otros modelos y/o marcas es uno de los que más favorece la convección natural. La cara posterior de la cámara de combustión forma con el respaldo un canal vertical muy estrecho (8mm de ancho), y sus temperaturas también son cercanas a los 600°C cuando se opera en llama máxima. De hecho, en otros modelos con gabinetes que impiden aún más la transferencia de calor se han detectado cámaras destruidas, con zonas de fusión de la chapa de hierro que constituye la cámara de combustión.

Al presente no se provee, ni en este modelo ni en otros calefactores de mercado, un sistema de convección forzada de aire. Por otro lado, del relevamiento de calefactores de uso residencial a la venta en los comercios, se observa que la tendencia actual, de parte de los fabricantes, es hacia gabinetes cada vez más cerrados, con limitación tanto para la transferencia por radiación como para la convección natural. En el caso del gabinete muy cerrado este se publicita como “frío”, y en el aspecto publicitario se argumenta que esta condición aumenta la seguridad. Como se entiende del presente estudio experimental, la condición de un gabinete “frío” se logra (en los diseños actuales) en desmedro de la transferencia de calor al ambiente. Este es el caso del modelo de la línea EURO de la misma marca EMEGE, para el cual inferimos entonces una eficiencia térmica aún menor a la encontrada aquí para el modelo estudiado.

Para minimizar la transferencia por radiación de la cámara al gabinete, se instala en algunos modelos (línea EURO por ejemplo) una pared intermedia entre ambas. De esta manera, la radiación es devuelta a la cámara de combustión, y por ende su temperatura aumenta y su rendimiento térmico hacia la vivienda disminuye. El otro mecanismo de transmisión de calor, la convección natural, se ve también limitado aerodinámicamente por un gabinete muy cerrado. En algunos casos se cierra completamente el frente y los laterales con doble pared de chapa aluminizada, y se dejan sólo aberturas superiores para la salida del aire caliente. Se busca, quizás, reproducir el perfil térmico de radiadores de calefacción por agua caliente, en donde la temperatura es moderada, con distribución regular en toda la superficie.

Consecuencias en el uso eficiente del gas

La evolución del diseño de calefactores comerciales parece priorizar aspectos que podríamos considerar atractivos para la comercialización, aunque a desmedro de la eficiencia térmica de los equipos. Al presente, esto es económicamente viable por el bajo precio relativo que tiene el gas natural. Además, en las regiones con las temperaturas medias más bajas del país (Patagonia), existe un subsidio para el sector residencial del 60% sobre el valor del gas de red consumido. Este es un subsidio que se descuenta directamente en cada una de las facturas bimestrales que recibe el usuario, siendo devuelto por el Estado Nacional a las compañías privadas proveedoras (Enargas, 2006). En un trabajo anterior, el resultado de una encuesta detallada en la ciudad de Bariloche mostró que, con un promedio de 3 personas por vivienda, se tienen 3,4 calefactores de tiro balanceado instalados por hogar. La carencia de técnicas constructivas adecuadas a clima frío, con aislaciones térmicas deficientes, lleva a resolver el problema de confort agregando calefactores. Esto es posible porque su precio de compra e instalación es relativamente bajo y, nuevamente, el precio del gas natural subsidiado es también relativamente muy bajo. En la porción de usuarios desconectada de la red de gas natural en cambio, se observa que rara vez utilizan el calefactor de tiro balanceado conectado con gas envasado. En su lugar, la leña es el combustible más utilizado en calefacción en ese sector residencial y en la región patagónica. Este sector comprende cerca del 40% de los hogares, aunque en población el porcentaje puede ser aún mayor dado que corresponde a los sectores de más bajos recursos, los cuales presentan una mayor proporción ya sea de familias numerosas o de mayor ocupación habitacional.

El promedio de consumo de gas natural encontrado para 70 viviendas unifamiliares de Bariloche fue de 169 GJ/año (González et al., 2006), los cuales se obtendrían de 3,700 kg de gas licuado de petróleo (gas envasado), o 12,000 kg de leña de buena calidad, o 4,500 litro de gas oil. Por unidad de energía, el precio de la leña es 4 veces mayor al del gas natural, mientras que el gas oil y el gas envasado se pagan entre 10 y 12 veces más que el gas natural. Se entiende, entonces, que la instalación masiva de calefactores con baja eficiencia térmica se corresponde con un precio bajo del gas, y particularmente con subsidios regionales, los cuales no crean incentivos a un uso energético más eficiente.

Desde el punto de vista económico, y para las necesidades de la región patagónica, la instalación de un sistema de calefacción por tiro balanceado en una vivienda tipo puede resultar en un costo inicial de 2 a 3 veces menor que el de un sistema con caldera y radiadores, dependiendo de la elección de artefactos. El exceso en consumo debido a las bajas eficiencias es económicamente viable al presente por el precio muy bajo del gas natural. Con una relación de precio más cercana a la de los niveles internacionales, el costo inicial de una instalación de caldera y radiadores se amortizaría en pocos años y se convertiría en la opción más ventajosa.

Por otro lado, considerando el uso de equipos de tiro balanceado, y al mismo tiempo la intención de obtener un confort similar al producido por la calefacción por agua caliente, es interesante contestar la pregunta: ¿qué condiciones de diseño llevarían a que, con máxima eficiencia térmica en el uso del gas, un dispositivo de tiro balanceado tuviera una distribución de temperaturas adecuada al confort y a la seguridad? De acuerdo a otro trabajo presentado aquí (Juanicó et al., 2006) la eficiencia se podría mejorar con modificaciones simples, tanto en costo como en complejidad, hacia colores de mayor emisividad en espectro infrarrojo y diseño de gabinetes más abiertos.

No es la intención de este análisis proponer una solución al problema energético actual en zona de clima frío a través de artefactos de calefacción. Está claro que el problema principal lo constituye la carencia de soluciones constructivas adecuadas a este clima, y que se necesita tanto de estudios como de la implementación de técnicas constructivas adecuadas a la cantidad de grados-día de calefacción (por ejemplo, 6500 grados-día por año para Bariloche). De todos modos, la eficiencia en los equipos es importante y juega su rol, más aún al momento en que se mejoren otras condiciones.

CONCLUSIONES

Estudiamos las condiciones de uso del gas en calefacción por equipos comerciales de tiro balanceado. Se midieron los parámetros de funcionamiento de un calefactor estándar con dos tipos de entrada y salida de gases. Se obtuvo la eficiencia térmica, que en el caso de chimenea horizontal resultó menor al 63%, y en el caso de chimenea vertical de 40% y 50% para una altura de tubos de 5 m y de 1 m, respectivamente. Dadas las eficiencias muy bajas obtenidas estudiamos en detalle aspectos del diseño de los equipos. Algunos puntos notables son:

- ✓ La radiación se ve obstruida por la baja emisividad de la cámara de combustión y el diseño de gabinete muy cerrados, que reducen fuertemente el flujo neto de calor radiante desde la cámara hacia el ambiente.
- ✓ El pobre diseño aerodinámico de la cámara y gabinete reducen fuertemente el calor intercambiado por convección con el ambiente;
- ✓ La chimenea no presenta regulación de tiraje.

Concluimos por lo anterior que el calefactor analizado presenta un pobre diseño térmico-aerodinámico que sería factible de mejorar significativamente con esfuerzos de diseño modestos, tal como se demuestra en otro trabajo reciente (Juanicó et al., 2006).

Por otra parte, en el sector de usuarios sin red de gas natural, y dentro del cual minoritariamente hay equipos operados con gas envasado (GLP), su uso está muy restringido por el alto costo del combustible, lo que fuerza, en zona fría patagónica, al uso de la leña como principal insumo de calefacción, lo cual acarrea otros problemas de biosustentabilidad (como desertificación del hábitat, etc.). Mientras que desde el Gobierno Nacional se otorgan subsidios al GLP a estos usuarios de menores recursos, hay todavía un enorme margen de acción para mejorar, (y quizás con menores esfuerzos económicos) los sistemas de calefacción por estos utilizados.

AGRADECIMIENTO

Al técnico gasista matriculado Carlos Catenazzi y a su grupo de trabajo del CAB, por el apoyo imprescindible para la ejecución de las experiencias. A la firma Elster AMCO de Argentina, por la donación de un medidor de gas calibrado.

REFERENCIAS

- Andrés D.A., et al. 2005. Comparación de la influencia de distintos equipos de calefacción en la contaminación interior por óxido de nitrógeno. Conclusiones finales. Energías Renovables y Medio Ambiente 17, 61-66.
- British Standard 1250. Part 4. Space Heating Appliances. (Biblioteca del IRAM).
- Cohen C. et al., 2005. Energy requirements of households in Brazil. Energy Policy 33 (4), 555-562
- Enargas, 2006. Ente Nacional Regulador del Gas. Norma NAG 315 www.enargas.gov.ar
- Eto J.H., 1988. On using degree-days to account for the effects of weather on annual energy use in office buildings. Energy and Buildings 12, 113-117
- González A.D., Crivelli E., Gortari S., 2005. Uso racional de energía y conservación de bosques en la Patagonia Andina, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 9, 7.10-7.16 con acceso libre en www.asades.org.ar
- González A.D., Crivelli E., Gortari S., 2006. Eficiencia en el uso del gas natural en viviendas unifamiliares de la ciudad de Bariloche. Averma 2006, enviado, en proceso de referato.
- Incropera F. and DeWitt, D. 2002. Fundamentals of Heat and Mass Transfer (5ª Ed.). John Wiley and Sons, New York.
- Juanicó, L., González A.D., Gortari S. 2006. Mejora en la eficiencia de calefactores a gas de tiro balanceado. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, enviado, en proceso de arbitraje.
- Lutz J. et al., 2006. Life-cycle cost analysis of energy efficiency design options for residential furnaces and boilers. Energy 31, 311-329
- Reinders A.H.M.E. et al., 2003. The direct and indirect energy requirements of households in the European Union. Energy Policy 31, 139-153
- Rosenfeld E. et al., 2003. El uso de la energía en el sector residencial del Gran La Plata. Discriminación de consumos, cambios tecnológicos y opinión de los usuarios en las décadas del '80 y '90. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 7, 07.25-07.30, con acceso libre en www.asades.org.ar

ABSTRACT: The thermal efficiency of a flue-draft commercial space heating device has been experimentally investigated. For a standard model used by households different flame intensities and two different chimney geometries —horizontal air inlet and outlet in a concentric arrangement and vertical tubes for inlet and outlet—, were studied. Thermal efficiencies for heat transfer to the room in a range of 39% to 63% were found, with the horizontal flue providing the highest efficiency, and decreasing with the height of the vertical chimney. The findings are explained by measuring the air flows, which were much larger than required by the combustion, being the excess air flow in the range of 1.8 to 8 times the stoichiometric one. The importance of proper air flows for the type of heater studied is then identified. Either actual regulations or industrial designs do not take the matter into account. Technical solutions to improve efficiency and reduce contaminants release to the environment are also proposed.

Key words: household space heating – gas – balanced draft flue type – thermal efficiency