

ANÁLISIS TÉRMICO Y FLUIDODINÁMICO DE UN CALEFACTOR A GAS DE TIRO BALANCEADO

Néstor J. Mariani^{*}, Roberto Pereiras^{*}, Sergio D. Keegan^{*}, Guillermo F. Barreto^{*}

^{*}PROIRQ, Depto. de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de La Plata – CONICET - La Plata, ARGENTINA
nmariani@quimica.unlp.edu.ar

1. Introducción

Una parte significativa de los requerimientos energéticos de los países (60–70%) puede asignarse al consumo doméstico [1]. El costo de la energía resulta un componente de importancia en la economía de las familias, variando su impacto de acuerdo al área geográfica, precios de los combustibles, características del grupo poblacional (ingreso familiar, nivel de educación, etc.) y características de la vivienda (tipo, antigüedad, etc.) [2]. Por ejemplo, de acuerdo a un estudio relativamente reciente [3] realizado en la ciudad de Bariloche (Argentina) el consumo anual promedio de gas fue 169 GJ por vivienda por año, mientras que el de electricidad resultó 8 GJ. Paralelamente, este consumo de gas reportado resulta el doble del valor para Estocolmo (Suecia), una ciudad cuyas condiciones climáticas pueden considerarse similares.

La energía total consumida puede emplearse en forma directa o indirecta. En general, una parte considerable de la energía de uso directo corresponde al rubro calefacción. En Argentina el sistema de calefacción domiciliaria mayoritariamente utilizado son los calefactores de tiro balanceado, representando aproximadamente un 80% del mercado. De acuerdo a la información consignada en las estadísticas de productos industriales elaborada mensualmente por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [4] el promedio anual de calefactores a gas producidas en la Argentina entre los años 2000 y 2010 (excluyendo el año 2002) resulta de 325,000 unidades. Si se tiene en cuenta que alrededor del 60% de las mismas son de tiro balanceado resultan aproximadamente 195,000 unidades anuales [5].

Los calefactores de tiro balanceado son elegidos fundamentalmente por razones de confort y seguridad, ya que no consumen aire del ambiente ni descargan los gases de combustión en el mismo. Su principio de funcionamiento se basa en la circulación natural de los fluidos por diferencia de densidades: los gases de combustión calientes abandonan el calefactor mientras que aire del exterior frío (más denso) ingresa al mismo. Sin embargo, la eficiencia térmica (definida como energía entregada al ambiente a calefaccionar frente a la energía consumida) de las unidades comercializadas en la actualidad dista considerablemente de ser óptima. Si bien los fabricantes, en general, no informan valores de eficiencia, cabe aclarar que la norma vigente en la Argentina [6] prevé una eficiencia no inferior a 65% (calentadores cuya potencia sea inferior a 5000 cal h⁻¹) ó 70% (calentadores cuya potencia sea superior a 5000 cal h⁻¹) para operación a caudal térmico nominal (*i.e.*, llama o potencia máxima), presión normal de ensayo y conductos de entrada de aire y salida de gases de combustión en un ambiente calmo, mientras que para operación a llama mínima, el valor no debe ser inferior a 50%.

A pesar de su uso extendido y su madurez como producto en el mercado (se comercializan en la Argentina hace más de 50 años), la información disponible en la literatura abierta referida a la evaluación del funcionamiento térmico y fluidodinámico de estas unidades resulta llamativamente escasa; sólo pueden contabilizarse una serie de trabajos relativamente recientes del mismo grupo de investigadores argentinos [7, 8]. En los mencionados trabajos (*e.g.*, [7]) se reportan medidas de eficiencia térmica realizadas para una marca de calefactor en particular que, dependiendo del sistema de evacuación de los gases empleado, no superan el 60% a llama máxima. Estos valores, ya sean los establecidos por la norma o los medidos, resultan particularmente bajos si se lo compara con otros sistemas de calefacción domiciliarios que utilizan gas como combustible, como las calderas de agua caliente que pueden alcanzar rendimientos de hasta 90% [9]; sin embargo y como contrapartida, los costos asociados a la adquisición de estos últimos resultan varias

veces superiores para calefaccionar una habitación del mismo volumen. Otro aspecto que resulta importante mencionar a cerca de los calefactores de tiro balanceado es que para operación a potencia máxima, la temperatura de salida de los gases de combustión puede resultar considerablemente elevada (cerca a los 500°C según se consigna en [7]).

Se evidencia entonces el impacto negativo que presenta el empleo de los calefactores de tiro balanceado comercializados en la actualidad desde dos puntos de vista. Uno de ellos está referido a la utilización racional de los recursos naturales - a tal fin resulta útil recordar que las reservas probadas de gas natural en Argentina se encuentran en franca disminución, según información la Secretaria de Energía de la Nación en la última década (2002-2011) las mismas ha disminuido sostenidamente registrándose un descenso del 50%, en particular entre los años 2010 y 2011 la diferencia, siempre en menos, resultó de un 7% [10]. En este contexto, resulta significativo mencionar que la matriz energética primaria de la Argentina se presenta como fuertemente dependiente del gas natural superando su participación el 50% [11], circunstancia que ha ocasionado que desde el año 2009 el país deba importar gas natural, fundamentalmente desde Bolivia. Otro de los aspectos que resulta resentido es el de naturaleza medio-ambiental. Por una parte, la utilización de dispositivos de calefacción ineficientes, aún suponiendo una combustión completa y perfecta (higiénica), implica una generación "extra" de CO₂ (unos de los principales contribuyentes al efecto invernadero) para obtener la misma tasa volumétrica de calefacción (kW m⁻³). Por otra parte, las altas temperaturas de descarga mencionadas anteriormente constituyen ciertamente una fuente de contaminación de tipo térmica.

En artículo reciente Lutz y col. [12] estudiaron el impacto positivo global generado a través de la mejora en la eficiencia de los dispositivos de calefacción a gas. Belosevic y col. [13] analizan el empleo de un dispositivo de intercambio térmico instalado en el interior de una estufa que quema combustibles sólidos para calentar agua y utilizarla como agente calefactor en un radiador ubicado en otro ambiente.

Lo expuesto antes permite afirmar que resulta de sumo interés el análisis de alternativas que mejoren la eficiencia de los calefactores a gas de tiro balanceado comercializados en la actualidad en la Argentina.

En este trabajo se presentan resultados de la caracterización, a través de ensayos experimentales, del comportamiento térmico y fluidodinámico de un calefactor a gas de tiro balanceado. En adicción, se reportan resultados preliminares obtenidos a partir de la implementación de un dispositivo recuperador de calor, compatible con el tamaño del calefactor, que permite aprovechar la entalpía de los gases producto de la combustión para precalentar el aire de ingreso al mismo.

2. Equipamiento experimental y medidas

Con el objetivo de desarrollar un plan de experiencias que permita evaluar el funcionamiento de los calefactores a gas de tiro balanceado y de los calefactores incorporándoles un recuperador de calor se instaló un banco de ensayos adecuadamente instrumentado. En una primera etapa se empleó un calefactor a gas natural de tiro balanceado marca Emegé 9030 GN línea Patagonia con una potencia de 3000 Kcal h⁻¹.

Los ensayos experimentales fueron realizados en condición de llama piloto y a potencias mínima y máxima, con (al menos) 5 repeticiones en cada caso. Para cada ensayo se siguió un protocolo experimental permitiendo primeramente que el sistema alcance el estado estacionario para luego realizar las medidas, las cuales fueron repetidas durante el transcurso del mismo. Las variables medidas fueron: temperatura y humedad del aire ambiente, presión y caudal del gas natural, temperatura y composición de los gases de combustión y campo de temperaturas en la pared frontal de la cámara de combustión del calefactor.

Para llevar adelante las medidas térmicas se emplearon termocuplas de tipo K con acople magnético a las superficies metálicas, las cuales se encuentran conectadas a 2 adquirentes de datos USB-TEMP (Measurement Computing Corp.) de 8 canales (cada uno) con conexión USB a una computadora personal.

Las condiciones (temperatura y humedad) en el ambiente en el que estuvo ubicado el equipo experimental se registraron con un termo-higrómetro digital.

Respecto a análisis de los gases producto de la combustión se empleó un instrumento marca Testo modelo 327-1, el cual que permite monitorear la composición de O₂ (precisión: ±0.2% en Vol.) y CO (precisión: ±20 ppm hasta 400 ppm, ±5 % del v.m. hasta 1000 ppm y ±10 % del v.m. hasta 4000 ppm). Paralelamente, se empleó un analizador de gases de marca GasCheck equipado con sensores para medir hidrocarburos no quemados, NO_x y CO₂, además de CO y O₂. Se observó una muy buena concordancia entre las medidas realizadas con ambos equipos para CO y O₂. Respecto a los hidrocarburos no quemados y NO_x en ninguno de los ensayos realizados se detectaron cantidades significativas.

Para medir el caudal de gas natural se utilizó un equipo marca Elster AMCO modelo BK-G1.6 que proporciona una precisión del orden del 1% en las condiciones de medida.

3. Resultados

Las series de medidas realizadas incluyen: calefactor en su configuración original, calefactor incorporándole un regulador de presión de gas a la entrada, conjunto calefactor con regulador de presión-recuperador de calor en posición horizontal en reemplazo de los conductos de entrada y salida estándar y, finalmente, conjunto calefactor con regulador presión-recuperador en posición vertical de manera de elevar el tiraje del sistema en 45 cm.

3.1 Serie de ensayos para el calefactor sin recuperador de calor

Para las dos primeras series de ensayos (calefactor funcionando sin recuperador), la sonda de toma de muestras de gases de combustión y medida de la temperatura de los mismos, se ubicó en el centro del conducto de salida de los gases de combustión a un diámetro (del conducto interno) de la salida de gases, de acuerdo a la norma europea EN 613. Cabe aclarar que la versión revisada de norma Argentina NAG 315 (que se encuentra para su aprobación) adopta el mismo procedimiento de ensayo para los calefactores que la norma europea, por esta razón se optó por su empleo. Los resultados obtenidos, en promedio, se muestran en la Tabla 1.

La potencia informada en la Tabla 1 (y en la Tabla 2) es la que surge de medir el consumo de gas natural (caudal) a intervalos regulares durante los ensayos.

Se desprende de la Tabla 1 (a) que el calefactor opera con un exceso de aire mínimo (prácticamente en condiciones de combustión estequiométrica) para potencia máxima, mientras que la temperatura de salida resulta muy elevada. Por otra parte, para la condición de potencia mínima aparece un elevado exceso de aire y simultáneamente las temperaturas de salida también pueden considerarse altas.

En adición, se detectó que cuando la presión de la línea de gas natural supera los 18 mbar (presión estándar de funcionamiento acuerdo a la normativa Argentina) en más de un 15-20% comienza a aparecer CO a la salida en cantidades significativas. Por esta razón se decidió para todos los ensayos a realizar incorporarle al calefactor un regulador de presión. Se indica que otros modelos de calefactores cuentan con este dispositivo como accesorio de fábrica.

La incorporación del regulador de presión hace que la presión de alimentación disminuya ligeramente respecto de la presión normal de operación que es 18 mbar; esta circunstancia conduce a que la potencia máxima "efectiva" desarrollada por el calefactor resulte algo inferior (3,1-3,2 frente a 3,45 kW, ver Tabla 1 b). De los datos reportados en la Tabla 1 (b) se advierte que el hecho de operar con una presión regulada de gas natural inferior (16 mbar) conduce a que el exceso de aire resulte algo mayor, y por ende, la temperatura de salida ligeramente menor en la condición de llama máxima. La combustión sigue siendo completa sin presencia de hidrocarburos no quemados ni CO en cantidades significativas.

Debe señalarse que se detectó experimentalmente una fuerte asimetría en la distribución de los flujos en la sección transversal, los gases de combustión tienden a circular por la parte superior de conducto interno mientras que el aire lo hace básicamente por la inferior del ánulo. En la sección transversal del tubo interno se registraron diferencias de temperatura de hasta 100°C. No obstante, se verificó que el valor medido en el centro del tubo de acuerdo a la norma resulta representativo de la temperatura media de salida de los gases de combustión. Esta temperatura se empleó para estimar la eficiencia resultando la misma cercana al 70% a potencia máxima.

Los valores máximos de la temperatura sobre la pared frontal del la cámara de combustión resultan superiores a 400 °C tanto para el calefactor operando, sin como con regulador de presión, siendo ligeramente superiores en el primer caso.

Tabla 1. Ensayos en un calefactor de tiro balanceado Emegé – mod. 9030 TB Patagonia de 3,5 kW. Conductos concéntricos de entrada y salida. Combustible: gas natural

Condiciones	Potencia [kW]	Exceso de aire	Temp. de salida de gases [°C]	Composición a la salida [% V/V]			
				O ₂	CO ₂	CO	HC (no quemados)
(a) T _{amb} =18°C, p _{GN} ≈18 mbar (sin regular)	3,4	6-8%	420-430	1,4-1,8	11,0-10,7	0,001	-
	1,2-1,8	150-380%	230-290	13,0-17,0	2,2-4,5	0,0002	-
(b) T _{amb} =20°C, p _{GN} =16 mbar (regulada)	3,1-3,2	20-32%	390-405	4,0-5,5	8,5-9,3	0,001	-
	1,1-1,6	230-380%	220-270	15,0-17,0	2,2-3,3	0,0005	-

3.2 Serie de ensayos para el calefactor incorporándole el recuperador de calor

Como se adelantó en la Introducción, para mejorar la eficiencia del calefactor la propuesta a implementar consiste en precalentar el aire necesario para la combustión que ingresa a la misma empleando los gases de salida. Para explorar esta posibilidad se simularon, empleando el enfoque bibliográfico clásico de diseño de intercambiadores de calor, pero considerando las particularidades tanto desde el punto de vista térmico como fluidodinámico, una serie de recuperadores que presentan la característica común de poseer micro-canales rectilíneos. En todos los casos se estableció como premisa el funcionamiento por circulación natural del conjunto calefactor-recuperador. Las simulaciones permitieron comprobar que distintos diseños de tipo compacto compatibles con el tamaño del calefactor, es decir, que pueden perfectamente incorporarse a la salida del mismo, permitirían alcanzar un nivel de recuperación del orden del 10% de la potencia total del calefactor. A partir del análisis de los resultados de las simulaciones se seleccionó de entre los distintos recuperadores estudiados uno consistente en tubos concéntricos aletados, mostrado en la Figura 1, (por el tubo interno salen los gases de combustión mientras que por el ánulo ingresa el aire) que presenta las siguientes características.

- Diámetro del tubo interno: 7.5 cm Diámetro del tubo externo: 15 cm
- 16 aletas longitudinales (chapa galvanizada) internas y externas
- Dimensiones Altura: 3.65 cm Espesor: 0.05 cm Largo: 22 cm
- Peso aproximado (sólo aletas): 1 kg

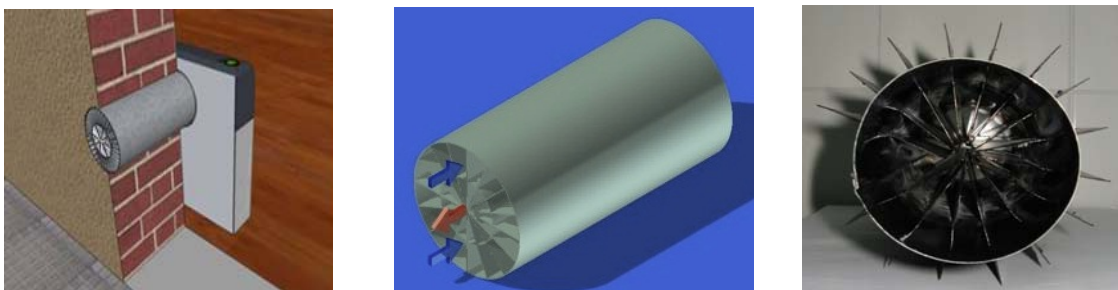


Figura 1. Esquema y fotografía del recuperador de calor incorporado al calefactor

Una vez construido e instalado el recuperador se realizaron una serie de ensayos para el conjunto calefactor con regulador de presión-recuperador de calor en posición horizontal en reemplazo de los conductos de entrada de aire y salida de gases de combustión estándar. La sonda de toma de muestras de gases de combustión y medida de la

temperatura de los mismos, se ubicó a la salida del recuperador de calor en la corriente de gases de combustión.

Se encontró que, a potencia máxima, el tiro no resulta suficiente para vencer la pérdida de presión ocasionada por la incorporación del recuperador, circunstancia que se refleja en el hecho de que se detecta una cantidad significativa de CO (superior a 0,4%, límite superior de detección del analizador) en los gases de combustión, claramente esta situación no puede admitirse. Respecto a la operación a potencia mínima, el recuperador funciona correctamente detectándose una disminución del exceso de aire y de la temperatura de salida de los gases de combustión y un aumento de las temperaturas de la pared frontal de la cámara de 10°C en promedio, recuperándose alrededor de un 40% de la entalpía de los gases de combustión.

Debe señalarse que la alternativa de instalar el recuperador en posición horizontal tiene la desventaja de acentuar la asimetría en la distribución de los flujos en la sección transversal. En consecuencia, no se aprovechan integralmente ni el área de transferencia ni las secciones transversales para la circulación de ambas corrientes.

El hecho de que el calefactor original no provea un tiraje apropiado, sumado a la distribución asimétrica del flujo, motivaron la implementación de la alternativa de ubicar el recuperador en posición vertical y elevar el tiraje del sistema en 45 cm.

Los resultados presentados en la Tabla 2 muestran que para esta alternativa la combustión se produce en forma completa y perfecta, no detectándose la presencia, en cantidades significativas, de CO ni de hidrocarburos no quemados. Simultáneamente, puede apreciarse que para la condición de potencia máxima ha podido disminuirse la temperatura de salida de los gases de combustión en aproximadamente 250°C respecto al calefactor funcionando sin el recuperador (Tabla 1 b), lo cual implica un nivel de recuperación entálpica elevado (50%), aún considerando que el exceso de aire es mayor para la alternativa calefactor-recuperador que para el calefactor sólo (se ha incrementado el tiraje en 45 cm). Este comportamiento tiene su correlato en un incremento de entre 10 y 15°C en los valores de temperatura de la pared frontal de la cámara de combustión.

Tabla 2. Ensayos para el conjunto calefactor de tiro balanceado Emegé – mod. 9030 TB Patagonia de 3,5 kW y recuperador de calor en posición vertical (tiraje total del sistema 82 cm). Combustible: gas natural

Condiciones	Potencia [kW]	Composición a la salida [% V/V]					
		Exceso de aire	Temp. de salida de gases [°C]	O ₂	CO ₂	CO	HC (no quemados)
T _{amb} =25°C, p _{GN} =16 mbar (regulada)	3,0	42-50%	190-205	6,8-7,6	7,5-8,0	0,001	-
	1,4-1,5	240-260%	140-150	15,3-15,6	3,0-3,3	0,0006	-

La disposición vertical del recuperador elevando el tiraje puede considerarse aceptable en términos de recuperación de energía, en este sentido, los resultados alcanzados son alentadores. Finalmente, cabe aclarar que con este tipo de disposición de los conductos de evacuación de gases el conducto externo debe estar aislado para evitar las pérdidas de calor al aire ambiente.

4. Conclusiones

En este trabajo se aborda el estudio experimental de un calefactor a gas de tiro balanceado, de las típicamente empleadas en la Argentina como medio de calefacción de las viviendas, con el objetivo de analizar su comportamiento térmico y explorar alternativas que incrementen su relativamente baja eficiencia térmica.

En primer término se determinó la necesidad de incorporarle al calefactor un regulador de presión de gas natural para garantizar una combustión completa. Posteriormente y como resultado significativo de los ensayos se observó que a potencia máxima la temperatura de

salida de los gases de combustión alcanza un valor significativamente elevado superando los 400°C, mientras que el exceso de aire que resulta de entre 20-30% puede considerarse razonable. Sin embargo, a potencia mínima los valores medidos tanto para la temperatura de salida como para el exceso resultan significativamente altos, 250°C (en promedio) y superiores al 200%, respectivamente.

En este contexto, se reportan también los resultados preliminares del diseño y la implementación de un dispositivo recuperador de calor de tubos concéntricos aletados, con funcionamiento por circulación natural y tamaño compatible con el del calefactor, que permite aprovechar la entalpía de los gases producto de la combustión para precalentar el aire que ingresa al calefactor. Se muestra que la incorporación del recuperador resulta una alternativa viable por cuanto permite recuperar hasta un 50% de la entalpía de los gases de combustión incrementando la eficiencia del sistema.

Como aspectos pendientes puede mencionarse la posibilidad, en función de los resultados obtenidos, de rediseñar el recuperador para maximizar la velocidad de transferencia de calor teniendo como premisas incrementar el número de aletas y disminuir la relación entre los diámetros de los tubos interno y externo, manteniendo el nivel de caída de presión en los valores actuales. En adición y para otorgarle mayor generalidad a la alternativa del empleo del recuperador calor sería deseable avanzar en un estudio sistemático que involucre otros modelos de calefactores.

Agradecimientos

Los autores agradecen el aporte de las siguientes instituciones argentinas: ANPCyT – ENARGAS (PICTO 191), CONICET (PIP 0304) y UNLP (PID 11/1136).

Referencias

- [1] W. Biesiot, K.J. Noorman, Energy requirements of household consumption: A case study of the Netherlands, *Ecological Economics*, 28 (3), pp. 367–383, 1999.
- [2] D. A. Poyer, L. Henderson, A. P. S. Teotia, Residential energy consumption across different population groups: comparative analysis for Latino and non-Latino households in USA, *Energy Economics*, vol. 19, pp. 445-463, 1997.
- [3] A. D. González, A. Carlsson-Kanyama, E. S. Crivelli, S. Gortari, Residential energy use in one-family households with natural gas provision in a city of the Patagonian Andean region, *Energy Policy*, vol. 35(4), pp. 2141–2150, 2007.
- [4] Estadísticas de productos industriales - Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2012.
- [5] Comunicación personal (7/2012) - Cámara Argentina de Fabricantes de Artefactos de Gas (CAFAGAS)
- [6] NAG 315, Norma provisoria para la aprobación de calentadores de ambiente con cámara estanca; entrada de aire y ventilación verticales, tipo U y balanceados, ENARGAS, Ente Nacional Regulador del Gas, 1995.
- [7] L. E. Juanicó, A. D. González, High-efficiency prototypes of commercial gas heaters extensively used in Argentina, *Int. J. of Hyd. Energy*, vol. 33 (13), pp. 3471-3474, 2008a.
- [8] L. E. Juanicó, A. D. González, Thermal efficiency of natural gas balanced-flue space heaters: Measurements for commercial devices”, *Energy and Buildings*, vol. 40, pp. 1067–1073, 2008b.
- [9] Sistema de información sobre eficiencia energética de calderas, Instituto para la diversificación y ahorro de energía, Ministerio de industria, turismo y comercio, Gobierno de España. Disponible en el sitio: http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540_Procedimientos_inspeccion_calderas_GT5_07_f5b208e3.pdf (4/02/2013)
- [10] L. Caratori, Evolución de las reservas de hidrocarburos en Argentina entre 2002 y 2011, Informe, Instituto Argentino de la Energía “General Mosconi”, Agosto, 2012.
- [11] Balance Energético Nacional, Secretaria de Energía de la Nación
- [12] J. Lutz, A. Lekov, P. Chan, C. Dunham Whitehead, S. Meyers, J. McMahon, Life-cycle cost analysis of energy efficiency design options for residential furnaces and boilers, *Energy* vol. 31, pp. 311–329, 2006.
- [13] S. Belosevic, M. Paprika, M. Komatina, Z. Stevanovic, R. Mladenovic, N. Oka, D. Dakic, Experimental and numerical investigation of heat exchanger built in solid fuel household furnace of an original concept, *Energy and Buildings*, vol. 37, pp. 325–331, 2005.