

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RADIACIÓN TÉRMICA EMITIDA POR UNA ESTUFA DE ALTO RENDIMIENTO

L. Boccaccini¹, J. Quiñonez² y A. Hernández³

¹UTN Regional San Rafael, Avda. Justo José de Urquiza 314, (5600) San Rafael, Mendoza
Tel. 549-260-4405353. E-mail: liboccaccini@gmail.com

^{2,3}Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET)
Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSA)
Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina.
Tel. 54-0387-4255579 – Fax 54-0387-4255489. E-mail: liboccaccini@gmail.com

Recibido: 02-02-18; Aceptado: 29-6-18.

RESUMEN.- El presente trabajo expone los avances realizados en el estudio del comportamiento térmico y de la cantidad de potencia emitida por una estufa de alto rendimiento en condiciones estacionarias de funcionamiento. Este trabajo está incluido en el estudio teórico-experimental del funcionamiento de una estufa de mampostería con hogar cerrado y horno para cocción de alimentos (estufa rusa) empleada en la calefacción de una vivienda de 90 m² de planta ubicada en la localidad de San Rafael, Mendoza, ensayada durante el invierno de 2016. Se relevaron más de 3.000 nodos térmicos sobre la superficie exterior de cada pared de la estufa. Con los datos obtenidos se generaron imágenes térmicas en falso color representativas del comportamiento térmico superficial de la estufa y se calculó la potencia térmica emitida por cada superficie. La potencia emisiva total de la estufa ensayada es de 1.433,73 W mientras que su valor por m² de superficie exterior es 293,37 W/m². Estos valores permitieron alcanzar el confort térmico interior bajo las condiciones climáticas del invierno del sur mendocino ya que durante todo el período de evaluación de este prototipo la temperatura del local calefaccionado permaneció entre 20,1 y 21,5 °C, valores que se encuentran dentro del rango de confort térmico humano.

Palabras claves: Estufa rusa, Potencia irradiada, Monitoreo estacionario.

EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL RADIATION EMITTED BY A HIGH PERFORMANCE STOVE

ABSTRACT.- The present work describes the advances made in the study of thermal behavior and amount of power emitted by a high performance stove in stationary operating conditions. This work is part of the theoretical-experimental study of the operation of a masonry stove with closed hearth and oven for cooking food (Russian stove) used in the heating of a house of 90 m² of plant located in the town of San Rafael, Mendoza, tested during the winter of 2016. More than 3,000 thermal nodes on the outer surface of each wall of the stove were sensed. With the obtained data, photochromatic images representative of the thermal behavior of the stove were generated and the thermal powers emitted by each surface were calculated. The total emissive power of the stove tested is 1,433.73 W while its value per m² of exterior surface is 293.37 W / m². These values allowed to reach the interior thermal comfort under the climatic conditions of the Southern Mendoza winter since throughout the evaluation period of this prototype the indoor temperature remained between 20.1 and 21.5 °C, values within of the human hygrothermal comfort range.

Keywords: Russian stove, Irradiated power, Stationary monitoring.

1. INTRODUCCION

Aunque las energías renovables han demostrado ser una opción técnicamente adecuada para satisfacer las necesidades básicas de algunas poblaciones aisladas, no son económicamente accesibles para sus pobladores debido a sus inestables economías de subsistencia. En las regiones precordilleranas o en la Patagonia Argentina, el combustible principal es la biomasa de especies leñosas nativas, cuya extracción intensiva no es sustentable.

El problema se agrava aún más debido a la alta ineficiencia térmica de los fogones donde se quema esa biomasa y a la aparición de enfermedades pulmonares en sus usuarios por los altos niveles de contaminación que genera la combustión incompleta de la leña.

Westhoff y Germann (1995) y la World Health Organization, (2006) describen la problemática del acceso a la energía y su importancia para las comunidades aisladas, y coinciden en que la energía es esencial para satisfacer las necesidades básicas como cocción de alimentos, agua caliente sanitaria, iluminación y calefacción de edificios. Jiménez et al. (2011) presentan el panorama del 2011 y las perspectivas futuras de las estufas de leña en México.

1. Investigador UTN Regional San Rafael, Mendoza.

2. Becario doctoral de CONICET.

3. Investigador Independiente de CONICET.

Analizan críticamente la problemática del uso de leña para la cocción de alimentos y sus impactos socio-ambientales revisando los principales programas realizados con éxito en el ámbito internacional.

En el año 1994 Barnes et al. destacaban que la estufa de biomasa mejorada debe ser considerada un nuevo trampolín hacia nuevas tecnologías de calefacción, comparándolas con las tradicionales estufas de biomasa utilizadas por las familias humildes rurales y urbanas. En esta línea de análisis Bratro (2002), INTI-CONICET (2008) e INTI (2014) concluyen que los sistemas de calefacción de alto rendimiento aprovechan la masa térmica de los ladrillos de su estructura para reducir el consumo de leña por acumulación del calor a corto y mediano plazo. También coinciden en la elevada eficiencia de estos tipos de calefacción (70% o superior), y además proponen prototipos de calefacción de alto rendimiento con sus respectivos detalles constructivos. Díaz et al. (2015) publican el manual constructivo de una estufa a leña mejorada detallando los múltiples beneficios y ventajas de utilizar este tipo de estufas de alto rendimiento.

Aristizábal (2010) se refiere a la construcción de tres prototipos de estufas mejoradas y declara un aumento del rendimiento promedio del 14,66 % entre las estufas mejoradas y las tradicionales. El Instituto Nacional de Ecología de México (2009), evaluó distintos tipos de estufas para cocción/calefacción y concluyó que todas las estufas mejoradas ahorran entre el 40 % y el 60 % de combustible respecto al fogón tradicional. MacCarty et al. (2008) compararon tres tipos de estufas y obtuvieron un 35 % de ahorro de combustible en comparación con las estufas tradicionales. En el libro de FAO-SAGARPA (2007) se describe la estufa Lorena, resaltando que puede ahorrar entre un 25 y 50 % de la leña que consume un fogón tradicional. Boccaccini y Hernández (2015), evaluaron experimentalmente el funcionamiento de una estufa de alto rendimiento instalada en una vivienda unifamiliar en la zona de San Rafael, Mendoza, Argentina, y destacan su potencial para calefaccionar grandes espacios bajo condiciones de frío extremo y su alta inercia térmica.

Bryden et al. (2006) estudiaron la contaminación del aire intra-domiciliario concluyendo que el uso de leña para cocción y calefacción de edificios causa serios problemas de salud a 2 mil millones de personas en todo el mundo. Regnando (2004), Smith (2006) y Tissari et al. (2009) midieron contaminantes en sangre de usuarios de distintos tipos de estufas y concluyeron que las de hogar cerrado disminuyen el nivel de contaminantes en el aire interior de los edificios en relación a los que utilizan artefactos de cocción-calefacción a biomasa tradicionales. Díaz et al. (2003) concluyeron que su modelo de estufa-cocina llamada PATSARI reduce en un 95 % la contaminación del aire interior de los hogares y, por tanto, evita el riesgo de contraer enfermedades respiratorias, de los ojos, quemaduras, etc.

Analizando la escasa diversificación de las fuentes primarias de energía empleadas en nuestro país, la alta dependencia de los combustibles fósiles que contaminan severamente el medio ambiente, y la baja eficiencia de los métodos de combustión de biomasa tradicionales, es indispensable hacer un análisis más detallado de las estufas de mampostería de alto rendimiento, que sean capaces de utilizar diferentes combustibles y resulten accesibles a la población, sobre todo a la de menores recursos económicos. En este sentido el

presente trabajo busca aportar nuevos conocimientos sobre la transferencia de calor por radiación al ambiente y a las personas para orientar el diseño de nuevos prototipos que maximicen el rendimiento termo-energético de este tipo de tecnología de bajo costo y fácil transferencia a potenciales usuarios.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ENSAYADO

El prototipo de estufa ensayado se encuentra instalado en una vivienda de uso familiar, ubicada a 34°34'53'' de latitud sur y 68°20'34'' de longitud oeste, a 5 km de la ciudad de San Rafael en la zona precordillerana de Mendoza. El clima se caracteriza por ser templado y seco con una amplitud térmica diaria muy marcada.

El hogar está construido interiormente con ladrillo refractario de sílice, material muy denso de baja conductividad térmica y alta capacidad térmica volumétrica. Exteriormente está recubierta con piedra tipo laja resultando una unidad de gran almacenamiento térmico que puede enfriarse lentamente durante el período de descarga. Como combustible, este prototipo puede utilizar indistintamente leña o gas natural a través de un quemador instalado en la cámara de combustión. A la mitad de su altura dispone de un horno para fines culinarios que aumenta su utilizabilidad durante el período invernal y mejora su efectividad al ahorrar parte del combustible que se emplearía en la cocción de alimentos si ésta debiera hacerse en una cocina convencional externa a la estufa.

La estufa rusa se encuentra ubicada en la cocina comedor de la vivienda, la cual se calefacciona directamente por convección y radiación desde la fuente caliente. El dormitorio se calefacciona indirectamente mediante el aire que, tomado de la cocina, se calienta dentro del intercambiador de calor de flujo cruzado ubicado en la parte superior de la estufa, (Figura 2 Izq., sector inclinado de color rojo), sin tomar contacto con los gases de combustión, y circula por convección natural a través de un ducto. De esta forma se genera una circulación natural entre la cocina y el dormitorio que favorece la distribución del aire caliente.

Los gases de combustión generados a muy alta temperatura, (superiores a 600 °C con leña y 415 °C con gas), circulan desde la cámara de combustión ubicada en la parte inferior de la estufa en sentido vertical por detrás y alrededor del horno, transfiriendo gran parte de su energía térmica a esta cavidad y a las paredes laterales y posterior construidas con ladrillo refractario. A continuación, realizan un movimiento horizontal de ida y vuelta por una canalización construida interiormente con los mismos ladrillos y toman contacto con el intercambiador de calor humos – aire cediendo otro porcentaje importante de su energía térmica. Finalmente, salen al exterior por una cañería metálica que irradia parte del calor residual al ambiente interior. La temperatura de salida de los gases de combustión es inferior a 80 °C lo que indica que la mayor parte de la energía liberada por el combustible fue acumulada en la masa de la estufa y transferida por convección y radiación al ambiente interior.

En la cara posterior de la estufa existe un canal construido a todo su ancho y alto con chapa de hierro donde el aire en contacto con ella y la pared de la estufa se calienta hasta unos 60 °C aproximadamente, generando una circulación termosifónica vertical que se mezcla con la que proviene del intercambiador de calor, siendo ambas colectadas por el

ducto superior que conduce el aire caliente hacia el dormitorio (Figura 2, *Izq.*). Esta circulación convectiva permite aprovechar más eficientemente la energía disipada por la superficie posterior de la estufa y potencia la succión del flujo de aire dentro del intercambiador.

3. MONITOREO DEL SISTEMA

El sistema fue térmicamente evaluado durante 5 días consecutivos en el invierno de 2016. Los instrumentos utilizados para el monitoreo de las distintas variables fueron:

- Cámara infrarroja Fluke TiS10 para obtención de imágenes termográficas de cada pared de la estufa.
- Pirómetro infrarrojo con emisividad ajustable por termocupla tipo *K*, marca CEM DT-8835. Resolución: 0,1 °C en temperatura y 0,01 en emitancia IR.
- Dataloggers de temperatura marca Hobo modelo Onset U12 para registro de temperaturas exterior e interior del edificio.

3.1. Metodología del monitoreo.

Para el ensayo se utilizó un pirómetro infrarrojo de emisividad ajustable mediante una termocupla tipo *K* realizando más de 3.000 mediciones puntuales de temperatura y emisividad infrarroja sobre las caras de la estufa expuestas al aire del ambiente principal de la casa (cocina-comedor).

Para el relevamiento de datos se dividió la superficie de cada pared en rectángulos consecutivos e iguales de 18 cm² c/u. Para ello se utilizó una malla plástica subdividida en rectángulos de 3 cm de ancho por 6 cm de alto. Mediante la termocupla tipo *K* del pirómetro infrarrojo se tomaron dos mediciones por rectángulo, una centrada en la mitad superior y la otra centrada en la mitad inferior. Simultáneamente se varió la emitancia en el pirómetro hasta que la temperatura indicada en su visor coincidiera con la de la termocupla *K*. De esta forma se obtuvo un mapeo discreto de valores de temperatura superficial y de emisividades infrarrojas calibradas para cada superficie evaluada.

Con este mapeo discreto de temperaturas superficiales se generaron imágenes de isotermas en falso color con el software Matlab que fueron contrastadas con las obtenidas mediante la cámara infrarroja a fin de evaluar la confiabilidad de las imágenes termográficas de las caras de la estufa. En la figura 1 se muestran las distintas superficies ensayadas.

Para el cálculo de la potencia térmica emitida por la estufa no es conveniente trabajar con la emitancia IR promedio fijada en la cámara termográfica para tomar cada imagen debido a que cada cara está compuesta por distintos materiales con distintas emisividades. En este trabajo, el mapeo de emisividades obtenido con las mediciones puntuales, permitió evaluar con mayor exactitud, la potencia emitida por toda la estufa desde sus distintas superficies. La potencia emisiva total se obtiene sumando los valores nodales sobre todas las caras de la estufa.

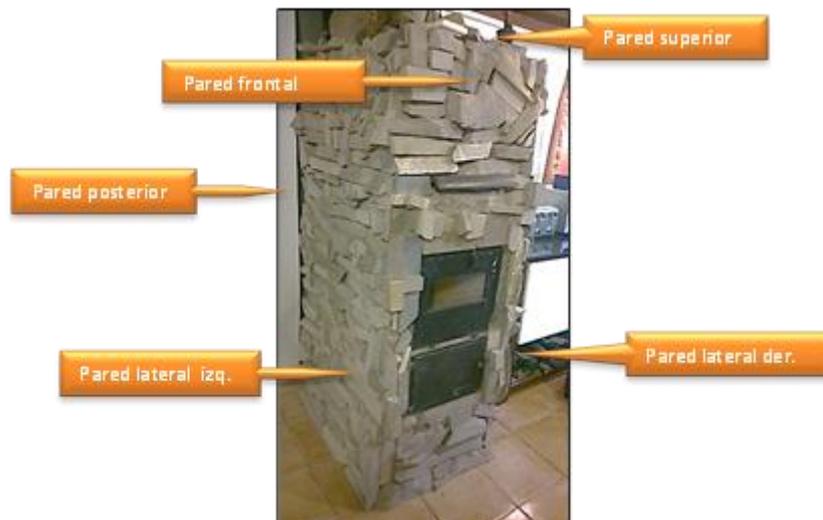


Fig. 1: Detalle de las caras de la estufa ensayadas.

4. CÁLCULO DE LA RADIACION EMITIDA

4.1. Radiación emitida por la pared lateral izquierda.

En esta superficie se obtuvieron cuatro valores de emisividad diferentes para los distintos tipos de piedras que la conforman (0,94, 0,95, 0,96 y 0,97). Cada uno de los valores de emisividad determinados en cada punto de medición se compararon con los valores informados en el manual del equipo y en la tabla de materiales del libro de Incropera y DeWitt (1990), verificando que eran los esperados según estas fuentes.

En el corte transversal presentado en la figura 2 *Izq.* se puede observar el detalle constructivo de la estufa que servirá para el análisis de resultados. En relleno sólido

oscuro se representan los muros de ladrillo refractario. El prototipo estudiado está revestido con piedras, detalle que no está especificado en esta figura que es solo de carácter representativo para interpretar su funcionamiento. La figura 2 *Der.* muestra el mapa de isotermas superficiales obtenido a partir de los datos de temperatura medidos. Las mediciones de esta superficie fueron realizadas con temperaturas externas al edificio entre 0 y -1°C mientras que la temperatura de la cocina-comedor donde se encuentra la estufa de alto rendimiento se mantuvo entre 20,1 y 20,9 °C. La distribución de temperaturas superficiales muestra cómo en la zona del quemador se encuentran las temperaturas más altas y, en las zonas periféricas, se distribuyen las temperaturas más bajas.

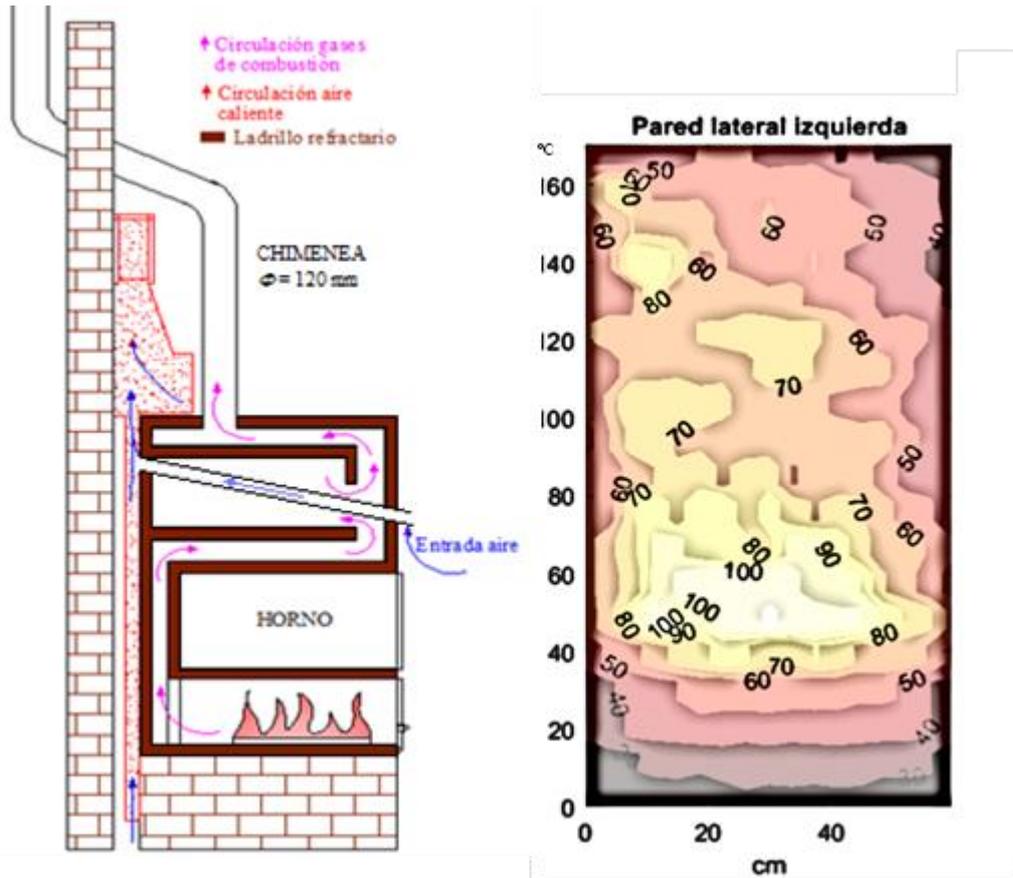


Fig. 2: Izc. Corte de estufa estudiada. Der. Mapa de isoterma obtenidas con Matlab.

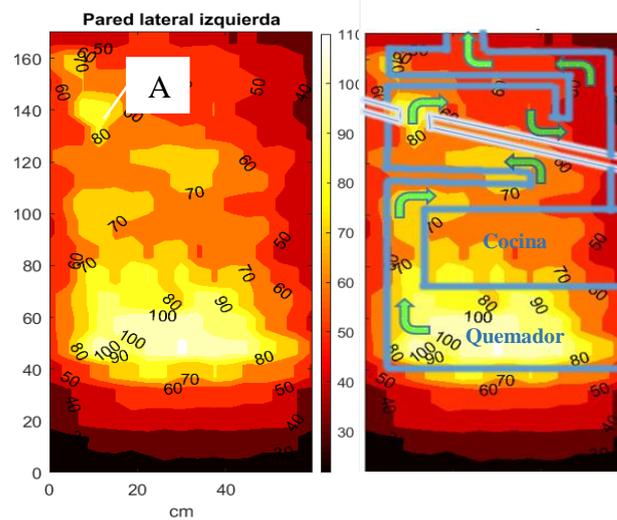


Fig. 3: Izc. Mapa de temperaturas superficiales. Der. Representación de circulación de humos.

En la figura 3 se observa que las temperaturas mínimas son aproximadamente de 30°C, y las máximas alrededor de los 110°C. La temperatura superficial promedio calculada en base a los valores de temperaturas nodales medidos en esta superficie es de 57,3 °C.

Existe una correspondencia térmica entre las zonas calientes graficadas y la ubicación del quemador y del conducto de circulación de los gases de combustión cuyas temperaturas van disminuyendo a medida que ascienden hacia la

chimenea. Esto es consecuencia del intercambio de calor entre los gases de combustión y el material de la estufa en su recorrido ascendente. Las zonas superficiales más calientes están representadas a la altura del quemador, con valores de hasta 100°C, y a medida que los humos se trasladan hacia la chimenea van cediendo calor en su recorrido. En la figura 3 Der. se observa que las paredes que están en contacto directo con el ducto de circulación de humos están más calientes que las que no están en contacto directo con ellos.

En la zona A de la figura 3, por cuestiones de diseño del intercambiador inclinado, los gases de combustión están obligados a circular en contacto directo con la pared analizada, por lo que se observa que el fluido caliente transfiere energía hacia el muro en esta zona levantando su temperatura respecto a las aledañas. En el corte de la derecha está representado gráficamente el recorrido que realizan los gases de combustión para superar el intercambiador de calor representado por las dos líneas claras inclinadas. Este punto caliente se podría tener en cuenta para nuevos diseños mejorados porque deja en evidencia que, si los gases de combustión son forzados a

circular en contacto directo con los muros, las temperaturas en estas superficies son más elevadas. Así, su capacidad de disipación calorífica hacia el medio que la contiene, será mayor.

En la figura 4, se comparan las imágenes termográficas obtenidas con la cámara infrarroja Fluke con la imagen de curvas de nivel térmicas en la superficie exterior del muro izquierdo de la estufa. Se evidencia una notable equivalencia entre ellas a pesar de que las primeras fueron obtenidas empleando un único valor de emitancia infrarroja para toda la imagen.

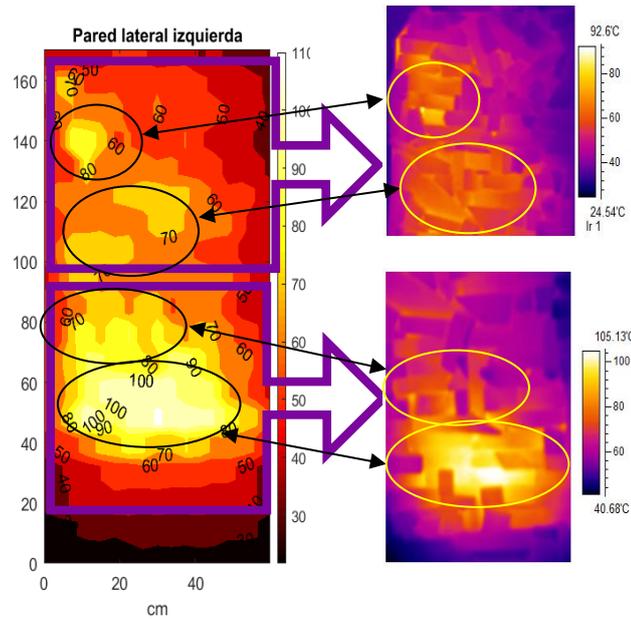


Fig. 4: Izq.: Mapa de isotermas. Der.: Imagen termográfica

Para el cálculo de potencias emisivas se utilizaron los datos de temperatura y emisividad infrarroja relevados punto por punto y graficados en Matlab, dado que este método es más exacto que la termografía, técnica que toma un único valor de emisividad para toda la superficie analizada.

La potencia radiante emitida por un cuerpo gris a temperatura T se calcula mediante la Ley de Stefan-Boltzmann que establece que la energía irradiada por el cuerpo es directamente proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta:

$$P = \varepsilon * S * \sigma * T^4 \quad (1)$$

donde:

P = potencia radiada en Watts; ε = emisividad infrarroja que depende de la naturaleza superficial del cuerpo (adimensional); S = área de la superficie radiante en m^2 ; σ = constante de Stefan-Boltzmann cuyo valor es $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ y T = temperatura absoluta en K.

Los valores de temperatura y emitancia infrarroja medidos se utilizaron para calcular la potencia emitida por cada nodo de área S_n . La potencia total emitida por cada pared de la estufa identificada con el subíndice j ($j = 1, 2, \dots, 5$) se obtiene sumando los valores de potencia emitida por cada nodo (i,j):

$$P_j = \sum_{i=1}^{N_j} \varepsilon_{i,j} S_n \sigma T_{i,j}^4 \quad (2)$$

donde

N_j = número de nodos de la pared j ; $\varepsilon_{i,j}$ = emisividad infrarroja del nodo i de la pared j ; S_n = área superficial de cada nodo ($0,0009 \text{ m}^2$) y $T_{i,j}$ = temperatura absoluta del nodo i de la pared j en K.

Reemplazando cada término en la ecuación (2) se obtuvo para el muro izquierdo una potencia emitida igual a $384,98 \text{ W}$.

Con este valor se puede calcular la potencia emitida por metro cuadrado mediante la ecuación:

$$P_{m^2} = \frac{P_j}{S_p} \quad (3)$$

donde:

P_{m^2} = potencia emisiva en W/m^2 y S_p = área superficial de la pared en m^2 .

El área de la pared izquierda es $1,49 \text{ m}^2$ que corresponde a un ancho de $0,85 \text{ m}$ y una altura de $1,75 \text{ m}$. La potencia emitida por m^2 por la pared izquierda de la estufa es $258,81 \text{ W/m}^2$.

4.2. Radiación emitida por la pared frontal.

En esta superficie se diferencian tres tipos de materiales con distintas emisividades, dos correspondientes a piedras con valores relevados de 0,94 y 0,95, y el otro a las puertas metálicas pintadas de negro con emisividad 0,98. Además, la puerta del horno cuenta con un visor de vidrio templado. Para medir la temperatura en esta zona se utilizó la termocupla tipo K del pirómetro infrarrojo, seleccionándose un valor de emisividad de 0,82 (Incropera y DeWitt, 1990). No se obtuvo un valor de emisividad con el pirómetro

infrarrojo debido a que el reflejo del vidrio dificulta dicha medición.

Según se observa en la figura 5, las temperaturas más altas estuvieron en el orden de los 110 °C, las más bajas alrededor de los 30 °C y la temperatura promedio del muro en 51,3 °C. Las temperaturas más altas corresponden a la puerta del quemador debido a la alta conductividad térmica del material utilizado (acero al carbono).

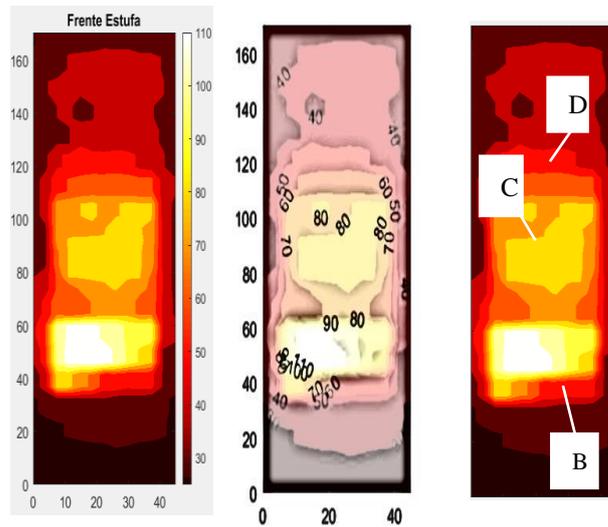


Fig. 5: Imágenes termocromáticas de la pared frontal (Matlab)

En la Zona B, se encuentra la toma de aire para la combustión (zona derecha de la tapa del quemador), con temperaturas menores que en el resto de la tapa debido a que el aire que ingresa por el orificio a temperatura ambiente enfría localmente la tapa de hierro. La Zona C corresponde al visor de vidrio del horno integrado a la estufa y las temperaturas están en el orden de los 88 °C. Es necesario señalar que este horno no se encontraba en uso y la temperatura del interior era de 180°C, aproximadamente, durante el período de medición. La Zona D corresponde a las curvas de nivel térmico de la toma de aire del intercambiador de calor que calefacciona el dormitorio y la temperatura del área se encuentra alrededor de los 40 °C.

En la zona de la tapa del horno (2), las temperaturas coinciden entre ambas imágenes. Se observa que en la zona (3), por encima de esta tapa, la temperatura superficial disminuye notablemente debido a que gran parte el aire caliente exterior que se desplaza hacia arriba por convección natural, ingresa al intercambiador de calor que calefacciona el dormitorio (rectángulo horizontal oscuro en ambas imágenes).

Para este muro se calculó la potencia irradiada empleando la ecuación (2) con la emisividad y la temperatura relevadas en cada nodo. El valor calculado de la potencia irradiada por esta superficie es 330,1 W. Como la pared frontal de la estufa tiene un ancho de 0,45 m y una altura de 1,75 m, el área de esta superficie es 0,79 m². Reemplazando estos valores en la ecuación (3), la potencia irradiada por m² por esta superficie es de 417,85 W/m².

4.3. Radiación emitida por la pared lateral derecha

Sobre esta superficie se relevaron tres tipos de materiales con emisividades diferentes, dos correspondientes a piedras con valores medidos de 0,94 y 0,95 y uno para el revestimiento cerámico que posee esta cara, con emisividad de 0,93. Como se observa en la figura 7 las temperaturas más altas fueron del orden de 98 °C y las más bajas alrededor de 30 °C. La temperatura promedio del muro fue de 54,7 °C. Si se compara esta imagen con la de la pared izquierda (figura 3), se observa que la temperatura superficial del muro derecho varía más uniformemente debido a que gran parte de su superficie está cubierta con un revestimiento cerámico, lo que conduce a una distribución más regular de la temperatura superficial.

En la comparación entre la imagen termográfica y la obtenida con Matlab, figura 6, la diferencia de temperaturas más evidente se encuentra en la zona de la puerta del quemador (1). Esto se debe a la regulación de entrada del aire para la combustión, ya que mientras más aire circula por el orificio, más fría se encuentra esta zona.

La potencia irradiada por esta pared, calculada con la ecuación 2, es igual a 364,75 W. El área de esta superficie es de 1,49 m², correspondiente a un ancho 0,85 m y una altura de 1,75 m. Reemplazando en (3) se obtiene la una potencia irradiada por m² de 244,79 W/m². Este valor es levemente inferior al de la pared izquierda.

Durante el período de medición se fue regulando el ingreso de aire a fin de mantener la combustión en régimen correcto.

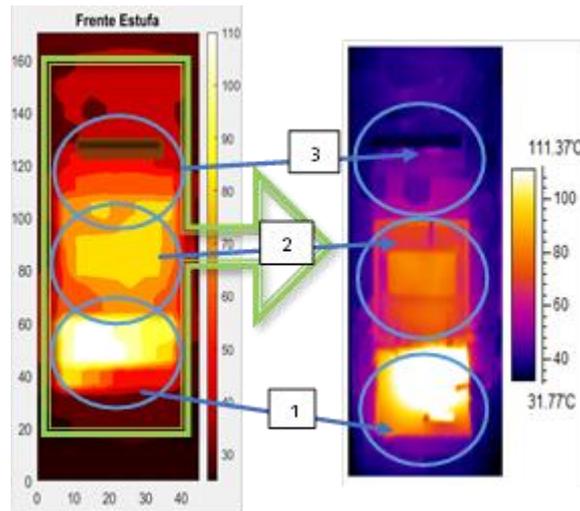


Fig. 6: Comparación de la imagen frontal termocromática con la termográfica.

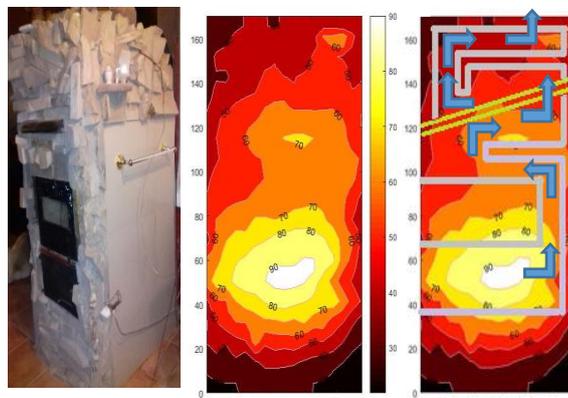


Fig. 7: Imagen termocromática de la pared lateral derecha (Matlab).

4.4. Radiación emitida por la pared posterior.

Para este muro se obtuvo un único valor de emisividad ya que está construido con ladrillo refractario. El valor de emisividad medido fue 0,93. Las temperaturas en la parte posterior de la estufa se representan gráficamente en la figura 8. Los valores mínimos medidos fueron del orden de 30 °C y los máximos registradas del orden de 95 °C. La temperatura promedio del muro fue de 51,5 °C.

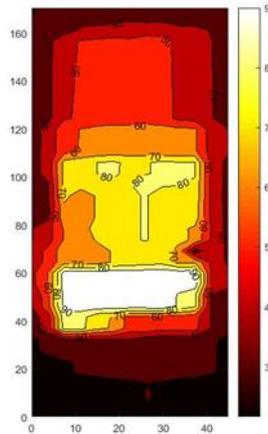


Fig. 8: Imagen termocromática de la pared posterior de la estufa (Matlab).

La potencia radiante calculada para este muro es de 242,1W mientras que por metro cuadrado es de 298,9 W/m².

4.5. Radiación emitida por la pared superior.

En la figura 9 se muestra la distribución de temperaturas en la parte superior de la estufa (techo). Se observa que el valor más alto es de 75 °C alrededor de la chimenea de salida de los gases y los más bajos del orden de 28 °C. La temperatura promedio de este muro es de 51,7 °C. La potencia irradiada alcanzó un valor de 111,18 W mientras que por metro cuadrado el valor es de 329,42W/m².

5. CÁLCULO DE LA POTENCIA TOTAL EMITIDA POR LA ESTUFA

La potencia total irradiada por la estufa se calcula como:

$$P_t = P_{pd} + P_{pi} + P_{pf} + P_{pp} + P_{ps} \quad (4)$$

donde

P_{pd} = Potencia en la pared derecha; P_{pi} = Potencia en la pared izquierda; P_{pf} = Potencia en la pared frontal; P_{pp} = Potencia en la pared posterior y P_{ps} = Potencia en la pared superior.

Reemplazando los valores correspondientes en la ecuación (4), la potencia total emitida por la estufa es de 1.433,73 W.

Por lo tanto, la potencia emitida por metro cuadrado de superficie es de 293,37 W/m².

La figura 10 es un modelo representativo del comportamiento térmico global de la estufa en tres dimensiones, confeccionado con Matlab. En ella se resumen los valores de temperatura y potencia emisiva de cada pared y se observa claramente la diferencia entre las distribuciones de temperaturas de las paredes laterales derecha e izquierda debido a sus diferentes revestimientos. La superficie que más potencia irradia es la lateral izquierda. La que más irradia en un metro cuadrado de superficie es la frontal debido a la alta conductividad térmica de sus dos puertas metálicas.

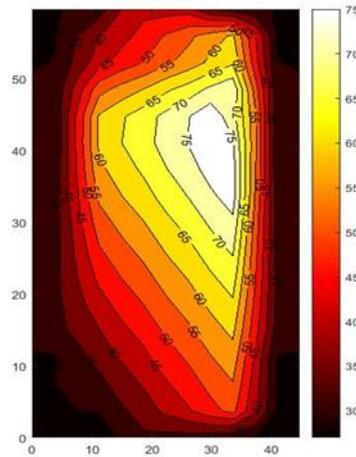


Fig. 9: Imagen termocromática de la pared superior de la estufa (Matlab).

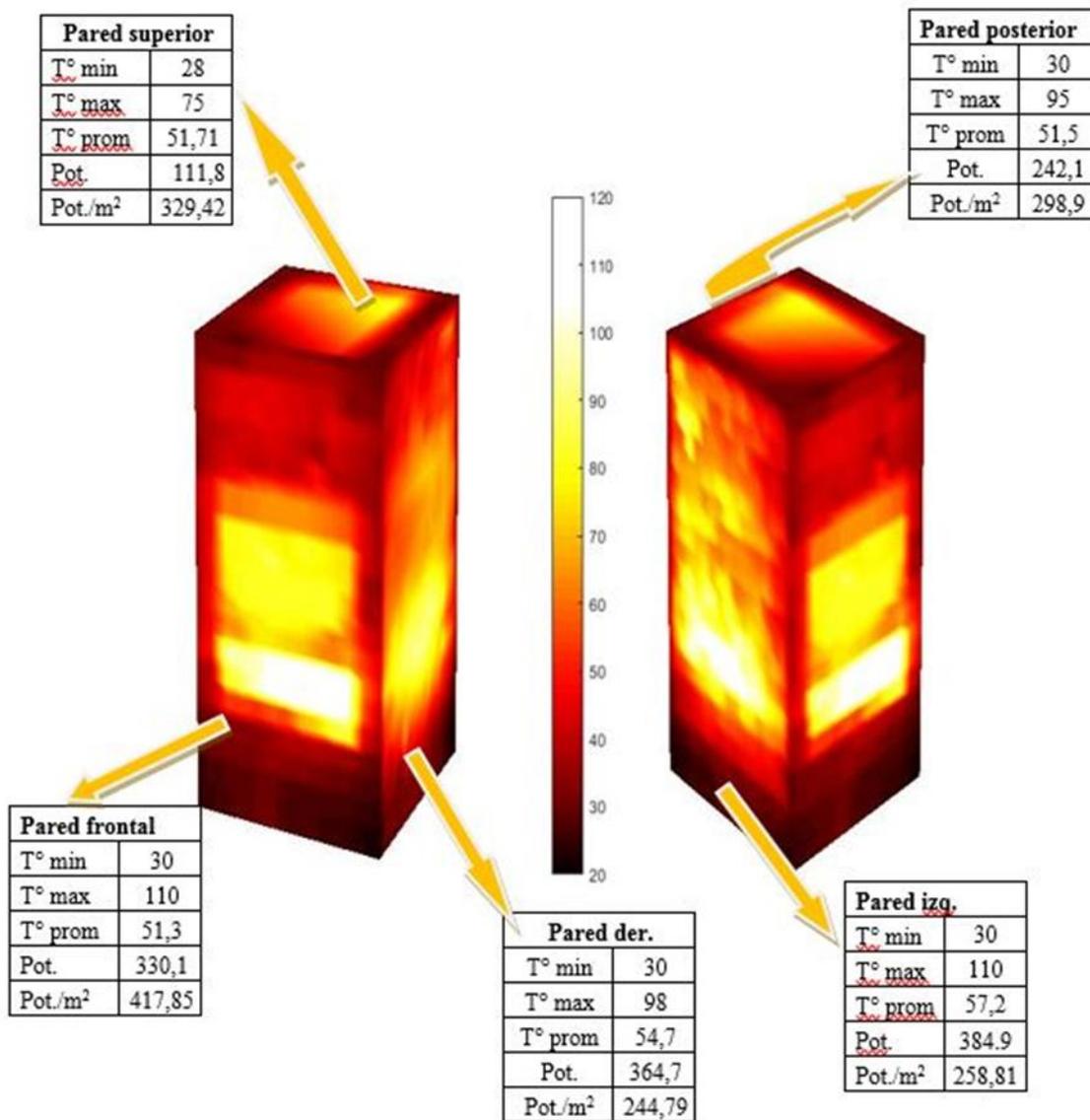


Fig. 10: Modelo 3D de la distribución de temperaturas superficiales de la estufa simulado con Matlab.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la evaluación termo-energética en estado estacionario de una estufa de alto rendimiento con horno para cocción de alimentos utilizando como combustible biomasa leñosa, instalada en una vivienda unifamiliar de la ciudad de San Rafael, Mendoza. Midiendo temperaturas y emisividades infrarrojas superficiales en nodos de 9 cm² de área c/u sobre las 5 superficies expuestas al aire interior del local se generaron imágenes termocromáticas con el software Matlab que permitieron visualizar globalmente la distribución de temperaturas sobre cada cara y calcular la potencia emisiva irradiada por cada superficie.

Comparando la imagen térmica de la pared izquierda con la de la derecha, se observa menos uniformidad de temperatura en la primera debido a la variabilidad en el espesor de las distintas piedras que revisten el material refractario de esta cara de la estufa. La mayor parte de la pared lateral derecha está revestida con cerámicos de igual espesor que difunden el calor uniformemente sobre su superficie.

Con respecto al muro posterior, es posible que su mayor temperatura se deba a que los ladrillos refractarios no están revestidos exteriormente con piedras y por lo tanto su espesor es menor.

Las imágenes termocromáticas muestran, como era de esperar, que las zonas más calientes son las que rodean al quemador, evidenciando una disminución de las temperaturas superficiales hacia las zonas más altas de la estufa. Entre las zonas más calientes se encuentran la puerta del quemador (de metal y color negro mate) y la puerta del horno (de metal y vidrio), alcanzando valores de temperatura superficial de 110 °C.

Al analizar comparativamente la potencia irradiada por cada pared, las que más disipan son las laterales (Izquierda: 385 W y Derecha: 365 W aprox.) debido a que estos muros son los que tienen mayor área superficial. Las que más potencia irradian por m² son las paredes frontal y superior con valores de 417,8 y 329,4 W/m² respectivamente. Las elevadas temperaturas de las puertas del quemador y del horno hacen que la pared frontal disipe la mayor potencia por m² de superficie de toda la estufa.

La pared superior, además de no estar revestida exteriormente, es la única en posición horizontal. La convección de los gases calientes que circulan por debajo de esta pared, aumenta considerablemente la transferencia de calor hacia el ladrillo refractario con que está construida.

En consecuencia, la distribución de temperaturas en esta superficie es más uniforme que en las restantes, resultando más caliente la región cercana a la chimenea de expulsión de los gases de combustión y presentando un alto valor de potencia irradiada por metro cuadrado. Sin embargo, al tratarse de una superficie horizontal elevada (1,75 m), su intercambio radiativo con los habitantes del edificio es nulo y, por ende, no provechoso para su sensación de confort térmico.

La potencia emisiva total de la estufa ensayada es de 1.433,73 W mientras que su valor por m² de superficie exterior es de 293,37 W/m². Estos valores permitieron alcanzar el confort térmico interior bajo las condiciones

climáticas del invierno del sur mendocino. Durante todo el período de evaluación de este prototipo la temperatura interior del local permaneció entre 20,1 y 21,5 °C, valores que se encuentran dentro del rango de confort higrotérmico humano.

Con respecto al punto caliente (A) de la figura 3, se observa que cuando los gases de combustión toman mayor contacto con la pared, aumenta la transferencia de calor desde ellos al material refractario. Esto puede aprovecharse en futuros diseños, aunque debe tenerse en cuenta que en estos estrangulamientos del flujo se puede acumular hollín, disminuyendo su sección y generando una capa aislante que dificulta la transferencia de calor desde los humos al material constructivo.

REFERENCIAS

- Aristizábal J. (2010). Improved cook stoves and fuelwood lots: an alternative of fuel self-supply for small farmers dependent of oak forests in the Colombia eastern cordillera, Colombia Forestal, ISSN 0120-0739, Scielo.
- Barnes D., Openshaw K, Smith K., y Van Der Plas R, (2004). "What Makes People Cook with Improved Biomass Stoves? A Comparative International Review of Stove Programs". *International Journal of Science and Research (IJSR)* 4(2):1028-1036
- Boccaccini L; Hernández A, (2014). Evaluación experimental del funcionamiento de una estufa rusa mejorada instalada en una vivienda unifamiliar de San Rafael, Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 18, 08.51-08.58.
- Bratro P. (2002). Estufa a Leña de Alto Rendimiento, Informe de la Estación Experimental Agropecuaria – Chubut – Centro Regional Patagonia Sur, Caimi— Chubut: edición INTA, 2006 43 P.:il. ISBN-10: 987-521-227-x Isbn-13:978-987-521-227-5.
- Bryden M.; Still D.; Scott P.; Hoffa G.; Ogle D.; Bailis R.; Goyer K.; (2006). Principios de diseño para estufas de cocción con leña. Informe técnico del Aprovecho Research Center, Shell Foundation y Partnership for Clean Indoor Air. Recuperado de: aprovecho.org/?paybox_id=140.
- Díaz R., Gabriel R., Molina O., Marcos S., (2003). La estufa PATSARI, Manual del Constructor, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiable
- CONAFOR, (2008). Estufas ahorradoras de leña, Primera edición, 2008. Editado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Zapopan, México. Recuperado de: <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Construccion-sustentable-manual-Estufa-Ahorradora-de-Lena.pdf>
- Incropera, F. P.; DeWitt, D. P., (1990). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3th Edition. John Wiley & Sons, New York.
- INTI (2008). Análisis de Estufas de Tiro Balanceado en el Programa Pruebas de Desempeño de Productos, Informe Técnico. Instituto Nacional de Tecnología Industrial Programa Pruebas de Desempeño de Productos.
- INTI y CONICET (2014), Estufa Social Argentina de Rendimiento Alto (SARA). Recuperado de: <http://www.inti.gob.ar/tecnologia/sustentables/pdf/manualEstufaSaraAutoconstructores.pdf>.
- Instituto Nacional De Ecología. México (2009). Estudio comparativo de estufas mejoradas para sustentar un programa de intervención masiva en México, Dirección General del Centro Nacional de Investigación y

- Capacitación Ambiental del Instituto Nacional de Ecología. Convenio INE/ADE- 038/2008
- Jiménez R., Soriano V., Cerutti M. (2011). Estufas a Leña, Cuaderno Temático No. 3. Ed. Cerutti. Red Mexicana De Bioenergía, A.C. Recuperado de www.rembio.org.mx
- Smith k. (2006). Health impacts of household fuelwood use in developing countries. *Unasylva* 224, Vol. 57,
- MacCarty N., Still D., Ogle D., Drouin T., (2008). Assessing Cook Stove Performance: Field and Lab Studies of Three Rocket Stoves Comparing the Open Fire and Traditional Stoves in Tamil Nadu, India on Measures of Time to Cook, Fuel Use, Total Emissions, and Indoor Air Pollution”
- Regnando M. (2004). “La Cocina y Estufa Rusa en Zonas Rurales Frías Como Factor de Protección del Aire”. Recuperado de <http://pdfcrop.in/ebook/title/Justificacion-Por-La-Contaminacion-Del-Aire.html>.
- Tissari, J.; Hytonen, K.; Sippula, O.; Jokiniemi, J. (2009) The effects of operating conditions on emissions from masonry heaters and sauna stoves. *Biomass and Bioenergy*, **33**, 513 – 520.
- Wang Z., Duanmu L., Yuan P., Liu Y. (2015). Experimental Study of Thermal Performance Comparison Based on the Traditional and Multifunctional Biomass Stoves in China, 9th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC) and the 3rd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE), *Science Direct*, **121**, 845-853.
- Westhoff B. y Germann D. (1995). “Estufas en Imágenes”, una documentación sobre las estufas mejoradas y tradicionales de Africa, Asia y América Latina. Edición Brandes & Apsel Verlag GmbH, Frankfurt am Main, Alemania. Recuperado de http://static2.wikia.nocookie.net/__cb20080509162852/solarcooking/images/4/4c/Estufas_en_imagenes.pdf
- Rehfuess, Eva & World Health Organization. (2006). Fuel for life : household energy and health. Geneva: World Health Organization. Recuperado de <http://www.who.int/iris/handle/10665/43421>.