

# DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO Y LA CARACTERIZACIÓN DE REGENERADORES TÉRMICOS TIPO HONEYCOMB

## DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR DESIGNING AND CHARACTERIZING HONEYCOMB HEAT REGENERATORS

CAROLINA SEPÚLVEDA

*Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía – Universidad de Antioquia,  
ccaso714@udea.edu.co*

ANDRÉS AMELL

*Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía – Universidad de Antioquia,  
anamell@udea.edu.co*

FRANCISCO CADAVID

*Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía – Universidad de Antioquia,  
fcadauid@udea.edu.co*

Recibido para revisar Junio 18 de 2009, aceptado Marzo 4 de 2010, versión final Abril 12 de 2010

**RESUMEN:** En este estudio, se propone una metodología para el diseño y la caracterización de regeneradores térmicos tipo honeycomb o panal de abeja, empleando el software de dinámica de fluidos computacional FLUENT, para la obtención de perfiles de temperatura, y empleando correlaciones para relacionar los resultados numéricos con indicadores de desempeño como efectividad y tasa de recuperación de calor. Adicionalmente, se determinan parámetros térmicos relevantes, como el coeficiente convectivo de transferencia de calor y el NTU mediante correlaciones empíricas. Esta metodología presenta un bajo costo computacional y permite la selección de los regeneradores a partir de geometrías comerciales disponibles.

Se aplicó la metodología a la caracterización de un regenerador con 400 celdas por pulgada cuadrada (CPSI), adscrito a un quemador auto regenerativo, y los resultados se compararon con mediciones experimentales, obteniéndose una buena aproximación.

**PALABRAS CLAVE:** Metodología de diseño, regenerador térmico cerámico, honeycomb, CFD, FLUENT, efectividad, recuperación de calor.

**ABSTRACT:** In this study, a methodology for designing and characterizing honeycomb thermal regenerators is proposed, using the Computational Fluid Dynamic CFD software FLUENT to obtain temperature profiles and correlations for relating numerical results with performance indicators such as effectiveness and heat recovery rate. Additionally, relevant thermal parameters such as convective coefficient of heat transfer and NTU are determined using empirical correlations. This methodology has a low computational cost and allows the selection of regenerators from commercially available geometries.

The methodology was applied to the characterization of a 400 cells per square inch (CPSI) regenerator embeded in a self-regenerative burner. Results were compared with experimental data and a good approximation was obtained.

**KEYWORDS:** Design methodology, ceramic thermal regenerator, honeycomb, CFD, FLUENT, effectiveness, heat recovery.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para las industrias con procesos de alta temperatura, el método más efectivo para mejorar la eficiencia de los equipos de combustión, consiste en el aprovechamiento de la energía térmica contenida en los humos producidos (calor sensible) para precalentar el aire de combustión mediante sistemas de recuperación de calor como los regeneradores térmicos, de modo que una fracción de este calor ingresa de nuevo a la cámara de combustión [1].

En los regeneradores térmicos, los gases de combustión y el aire, alternativamente fluyen a través de una cámara llena con un material cerámico, el cual es empleado como medio de almacenamiento de calor, recuperando parte del calor de los gases de combustión durante el modo regenerativo, y liberándolo al aire de combustión [2]. Investigaciones en Japón han encontrado que al usar sistemas regenerativos de recuperación de calor se obtienen ahorros de energía significativos, cercanos al 30%, reducciones en el tamaño de los equipos cercanas al 25 % y reducciones en los contaminantes emitidos cercanas al 30 % [3]. Este tipo de sistemas permiten obtener efectividades o relaciones entre la temperatura de precalentamiento del aire y temperatura de los gases de combustión, por encima del 80 % en algunos diseños [1].

El diseño óptimo de regeneradores térmicos tipo honeycomb depende de la utilización de metodologías adecuadas que evalúen las variables térmicas y fluido-dinámicas y las correlaciones entre estas. En la literatura se encuentran algunas de estas metodologías que involucran el uso de herramientas computacionales CFD. JIA, Li *et al.* [4], obtienen la distribución de temperatura longitudinal, la variación de la misma con diferentes tiempos de conmutación y el tiempo de saturación o el tiempo en el que se alcanza el estado pseudo estable, mediante simulación numérica empleando el software CFX5. En el artículo se da información sobre las principales variables consideradas para la simulación y la metodología empleada. Por otro lado, Fang *et al.* [5], desarrollaron un método semi-analítico para

el cálculo de este tipo de regeneradores, en el cual se presenta un parámetro de perturbación para la transferencia de calor en estado transitorio. Su estudio fue limitado al caso donde la matriz cerámica tiene un espesor de pared pequeño, de modo que no se consideran variaciones de temperatura perpendicular a la dirección del flujo. En el modelo, los perfiles de temperatura del regenerador son expresados como series de Taylor del coeficiente de conducción de calor. La validez del modelo semi-analítico fue comparada con resultados experimentales y con el software FLUENT empleando los perfiles de temperatura a lo largo del regenerador, obteniéndose una alta aproximación. Sin embargo, en este trabajo, no se presenta información sobre la metodología utilizada para obtener la solución numérica y no se determinan indicadores de desempeño.

En los anteriores trabajos se indaga principalmente en la solución de los perfiles de temperatura a lo largo del regenerador; sin embargo, no se profundiza en el uso de una metodología específica, ni en el uso de los resultados arrojados por las herramientas computacionales y correlaciones para caracterizar el desempeño de estos regeneradores con indicadores como efectividad, tasa de recuperación de calor y caída de presión.

Este artículo entonces, propone una metodología para diseñar y caracterizar el desempeño de regeneradores tipo honeycomb, empleando el software de CFD FLUENT y correlaciones, con un bajo costo computacional y permitiendo su selección a partir de geometrías comerciales disponibles.

## 2. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE DISEÑO

### 2.1 Ecuaciones fundamentales

El flujo y la transferencia de calor de los gases de combustión al material regenerativo y de este al aire pueden ser descritos mediante las ecuaciones de transporte implementadas en el software FLUENT, esto es, continuidad (Ecuación (1)), cantidad de movimiento

(Ecuación (2)) y energía (Ecuaciones (4) y (5)). Estas ecuaciones, para un flujo laminar, en estado transitorio y escritas en forma conservativa, son [6, 4]:

- Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

- Ecuación de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) \quad (2)$$

Donde el tensor de esfuerzos ( $\bar{\tau}$ ) está dado por la Ecuación (3):

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

- Ecuación de conservación de la energía:

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} T) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{C_p} \nabla T \right) \quad (4)$$

Para el dominio sólido solo es necesario considerar la ecuación de conservación de la energía:

$$\frac{\partial (\rho_s T_s)}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \frac{k}{C_{ps}} \nabla T_s \right) \quad (5)$$

Adicionalmente, si se asume que los gases de combustión y el aire son gases ideales, se puede utilizar la ecuación de estado de los gases ideales (Ecuación (5)) para relacionar la densidad ( $\rho$ ) con la presión de operación ( $p_{op}$ ) y la temperatura ( $T$ ), esto es:

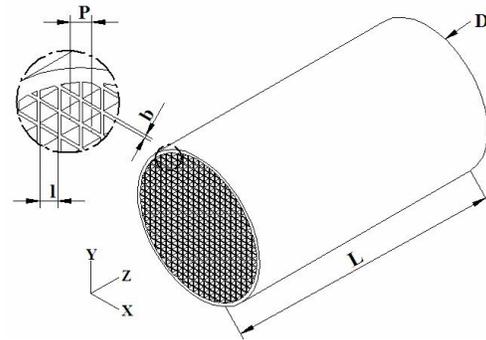
$$\rho = \frac{p_{op}}{\frac{RT}{M_w}} \quad (6)$$

Dentro de los modelos, no se consideró transferencia de calor por radiación al interior de cada celda del regenerador durante el flujo de gases calientes desde la cámara de combustión, puesto que no constituye un aporte significativo en el flujo de calor global dada la baja emisividad de los gases y los cortos tiempos de conmutación. Rafidi *et al.* reportan que para 1400 K, del calor total transferido al regenerador, la radiación tan solo representa entre un 5 y un 7% [2].

## 2.2 Parámetros característicos y condiciones óptimas de desempeño en un regenerador térmico tipo honeycomb

### 2.2.1 Parámetros geométricos

Dentro de los parámetros geométricos característicos de un regenerador tipo honeycomb se encuentran los siguientes: el número de celdas por pulgada cuadrada (CPSI), el paso ( $P$ ) o distancia entre los centros de dos celdas consecutivas, el espesor de la pared ( $b$ ), la relación paso- espesor ( $P/b$ ), la longitud total del bloque de regenerador ( $L$ ), el diámetro hidráulico de la sección de paso de la celda ( $l$ ) y la forma de las celdas (rectangulares, triangulares, hexagonales, redondas, entre otras). En la Figura 1 se muestran estos parámetros.



**Figura 1.** Esquema de un regenerador térmico tipo honeycomb con sus principales dimensiones

**Figure 1.** Honeycomb thermal regenerator sketch with its principal dimensions

### 2.2.2 Parámetros térmicos

Dentro de las variables térmicas relevantes se encuentran la temperatura de entrada de los gases de combustión provenientes de la cámara de combustión ( $T_{gi}$ ), la temperatura de salida de los gases de combustión ( $T_{go}$ ), la temperatura de entrada del aire al regenerador ( $T_{ai}$ ) y la temperatura de salida del aire de la matriz cerámica ( $T_{ao}$ ).

Para analizar la transferencia de calor al interior del regenerador, se determina el coeficiente convectivo de transferencia de calor utilizando la Ecuación (7), la cual es válida para flujo laminar y geometría de celda cuadrada. Esta correlación

se le atribuye a Hausen y es reportada por Incropera *et al.* [7]:

$$h = \left( 3.61 + \frac{0.0668(D_h / L) \text{Re Pr}}{1 + 0.04[(D_h / L) \text{Re Pr}]^{2/3}} \right) \frac{k_g}{D_h} \quad (7)$$

A partir del coeficiente convectivo es posible determinar el Número de Unidades Térmicas o NTU por sus siglas en inglés (Ver Ecuación (8)), el cual es un parámetro adimensional relacionado con el tamaño de la zona de intercambio de calor y con la calidad entre la transferencia de calor entre el gas y la matriz cerámica, que se define como [2]:

$$NTU = \frac{A}{C_{\min}} \left( \frac{h_a h_g}{h_a + h_g} \right) \quad (8)$$

Otro parámetro que influye en la transferencia de calor gas-sólido-gas es el tiempo de conmutación. En dispositivos de tipo honeycomb suelen emplearse tiempos de conmutación de 5 a 60 segundos [8].

### 2.2.3 Indicadores de desempeño

Entre los indicadores de desempeño tenemos:

- Efectividad ( $\varepsilon$ ): la efectividad compara la tasa de transferencia de calor real con el calor máximo posible (Ver Ecuación (9)) [2,7]:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (9)$$

Si el flujo másico de gases de combustión empleado en el análisis difiere del flujo másico de aire, existirá efectividad del lado frío o del aire,  $\varepsilon_a$  (Ver Ecuación (10)) y efectividad del lado caliente o del lado de los gases de combustión,  $\varepsilon_g$  (Ver Ecuación (11)). Tenemos entonces:

$$\varepsilon_a = \frac{C_a(T_{ao} - T_{ai})}{C_{\min}(T_{gi} - T_{ai})} \quad (10)$$

$$\varepsilon_g = \frac{C_g(T_{gi} - T_{go})}{C_{\min}(T_{gi} - T_{ai})} \quad (11)$$

- Tasa de recuperación de energía (TRE): la TRE está dada por la Ecuación (12) y compara la energía absorbida por la corriente de aire con la energía disponible aportada por los gases calientes [2]:

$$TRE(\%) = \frac{E_{ao} - E_{ai}}{E_{gi}} \times 100 \quad (12)$$

Donde  $E$  corresponde a la energía, y los subíndices  $a$  al aire,  $g$  a los gases de combustión,  $i$  a las condiciones de entrada, y  $o$  a las de salida, respectivamente. La energía está definida por la Ecuación (13):

$$E = \dot{m} \int_{T_R} C_p dT \quad (13)$$

Con  $T$  temperatura,  $T_R$  temperatura de referencia base para el cálculo correspondiente a 298 K,  $\dot{m}$  flujo másico y  $C_p$  calor específico.

La TRE es un indicador que cobra gran importancia, considerando que en los procesos térmicos actuales se enfatiza sobremanera en el uso racional de la energía.

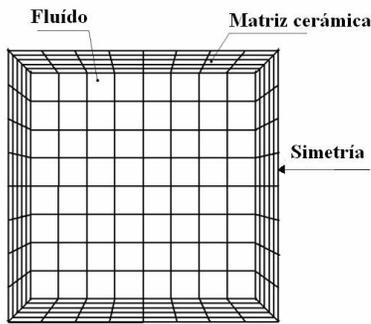
### 2.2.4 Metodología propuesta

Para la caracterización de regeneradores tipo honeycomb y el diseño de sistemas auto regenerativos de calor con este tipo de recuperadores, se propone el siguiente procedimiento metodológico:

1. Especificar las condiciones de operación del regenerador, esto es, el flujo másico de gases de combustión y aire que ingresan en cada ciclo con sus respectivas temperaturas. Así mismo se debe seleccionar el tiempo de conmutación del sistema.
2. Seleccionar una de las geometrías comerciales disponibles para el regenerador y determinar el número total de celdas del mismo, y de esta forma, el flujo de gases y de aire por cada celda. Se debe tener en cuenta que el material cerámico del regenerador seleccionado resista la temperatura de entrada de los gases de combustión.

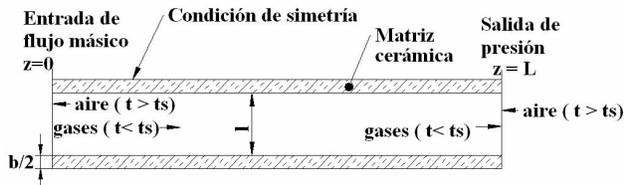
3. Realizar el mallado de una sola celda del regenerador, utilizando toda el área de paso del fluido y solo la mitad del espesor de la pared de la celda para que las condiciones de operación en cada una sean simétricas (Figura 2-a). En esta etapa también se deben definir los dos medios continuos, esto es, el sólido (matriz cerámica) y fluido (aire o productos de combustión).

4. Definir las condiciones de fronteras geométricas, correspondientes a una entrada de flujo o *mass flow inlet*, una salida de flujo o *pressure outlet* y una condición de simetría para las paredes externas del sólido (Figura 2-b).



**Figura 2.a.** Mallado de la geometría en el software GAMBIT

**Figure 2.a.** Meshing of the geometry in GAMBIT software



**Figura 2.b.** Condiciones de frontera aplicadas a una celda del regenerador honeycomb

**Figure 2.b.** Boundary conditions applied to a cell of the honeycomb regenerator

5. Chequear la independencía de la solución con respecto a la discretización del dominio computacional para definir el número óptimo de mallas, a partir del cual no se presentan variaciones significativas en los resultados. Para esto, deben realizarse simulaciones preliminares siguiendo los pasos descritos a continuación.

6. Realizar la simulación numérica en el software FLUENT 6.2, empleando un solucionador segregado, es decir, resolviendo las ecuaciones de transporte como una secuencia, esto es, primero continuidad, luego momentum y finalmente energía. Se considera flujo transitorio laminar y se divide el dominio temporal en pasos fijos (sin variación con respecto al tiempo) con un tamaño definido según el tiempo de conmutación. Para la discretización de las componentes temporales de las ecuaciones de transporte, se emplea un esquema implícito de segundo orden. Se utiliza un esquema implícito por ser incondicionalmente estable. Sin embargo, como las ecuaciones a resolver son no lineales, el sistema de ecuaciones que resulta en cada paso temporal se debe resolver de forma iterativa antes de avanzar al siguiente paso temporal.

La simulación se realiza de tal forma que durante el primer ciclo los gases de combustión calientan la matriz cerámica. Una vez cumplido el tiempo de conmutación especificado, las condiciones de frontera se cambian para el funcionamiento con aire, conservando los resultados de la simulación precedente, completando de esta forma, un ciclo de conmutación. En el caso del aire, la frontera de entrada se convierte en salida de presión y la salida en entrada de flujo másico. En cada caso se especifican las temperaturas y presiones de operación y se repite el procedimiento hasta completar la totalidad de ciclos de conmutación necesarios para alcanzar el estado seudo estable. El número de ciclos realizados se elige con base a la respuesta del sistema, pues en este punto, la temperatura de salida del aire debe mostrar un comportamiento asintótico.

7. Obtener la evolución de la temperatura de salida de gases de combustión y aire, perfiles de temperatura a lo largo del regenerador y todos los reportes de calor que entran o salen con el flujo cuando se alcance el estado seudo estable, a partir de la simulación numérica.

8. A partir de correlaciones, determinar el coeficiente convectivo de transferencia de calor, el NTU, las efectividades del lado frío y caliente y la tasa de recuperación de calor.

9. Escoger la geometría más óptima, de acuerdo con los parámetros mencionados anteriormente.

### 3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA

#### 3.1 Descripción de los regeneradores considerados

Durante el diseño de un quemador auto regenerativo para trabajo continuo, se empleó la metodología propuesta, para caracterizar el desempeño de diferentes geometrías de regeneradores térmicos tipo honeycomb disponibles en el mercado, y de esta forma seleccionar la más óptima. En este caso, los mejores resultados se obtuvieron para una geometría con 400 CPSI, fabricada en cordierita, la cual fue instalada en el equipo de combustión. Con el fin de validar la metodología de diseño propuesta, se compararon los datos de desempeño obtenidos mediante su aplicación, con datos experimentales obtenidos en el quemador autoregenerativo.

Las características generales del regenerador estudiado así como sus propiedades térmicas se presentan en la Tabla 1. A partir del número de celdas por pulgada cuadrada y de la geometría del bloque regenerador, se determinó el número total de celdas y el flujo de aire y de gases por cada una (Ver Tabla 2).

**Tabla 1.** Características generales y propiedades térmicas de los regeneradores empleados

**Table 1.** General characteristics and thermal properties of the employed regenerators

Característica/propiedad	Un.	Valor
Número de celdas por pulgada cuadrada	CPSI	400
Diámetro hidráulico de la sección de paso de flujo, $l$	mm x mm	1 x 1
Paso, $P$ (distancia entre los centros de 2 celdas consecutivas)	mm	1,2
Espesor, $b$	mm	0,2
Relación $P/b$	-	6
Diámetro exterior, $D$	mm	80
Longitud total, $L$	mm	150
Número total de celdas estimadas	-	3.491
Área específica de transferencia de calor	$m^2/m^3$	9.091
Área total de transferencia de calor	$m^2$	2,1
Densidad	$kg/m^3$	2000
Conductividad	$W/mK$	1,4
Capacidad calórica	$J/kgK$	850

En la Tabla 2 se muestran las condiciones de operación empleadas durante la simulación numérica. Por las características del equipo de combustión en el que se instalaron los regeneradores, solamente pasan a través de estos el 80 % del total de gases generados durante la combustión. Esto explica porque en la Tabla 2, el flujo total de gases de combustión es menor que el flujo total de aire.

**Tabla 2.** Condiciones de operación empleadas en el modelo numérico

**Table 2.** Operating conditions employed in the numerical model

Condición	Un.	Valor
Flujo másico total de gases de combustión	kg/s	0,00335
Flujo másico de gases de combustión por cada celda	kg/s	9,591 e-07
Temperatura de entrada de los gases de combustión	K	898
Flujo másico total de aire	kg/s	0,00377
Flujo másico de aire en cada celda	kg/s	1,079 e-06
Temperatura de entrada del aire	K	359
Presión en la atmósfera de descarga	Pa	0
Tiempo de conmutación	s	30

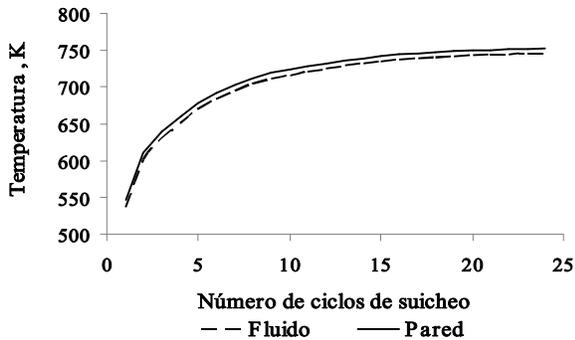
Con el fin de verificar la independencia de los resultados con respecto a la discretización del dominio computacional, se realizaron simulaciones preliminares empleando 112.000 y 750.000 celdas, respectivamente. Se evaluaron los perfiles de velocidad obtenidos en el estado pseudo estable y la diferencia entre éstos no fue significativa, de modo que se seleccionó la configuración con 750.000 celdas para los análisis definitivos.

### 3.2 Resultados

#### 3.2.1 Evolución temporal de la temperatura del aire, de los gases de combustión y de la matriz cerámica vía simulación numérica

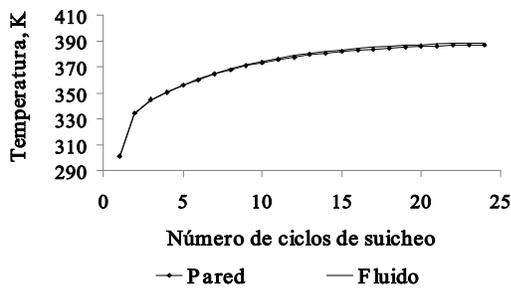
Para el flujo de aire y de gases de combustión, se registraron en cada ciclo de conmutación las temperaturas en los planos de entrada y salida del regenerador ( $z=75$  y  $z=-75$  mm) para una línea situada sobre el eje  $x$  ( $y=0$ ). Se obtuvieron los promedios de las temperaturas correspondientes al fluido y a la pared para cada configuración estudiada.

En la Figura 3 se muestran las temperaturas promedio a la salida del regenerador para el paso de aire y en la Figura 4 para el paso de gases de combustión.



**Figura 3.** Temperaturas de salida del aire en cada ciclo

**Figure 3.** Air outlet temperatures in each cycle



**Figura 4.** Temperaturas de salida de los gases de combustión en cada ciclo

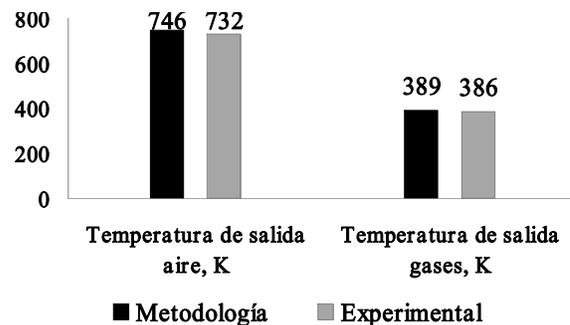
**Figure 4.** Flue gases outlet temperatures in each cycle

Las temperaturas de fluido y pared, tienden a traslaparse, sobre todo para el paso de gases de combustión, lo que muestra la tendencia de la matriz a conservar la temperatura del fluido en el ciclo inmediatamente anterior, debido al bajo espesor de la pared y al tiempo de conmutación. Se observa que hacia el ciclo 20, la temperatura del aire comienza a ser asintótica, alcanzándose el estado pseudo estable de este parámetro hacia los 20 minutos de operación.

Para el paso del aire, la temperatura del fluido a la salida del regenerador fue de 746 K y para la matriz cerámica de 753 K. En este caso, la temperatura de pared es mayor, dado que en el ciclo inmediatamente anterior fue calentada por el paso de gases de combustión.

Por otro lado, para el paso de gases de combustión, la temperatura promedio de salida del regenerador para el fluido fue de 389 K y para el material cerámico 387 K, y en este caso, la temperatura de pared es menor a la de los gases, puesto que en el ciclo inmediatamente anterior el flujo de aire enfrió la matriz cerámica, por lo cual los gases de combustión ceden su calor a las paredes.

En la Figura 5 se comparan las temperaturas promedio de salida para los flujos de aire y gases del regenerador, predichas por la simulación numérica y medidas durante la experimentación. La desviación de las predicciones numéricas con respecto a los datos medidos fue de 1.9 % para la temperatura promedio de salida del aire y de 0.8 % para la temperatura de salida de los gases de combustión. Esto muestra, que en el caso analizado se logran buenas predicciones de las características del regenerador a partir de la aplicación de la metodología desarrollada y que ésta puede ser aplicada a otros arreglos geométricos de regeneradores tipo honeycomb.



**Figura 5.** Comparación entre las temperaturas de salida de los flujos de aire y gases determinadas numéricamente y experimentalmente

**Figure 5.** Air and flue gases flow temperatures comparison, each determined numerically and experimentally

### 3.2.2 Desempeño térmico de los regeneradores vía correlaciones

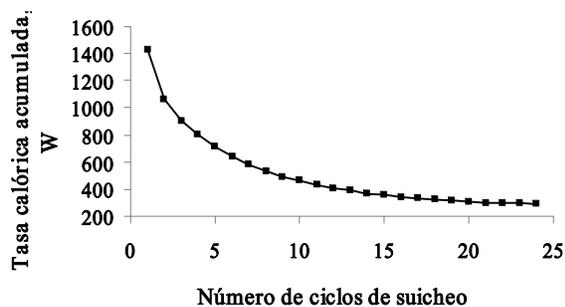
A partir de la simulación se obtienen valores muy cercanos a los experimentales, lo cual hace que los parámetros térmicos e indicadores de desempeño calculados, que se muestran en la Tabla 3, también lo sean.

**Tabla 3.** Indicadores de desempeño y parámetros térmicos del regenerador térmico caracterizado  
**Table 3.** Performance indicators and thermal parameters of characterized thermal regenerator

	$\varepsilon_a$	$\varepsilon_g$	TRE	$h_a$	$h_g$	NTU
Metodología	71.9	96.7	74.3	160	179	44.1
Experimental	69.2	97.3	71.1	158	178	43.7

En el estado seudo estable, no todo el calor que ingresa con los gases de combustión es absorbido por el aire, parte se acumula en la masa cerámica del regenerador como un calor parasito que se pierde al apagar el equipo, es por esto que la efectividad del lado caliente, es mayor que la efectividad del lado frío. De no ser así, los sistemas regenerativos tendrían una tasa de recuperación de energía del 100% lo cual no es posible termodinámicamente. Lo anterior se verifica con el mayor coeficiente convectivo hallado para los gases de combustión, con relación al flujo de aire.

En la Figura 6 se muestra la tasa calórica acumulada en la matriz cerámica durante los ciclos de conmutación, y calculada mediante la simulación numérica. Se observa que al aumentar el tiempo de conmutación, la tasa calórica acumulada tiende a un valor constante igual a 291 W. Este valor corresponde a la diferencia entre la tasa calórica cedida por los gases y la que gana el aire cuando se alcanza el estado seudo estable, esto es, a partir del ciclo 20.



**Figura 6.** Tasa calórica acumulada en la matriz cerámica durante los ciclos de operación

**Figure 6.** Accumulated heat rate in the ceramic bed during operation cycles

El NTU se calcula a partir de los coeficientes convectivos de transferencia de calor y entre

mayor sea su valor, mayor será el calor transferido. En caso de comparar dos geometrías de regeneradores tipo honeycomb, es importante establecer las premisas de diseño, de acuerdo al tipo de equipo en que serán instalados los regeneradores, se debe aplicar la metodología para caracterizar las geometrías de la manera descrita, encontrando los principales parámetros e indicadores de desempeño, a fin de seleccionar la geometría más óptima, ya sea que ésta se encuentre disponible comercialmente o que a partir de la comparación de resultados, se especifique una nueva.

#### 4. CONCLUSIONES

- Se propuso una metodología para el diseño y la caracterización de regeneradores térmicos tipo honeycomb mediante simulación numérica transitoria con el software CFD FLUENT 6.2, encontrando perfiles de temperatura al interior de cada celda; y mediante correlaciones para el cálculo de parámetros de desempeño como efectividad, y tasa de recuperación de calor, y parámetros térmicos como los coeficiente convectivos de transferencia de calor de los flujos y el NTU; con bajo costo computacional, que permite la selección de los mismos a partir de opciones comerciales existentes. Para el análisis numérico se empleó una sola celda del regenerador la cual fue mallada con el software GAMBIT 3D y se consideraron condiciones de flujo laminar, despreciando efectos de radiación de los gases hacia la matriz cerámica.

- Mediante la simulación numérica, se determinó que hacia el ciclo 20, el regenerador alcanza el estado seudo estable, lo cual corresponde a 20 minutos de operación continua del equipo de combustión.

- Se compararon las temperaturas de salida de los flujos de aire y gases de combustión, y los indicadores de desempeño del regenerador, mediante la simulación numérica y datos experimentales, obteniéndose alta aproximación, con lo cual se demuestran las bondades predictivas y el bajo costo computacional del modelo empleado.

## 5. LISTADO DE SÍMBOLOS

$\rho$  Densidad (kg/m<sup>3</sup>)  
 $t$  Tiempo (s)  
 $v$  Velocidad (m/s)  
 $p$  Presión (Pa)  
 $\bar{\tau}$  Tensor de esfuerzos (Pa)  
 $\mu$  Viscosidad molecular (kg/ms)  
 $I$  Tensor unitario  
 $\nabla \bar{v}^T$  Transpuesta del tensor gradiente de velocidad (m/s)  
 $T$  Temperatura (K)  
 $k$  Conductividad (W/mK)  
 $C_p$  Calor específico (kJ/kgK)  
 $R$  Constante universal de los gases (kJ/kmolK)  
 $M_w$  Peso molecular del gas (kg/kmol)  
 $\dot{m}$  Flujo másico (kg/s)  
 $Q$  Calor (W)  
 $\varepsilon$  Efectividad (%)  
 $C$  Capacidad térmica (W/K)  
 $h$  Coeficiente convectivo (W/m<sup>2</sup>K)  
 $D_h$  Diámetro hidráulico (m)  
 $A$  área (m<sup>2</sup>)  
 $TRE$  Tasa de recuperación de calor (%)  
 $\Delta P$  Caída de presión (Pa)  
 $L$  longitud (m)  
*Subíndices:*  
 a Aire  
 g Gases  
 s Sólido  
 op Operación  
*Grupos adimensionales:*  
 $Re$  Número de Reynolds  
 $Pr$  Número de Prandtl  
 $Nu$  Número de Nusselt  
 $NTU$  Número de Unidades Térmicas  
 i Entrada  
 o Salida  
 min. Mínimo  
 máx. Máximo

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a Colciencias por la financiación y apoyo en la ejecución del proyecto “Desarrollo y evaluación de un horno de combustión sin llama de alta eficiencia térmica”, No contrato 184-2006, a partir del cual se desarrolló este artículo.

## REFERENCIAS

- [1] MILANI, A., WÜNNING, J. What is the effect of air preheat on process efficiency?, IFRF Online Combustion Handbook, 1-6, 2002.
- [2] RAFIDI, N., BLASIAK, W. Thermal performance analysis on a two composite material honeycomb heat regenerators used for HITAC Burners, Applied Thermal Engineering, 25, 2966-2982, 2005.
- [3] GUPTA, A. K. Flame characteristics and challenges with high temperature air combustion. Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference. Miami Beach, 1-8, 2000.
- [4] JIA, L., MAO, Y., YANG, L. Temperature distribution and heat saturating time of regenerative heat transfer, Journal of Thermal Science, 15, 175-180, 2006.
- [5] YUAN FANG, A., CHI, M., GUO-DONG, H., SHAO-JIAN, J. Perturbation solutions for thermal process of honeycomb regenerator, Journal of Iron and Steel Research International, 14, 6-10, 2007.
- [6] FLUENT 6.2. Documentation, 2008.
- [7] INCROPERA, P. F., DEWITT, P. D. Fundamentos de Transferencia de Calor, Prentice Hall, México, 1999
- [8] TANAKA, R., MAMURO, M. High Cycle Regenerative Heat Exchanger. U.S. Patent No 5,695,002, 1-22, 1997.