

# Incineración de residuos sólidos municipales en hornos ladrilleros tipo Hoffman: simulación y análisis del flujo de gases

## *Municipal solid wastes incineration in kilns brick Hoffman: simulation and gas flow analysis*

### **CÉSAR AUGUSTO GARCÍA UBAQUE**

Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería. Docente Asistente de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Contacto: [cagarciau@udistrital.edu.co](mailto:cagarciau@udistrital.edu.co).

### **JUAN CARLOS MORENO PIRAJÁN**

Químico, Doctor en Ciencias. Docente Titular del Departamento de Química de la Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. Contacto: [jumoreno@uniandes.edu.co](mailto:jumoreno@uniandes.edu.co).

### **MARTHA LUCÍA VACA BOHÓRQUEZ**

Psicóloga, Magister en Administración y Negocios. Consultora e Investigadora de la Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. Contacto: [ml.vaca68@uniandes.edu.co](mailto:ml.vaca68@uniandes.edu.co).

Fecha de recepción: 11 de Julio de 2012

Clasificación del artículo: Investigación

Fecha de aceptación: 1 de Octubre de 2012

Grupo de Investigación: GIIICUD

**Palabras clave:** *CFD, combustión, horno, ladrillos, residuos.*

**Key words:** *CFD, combustion, kiln, bricks, solid wastes.*

## **RESUMEN**

Esta investigación hizo parte del proyecto de adaptación de hornos ladrilleros de tipo continuo para co-incinerar residuos domésticos, financiado por COLCIENCIAS. Su objetivo fue encontrar líneas de corriente y puntos de mayor vorticidad de los gases, con el fin de determinar las mejores zonas dentro de las cámaras, para llevar a cabo la destrucción térmica de los residuos. Para realizar la simulación, se utilizó como modelo un horno ladrillero tipo Hoffman, ubicado en el municipio de Tabio, Cundinamarca (Colombia, S.A.). Tanto las dimensiones del horno, como los arreglos de apilamiento de los ladrillos fueron homologados para servir de datos de entrada. En este modelo se consideraron flujos altos de temperatura y números de Rey-

nolds. Se realizaron simulaciones progresivas en dos programas computacionales: ANSYS y Fluent. Se inició modelando el flujo a través de un solo ladrillo, luego el de una columna hasta llegar a modelar el flujo de un arreglo trasversal de ladrillos, para posteriormente extender la solución a una cámara completa. Los resultados arrojaron una serie de condiciones y ubicaciones en las cuales el flujo generado en el proceso de combustión optimizará los tiempos de residencia de los gases dentro de la cámara como la turbulencia en sectores definidos.

## **ABSTRACT**

This research was part of a project to adapt continuous type brick kilns to incinerate domestic solid

wastes, founded by COLCIENCIAS. The authors looked for flow lines and points of greatest vorticity to determine the best areas in kilns chambers to carry out thermal destruction of wastes. To make the simulation model a brick kiln located in Tabio, Cundinamarca (Colombia, S.A.) was used. The dimensions of the furnace and the stacking arrangement of the bricks were approved to serve as input data. In this model were considerate high values of

temperature flows and Reynolds numbers. Researchers made progressive simulations with ANSYS and Fluent software. Simulation started with a single brick, then with a column, up to model a stack; and with this data a whole chamber could be simulated. Results showed conditions and locations where current flow optimize resident times and turbulence that improve combustion process and thermal destruction of wastes.

\* \* \*

## 1. INTRODUCCIÓN

El tratamiento y disposición de basuras es uno de los principales problemas ambientales en la actualidad, debido al aumento exponencial tanto en las cantidades generadas como en la complejidad de los materiales desechados que superan la capacidad de sumidero de los vertederos disponibles. Dentro de las diferentes alternativas utilizadas para su tratamiento y disposición, como: reciclaje, reutilización, relleno sanitario, etc., se presenta la incineración. Esta opción que tiene una enorme ventaja al disminuir de manera significativa el volumen de los residuos procesados, pero conlleva, problemas inherentes como la generación de compuestos indeseables a la atmósfera durante la combustión y las cenizas residuales altamente peligrosas que deben ser dispuestas de manera adecuada.

Esta investigación se enfocó principalmente en el proceso específico de co-incineración de residuos municipales en hornos de cocción de ladrillo tipo Hoffman y modeló los flujos de gases durante la combustión, para definir la ubicación ideal de los residuos dentro de las cámaras del horno, de manera que tanto las temperaturas alcanzadas, como los tiempos de residencia y las turbulencias generadas, impidan la formación de compuestos indeseables. Específicamente, se buscó analizar el flujo de aire dentro de la cámara de cocción y secado de ladrillos, además de entender el efecto de la ubicación de los ladrillos sobre este flujo, el efecto que tendría la presencia adicional de lotes de basura y por último, encontrar los puntos de mayor vorticidad

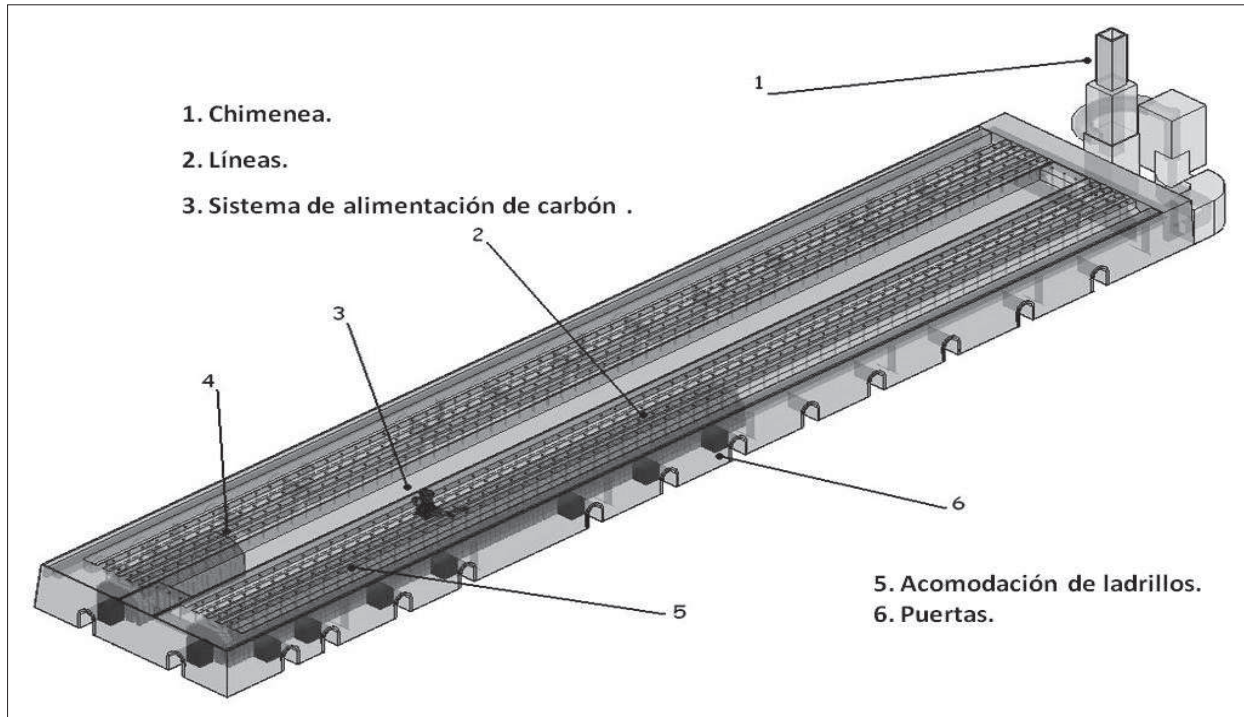
en el flujo de aire, que garanticen un mayor tiempo de residencia de los gases de combustión. Al lograr mantener mayores temperaturas por periodos determinados de tiempo es posible evitar la liberación de sustancias tóxicas a la atmósfera durante el proceso de co-incineración. Con base en los resultados obtenidos se definió la ubicación ideal de lotes de basura que permita su completa incineración sin la generación de compuestos tóxicos asociados [1].

## 2. METODOLOGÍA

Para llegar a entender el flujo de aire a través de un sistema complejo como lo es la acomodación de ladrillos dentro de una cámara de cocción en el horno, el proceso de simulación se dividió en varias etapas, de la siguiente manera:

- Simulación del flujo a través de un solo ladrillo.
- Simulación del flujo a través de una columna de ladrillos.
- Simulación del flujo a través de una cámara.
- Simulación del flujo a través de una serie de columnas.

Aunque la cocción de ladrillos es un proceso transiente, las primeras simulaciones se trabajaron en estado estable tomando en cuenta que el periodo total de duración es largo y se mantienen las condiciones del flujo durante un tiempo considerable,



**Figura 1.** Esquema del horno utilizado para la modelación.  
Fuente: Elaboración propia.

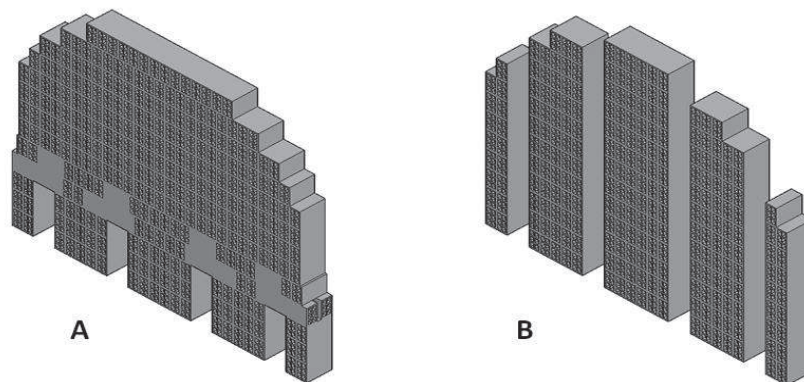
asimilándose a los resultados encontrados en un horno de cama viajera [2].

De manera simultánea a estas simulaciones se realizaron mediciones directas de perfil de temperatura en el horno que se compararon con los resultados de las simulaciones realizadas.

En la figura 1 se puede apreciar la estructura general del horno utilizado como modelo. Presenta dos

hileras de cámaras de combustión, lo que permite operarlo de manera continua, llenando y desocupando cámaras de manera rotativa. El sistema de alimentación de combustible se va desplazando desde el techo por las diferentes cámaras en la dirección que muestran las flechas. El combustible que utiliza es carbón pulverizado.

En la tabla 1 se presentan los datos utilizados para la modelación de la geometría de los ladrillos.



**Figura 2.** Patrones de apilamiento de ladrillos en la cámara.  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 1.** Datos para la modelación geométrica de los ladrillos.

| Dimensiones | Ladrillo | Huecos |
|-------------|----------|--------|
| Alto (m)    | 0,2      | 0,047  |
| Ancho (m)   | 0,12     | 0,04   |
| Largo (m)   | 0,3      | 0,3    |
| Alto/Ancho  | 0,6      |        |

Dentro del horno los ladrillos son apilados en torres separadas unas de otras a una distancia de 30 cm y se utilizan los siguientes patrones de apilamiento, llamados *endagues*. Se coloca una hilera tipo A seguida por dos hileras tipo B y de nuevo una tipo A (ver figura 2). De esta manera la configuración de una cámara sigue un patrón A-B-B-A. Por medio de un ventilador industrial se mantiene una velocidad constante en toda la cámara de 0,25 m/s y los gases del proceso son extraídos y liberados a la atmósfera por la chimenea. La cámara tiene una geometría correspondiente a un arco de 3,7 metros de diámetro, con una base de 1,5 m para un total de 5 m de alto..

Para esta simulación se utilizaron los Modelos ANSYS [3] y Fluent V6.1.22 [4], específicamente los módulos de turbulencia y energía. La primera parte de los análisis fueron modelados con ANSYS.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Simulación de Flujo a Través de un ladrillo.

Debido a la gran cantidad de elementos generada por una geometría de este tipo, se consideró inicialmente la posibilidad de reemplazar los agujeros de los ladrillos fabricados en este horno por uno solo que mantuviera constantes las condiciones del flujo, sin alterar el resultado de la simulación en las áreas donde se podría ubicar la basura. Sin embargo, no resultó una opción viable, debido a que la presencia de estos agujeros era un elemento de-

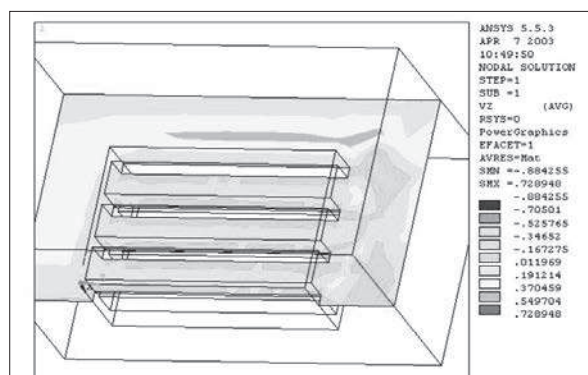
cisivo en la definición del contorno del flujo. Estos modelos cuentan con la posibilidad de definir cerca de 1 millón de elementos y ya que las áreas entre los ladrillos requieren elementos de dimensiones reducidas, se decidió elaborar una malla tetraédrica.

Las condiciones generales para esta simulación asumen una velocidad en todas las paredes de 0, una velocidad de entrada de 0,25 m/s y una caída de presión a la salida que el programa calcula con base en la información anterior (ver figura 3). Este modelo incluye también ecuaciones de energía y condiciones de flujo turbulento. Se trabajó con el siguiente modelo de turbulencia ( $\kappa$ - $\epsilon$ ) y con las constantes que se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2.** Constantes utilizadas en modelo de turbulencia.

| Constante                      | Valor |
|--------------------------------|-------|
| Cmu                            | 0,09  |
| C1-e                           | 1,44  |
| C2-e                           | 1,92  |
| Numero Schmidt para E cinética | 1     |
| Numero Schmidt para E disipada | 1,3   |

En la primera simulación, se observó la presencia de velocidades negativas en la parte posterior del ladrillo.



**Figura 3.** Contornos de velocidad para un ladrillo ( $V_{in} = 0,25$  m/s).

Fuente: Elaboración propia.



### 3.2 Simulación de Flujo a través de una columna

Para esta simulación se asumieron las mismas del proceso de combustión de la simulación anterior para encontrar condiciones de borde con respecto a la temperatura. De esta manera se simplificó el comportamiento de la generación de calor dada por la combustión del carbón. De manera adicional, durante el diseño se incluyó un modelo más sencillo en el cual se genera una cantidad de calor  $q$  para observar el flujo de calor a lo largo de toda la cámara con menor detalle a nivel de cada ladrillo.

Los resultados de esta simulación muestran que en la parte posterior de la columna se forman zonas en las cuales el flujo de aire rota y se estanca aumentando su tiempo de residencia dentro de la cámara (ver figura 4), evitando así la formación de compuestos altamente tóxicos como dioxinas y furanos (PCDD/PCDF) [5]. Adicionalmente se evidenció, que las velocidades del flujo aumentan de manera considerable (hasta en un 20%) en las áreas libres entre las torres de ladrillos y las paredes de la cámara (ver figura 5). Este mismo efecto se presentó en las áreas en la que la velocidad del flujo se volvía negativa, reportando zonas de recirculación propicias para ubicar pilas de residuos municipales a incinerar (más adelante se mostrará este comportamiento en un campo vectorial).

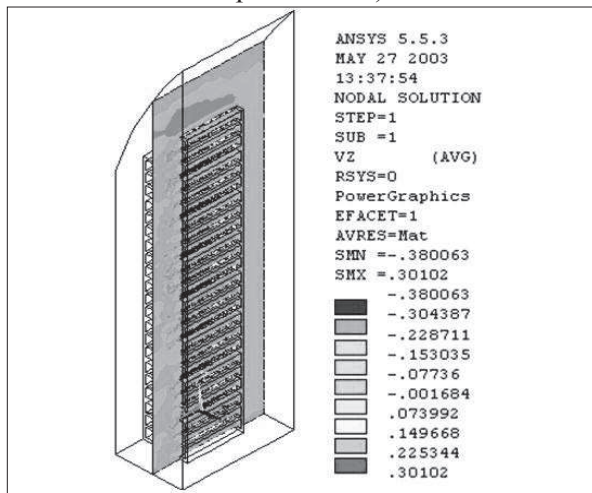


Figura 4. Contornos de velocidad corte vertical.  
Fuente: Elaboración propia..

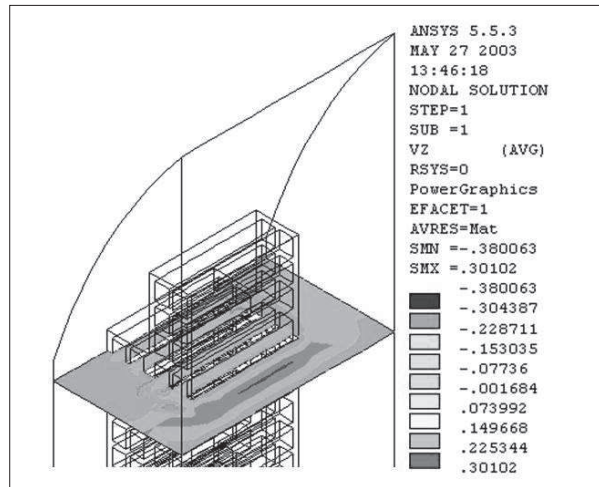


Figura 5. Contornos de velocidad corte XY.  
Fuente: Elaboración propia..

Adicionalmente, se incluyó en los cálculos, la energía turbulenta ideal requerida para el proceso de combustión [6]. Las áreas con las mejores condiciones para la ubicación de residuos fueron las intersecciones entre zonas de alta velocidad y la salida de los puntos de recirculación al final de los agujeros de los ladrillos, como se ve en la Figura 6.

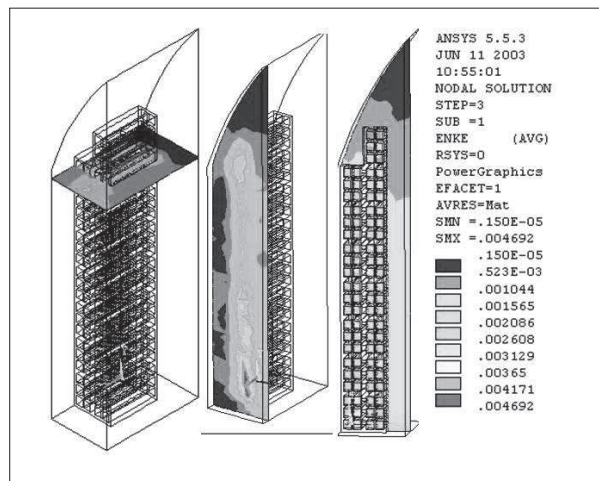


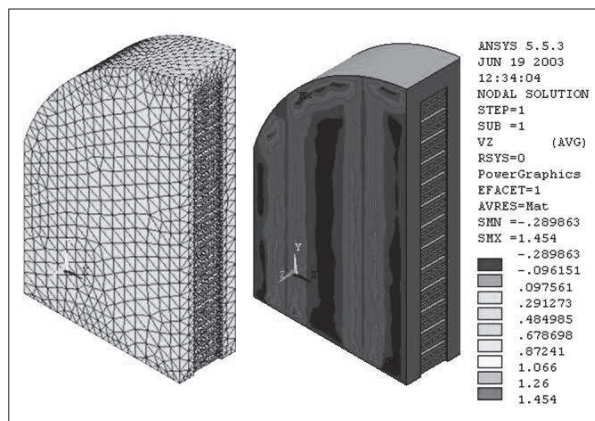
Figura 6. Contornos de energía turbulenta.  
Fuente: Elaboración propia.

Las figuras anteriores confirman que la zona posterior de las columnas de ladrillos en la intersección del área libre y los ladrillos y de manera más pronunciada en cercanías al suelo, se producen las

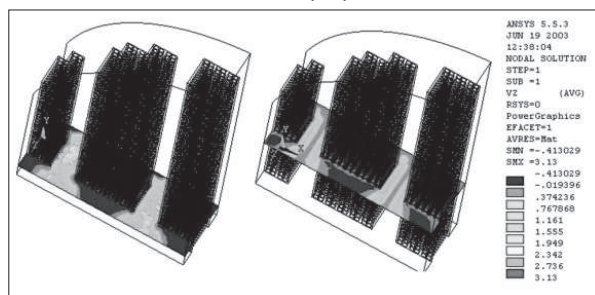
condiciones más favorables de temperatura y turbulencia para la incineración de residuos [7].

### 3.3 Simulación de Flujo a Través de una Cámara.

Una vez conocido el comportamiento del flujo a través de este segmento se procedió a simular una columna de ladrillos completa con condiciones de simetría en la mitad. Esto con el propósito de confirmar los comportamientos reportados inicialmente a lo largo de toda la cámara. A continuación (figuras 7 y 8), se presenta la malla y los contornos de velocidad y energía turbulenta para esta condición [8].



**Figura 7.** Mallado y contornos de velocidad m/s  
Fuente: Elaboración propia

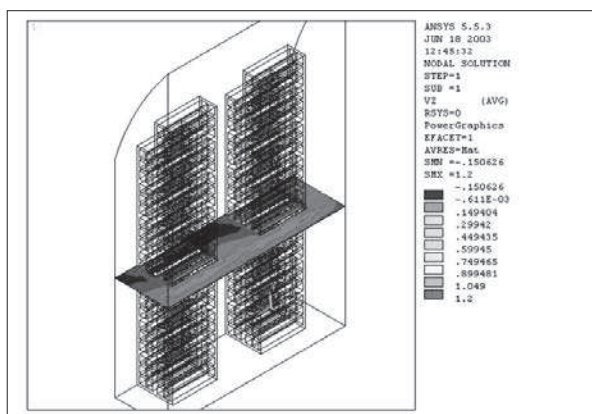


**Figura 8.** Contornos de energía turbulenta.  
Fuente: Elaboración propia.

Las simulaciones llevadas a cabo, considerando la configuración completa de una cámara, confirmaron los resultados obtenidos para segmentos independientes.

### 3.4 Simulación de flujo a través de una serie de columnas

Al asumir que se presenta en la cámara una acomodación de columnas una frente a otra, fue necesario estudiar cuál era el comportamiento del flujo al pasar de una columna a la siguiente. Las simulaciones reportaron que los agujeros de los ladrillos permitían que el flujo turbulento que salía de la columna anterior se enderezara nuevamente para ingresar por los agujeros de la columna siguiente (figura 9).



**Figura 9.** Contornos de velocidad para zonas entre columnas.  
Fuente: Elaboración propia..

El comportamiento observado en la modelación del flujo, muestra que existe poca variación entre las hileras. Por otra parte, los valores de velocidad encontrados corroboraron los datos de las simulaciones para una sola columna con el modelo simétrico. Por lo tanto, se puede asumir que es posible analizar el comportamiento de una única hilera y extrapolar esta información para las hileras anteriores y posteriores en la cámara [9].

En la figura 10 se pueden observar los lugares de máxima turbulencia y a partir de esta configuración, se corrió una simulación incluyendo la ubicación de un apilamiento de desechos en el área que presentaba mayor turbulencia y se encontró que la energía turbulenta se duplicó con relación al modelo previamente analizado [10].

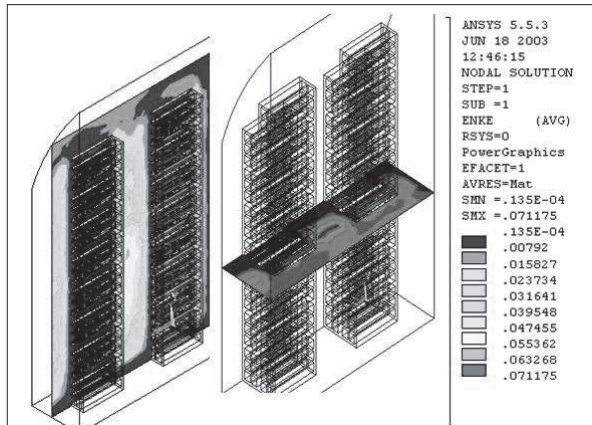


Figura 10. Contornos de energía turbulenta.  
Fuente: Elaboración propia.

Es evidente que al ubicar un objeto entre las columnas se genera una alteración del flujo, pero esta situación es favorable para el proceso de incineración, ya que genera una mayor turbulencia. Se encontró también que sería óptimo ubicar pilas de basura en los espacios entre las columnas de ladrillos, preferiblemente en forma de un cilindro dado que esta configuración ayudaría a generar una mayor cantidad de vórtices [11] en su parte posterior incrementando el tiempo de residencia cerca de la superficie de la basura y dejando el resto del flujo inalterado [12].

El número de Reynolds se constituye en otro indicador importante del proceso de combustión y de acuerdo con las estimaciones realizadas, los máximos valores oscilaron entre 10.000 y 12.000. Igualmente, al alcanzar mayores temperaturas este indicador se reduce considerablemente, disminuyendo un orden de magnitud.

### 3.5 Comparación de resultados entre los CFD utilizados y los datos adicionales medidos en el horno [13].

Para la segunda parte de la simulación se utilizó el software FLUENT, ya que permite mejores condiciones tanto para el procesamiento de datos de salida como un menor tiempo requerido para el análisis de la información.

En este caso, se escogieron los planos de corte que representarían mejor las líneas de corriente, correspondientes al flujo entre los ladrillos y a través de las columnas y que permitieran apreciar cortes horizontales y verticales (figura 11).

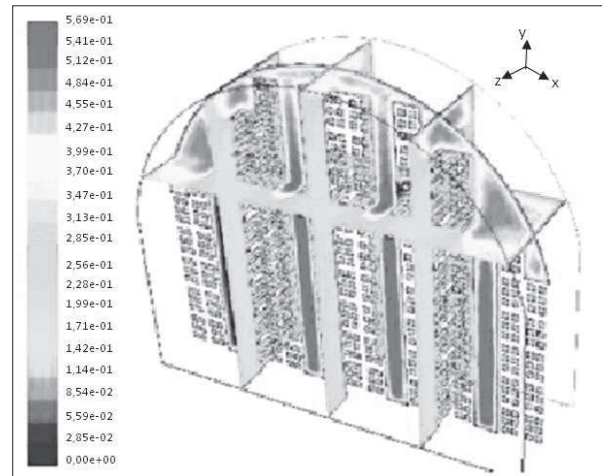


Figura 11. Contornos de velocidad para un corte de la cámara.  
Fuente: Elaboración propia.

En la figuras 12, 13 y 14 se muestran los cortes verticales con los vectores de velocidad.

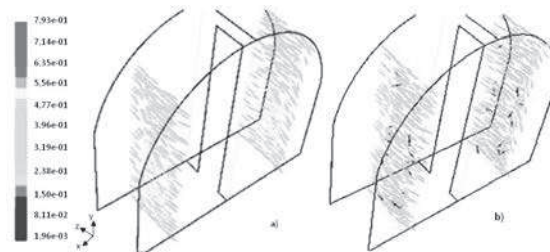
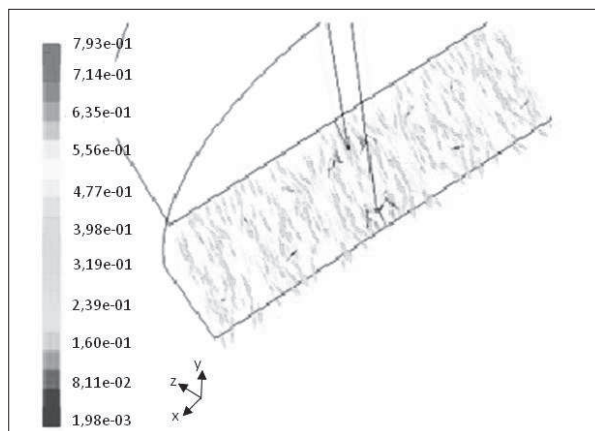


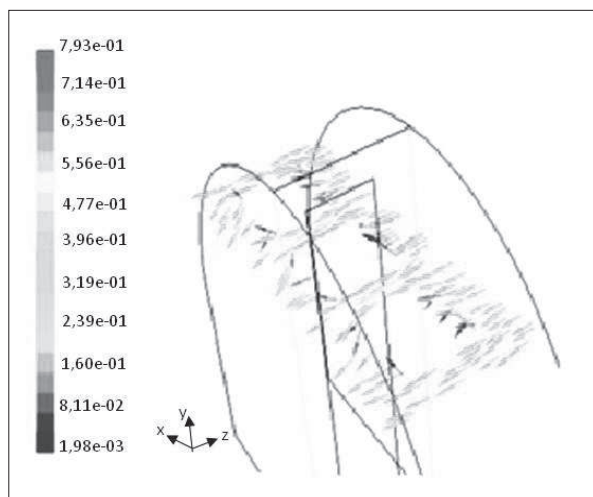
Figura 12. Vectores de Velocidad m/s entre: a) columnas y b) ladrillos.  
Fuente: Elaboración propia.

Se observa que de acuerdo con el arreglo que tengan las columnas de ladrillos, el flujo tenderá a ser más turbulento en la parte superior o inferior de la cámara. Cuando el flujo pasa de una columna con arreglo tipo B a una con arreglo tipo A, la parte más turbulenta es la inferior, mientras que cuando pasa de una columna en arreglo tipo A a una con arreglo tipo B, el flujo se hace más turbulento en la





**Figura 13.** Vectores de velocidad en la base de la cámara.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 14.** Vectores de velocidad en la parte superior de la cámara.  
Fuente: Elaboración propia.

parte superior de la cámara. Sin embargo, la mayor energía turbulenta se sigue obteniendo en la parte inferior de la cámara.

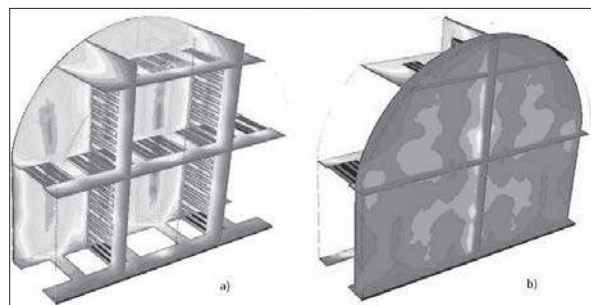
### 3.6 Resultados de medición de temperaturas

Al incluir los parámetros de energía térmica en el modelo, es posible estimar la temperatura en diferentes zonas de la cámara, ingresando al programa una caída de temperatura aproximada. En este caso, se tomó una temperatura de 800°C a la entra-

da y de 750°C a la salida. Se debe tener en cuenta que en este caso no se considera la generación de calor, ya que las altas temperaturas, generadas alteran el movimiento del flujo y este fenómeno se trató como un evento independiente.

Adicionalmente se analizaron los efectos de los productos de la combustión [14]. El interés de la distribución seleccionada para la acomodación de ladrillos y basura, fue correlacionar las zonas de mayor energía turbulenta (mayores números de Reynolds  $RE$  y mayores valores de temperatura) para encontrar la distribución más eficiente.

En la Figura 15 se observa que los lugares más calientes corresponden a las paredes inferiores y laterales. Los contornos de temperatura en rojo corresponden a las zonas más cálidas y los contornos en azul a las más frías.



**Figura 15.** Contornos de Zonas de Temperatura: a) parte anterior y b) parte posterior de las columnas.  
Fuente: Elaboración propia

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se observa claramente que el flujo se estabiliza considerablemente en las áreas de transición entre hileras. Asimismo, en estas zonas se presenta una importante energía turbulenta, especialmente entre los vacíos de las columnas.

Al ubicar los residuos a incinerar entre las hileras de ladrillos y como fue realizado en una de las simulaciones desarrolladas, se presenta una mayor turbulencia, un mayor tiempo de residencia y la afectación al flujo en los ladrillos es mínima, por lo cual no se perturba el proceso de secado-cocción



de los ladrillos.

En términos generales, la máxima velocidad del flujo se presenta en la parte alta de la cámara, sobre los ladrillos, sin embargo en este lugar se presenta una baja energía turbulenta.

El flujo de gases serpentea levemente de arriba hacia la parte baja de la cámara mientras que pasa de filas tipo A a tipo B. Para cualquiera de los dos arreglos, la ubicación de la basura debe ser la misma.

No es conveniente la ubicación de residuos en la parte superior de las filas de ladrillo, ya que esta condición taponaría completamente el flujo en esta área y llevaría el flujo a la parte inferior de la cámara, donde se perdería el efecto favorable de los factores de temperatura y energía turbulenta, anteriormente mencionados.

Dado que en las pruebas realizadas, al ubicar la basura en la parte superior de la cámara fueron aceptables, y considerando que es en efecto un lugar donde la turbulencia es mínima, se sugiere, que

parte de esta basura sea ubicada justo detrás de los ladrillos, tendiendo hacia la siguiente columna, y que estos residuos podrían actuar como combustible una vez que su contenido de humedad es eliminado y disminuir así la inyección de carbón en esas áreas de la cámara. De esta manera se podría mejorar la eficiencia del horno, reduciendo la cantidad de carbón a utilizar.

## 5. FINANCIAMIENTO

Esta investigación hizo parte del Proyecto “Adaptación de hornos ladrilleros de tipo continuo como incineradores de residuos sólidos y evaluación de su viabilidad técnica, económica y ambiental” financiado por COLCIENCIAS.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología COLCIENCIAS y Grupo de investigación en Calorimetría y Sólidos Porosos de la Universidad de los Andes.

## REFERENCIAS

- [1]. Y. Yang, Y. R. Goh, R. Zakaria, V. Nasserzadeh and J. Swithenbank, “Mathematical model of MSW incineration on a traveling bed”. *Waste Management*. Vol. 22, pp. 369-380, 2002.
- [2]. ANSYS Inc, Ansys Theory Reference, 2002.
- [3]. Fluent V.2.2, Fluent’s Theory Reference, 2002.
- [4]. A. Ficarella and D. Laforgia, “Numerical simulation of flow-field and dioxins chemistry for incineration plants and experimental investigation”, *Waste Management*, Vol. 20, No. 1, pp 27-49, 2000.
- [5]. D. Incropera and D.P. de Witt. *Fundamentos de Transferencia de Calor*, Ed. Pearson-Prentice Hall, 4ª Edición, 1999.
- [6]. Z. F. Tian, P. J. Witt, M. P. Scharz and W. Yang, “Numerical Modeling of Victorian brown coal combustion in tangentially fired furnace”, *Energy and Fuels*, Vol. 24, No. 9, pp. 4971-4979, 2010.
- [7]. J. Mac Phee, M. Sellier, M. Jermy and E. Tadulan, “Combustion modeling of a rotary limekiln”, *Progress in computational fluid dynamics*, Vol. 10, No. 6, pp. 384-393, 2010.
- [8]. Y. Shen, A. Yu and P. Zulli, “CFP Modeling and analysis of pulverized coal injection on blast furnace: an overview”, *Steel Research International*, Vol. 85, No. 5, pp. 532-542, 2011.

- [9]. C. Ghenai and I. Janajreh, “CFD analysis of the effects of co-firing biomass with coal”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, No. 8, pp. 1694-1701, 2010.
- [10]. R. Street, *Elementary Fluid Mechanics*, Ed. Jhon Wiley, 7ª Edición, 1996.
- [11]. K. Wardenier, E. Van Den Bulck, “Steady state waste combustion and air flow optimization in a field scale rotary kiln”, *Environmental Engineering Science*, Vol. 14, No. 1, pp. 43-54, 1997.
- [12]. P. J. Paul, “Computational Fluid Dynamic in Combustion”, *Defense Science Journal*, Vol. 60, No. 6, pp. 557-582, 2010.
- [13]. J.M. Veranth, G. D. Silcox, D. W. Pershing. “Numerical Modeling of the temperature distribution in a commercial hazardous waste slagging rotary kiln”, *Science & Technology*, Vol. 31, No. 9, pp. 2534–2539, 1997.