

# Modelado de la Dinámica de Fluidos para Optimizar el Proceso de Manufactura de un Horno de Secado de Madera

## Computational Fluid Dynamics to Optimize Manufacturing Process of an Oven for Drying Wood

*Lisandro Vargas Henríquez\**  
*Alfonso Rodríguez Peña*  
*Noel Castro Miranda*  
*Cristian Pedraza Yepes*  
*Jorge Peña Consuegra*

### RESUMEN

Se presenta un modelo computacional desarrollado para la transferencia de calor y momento en un horno de secado de madera y el estudio de la evolución en el tiempo de las variables, temperatura y velocidad del aire, que influyen directamente en el proceso de secado. Para la simulación por elementos finitos del flujo de calor en el horno, se empleó el software Solidworks.

El objetivo del trabajo es rediseñar el horno de secado de madera, lo cual permite mejorar las condiciones de flujo de calor y fluido en su interior. Se proponen algunas modificaciones estructurales del diseño que logran re-direccionar el comportamiento del flujo y, con eso, mejorar la calidad del producto secado.

**Palabras Claves:** *Campo de Flujo, elementos finitos, flujo turbulento, horno, modelado computacional.*

### ABSTRACT

A computational model developed for the heat transfer and momentum in an oven to dry wood, in addition the study of the evolution in the time of the variables temperature and speed of the air which influences directly the process of dried. Solidworks software was used for finite element simulation of the heat flow in the oven. The objective of this work is to re-design the oven drying wood to allow improving the flow of heat and fluid inside. Some structural modifications of the design that allow directing better the flow and this way to improve the quality of the dried product.

**Key Words:** *Computational modeling, field of flow, finite element, Oven, Turbulent flow.*

\* Grupo IMTEF, Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia.  
Correo-e: lisandrovargas@mail.uniatlantico.edu.co

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las industrias manufactureras de Colombia han venido desarrollando políticas de control de calidad para mejorar sus productos y maximizar los recursos. La industria de la madera, pese al poco adelanto tecnológico que presenta, está procurando ponerse al día con las nuevas tendencias de desarrollo [1]. En la mayoría de los aserraderos de Barranquilla trabajan con escasa tecnología para el procesamiento de la madera. En particular, el proceso de secado posee muchas dificultades para brindar un producto de buena calidad; esto debido a los diseños inadecuados de las cámaras de secado en las que no hay uniformidad del flujo en su interior, trayendo como consecuencia diferentes defectos de secado como torceduras, quemaduras, arqueamientos, etc. lo cual no es conveniente para los posteriores procesos a los que es sometido este producto.

Se ha realizado para ello una simulación por el método de los Elementos Finitos del comportamiento del flujo en el interior de un horno de secado de madera, en la cual se estudian los fenómenos de los procesos de transferencia de calor y momento, hallados en su interior. Posteriormente, se proponen modificaciones estructurales para mejorar las condiciones de flujo, con base en los fenómenos presentados.

## 2. MODELACIÓN COMPUTACIONAL

El sistema que se estudia es un horno de secado de madera ubicado en la ciudad de Barranquilla de propiedad de la empresa Ci Colombian Wood, del tipo de fuente de energía. Posee un volumen aproximado de 122 m<sup>3</sup>. Tiene un intercambiador de calor tipo serpentín (de cobre), con aletas de aluminio. El aire es impulsado por dos ventiladores (Siemens) dispuestos en forma simétrica en el interior de la cámara de secado (Figura 1).

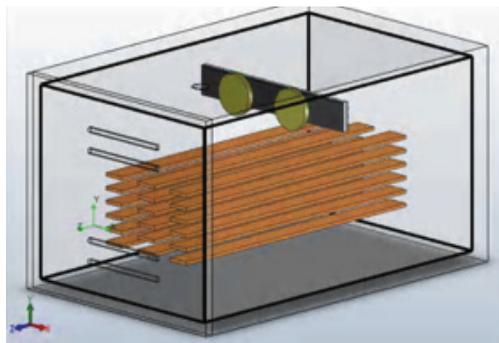


Figura 1. Posición de las pilas de madera dentro del horno

Fuente: Elaboración de los autores

En los serpentines del intercambiador de calor fluye vapor de agua. Como condición de frontera se asumió una temperatura constante en el intercambiador de 100°C. Además, para dis-

minuir el aumento excesivo del mallado localizado en esta zona de intercambio de calor, este dispositivo fue considerado como un medio poroso, el cual presenta resistencia al paso del flujo de aire. Entre la puerta (de lámina galvanizada y fibra de vidrio) y la cámara de cemento existen filtraciones, las cuales se colocaron como dos rejillas de entrada y dos de salida de aire. El tipo de madera a secar es bálsamo cuyas condiciones adecuadas de secado son para temperaturas entre 60-70°C, y para la velocidad del flujo, entre 1-2 m/s [2].

## 1) Modelo Matemático

El programa utilizado para la simulación fue Solidworks, el cual resuelve las ecuaciones que rigen el comportamiento de los fluidos tanto laminar como turbulento [3]. El caso bajo estudio trata precisamente este último. Empleando las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación, llamado modelo  $\kappa - \varepsilon$ .

Las leyes de conservación de masa, momento y energía en un sistema de coordenadas girando a una velocidad angular  $\Omega$  cerca de un eje que pasa a través del origen del sistema de coordenadas, son como sigue [4]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k)}{\partial x_k} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_k - \tau_{ik})}{\partial x_k} + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial((\rho E + P)u_k + q_i - \tau_{ik}u_i)}{\partial x_k} = S_k u_k Q_H \quad (3)$$

Donde  $u$  es la velocidad del fluido,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $S_i$  es una fuerza externa de masa distribuida por unidad de masa debido a la resistencia de un medio poroso (*Siporo*), flotación (*Sigravitación*), y la rotación del sistema de coordenadas (*Sirotorio*); entonces,  $S_i = (Siporo) + (Sigravitación) + (Sirotorio)$ ,  $E$  es la energía total por unidad de masa,  $Q_H$  es la fuente de calor por unidad de volumen,  $\tau_{ik}$  es el tensor del esfuerzo cortante viscoso,  $q_i$  es el flujo de calor de difusión y los subíndices son una expresión para denotar la sumatoria por encima de las tres direcciones coordenadas.

Dos ecuaciones de transporte adicionales son usadas para describir la energía cinética turbulenta y disipación[4]:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k k)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu_l + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + S_k$$

Donde

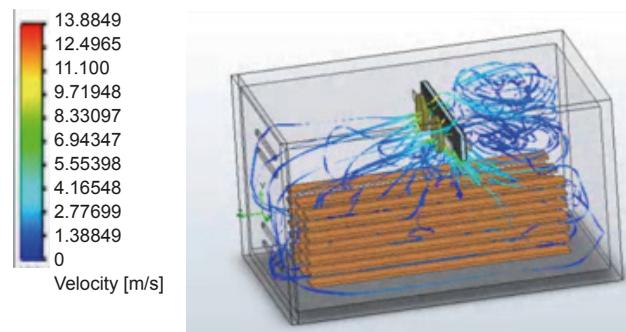
$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k \varepsilon)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu_l + \frac{u_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + S_\varepsilon$$

$S_k$  y  $S_\varepsilon$  son los términos de fuente.

## 2) Estudio preliminar del horno

Después de un análisis de convergencia en el cual se seleccionó el mejor mallado (185944 celdas) y el paso de tiempo (0,7 segundos) se procedió a ingresar la madera de tal forma que el aumento de los elementos del mallado no excediera la capacidad computacional con los que se contaron. Para esto se ubicaron tres pilas de listones de madera, una que cubriera la zona central y las otras dos debajo de cada uno de los ventiladores, las cuales representan las condiciones de un lote de madera.

Se evidenciaron algunos fenómenos en el desarrollo del flujo dentro del horno que conllevan a una no uniformidad del frente de calor y de la velocidad. Además, se presentaron calentamientos localizados a lo largo de los listones de madera. Estos fenómenos que se pueden nombrar como el cambio brusco de dirección del flujo de aire contra la pared del horno, que está en frente del intercambiador de calor (figura 2) y, el calentamiento localizado de la madera, son algunas de las falencias que presenta el horno actualmente.

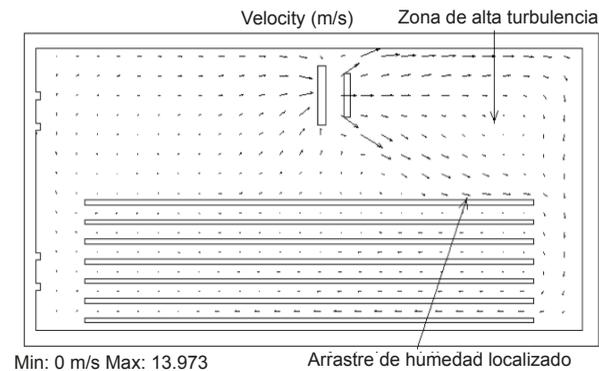


**Figura 2. Flujo de las trayectorias en el horno actual**

Fuente: Elaboración de los autores

El primer fenómeno ocasiona una alta turbulencia en la parte superior del horno, con disminución de la velocidad, cuando hace contacto el flujo contra la pared, y se desaprovecha así la energía que trae el flujo, la cual se puede utilizar para el arrastre de humedad en la zona donde está ubicada la madera. El segundo de los fenómenos es ocasionado por el flujo que sale del ventilador y que se desvía hacia abajo, debido al cambio de dirección a que es sometido por el choque contra el intercambiador de calor. Este hace contacto con la madera, la calienta localmente y produce una no uniformidad en el calentamiento de los listones de madera, y un arrastre de humedad más elevado que se traduce en resecamiento localizado, lo que le ocasiona a la madera un defecto conocido como arqueadura (figura 3 y 5).

Con estos fenómenos presentados en el horno se propusieron tres modificaciones estructurales a la cámara de secado, las cuales redundaban en mejoras en el comportamiento del flujo.

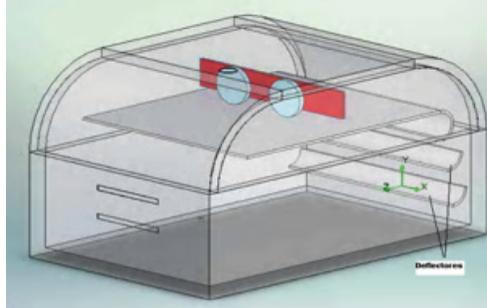


**Figura 3. Desarrollo del campo de velocidad en el horno actual**  
Fuente: Elaboración de los autores

### 3) Propuesta para el rediseño del horno

Se plantearon tres propuestas para modificar el horno estructuralmente, denotadas como: Curva suave, Curva suave y *plenum* y, por último, Curva suave, *plenum* y deflectores. De estas tres propuestas, la que mejor comportamiento presentó fue la de curva suave, *plenum* y deflectores (Figura 4).

**Figura 4. Modificación del horno con curva suave, plenum y deflectores.**



Fuente: Elaboración de los autores

Con esta modificación se obliga al aire a fluir justamente por todo el espacio cubierto por el lote de madera, y por tanto, no se dirigirá a la parte baja de la cámara y, a su vez, previene el calentamiento localizado en la zona superior del lote mediante la colocación del plenum, que es la placa de separación entre la madera y el equipo de intercambio de calor.

#### 4) Estudio del proceso de transferencia de calor y momento del horno modificado

Se evaluaron dos planos laterales que presentaban comportamiento distintos, uno que pasa por la mitad del sistema, y el otro que pasa debajo de un ventilador. Para este artículo solo se comparan los planos que pasan por la mitad del sistema para el modelo de referencia (horno actual), y el modelo con mejores características (modificación con curva suave, *plenum* y deflectores).

En el horno actual, transcurridos 5 segundos de proceso, la temperatura del flujo de aire calienta localmente el lote de madera en la parte superior, que es uno de los fenómenos por el cual se realizó una de las modificaciones, luego se desplaza a lo largo de los listones de madera mediante un proceso de transferencia de calor en términos de difusión por convección. A 50 segundos del proceso la temperatura aumenta en diferentes zonas de los listones de madera, debido a la transferencia de calor por conducción del fluido caliente al interior de esta. Ese calentamiento da pie para que ocurra uno de los mecanismos del proceso de secado que se encuentra dentro de los tipos de migración de humedad conocido como transporte de humedad por termo-difusión, la cual tiene en cuenta el cambio de la temperatura al interior de la madera y tiene como referencia el coeficiente de termo-difusión [5,6]. A los 100 segundos de proceso, se aprecia que casi la mitad del sistema se encuentra a mayor temperatura, lo que se traduce en un calentamiento no homogéneo (Figura 5).

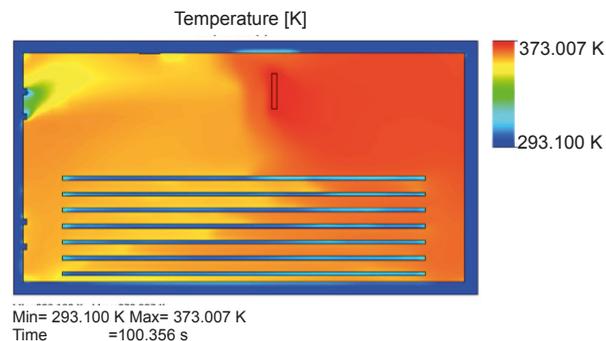
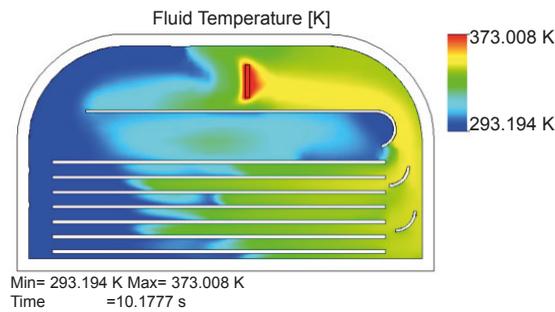


Figura 5. Campo de temperatura en el horno actual a 100 segundos de proceso.

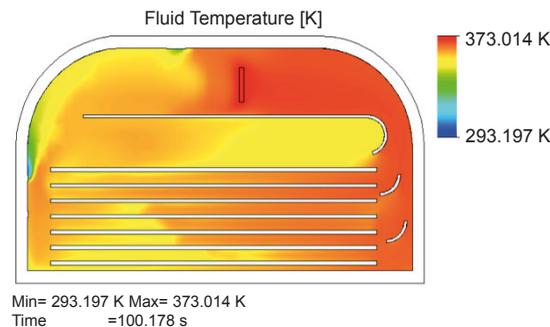
Fuente: Elaboración de los autores

En el modelo con curva suave, plenum y deflector se observa que el campo de temperatura es obligado a cruzar en el espacio que existe entre la cámara de secado y el lote de madera, y el problema del calentamiento localizado en los listones de la parte superior se supera (Figura 6). La posición de los deflectores es estratégica para dirigir el flujo de una manera forzada a la zona objetivo, que es el lote de madera. Se observa que el campo de temperatura al salir de la zona entre la curva suave y el plenum se ve obligado a ingresar en los espacios que separan a cada listón de madera, con mayor uniformidad en todo el lote, gracias a la ubicación de los deflectores. Esto continúa hasta que ocupa totalmente toda la cámara.



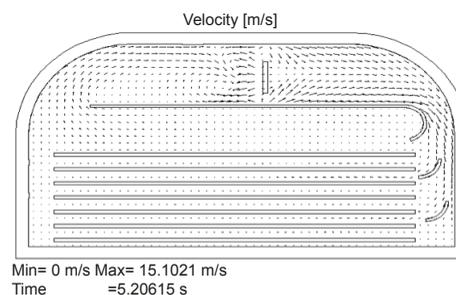
**Figura 6: Temperatura del flujo en el modelo con curva suave, plenum y deflectores a 50 segundos de proceso**  
Fuente: Elaboración de los autores

A los 100 segundos de proceso (Figura 7), la temperatura en el lote de madera es más uniforme en comparación al horno actual, y cerca del 70% del lote de madera presenta temperaturas semejantes.



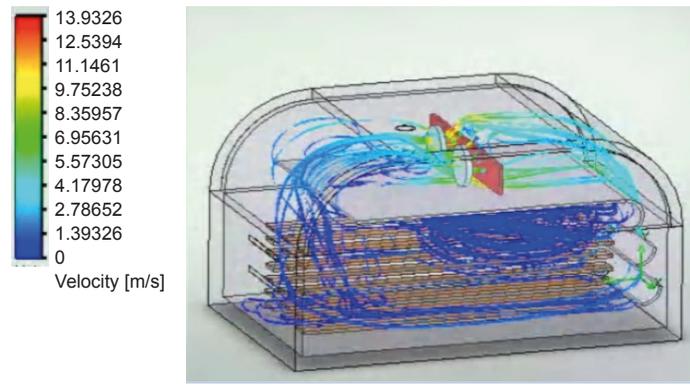
**Figura 7. Temperatura del flujo en el modelo con curva suave, plenum y deflectores a 100 segundos.**  
Fuente: Elaboración de los autores

El desarrollo del campo de flujo (Figura 8) es más rápido y permanente en el tiempo, de manera que cerca de los 10 segundos ya ha alcanzado a desarrollarse completamente. El fluido es obligado a circular por el espacio de separación entre el deflector superior y la cámara, el cual es algo reducido, y alcanza velocidades más altas, las cuales inducen el movimiento, desplazando al fluido que se encuentra en su trayectoria, hasta llegar a los dos deflectores inferiores, en los cuales se direcciona el flujo hacia la zona objetivo, y a la parte baja (en la esquina inferior), en la que se genera un pequeño vórtice, para luego dirigirlo a los listones inferiores.



**Figura 8. Desarrollo del campo de flujo en el modelo con curva suave, plenum y deflectores.**  
Fuente: Elaboración de los autores

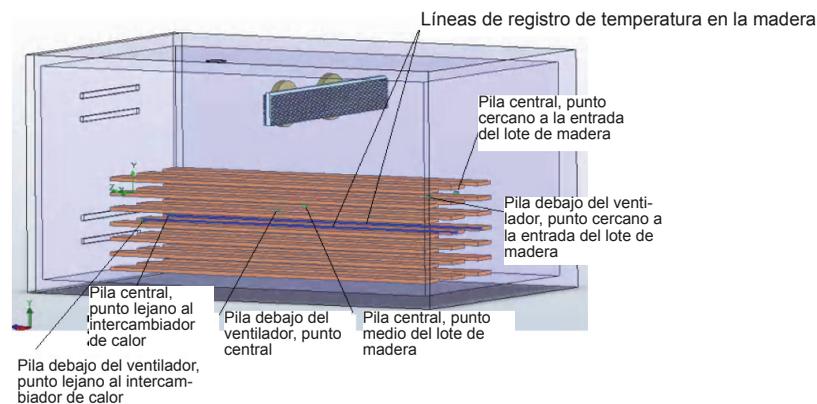
El modelo alcanza una mayor uniformidad de flujo en la circulación del aire y en la zona central donde está ubicada la madera existe mayor presencia del flujo, gracias a la desviación causada por los deflectores (Figura 9).



**Figura 9: Flujo de trayectorias en el modelo con curva suave, plenum y deflectores.**  
Fuente: Elaboración de los autores

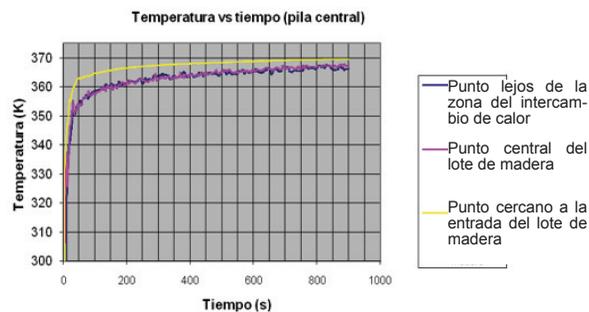
### 5) Estudio de la evolución en el tiempo de la temperatura y la velocidad de flujo

Es necesario para este análisis el conocimiento de las condiciones adecuadas de secado de la madera balsa. Para la temperatura y velocidad se manejan los siguientes rangos, respectivamente: 60-70 °C y 1-2 m/s [7]. Se colocaron seis puntos estratégicamente en el lote de madera que registraron el valor de las dos variables que se analizan en el tiempo, tres en una de las pilas debajo del ventilador, y tres en la pila central (Figura 10), denotados como cercanos, centrales y lejanos. El comportamiento de las variables en estos puntos caracteriza el sistema.



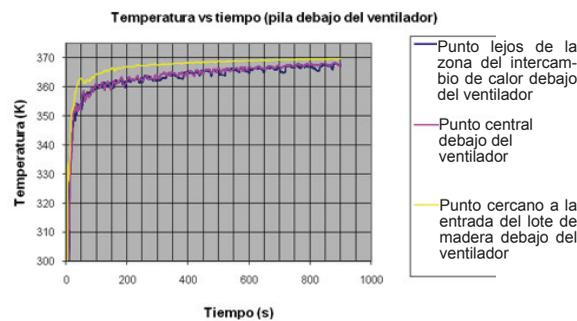
**Figura 10. Puntos de registro de las variables.**  
Fuente: Elaboración de los autores.

En las Figuras 11 y 12 se puede apreciar que, después de transcurrido el tiempo de simulación propuesto de 15 minutos, las curvas en los puntos cercanos a la entrada del lote de madera tienen una tendencia a estabilizarse cerca de los 370 °K. Nótese que la curva que los representa muestra un comportamiento asintótico, lo cual es un indicio que la zona alcanzó un estado estable, pero no para todo el sistema. Esto último se evidencia en las curvas para los puntos lejanos y centrales, en las cuales el comportamiento de la temperatura es fluctuante debido a los cambios en la velocidad del flujo para estas dos zonas, pero con la misma tendencia a estabilizarse, solo que se requiere un tiempo mayor de proceso.



**Figura 11. Temperatura contra tiempo para los puntos de la pila central, modelo horno actual.**

Fuente: Elaboración de los autores



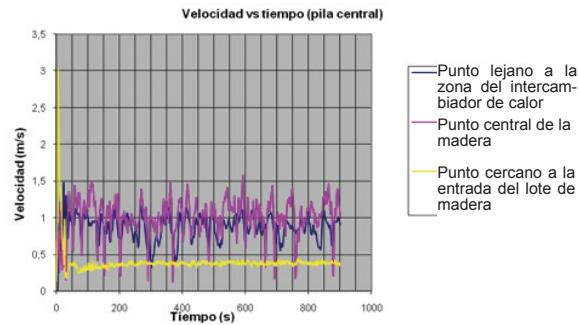
**Figura 12. Temperatura contra tiempo para los puntos en la pila debajo del ventilador, modelo horno actual.**

Fuente: Elaboración de los autores

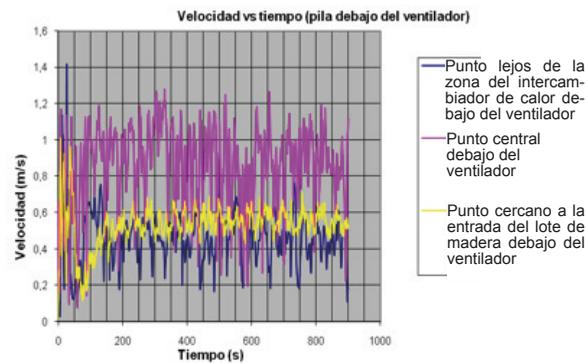
Por otra parte, se puede observar que el rango de temperaturas adecuado para el proceso de secado del bálsamo se alcanza para ambas pilas entre los 10 y 20 segundos de proceso, y si a los quince minutos de proceso no se ha alcanzado la estabilidad, se puede concluir que el proceso de secado debe estar sujeto a un sistema de control de temperatura en todo el tiempo de operación, dejando claro que el estado del flujo permanecerá en estado transitorio durante todo el proceso de secado.

En relación con el comportamiento de la velocidad en el tiempo para los puntos testigos, las Figuras 13 y 14 no muestran una tendencia a estabilizarse, salvo el punto cercano a la entrada del lote de madera en la pila central, en el que a partir de los 30 segundos muestra leves fluctuaciones de cambio de velocidad en el tiempo, pero con magnitud baja (cerca de

los 0.4 m/s). Para los demás puntos, la inestabilidad que presentan es característica del flujo turbulento y tiene implicaciones para el proceso de secado, debido a la no uniformidad en el arrastre de la humedad.



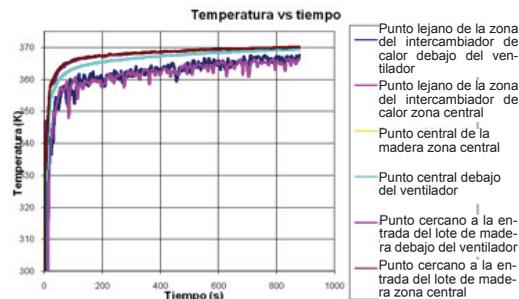
**Figura 13. Velocidad contra tiempo en los puntos de la pila central, modelo horno actual.**  
Fuente: Elaboración de los autores



**Figura 14. Velocidad contra tiempo en los puntos de la pila debajo del ventilador, modelo horno actual.**  
Fuente: Elaboración de los autores

Se puede observar que las magnitudes de la velocidad varían para los mismos puntos considerablemente, por ejemplo para los puntos lejanos, la velocidad media está cerca de 0,85 y 0,5 para la pila central y debajo del ventilador respectivamente.

Para el modelo con curva suave, plenum y deflectores (figura 15) el comportamiento en el tiempo presentado en las curvas es muy similar respecto al modelo actual



**Figura 15. Temperatura contra tiempo en los seis puntos, modelo con curva suave, plenum y deflectores.**  
Fuente: Elaboración de los autores

Por otra parte, el desarrollo de la velocidad en el tiempo para los seis puntos testigos se muestra en la figura 16. Se observa que para las mismas posiciones de los puntos en el plano de cada pila (central y debajo del ventilador) las velocidades son prácticamente de la misma magnitud y tienen mayor tendencia a uniformizarse. Solo muestra pequeñas fluctuaciones para los cercanos a la entrada del lote de madera y los centrales. Además, la evolución de la velocidad a lo largo de los listones de madera está más cerca al comportamiento ideal. El rango de velocidad de flujo que presenta este modelo está entre los 0.5 y 1.5 m/s, más cercano al adecuado para una buena remoción de humedad, comparándolo con el recomendado (1-2 m/s).

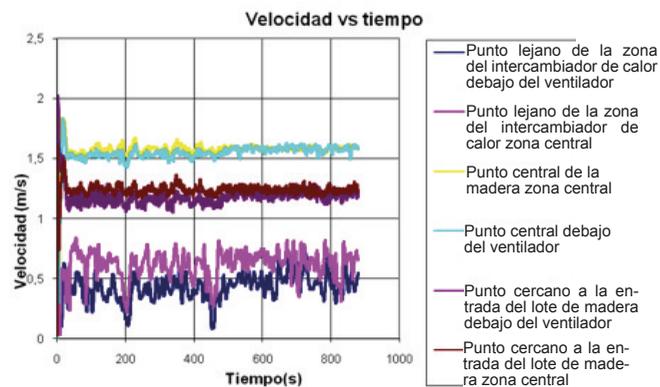


Figura 16. Velocidad contra tiempo en los seis puntos, modelo con curva suave, plenum y deflectores.

Fuente: Elaboración de los autores

La figura anterior muestra que se ha mejorado el comportamiento en términos de velocidad, y es precisamente este parámetro el seleccionado para decidir el rediseño de la cámara de secado. De acuerdo con lo anterior, se determinó la mejora en términos de uniformidad del flujo, tomando como base el grado de fluctuación de cada curva para los diferentes puntos. En este sentido para los puntos centrales y lejanos se mejoró el comportamiento entre 16.6 y 87.5 %.

## 6) Selección de la propuesta

Cada uno de los modelos modificados, requiere de la construcción de los elementos estructurales que la componen, además de un sistema de control de temperatura, el cual debe disminuir el consumo energético de la cámara de secado. La selección de la mejor propuesta se llevó a cabo con la implementación de una matriz de selección (Tabla 1) en la que se le colocaron valores ponderados a los parámetros más importantes del sistema y se calificó de 1 a 5 cada parámetro en todos los modelos.

De la Tabla 1, se aprecia que la propuesta seleccionada es la Curva suave, plenum y deflectores. Aunque es la propuesta con costo total más elevado, la inversión inicial tiene justificación ya que se mejorará el proceso de secado en términos de tiempo de secado, consumo energético y uniformidad de secado en los listones de madera. Esto es provechoso para la empresa, puesto que podrá brindar a sus clientes un producto de mejor acabado y competir en precios.

Tabla 1. Matriz de selección de la mejor propuesta

PROPUESTA	Velocidad del flujo	Uniformidad del flujo	Uniformidad de la temperatura	Costo total de la modificación	SELECCIÓN
	0,2	0,3	0,2	0,3	
Horno Actual	1	2	2	5	2,7
Curva Suave	3	2	3	3	2,7
Curva Suave y Plenum	2	3	4	2	2,7
Curva Suave, Plenum y Deflectores	4	4	4	1	3,1

Fuente: Elaboración de los autores.

### 3. CONCLUSIONES

Con el análisis de los fenómenos presentados en el modelo del horno actual se logró identificar las falencias, definir los cambios en la estructura del horno, y la optimización del diseño para su posterior fabricación. Varias conclusiones se pueden extraer del modelo:

- 1) A partir de los resultados obtenidos se puede considerar que se cuenta con una herramienta capaz de predecir el comportamiento del flujo de calor y fluido. Las diferentes figuras que se muestran caracterizan el movimiento del campo de flujo el cual depende de varios factores. Uno de los cuales es el direccionamiento hecho por los deflectores en el modelo con curva suave, plenum y deflectores.
- 2) Con la distribución del campo de velocidad y temperatura en el modelo con curva suave, plenum y deflectores se logra una mayor uniformidad en el arrastre de la humedad y el calentamiento de la madera, minimizando la presencia de defectos en el proceso de secado. Para diferentes sectores del lote de madera se tienen mejoras en la uniformidad del flujo que va desde los 16 a 87.5 %.
- 3) El análisis de la temperatura en el tiempo permitió la implementación del sistema de control de temperatura, el que a su vez deberá disminuir el consumo energético y permitirá operar en el rango adecuado de temperaturas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ESPINAL G. Carlos, MARTINEZ C. Héctor y GONZALEZ D. Elkin. Características y Estructura del Sector Forestal-Maderas-Muebles en Colombia. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Documento n° 95. 2005.
- [2] Bálsamo, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Sena, (online) Disponible: <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Balsamo.pdf#search=%22propiedades%20de%20la%20madera%20balsamo%22>.
- [3] LEVEQUE, Randy. Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations: Steady-State and Time-Dependent Problems. SIAM 2008
- [4] VERSTEEG H, & MALALASEKRAW, An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method, 2nd Edition, Pearson Education, 2007.
- [5] Wood Handbook, Wood as an Engineering Material. Forest Products Laboratory,, General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 2010, Chapter 12.
- [6] BLAZEK J. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Oxford, Elsevier. 2001.
- [7] ACERO L.E. Propiedades, Usos y Nominación de Especies Vegetales de la Amazonía Colombiana. DAINCO. Bogotá Colombia. 1982. 113p.