

DISEÑO EN *COSMOSFLOWWORKS* DEL CONDUCTO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DEL AIRE AL PASO DE BANDEJAS METÁLICAS

Alejandro Escalante*
Luis Carlos Flórez García**
Oscar Fabián Higuera Cobos***

Recibido: 07/03/2008

Aceptado: 05/10/2009

RESUMEN

En el siguiente artículo se presenta el proceso de desarrollo de diseño del conducto experimental que facilita la medición de la caída de presión del aire tras su paso por bandejas metálicas. El diseño se fundamenta en los resultados arrojados por las simulaciones realizadas a diferentes disposiciones en la etapa inicial del conducto, y la validación de los datos de la simulación más representativa con un prototipo del conducto real con esta misma distribución. Para este estudio se usó *software Cosmosfloworks* [1], con el cual se analizaron las líneas de corriente y la caída de presión del fluido en el conducto.

Palabras clave: conducto, pérdidas, fricción, simulación, *cosmosfloworks*, flujo de aire.

* Estudiante de ingeniería mecánica. Facultad de ingeniería mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira. Correo: jaeh0584@gmail.com

** Ingeniero Mecánico, M.Sc. Profesor Asistente. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira. Correo: luiscar@utp.edu.co

*** Ingeniero Metalúrgico, M.Sc. Profesor Asistente. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Tecnológica de Pereira. Correo: osfahico@utp.edu.co

COSMOSFLOWWORKS DESIGN OF AN EXPERIMENTAL DUCT FOR MEASUREMENT OF THE DROP IN AIR PRESSURE AFTER ITS PASSAGE THROUGH METAL TRAYS

ABSTRACT

The following article presents the development's process of designing an experimental duct which facilitates the measurement of the drop in air pressure after its going through metal trays. The design is based on the results of simulations conducted at various provisions of the duct, and validation of data from the most representative simulation through actual prototype with the same distribution. For this study, we used [1], with which curves of fluid and pressure drop of the fluid were analyzed.

Key words: duct, losses, friction, simulation, cosmosflowworks, air flow

INTRODUCCIÓN

El cálculo para determinar las pérdidas de presión y la transferencia de calor del paso del aire atmosférico en algunas aplicaciones específicas puede convertirse en una tarea muy complicada, más cuando parte de dicha pérdida es resultado de la rugosidad de materiales no convencionales para este tipo de cálculos como, por ejemplo, frutas o verduras. Esto hace necesario un dispositivo que facilite la medición de la caída de presión para diferentes productos y materiales.

El presente artículo describe el diseño del conducto que sirve para la medición experimental de las pérdidas de presión del paso de aire por bandejas para distintos materiales, que se adapta a la unidad de aire acondicionado A 574 que se encuentra en el laboratorio de térmicas de la Universidad Tecnológica de Pereira. Adicionalmente, el diseño garantiza una completa distribución del aire al paso por las bandejas para aproximar la medida en lo posible a los valores reales.

Al igual que en otros estudios donde se involucra análisis del fluido [2, 3], se diseñó el conducto por medio de herramientas computacionales, en este caso empleando el *software Cosmosfloworks* [1], que es un programa licenciado para el estudio de fluidos en la Universidad Tecnológica de Pereira.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Ley de continuidad de los fluidos[4]

La continuidad en la mecánica de fluidos, para un volumen de control, está regida por la ecuación:

$$\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sal} = \frac{dm_{vc}}{dt} \quad (1)$$

donde m_{ent} y m_{sal} son, respectivamente, el flujo de masa entrante y saliente del volumen de control, y dm_{vc}/dt es la razón de cambio de la masa dentro de las fronteras de esos volúmenes; este es igual a

cero cuando el fluido no cruza las fronteras del volumen de control o cuando se presenta un proceso de flujo estable, en donde la cantidad de masa que sale del sistema es igual a la que entra en la misma unidad de tiempo. Para un proceso con flujo estable tenemos que la ecuación de continuidad es:

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal} \quad (2)$$

Pero tenemos que el flujo de masa puede ser representado por la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = \rho \dot{V}A \quad (3)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, V es la velocidad media y A es el área de conducto por el cual pasa el fluido que se analiza. Reemplazando la ecuación (3) en (2), se obtiene:

$$\rho_{ent} \dot{V}_{ent} A_{ent} = \rho_{sal} \dot{V}_{sal} A_{sal} \quad (4)$$

Un flujo de fluido en donde los cambios de densidad son tan pequeños que se pueden despreciar es conocido como flujo incompresible o flujo no compresible. Por lo general, el flujo es incompresible porque los fluidos son incompresibles (líquidos) o porque el número de Mach es bajo (aproximadamente $< 0,3$). Para flujos incompresibles la ecuación (4) queda de la siguiente forma:

$$\dot{V}_{ent} A_{ent} = \dot{V}_{sal} A_{sal} \quad (5)$$

1.2 Análisis de elementos finitos [5, 6]

La mayoría de los programas de elementos finitos divide el espacio en un conjunto de poliedros. Para el caso de [1], programa de elementos finitos para el análisis de fluidos, la región de estudio la divide en celdas cúbicas. Las celdas pueden contener fluido o, como se observa en la figura 1, elementos sólidos (líneas oscuras) o una combinación que contiene una parte de sólido y una parte de fluido (líneas claras). Las celdas se refinan si se considera necesario y el refinamiento de la malla se hace fraccionando una celda en otras ocho, y así sucesivamente. No se realiza un estudio de indepen-

dencia de la malla debido al tipo de simulación, en el cual estos datos son suministrados al *software* y a cálculos internos de este, que optimizan y refinan la malla para establecer un nivel de resultados suficientemente precisos.

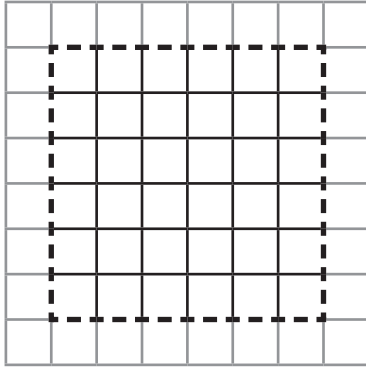


Figura 1. Modelo en forma de cubo, dividido en celdas.

Fuente: Elaboración propia

El análisis se estimó para un comportamiento del flujo estable. Debido a que la simulación es dependiente del tiempo, al inicio existe un desorden en el fluido hasta llegar a un instante donde las líneas del fluido recorren el ducto, se organizan y no varían. Como se analizó la distribución del fluido, se utilizó como criterio de convergencia en el análisis computacional la velocidad y presión del fluido en una variación de los datos en las últimas iteraciones de 1×10^{-5} , después de que las líneas de flujo se estabilizaran.

- **Ecuaciones gobernantes del sistema.** Las ecuaciones que gobiernan la simulación de fluidos para los regímenes laminar y turbulento en el *software* *Cosmosflowworks*, y en el sistema de coordenadas cartesianas, son las siguientes: [7]

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(p u_i) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial p u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(p u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad (7)$$

Estas ecuaciones de Navier-Stokes, formulan las leyes de flujo de fluidos para masa (6) momento (7) y conservación de energía.

El fluido laminar ocurre cuando el valor del número de Reynolds (Re) tiene un valor bajo (generalmente se considera para $Re < 2000$), cuando este número excede un valor crítico ($Re > 4000$) el fluido se convierte en turbulento, por lo que se pueden presentar los dos. Debido a las condiciones del flujo se considera como laminar en el desarrollo de este diseño. Para predecir un flujo turbulento el programa usa las ecuaciones de Navier-Stokes y Favre, donde los efectos de fluido turbulento afectan los parámetros a considerar.

- **Condiciones de frontera.** Permiten generar las diferentes condiciones de entrada y salida de fluido en un sistema; en este estudio no existen entradas ni salidas de flujo. Asimismo se pueden configurar las condiciones de las paredes que están en contacto con el fluido, las cuales pueden ser: pared real, pared externa y pared ideal.

La primera opción permite seleccionar la rugosidad y/o la temperatura de la pared que está en contacto con el fluido. Además, permite simular condiciones de elementos que generen movimiento rotacional o lineal en el fluido. La pared externa permite especificar el coeficiente de transferencia de calor y la temperatura externa o solamente la temperatura de la pared [8].

- **Mallado.** El mallado propuesto para los trabajos iniciales es de calidad 4 de la escala empleada por el programa y adicionalmente, para el diseño final, con la función de optimización pared delgada, tomando como espesor mínimo medio milímetro (0,0005 m), donde un mallado de mejor calidad no presenta alteraciones en los resultados de forma significativa. Dado que el conducto a diseñar no contiene piezas móviles, el mallado es uniforme para todo el conducto.

En la figura 2 se puede apreciar un ejemplo del mallado en un conducto.

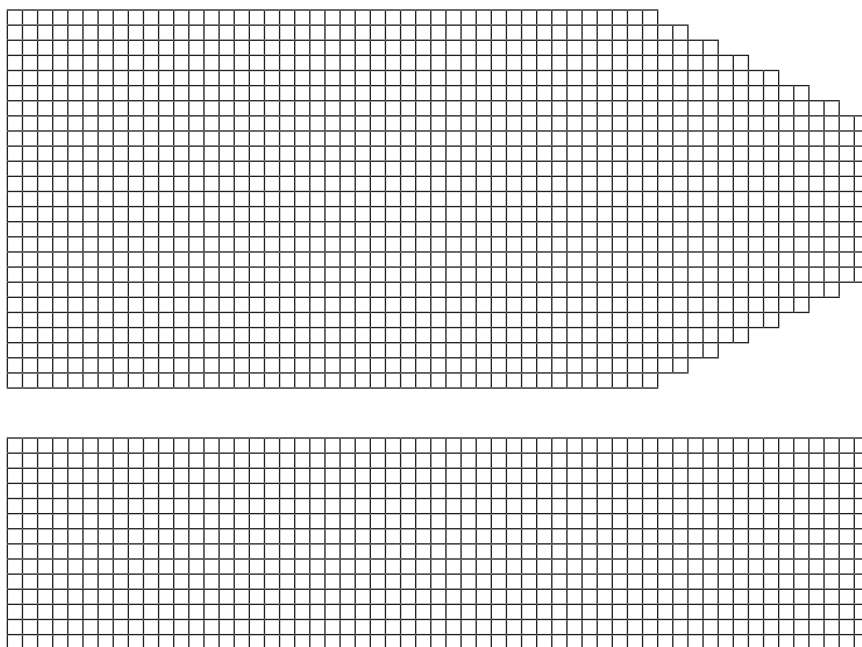


Figura 2. Mallado calidad 4.

Fuente: [1].

1.3 Unidad de aire acondicionado P.A. Hilton A574 [9]

Es un instrumento diseñado para evaluar y demostrar la transferencia de energía en cualquier proceso que se presente en una planta de aire

acondicionado (a excepción del proceso de filtrado y de mezclado).

La unidad consta de un ventilador con control de velocidad, un precalentador, un enfriador deshumidificador, un recalentador y una placa de orificio para la medición del flujo de masa.

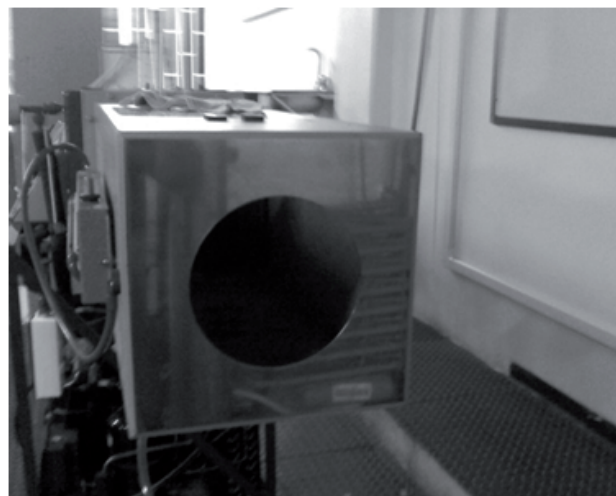
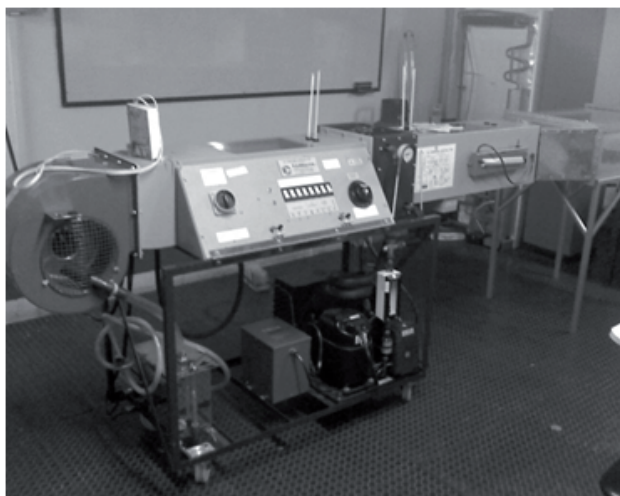


Figura 3. a) Unidad de aire acondicionado P.A. Hilton A574.
b) Placa de orificio calibrada para medir el flujo de masa.

Fuente: [9]

2. DESARROLLO DEL DISEÑO

2.1 Esquema inicial

El objetivo inicial consistió en diseñar un conducto experimental para el diseño del modelo para el deshidratado de plátano por medio de aire caliente, el cual requería una herramienta que permitiera medir la caída de presión producida por la fricción del aire con las superficies de un producto no convencional para estos cálculos, en este caso, el plátano.

Como parámetros o condiciones para el diseño se tuvieron en cuenta los siguientes:

- El conducto debe tener capacidad de albergar bandejas de 75cm x 50cm, para facilitar la aplicación de los resultados obtenidos con el proyecto de grado ya mencionado.
- El fluido a emplear es aire atmosférico, 1.399 el calor específico (C_p/C_v), 0.02896 kg/mol, 21 C, donde la viscosidad dinámica y el calor específico varían de acuerdo a la temperatura. Flujo laminar, $Re < 2000$.
- El conducto debe ser de fácil acople con la unidad de aire acondicionado A 574, equipo que posee el laboratorio de térmicas

de la Universidad Tecnológica de Pereira.

- El conducto debe distribuir de la forma más eficiente el fluido por el máximo de las cavidades posibles del conducto.
- Se deben evitar elementos propios de la estructura del conducto, que interfieran en la medición de la caída de presión, diferentes a las bandejas y el producto.
- El diseño final debe ser de fácil implementación.

2.2 Modelo inicial

Los parámetros de diseño establecidos, dieron paso a la elaboración del primer modelo a simular, el cual se desarrolló cumpliendo con los parámetros básicos de dimensiones y de acople, y se obtuvo el esquema de la figura 4.

Este primer modelo fue sometido a simulaciones, y se obtuvo como resultado el diagrama de líneas de flujo que aparece en la figura 5.

En ella se puede observar que existe un problema de concentración del flujo en el centro del conducto, ocasionado por la placa de orificio de la unidad de aire acondicionado A574. Esto puede ocasionar errores en la obtención de medidas, dado que los instrumentos de medición estarán

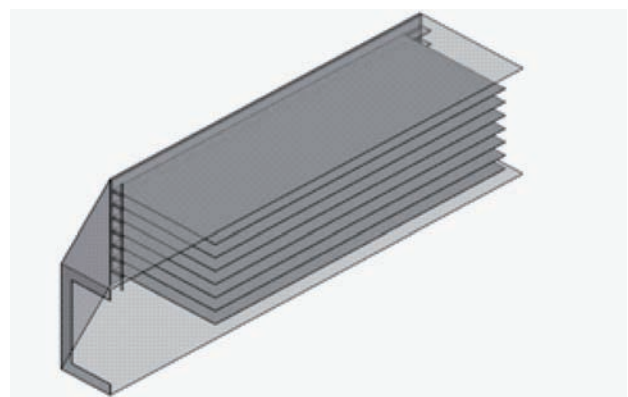
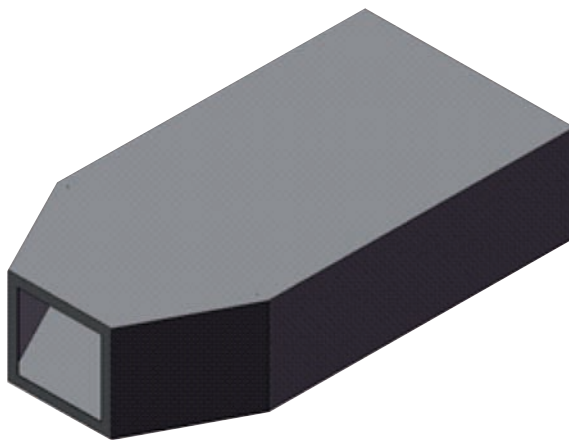


Figura 4. Esquema básico del conducto para el modelo inicial con bandejas. Vista isométrica.

Fuente: Elaboración propia

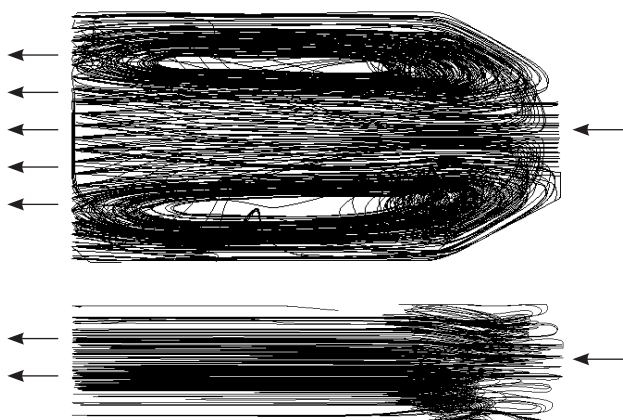


Figura 5. Diagrama de líneas de flujo de la simulación del esquema básico del conducto, vista superior y lateral.

Fuente: Elaboración propia

colocados en las paredes del conducto y la concentración del flujo no permitiría el contacto directo con el fluido.

Este fenómeno, dio paso a un estudio para hallar modificaciones que ayudaron a corregir el problema.

2.3 Etapa de simulaciones de estudio para la corrección de problemas

Esta etapa del estudio consistió en realizar modificaciones al modelo y simularlas con el ob-

jetivo de encontrar una solución al problema de concentración de flujo ocasionado por la placa de orificio, la cual es un objeto no removible de la unidad de aire acondicionado A574.

Las modificaciones consistieron en evaluar diferentes obstáculos que pudieran distribuir la concentración del flujo por todo el conducto, empleando álabes fijos, prolongaciones del conducto y canales de distribución. En la figura 6 se muestran algunos de las modificaciones realizadas al conducto. Figura 6. Esquemas de algunas de las modificaciones hechas en las entradas del ducto para obtener una mejor distribución de flujo.

- Condiciones iniciales. Como condiciones iniciales se seleccionó el aire como el fluido de trabajo, la rugosidad del material se seleccionó como la rugosidad de acero comercial que es aproximadamente 40 μm [4]. El ventilador de la unidad de aire acondicionado A574 es modelado por una placa con las mismas dimensiones de la placa de orificio; para su modelamiento se le puede adaptar una entrada de fluido a diferentes temperaturas y caudales para el aire. De igual manera, la salida del fluido es modelada por una placa en condiciones de salida al ambiente. La presión atmosférica que se tomó fue la de la ciudad de Pereira, Risaralda Colombia.

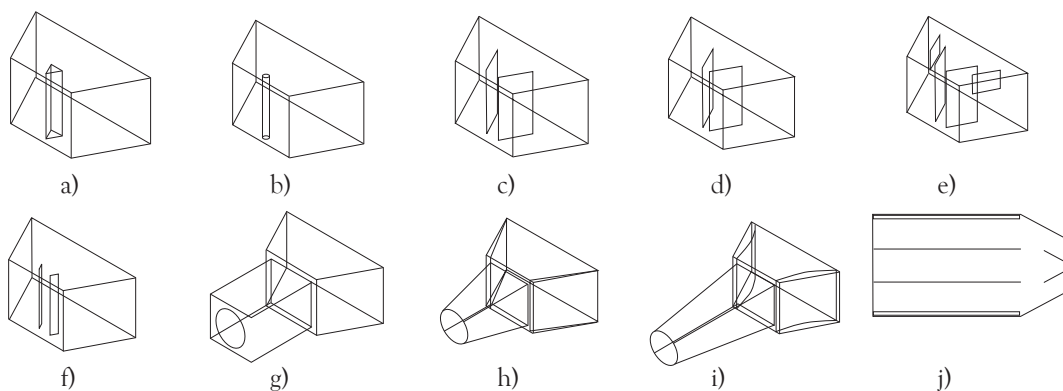


Figura 6. Esquemas de algunas de las modificaciones hechas en las entradas del ducto para obtener una mejor distribución de flujo.

Fuente: Elaboración propia

3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

3.1 Primera etapa del estudio

Todos los modelos fueron simulados a las mismas condiciones de temperatura inicial, presión

atmosférica, rugosidad, temperatura y velocidad del fluido, con la intención de ver cuáles de las modificaciones daban mejores resultados en la distribución del fluido. Estas se realizaron con el mallado básico para simplificar los cálculos de computador.

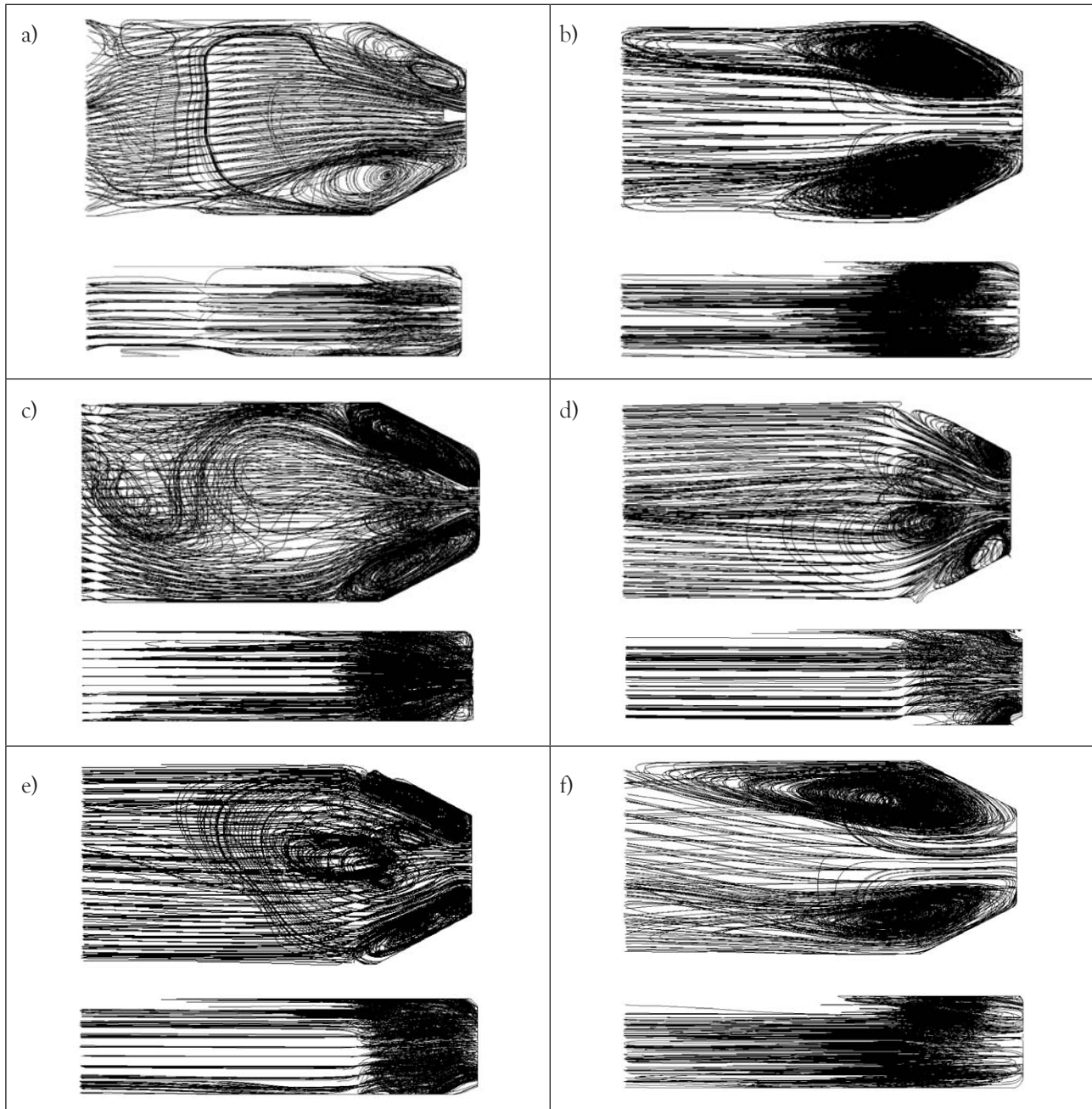


Figura 7. Resultados de las direcciones del flujo una vez alcanzado el estado estable, para cada uno de las modificaciones mostradas en la figura 2, respectivamente. (Continúa en la página de enfrente)

Fuente: Elaboración propia

Ejemplo de análisis. El análisis consistió en la evolución del modelo para cada una de las distribuciones ya antes mostradas. Observando desde varios puntos de vista la distribución del flujo obtenido, se escogieron: la vista superior, lateral y una en 3D tipo isométrica, donde esta última no se muestra debido a que el modelo se evaluó rotándolo en el espacio para una mejor visualización de las líneas de flujo.

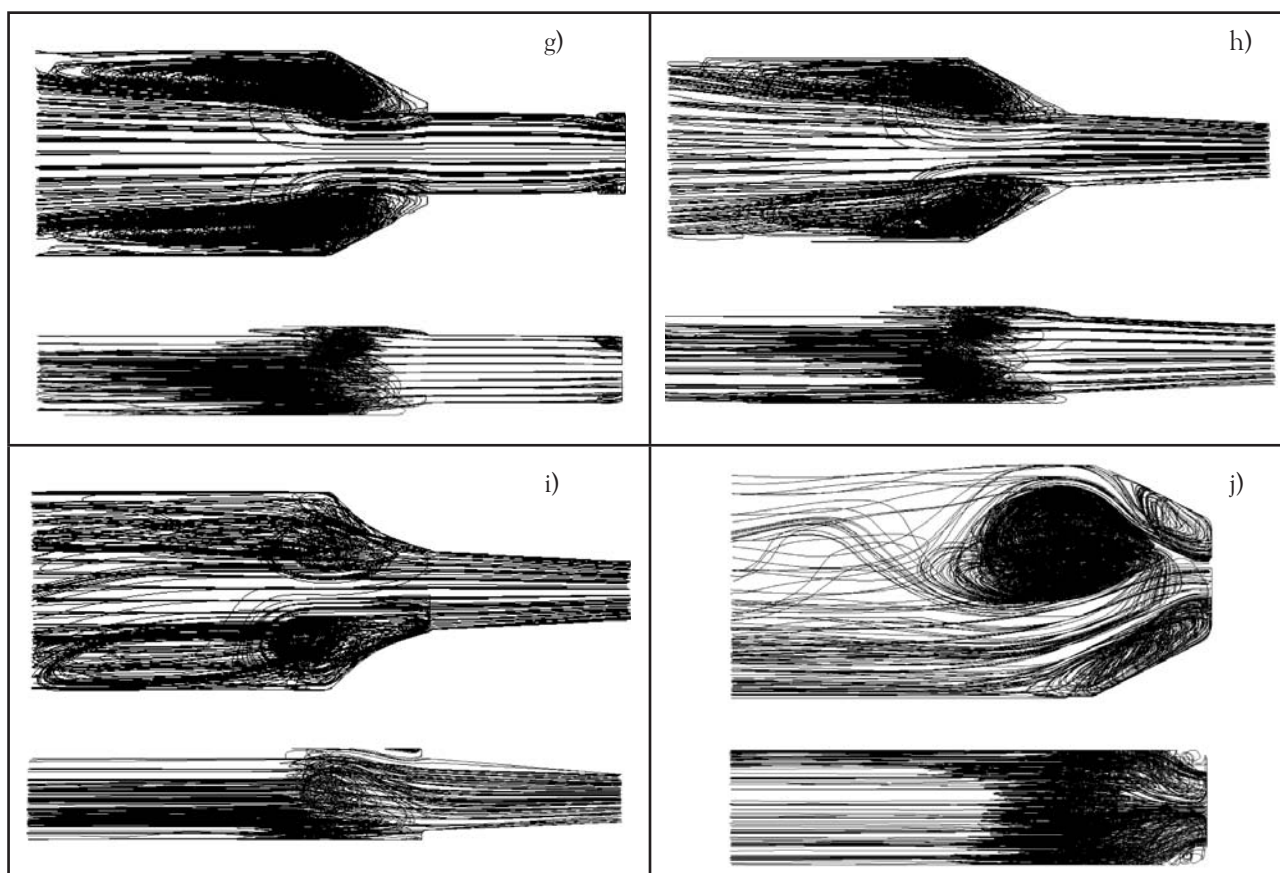
El criterio de evaluación fue buscar la mejor distribución dentro del conducto, en otras palabras, una que permitiera al fluido llenar el conducto y que mantuviese un recorrido lo menos accidentado posible. Por ejemplo, al observar los resultados de la figura 7b se puede observar cómo al romper el flujo se generan dos vórtices muy grandes, o sea que la distribución del fluido por el conducto no es la mejor. Este fenómeno se mejora con la distribución de la figura 7e, donde, aunque

se puede presenciar parte de los vórtices, estos han disminuido su tamaño.

- **Diseño seleccionado.** De acuerdo con las simulaciones, se optó por seleccionar la disposición que presentara la mejor distribución del fluido, y que permitiera la más fácil instalación en el conducto. El diseño seleccionado es el que se muestra en la figura 6d cuya variación son dos álabes, pero a diferencia de la figura 6c, la distancia entre ellos es más pequeña. El diagrama de flujo para esta disposición es el que se encuentra en la figura 7d.

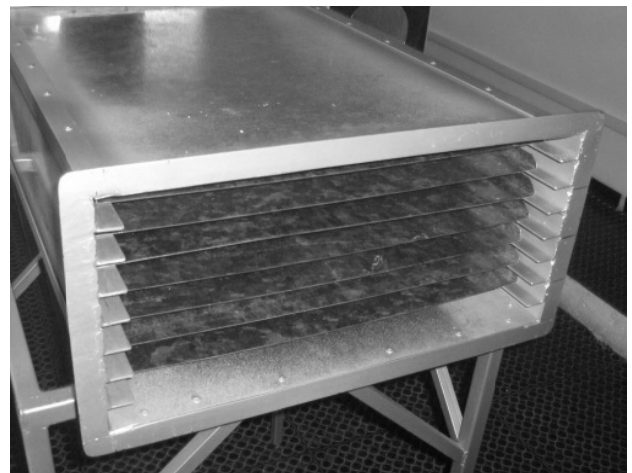
3.2 Segunda etapa del estudio

Con el diseño seleccionado se prosiguió con la construcción del prototipo para su posterior evaluación, y con el objetivo de confrontar los resultados obtenidos en la simulación con los que se obtuvieran con las mediciones.

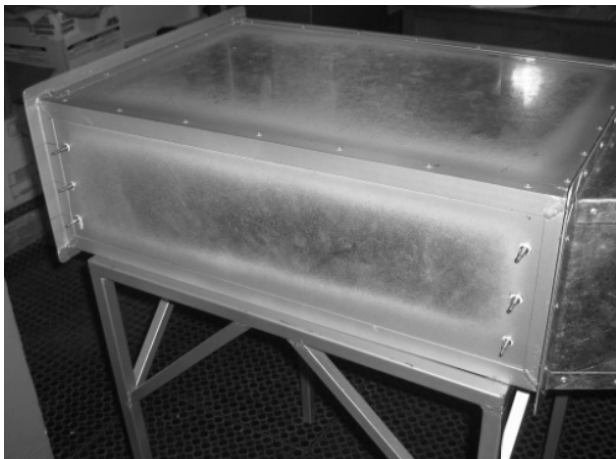




a)



b)



c)



d)

Figura 8. Fotografías del conducto construido. a) Frente. b) posterior. c) Lateral, lado para la toma de datos. d) Conducto acoplado con la unidad de aire acondicionado.

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 8a, 8b y 8c, se puede observar el conducto después de su construcción; en la figura 8c se observan los aditamentos para facilitar la medición de la caída de presión en las bandejas y en la figura 8d se puede ver el conducto acoplado a la unidad de aire acondicionado. En la figura 9 se muestra la distribución de los álabes que se seleccionaron, ya implementados en el prototipo.

En el conducto experimental, las propiedades que se midieron fueron su caída de presión y su

velocidad, empleando un manómetro diferencial y un anemómetro de turbina, respectivamente.

Cabe recalcar que antes de incorporar los álabes seleccionados, se realizaron pruebas al conducto sin restricción alguna; estas pruebas se hicieron con el anemómetro de turbina con la intención de corroborar el fenómeno de concentración del flujo, presentado en las simulaciones iniciales. Efectivamente, los resultados confirmaron la concentración del flujo: mientras en los extremos podíamos



Figura 9. Álabes seleccionados para la distribución del flujo.

Fuente: Elaboración propia

encontrar una velocidad promedio de 0,5 m/s a 20% de la capacidad del ventilador de la unidad de aire acondicionado, en el centro se presentaba una velocidad de hasta 3,8 m/s.

Ya con los álabes en el conducto, los datos obtenidos de velocidad del fluido sirvieron para realimentar la simulación del conducto en SW y, a su vez, con los resultados de esta, empleando la herramienta para el análisis de las propiedades del fluido en la simulación, se obtuvo la caída de presión del aire entre los mismos puntos en los que se tomaron los datos en el prototipo. Para el estudio de los resultados [9] se utilizó la hoja de cálculo Excel.

En la tabla 1 se pueden comparar los resultados obtenidos:

Tabla 1. Comparación entre medición y simulación.

Dial (%)	T _{bs} (°C)	ΔP promedio Simulado (Pa)	ΔP promedio Medido (Pa)
50	24	6,0681632	5,96179167 ± 0,0792
60	24,5	6,2414376	6,51131333 ± 0,0821
70	24,5	7,3757699	7,91103833 ± 0,1024

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla 1, los datos obtenidos de la simulación no son muy distantes de los que se pudieron obtener con los instrumentos en el laboratorio. Esto muestra que la herramienta de análisis de fluidos [1] puede facilitar la toma de decisiones, ya que permite realizar variaciones a cualquier modelo o prototipo que se fabrique, y permite evaluar tales variaciones, dando de esta forma una probabilidad más alta de tener resultados satisfactorios y aproximados a la realidad.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se logró obtener un diseño de conducto que facilita las medidas de la caída de presión del aire por bandejas metálicas, el cual es de fácil acoplamiento con la unidad de aire acondicionado A574 del laboratorio de térmicas de la Universidad Tecnológica de Pereira.
- Este diseño se logró llevar a cabo implementando las herramientas de [1], el cual facilitó la identificación de problemas, y de igual manera permitió experimentar diferentes distribuciones para su solución, permitiendo obtener una apreciación de la magnitud de la solución planteada.
- Se construyó un prototipo, para evaluar los resultados obtenidos en las simulaciones, y el cual sirvió para realimentar las simulaciones y acercarlas un poco más a las condiciones reales.
- De la validación de los datos obtenidos en la simulación se puede apreciar que el modelo matemático implementado por el programa [1], se aproxima a los datos que se pueden obtener en el proceso real, lo que lo convierte en una buena herramienta para el diseño y toma de decisiones, dando la posibilidad de realizar cambios y evaluarlos, sin un coste adicional.

REFERENCIAS

- [1] Cosmos, "COSMOSFloWorks SP3.0 Build: 498," 2007.
- [2] H. Sang, Y. Jeong, J. P. So *et al.*, "Characteristics on heat transfer at the high temperature state of cylindrical composite in turbulence flow," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 14, pp. 505-509, 2007.
- [3] T. Knopp, G. Lube, R. Gritzki *et al.*, "A near-wall strategy for buoyancy-affected turbulent flows using stabilized FEM with applications to indoor air flow simulation," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 194, no. 36-38, pp. 3797-3816, 2005.
- [4] Y. Cengel, and J. Cimbala, *Mecánica de fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*, Madrid: McGraw Hill, 2006.
- [5] P. J. Roache, *Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*, Albuquerque: Hermos, 1998.
- [6] L. Florez, O. Higuera, and J. Tristancho, "Diseño de un tanque de temple directo por medio de simulaciones en elementos finitos en cosmosfloworks," *Scientia et Technica*, vol. XIII, no. 36, pp. 291-296, 2007.
- [7] Cosmos, "COSMOSFloWorks Fundamentals: Fluid Flow Simulation Software," 2006.
- [8] Cosmos, *Introducing COSMOSFloWorks: Fluid Flow Simulation Software*, 2006.
- [9] P. Hilton, "Experimental operating and maintenance manual: Air conditioning laboratory," unit A574, P.A. HILTON LTD, 1995.