

Procedimiento para el cálculo de circuitos en el modelado del flujo en intercambiadores de calor de aletas y tubos

Edwin Córdoba-Tuta¹ y David Fuentes-Díaz²

Recepción: 21-05-2014 | Aceptación: 24-07-2014 | En línea: 30-01-2015

PACS: 07.05.Tp

doi:10.17230/ingciencia.11.21.6

Resumen

En este trabajo se presenta un procedimiento general para la simulación del comportamiento del flujo en los intercambiadores de tubos y aletas con una gran flexibilidad en el manejo de la información. Este procedimiento está basado en el uso de Programación Orientada a Objetos y específicamente al uso de C++, esto debido a todas las ventajas de este tipo de programación. La entrada de datos se lleva a cabo por medio de archivos, de forma que programas de terceros puedan generar la configuración del intercambiador y permitir calcular el intercambiador en forma paramétrica. Los resultados para el análisis se presentan en tres formatos diferentes: valores separados por comas (CSV), texto plano estructurado y autodocumentado (XML) y un formato para la visualización gráfica de resultados (VTK).

Palabras clave: circuitos; intercambiadores; aletas y tubos; grafos; modelado; simulación

¹ Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia, edwin.cordoba@upb.edu.co.

² Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, dfuentes@uis.edu.co.

Procedure for Calculating Circuits in the Modeling of Flow in fin-and-tube Heat Exchangers

Abstract

This paper presents a general method for simulating the flow behavior in the fin-and-tube heat exchangers with high flexibility in handling the information. This procedure is based on the use of Object-Oriented Programming and specifically using C++, this because of all the advantages of this type of programming. Data entry is carried out by files, so that third-party programs can generate configuration and permit calculation in parametric form. The results for the analysis are presented in three different formats: comma separated value (CSV), structured plain text and self-documenting (XML) and a graphical display of results (VTK).

Key words: circuits; heat exchangers; finned tubes; graphs; modeling, simulation

1 Introducción

La gran mayoría de estudios realizados a los intercambiadores de calor de aletas y tubos están enfocados en el cálculo analítico o experimental de correlaciones de los coeficientes de transferencia de calor y caída de presión tanto en el lado del aire como en el refrigerante. Como lo menciona Ding [1], hay un aspecto muy importante que se debe estudiar y que afecta el desempeño de estos tipos de intercambiadores, y es todo lo relacionado a factores como: geometría de la las aletas, arreglo de los tubos, tipo de fluidos y condiciones de operación. Ding hace referencia que los programas para el modelado de flujo en intercambiadores de aletas y tubos no solo deben ser eficientes y aproximados, sino debe tener además una alta flexibilidad para aplicar diferentes datos de entrada. Además a esta flexibilidad en el ingreso de los datos, hay que agregarle la flexibilidad de que los resultados generados puedan ser analizados en aplicaciones de terceros.

La metodología para el cálculo de los intercambiadores de tubos y aletas, empieza con el ingreso de la información, de forma que pueda aceptar las diferentes configuraciones de los intercambiadores de calor. Además de los datos de la geometría y topología del intercambiador, también debe incluir las correlaciones y correcciones que se aplicarán al modelo. Teniendo los datos e información de los modelos que se aplicarán, se deben realizar

los algoritmos para cálculo de propiedades de los fluidos, cálculo de caída de presión y cálculo del coeficiente de transferencia de calor independiente de la configuración realizada. El cálculo del flujo del intercambiador se realizará hasta encontrar los valores con la precisión esperada y por último se generan los resultados.

2 Estructura de información del intercambiador

La primera parte del trabajo consistió en estructurar la información que se va a introducir en los intercambiadores de calor. En este trabajo se usó la estructura de archivo autodocumentada XML para la entrada de datos. En el Cuadro de Código 1 se puede observar una plantilla de datos de entrada.

Código 1: Ejemplo plantilla ingreso de datos XML.

```
<?xml version="1.0" ?>
<documento progid="CalInter" version="0.1">
  <info nombre="Condensador" tipo="TubosAletas"/>
  <fluidos>
    ...
  </fluidos>
  <propiedades>
    ...
  </propiedades>
  <topologia>
    ...
  </topologia>
  <correlacion>
    ...
  </correlacion>
  <ajuste>
    ...
  </ajuste>
  <configuracion resolucion="5" />
</documento>
```

En la Figura 1 se muestra la estructura utilizada para representar la configuración de un intercambiador de calor de tubos y aletas. Los datos de ingreso se dividen en 7 categorías, que están contenidos dentro de una etiqueta raíz nombrada *documento*, la cual solo tiene dos atributos: *progid*, corresponde al nombre del programa que utilizará el documento, para diferenciarlo de cualquier otro documento en XML; *version*, indica la versión del programa para la cual se realizó el documento, con esto se busca tener compatibilidad para futuras versiones del programa.

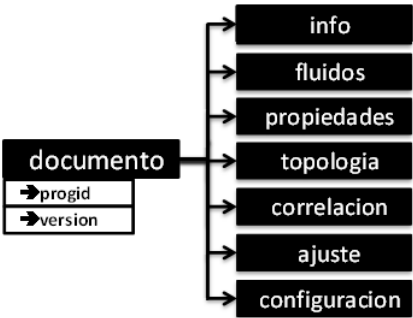


Figura 1: Estructura Documento

A continuación se describen cada una de las etiquetas contenidas en la etiqueta raíz “*documento*”.

Etiqueta “info”: En la etiqueta *info* se almacena la información propia y característica del intercambiador, esta información se divide en: *nombre*, indica la identificación característica al que hace referencia el intercambiador, puede ser cualquier cadena; *tipo*, corresponde al tipo de intercambiador de calor a ser analizado, por ejemplo *TubosAletas*, este dato es flexible previendo que en el futuro el programa pueda aceptar otros tipos de intercambiadores.

Etiqueta “fluidos”: En la Figura 2, se muestra la estructura usada para el manejo de la información de los fluidos. La etiqueta *interno* está relacionada con el refrigerante y la etiqueta *externo* se relaciona con el aire húmedo.

solo ingresará las etiquetas de la aleta seleccionada en el atributo id de la superficie como se muestra en la Figura 3.

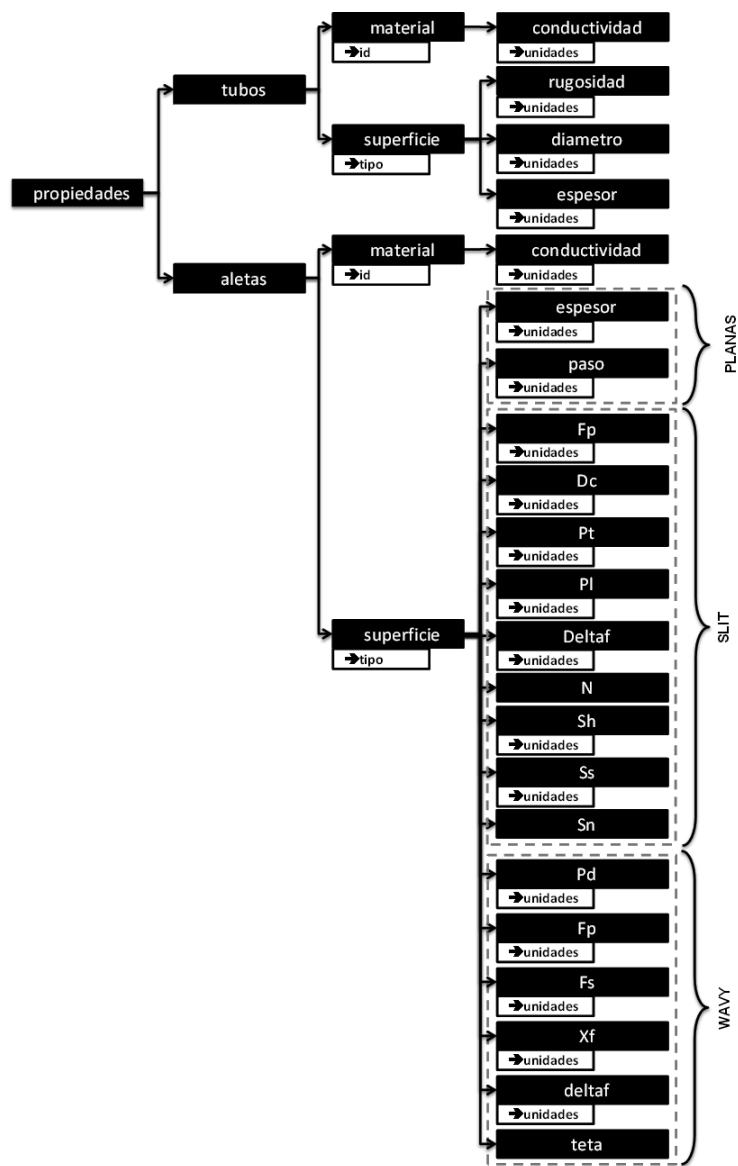


Figura 3: Estructura Propiedades

Etiqueta “topología”: Bajo esta etiqueta se almacena la información referente al conexionado de los tubos, tipo de arreglo y separaciones. La topología del intercambiador puede ser diversa y tener muchas alternativas que pueden hacer que el comportamiento del intercambiador de calor cambie drásticamente, es por eso que la representación de los datos almacenados en esta etiqueta debe ser flexible y capaz de representar cualquier interconexionado entre los tubos. En la Figura 4 se muestra cómo se representó la topología y se describe a continuación.

filas: número de filas del intercambiador.

columnas: número de columnas del intercambiador.

ancho: corresponde a la longitud de los tubos.

espaciamiento: en el atributo *tipo* se especifica la clase de arreglo (triangular o rectangular) y además se relaciona el valor del espaciamiento longitudinal y transversal.

circuitos: Para especificar los circuitos se divide en trayectos simples, es decir, que no tengan uniones o divisiones. Cada uno de los trayectos debe tener un *id* único, y dependiendo si es un trayecto inicial tiene un atributo *inicio* indicando si inicia en la parte frontal o en la parte posterior del intercambiador de calor. Si el trayecto es una unión de otro trayecto, tiene un atributo *conexion* indicando si la conexión es por el frente o por la parte posterior. Cada trayecto está compuesto por uniones donde se indica el incremento en las filas y las columnas, tal como se muestra en la Figura 4.

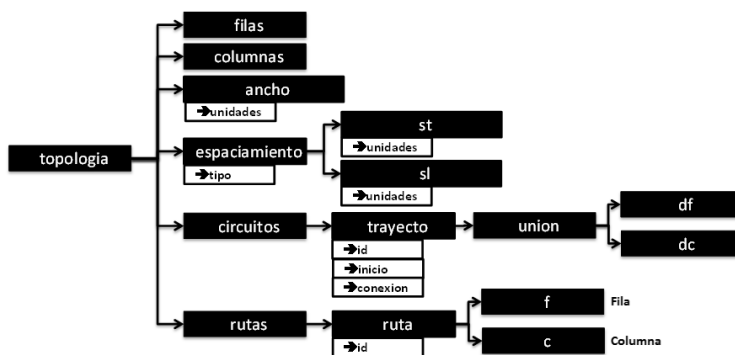


Figura 4: EstructuraTopologia

rutas: Para describir las rutas, se selecciona cada uno de los trayectos y se indica en qué tubo inicia. Esto puede realizarse como se muestra en la Figura 4, para cada etiqueta se le asigna un atributo *id* que está relacionado con un trayecto específico y con dos etiquetas que relacionan la columna y fila donde se aplica.

Etiqueta “correlación”: En esta etiqueta se almacenó la información sobre las correlaciones que se aplicarán al fluido interior y exterior. Además si el fluido tiene un cambio de fase se debe especificar la correlación para flujo bifásico, estas correlaciones son para el cálculo de la caída de presión y el cálculo de coeficiente de transferencia de calor. La estructura utilizada se observa en la Figura 5.

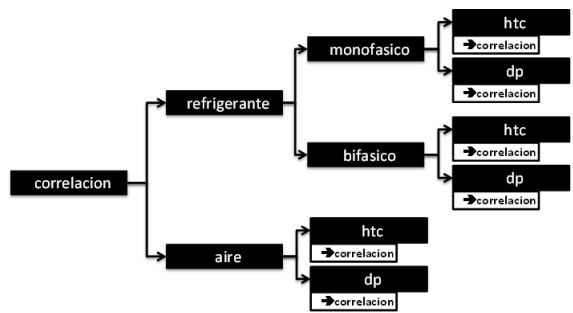


Figura 5: Estructura Correlación

Etiqueta “ajustes”: En esta etiqueta se guardan los ajustes que se le aplicarán a las correlaciones presentadas anteriormente, este factor es un valor que multiplicará al cálculo de cada uno de las correlaciones de forma independiente. El objetivo de este factor es ajustar o sintonizar la simulación, ver Figura 6.

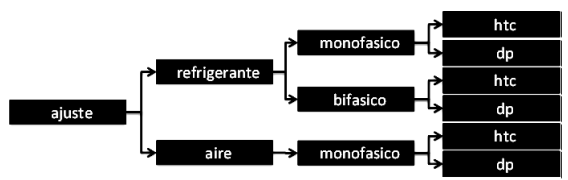


Figura 6: Estructura Ajustes

Etiqueta “configuracion”. En esta etiqueta se guarda las configuraciones propias del programa, como por ejemplo, puede ser el número de particiones que contendrá cada tubo, ver Figura 7, en donde existe un atributo resolución que indica el número de divisiones del tubo.



Figura 7: Estructura Configuración

3 Conexionado de los tubos

El cálculo del flujo del intercambiador de calor parte de la información suministrada por el archivo XML, y este cálculo se realiza a cada volumen de control siguiendo la misma dirección del flujo del refrigerante. Esta secuencia se puede realizar de diferentes formas, por ejemplo Ding [1] simplemente hizo uso de cuatro estructuras de datos para relacionar toda la información, mientras que Liu [2] hace uso de la teoría de grafos para relacionar la topología del intercambiador. El presente trabajo hace uso de la teoría de grafos de forma muy similar al trabajo de Liu, pero con ciertas modificaciones que le dan más flexibilidad, como es la mejora de los datos de la matriz adjunta, uso de una versión modificada de búsqueda de profundidad (en inglés DFS o Depth First Search) y que cada nodo y camino tiene su propia estructura de datos como se explica a continuación.

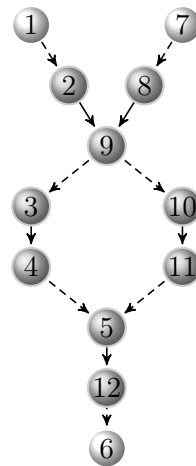
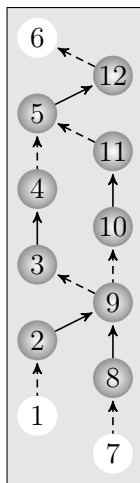
La representación de la interconexión de los tubos se realizó mediante grafos dirigidos. Considere, por ejemplo, que se tiene un simple intercambiador de calor como se muestra en la Figura 8a(a), donde los tubos están enumerados de abajo hacia arriba y de izquierda a derecha, y las líneas discontinuas representan que la conexión de los tubos se realiza en la parte posterior del intercambiador. Las conexiones de los tubos de este intercambiador están representadas mediante el grafo presentado en la Figura 8b(b). A partir de este grafo se genera una matriz adjunta del interconexionado de los tubos, posibilitando identificar la entrada del refrigerante. Como físicamente un tubo no puede ser conectado con si mismo, la conexión del tubo consigo relaciona el tubo como una entrada de refrigerante al intercambiador, haciendo uso de las reglas que se presentan a continuación.

si $(i \neq j)$

$$m_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{el tubo } i \text{ no está conectado con el tubo } j \\ 1 & \text{el tubo } i \text{ está conectado al tubo } j \text{ por la parte frontal} \\ -1 & \text{el tubo } i \text{ está conectado al tubo } j \text{ por la parte posterior} \end{cases}$$

si $(i = j)$

$$m_{i,i} = \begin{cases} 0 & \text{el tubo } i \text{ no es entrada} \\ 1 & \text{el tubo } i \text{ es entrada en la parte frontal} \\ -1 & \text{el tubo } i \text{ es entrada en la parte posterior} \end{cases}$$



(a) Esquema del intercambiador. (b) Grafo de conexión de tubos

Figura 8: Esquema del intercambiador y grafo equivalente

La matriz adjunta resultante se puede observar en la Figura 9, esta matriz siempre será simétrica y tendrá la información sobre, qué tubos están conectados y en cuál lado, lo que facilitaría ciertas operaciones como la generación de una visualización del intercambiador. Esta matriz adjunta se diferencia a la matriz adjunta propuesta por Liu, porque no es necesario crear dos tubos virtuales para considerar las entradas y salidas del intercambiador. Otra diferencia es que la matriz propuesta por Liu no es

simétrica y solo relaciona la conexión con el siguiente tubo. Jiang [3] también trabaja con una matriz adjunta, pero esta matriz no es cuadrada y lo que relaciona son las uniones de los tubos.

Existen otros métodos para la relación de los conexiones de los tubos como es el propuesto por Kuo [4], el cual está basada en una matriz de 4 índices y cada uno de estos índices puede tener valores de 0 hasta 6 que representa una condición en especial. La implementación de este método sería más complicada y rígida, que la presentada en este trabajo.

$$M = \begin{matrix} & \overbrace{\begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \end{matrix}}^{\text{Tubos}} \\ \left[\begin{array}{cccccccccccc} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] & \left. \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \end{matrix} \right\} \begin{matrix} \text{Tubos} \end{matrix}$$

Figura 9: Matriz adjunta

La matriz adjunta presentada en la Figura 9 es muy práctica para obtener información de las conexiones de los tubos y ubicación de la conexión. Pero esta matriz adjunta no permite determinar, de forma eficiente, los tubos donde se presentan singularidades en el flujo del refrigerante. Estas singularidades pueden ser: puntos de convergencia, donde se unen el flujo de dos o más tubos; puntos de divergencias, donde el flujo del refrigerante se divide en dos o más tubos; puntos de entrada, son los tubos donde ingresa el refrigerante al intercambiador; puntos de salida, son los tubos donde el refrigerante sale del intercambiador.

El cálculo del flujo del intercambiador es realizado siguiendo la dirección del flujo del refrigerante entre los posibles caminos que unen los puntos de singularidad. Para realizar esto se usa un nuevo grafo de conexiones de los caminos, que para el ejemplo ya presentado, el grafo resultante se muestra en la Figura 10.

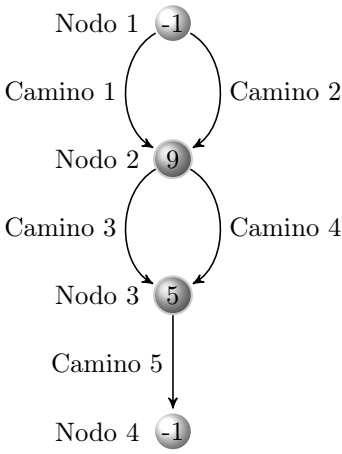


Figura 10: Grafo de conexionado de los caminos

En este grafo los nodos están asociados a las singularidades, y los caminos¹ están asociados a las uniones de estas singularidades. Siempre debe existir por lo menos dos nodos, uno de entrada y el otro de salida, que para diferenciarlos, son asociados a un tubo inexistente -1. En la implementación, el grafo se asocia a un puntero de un nodo que apunta al nodo de entrada, para el ejemplo es el nodo 1 de la Figura 10. Los nodos donde se presenta una divergencia o convergencia del flujo, están asociados al tubo donde esto ocurre, para el ejemplo seleccionado serían los tubos 5 y 9, como se muestra en la Figura 10.

En el ejemplo ya presentado y haciendo uso del grafo de la Figura 10, los caminos quedan identificados por la siguiente secuencia de tubos:

- Camino 1:** 1 → 2 → 9
- Camino 2:** 7 → 8 → 9
- Camino 3:** 9 → 3 → 4 → 5
- Camino 4:** 9 → 10 → 11 → 5
- Camino 5:** 5 → 12 → 6

En la Figura 11, se muestra la estructura del nodo, que tiene asociado ciertos valores. *Tubo* hace referencia al número del tubo, *Presión* está relacionada con la presión de entrada en el tubo, *Entalpía* es el valor de la

¹unión consecutiva de tubos donde el flujo másico del refrigerante es constante.

entalpía específica a la entrada del tubo, *Factor de flujo* es la fracción de flujo con respecto al total que entra al tubo, además la estructura tiene dos listas de punteros de caminos, la lista *entrada* hace referencia a los caminos que entran al nodo y la lista *salida* hace referencia a los caminos que salen del nodo.

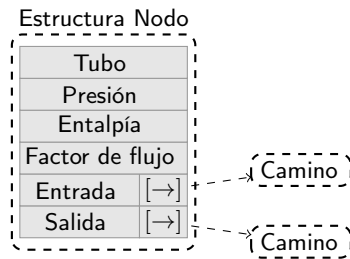


Figura 11: Estructura de datos para el nodo

En la Figura 12, se muestra la estructura camino, que está asociada a la conexión de los nodos. Esta estructura tiene asociada ciertos valores. El puntero *inicio* hace referencia al nodo de entrada, el puntero *fin* hace referencia al nodo de salida, *Tubo inicial* indica el primer tubo al que se une el nodo, *Presión salida* es la presión de salida del camino, *Entalpía salida* es el valor de la entalpía específica de salida del camino, *Factor de flujo* es la fracción de flujo con respecto al total que entra al tubo y *Calculado?* indica si ya se realizó el cálculo de ese camino (usado para las rutinas de los grafos).

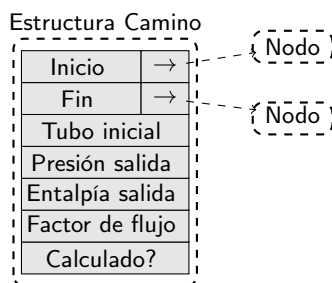


Figura 12: Estructura de datos para el camino

El cálculo del intercambiador de calor haciendo uso del grafo de la Figura 10 y las estructura de datos de las Figuras 11 y 12, está basado en una versión modificada de búsqueda de profundidad, que para el ejemplo con que se está trabajando se procede de la forma que se explica a continuación. El grafo está identificado con un puntero al nodo de entrada, para este caso

es el nodo 1 y se aplica el algoritmo DFS a cada uno de los nodos, hasta llegar al nodo de salida. El nodo 1 tiene dos caminos de salida: el camino 1 y el camino 2, según el algoritmo DFS, el cálculo se realiza siguiendo las siguientes rutas:

$$\begin{aligned} &Camino\ 1 \rightarrow Camino\ 3 \rightarrow Camino\ 5 \\ &Camino\ 2 \rightarrow Camino\ 3 \rightarrow Camino\ 5 \end{aligned}$$

En la estructura camino presentado en la Figura 12, bajo la variable *presion salida*, queda guardada la presión de salida de cada camino, entonces se calcula la caída de presión por cada una de las rutas y se ajusta el flujo másico por cada una de las rutas de forma que la caída de presión por cada una de las rutas sean aproximadamente iguales. El nuevo valor del flujo luego es asociado a la variable *Factor de flujo* perteneciente a la estructura camino mostrada en la Figura 12. Este mismo proceso se realiza en los siguientes nodos. Para el nodo 2 las rutas por las que se calcula son:

$$\begin{aligned} &Camino\ 3 \rightarrow Camino\ 5 \\ &Camino\ 4 \rightarrow Camino\ 5 \end{aligned}$$

En el nodo 2, se realiza los mismos cálculos realizados para el nodo 1. En el nodo 3 solo va a consistir de una sola ruta que corresponde a:

$$Camino\ 5$$

Como el nodo 3 solo tiene una ruta de salida, no tendrá ajuste para el flujo. El nodo 4 es el nodo de salida y no es usado para los cálculos.

4 Generación de resultados

Los resultados son presentados en varios formatos, estos formatos son: valores separados por comas (CSV), texto plano estructurado y autodocumentado (XML) y un formato para la visualización gráfica de resultados (VTK).

Por medio de la Programación Orientada a Objetos y haciendo uso de la biblioteca VTK[®] para visualización, se obtiene la presentación de los resultados como se muestra en la Figura 13.

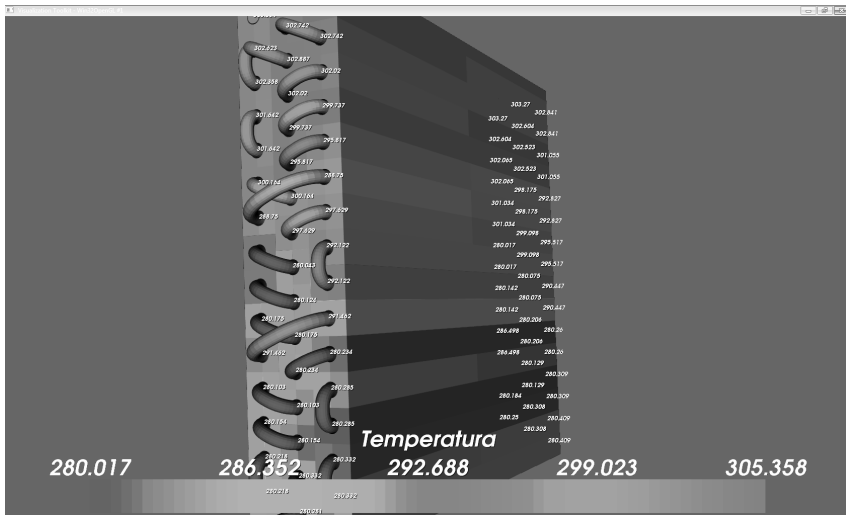


Figura 13: Visualización usando VTK

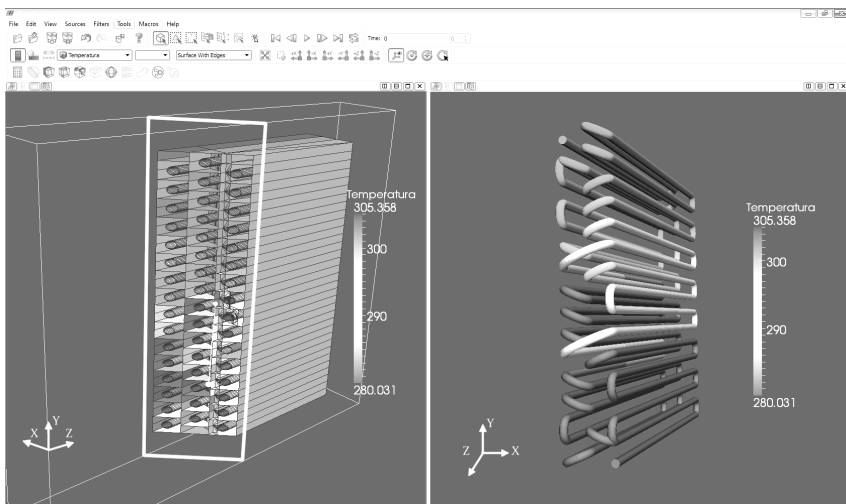
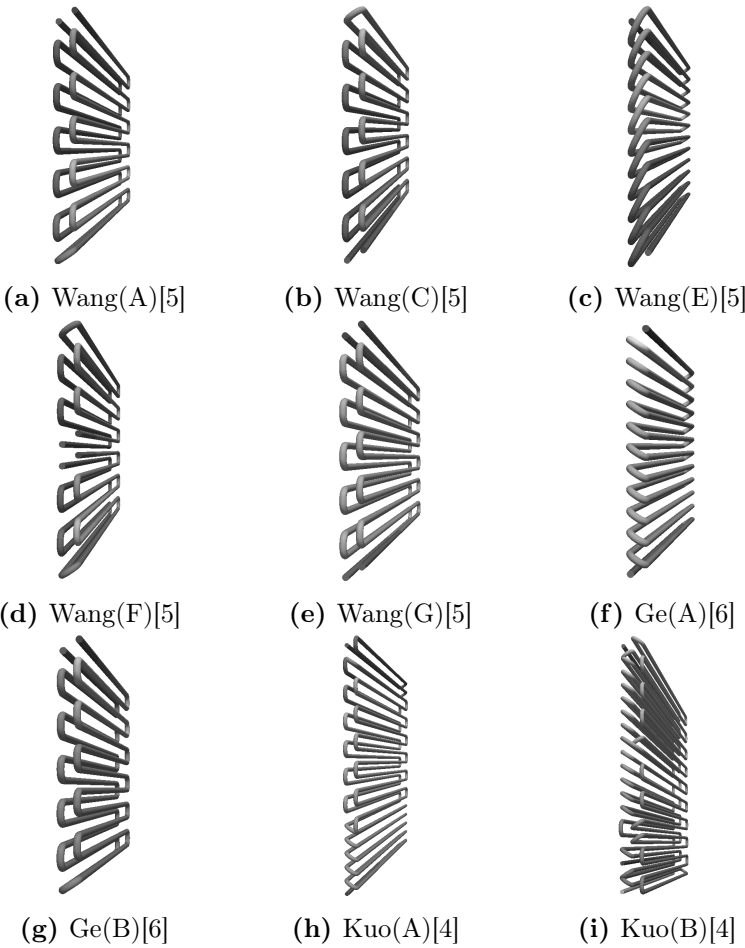


Figura 14: Visualización usando Paraview

Además después de haberse generado los resultados en formato VTK, se puede hacer uso de programas de terceros para análisis y visualización de los resultados como se muestra en la Figura 14, en el cual se usa el software Paraview[®], que permite tanto la visualización como el análisis de resultados.

5 Validación de los resultados

Inicialmente se validó la metodología para simular cualquier tipo de circuitos. Estos resultados se muestran en la Figura 15, donde se presentan la representación de varios circuitos encontrados en la literatura.



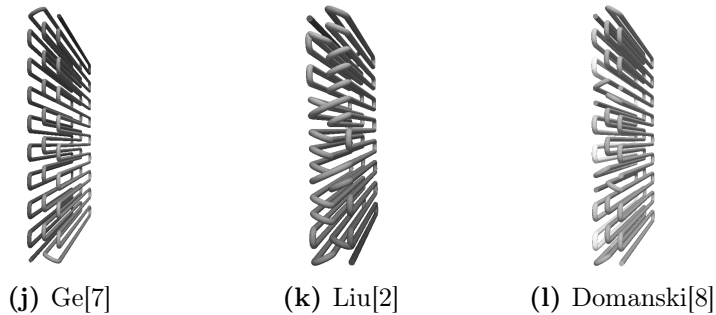


Figura 15: Ejemplos de circuitos validados.

De la misma forma que lo hizo Ge [6], los resultados se validaron con los datos experimentales encontrados en la literatura y específicamente con el trabajo realizado por Lee [9]. En este trabajo se usaron dos configuraciones de circuitos tipo U y tipo Z como se muestra en la Figura 16, y las características físicas del intercambiador están detalladas en la Tabla 1.

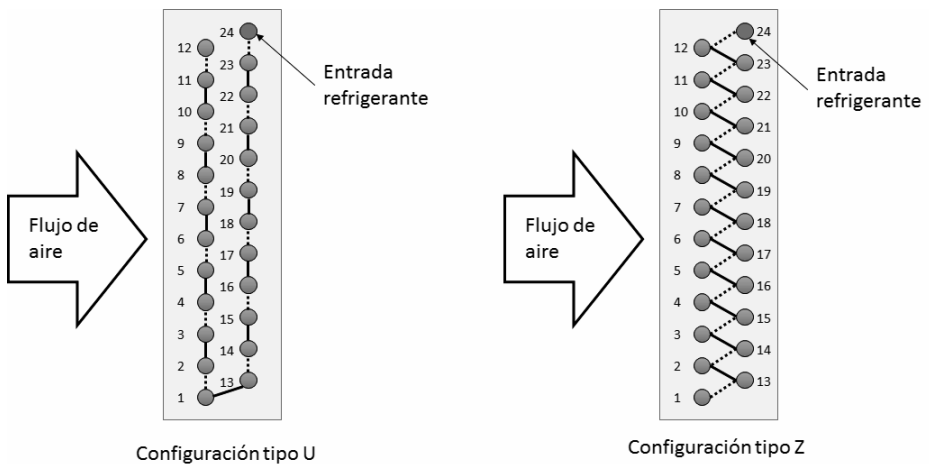


Figura 16: Configuración de los circuitos utilizados en las pruebas.

Tabla 1: Dimensiones del intercambiador.

| | |
|-----------------------|--------------------|
| Diámetro externo | 9,52 mm |
| Diámetro interno | 8,8 mm |
| Paso de las aletas | 6,14 aletas por cm |
| Espesor de las aletas | 0,105 mm |
| Tipo de las aletas | Slit |
| Longitud de los tubos | 410 mm |
| Altura | 305 mm |
| Profundidad | 38,1 mm |

En total se seleccionaron 8 pruebas diferentes usando *R22* como refrigerante. Para cada uno de estos casos se generó un archivo con la información respectiva y se ajustó el modelo hasta obtener los valores en el rango adecuado, el resumen comparativo de cada uno de estos casos se aprecia en la Tabla 2.

Tabla 2: Comparación de los resultados.

| Circuito | $T_{ref,ent}$ [°C] | $P_{ref,ent}$ [MPa] | \dot{m}_{ref} [kg/h] | $V_{a,ent}$ [m/s] | $T_{a,ent}$ [°C] | Q_{exp} [kW] | Q_{sim} [kW] | $Desvio\ Q_{sim}$ [kW] |
|----------|-----------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| Z | 88,1 | 1,69 | 52,0 | 1,20 | 22,1 | 3,08 | 3,074 | -0,006 |
| Z | 88,9 | 1,66 | 60,0 | 1,68 | 21,0 | 3,96 | 3,640 | -0,32 |
| Z | 88,5 | 1,65 | 61,0 | 1,68 | 21,1 | 3,96 | 3,648 | -0,312 |
| Z | 90,2 | 1,67 | 62,0 | 1,68 | 21,1 | 3,96 | 3,733 | -0,227 |
| U | 97,4 | 1,68 | 54,0 | 1,28 | 23,2 | 3,07 | 3,307 | 0,237 |
| U | 73,1 | 1,64 | 60,0 | 1,61 | 23,5 | 3,37 | 3,351 | -0,019 |
| U | 90,2 | 1,67 | 61,0 | 1,63 | 23,9 | 3,39 | 3,582 | 0,192 |
| U | 94,4 | 1,94 | 62,0 | 1,63 | 23,5 | 3,48 | 3,730 | 0,25 |

En la Figura 17 se muestra los porcentajes de error para cada una de las pruebas en donde se puede observar que los errores son menores a $\pm 10\%$.

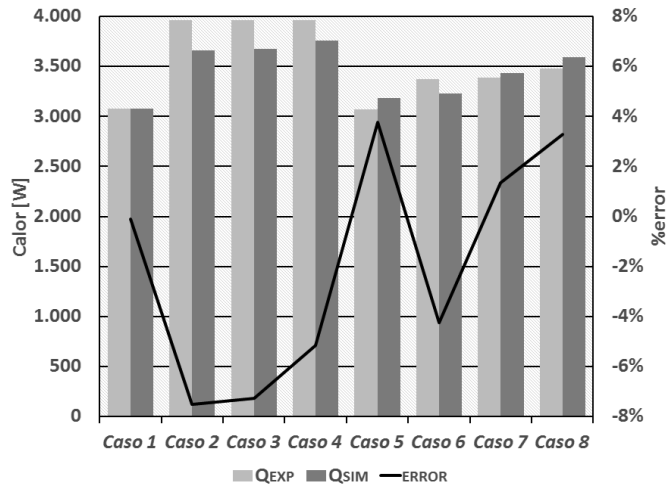


Figura 17: Comparación de los datos simulados con los datos experimentales

6 Conclusiones

Se comprobó la eficiencia del procedimiento para la simulación de intercambiadores de calor de tubos y aletas, el cual permitió el ingreso de datos en forma flexible, para diferentes condiciones de operación y geometría. Los datos del intercambiador y las condiciones de operación fueron almacenados en archivos XML, usando las etiquetas descritas en este trabajo. Fue posible configurar propiedades del tubo y aletas, fluido interno y externo, condiciones de operación, rutas y correlaciones a aplicar para el cálculo de caída de presión y coeficiente de transferencia de calor. Los resultados generados se obtuvieron en tres formatos diferentes; texto separado por comas (CSV), texto etiquetado (XML) y archivos de Paraview® (VTK). Para probar el procedimiento se hizo pruebas con datos experimentales que han sido reportados en la literatura, donde los errores encontrados fueron menores del $\pm 10\%$.

En forma general la mayoría de investigadores consultados realizan el cálculo de las propiedades termodinámicas de los fluidos por medio del software REFPROP®. El alcance de este artículo no pretendía mostrar el modelo usado, pero está basado en el trabajo de Fuentes [10].

Referencias

- [1] W. K. Ding, J. F. Fan, Y. L. He, W. Q. Tao, Y. X. Zheng, Y. F. Gao, and J. Song, "A general simulation model for performance prediction of plate fin-and-tube heat exchanger with complex circuit configuration," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 16, pp. 3106–3116, 2011. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431111000706> 116, 123
- [2] J. Liu, W. Wei, G. Ding, C. Zhang, M. Fukaya, K. Wang, and T. Inagaki, "A general steady state mathematical model for fin-and-tube heat exchanger based on graph theory," *International Journal of Refrigeration*, vol. 27, no. 8, pp. 965–973, 2004. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700704001240> 123, 131
- [3] H. Jiang, V. Aute, and R. Radermacher, "CoilDesigner: a general-purpose simulation and design tool for air-to-refrigerant heat exchangers," *International Journal of Refrigeration*, vol. 29, no. 4, pp. 601–610, 2006. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700705001970> 125
- [4] M. C. Kuo, H. K. Ma, S. L. Chen, and C. C. Wang, "An algorithm for simulation of the performance of air-cooled heat exchanger applications subject to the influence of complex circuitry," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 1–9, 2006. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431105001468> 125, 130
- [5] C.-C. Wang, J.-Y. Jang, C.-C. Lai, and Y.-J. Chang, "Effect of circuit arrangement on the performance of air-cooled condensers," *International Journal of Refrigeration*, vol. 22, no. 4, pp. 275–282, 1999. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700798000656> 130
- [6] Y. Ge and R. Cropper, "Air-cooled condensers in retail systems using R22 and R404A refrigerants," *Applied Energy*, vol. 78, no. 1, pp. 95–110, 2004. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261903001557> 130, 131
- [7] Y. T. Ge and R. T. Cropper, "Simulation and performance evaluation of finned-tube {CO₂} gas coolers for refrigeration systems," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, no. 5–6, pp. 957–965, 2009. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431108002214> 131

- [8] W. Payne and P. Domanski, “Potential Benefits of Smart Refrigerant Distributors: Final Report,” Air-Conditioning and Refrigeration Technology Institute, Arlington, Tech. Rep., 2002. [Online]. Available: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build02/PDF/b02130.pdf> 131
- [9] J. H. Lee, S. W. Bae, K. H. Bang, and M. H. Kim, “Experimental and numerical research on condenser performance for R-22 and R-407C refrigerants,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 25, no. 3, pp. 372–382, 2002. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700701000123> 131
- [10] D. Fuentes, J. Chacón, and O. Gelvez, “Estrategias de cálculo de intercambiadores de calor por medio del método de los volúmenes finitos. parte 1: desarrollo de la formulación.” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 7, no. 2, pp. 139–151, 2009. [Online]. Available: <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/45> 133