

CARACTERIZACIÓN MATEMÁTICA DEL REFRIGERANTE R134A PARA LA EVALUACIÓN NUMÉRICA DE EVAPORADORES

MATHEMATICAL CHARACTERIZATION OF REFRIGERANT R134A FOR THE NUMERICAL EVALUATION OF EVAPORATORS

Iván Alonso García Reyes

Tecnológico Nacional de México en Celaya
ivanalonsogr@gmail.com

Mauricio de Alba Rossano

Mabe TyP
mauricio.dealba@mabe.com.mx

José Martín Medina Flores

Tecnológico Nacional de México en Celaya
martin.medina@itcelaya.com.mx

Resumen

En este documento, se presenta un enfoque integral para acelerar los cálculos de las propiedades termofísicas del refrigerante R134a, que incluye las formas funcionales de la parametrización y aspectos de la implementación numérica aplicados a la simulación de componentes en sistemas de refrigeración por compresión de vapor. Son presentadas un conjunto de expresiones polinomiales que permiten la aproximación de las propiedades termofísicas del fluido en regiones definidas (líquido saturado, vapor saturado y zona bifásica). Las propiedades del refrigerante se calculan a lo largo de las líneas de saturación como una función de la temperatura, en un rango que comprende desde los -10 hasta los -40 °C. "Los resultados de la caracterización matemática del fluido son evaluadas a través de la simulación numérica de evaporadores con flujo bifásico bajo dos diferentes criterios, el primero resuelve el modelo del intercambiador empleando la aproximación polinomial de las propiedades y el segundo toma los datos del refrigerante directamente de la base de datos estándar NIST REFPROP 2010, presentando un porcentaje de error relativo entre los dos enfoques de cálculo menor al 6%.

Palabra(s) clave: códigos, evaporadores, flujos bifásicos, polinomios, R134a.

Abstract

In this paper, an integral approach for speeding up thermophysical property calculations is presented, which includes the functional forms of the parameterization and the numerical implementation aspects applied to simulation of components in compression vapor refrigeration systems. A set of polynomial functional forms are presented that allow for approximation of all the thermophysical properties of the working fluid in defined regions (saturated liquid, saturated vapor, and two-phase zone) The properties of the refrigerant are calculated along the saturation lines as a function of temperature, in a range from -10 to -40 °C. The results of the mathematical characterization of the fluid are evaluated through the numerical simulation of evaporators with two-phase flow under two different criteria, the first solves the model of the exchanger using the polynomial approximation of the properties and the second one takes the data from the refrigerant directly from the standard database NIST REFPROP 2010, presenting a percentage of relative error between the two calculation approaches less than 6%.

Keywords: codes, evaporators, polynomial, R134a two – phase flow.

1. Introducción

La industria de la producción de frío industrial exige un amplio uso de la simulación numérica para el diseño, la optimización y el control de sistemas térmicos. El mercado energético está influenciado principalmente por la reducción de costos en la producción de energía y altos estándares de eficiencia (Ashra Handbook., 1997). Con la ayuda de herramientas de simulación, es posible evaluar la fenomenología de la transferencia de calor en equipos de refrigeración haciendo uso de ordenadores digitales en lugar de implementar instalaciones físicas y ejecutar costosas pruebas en el laboratorio (Belman., 2008). En este sentido y ante la necesidad de disponer de equipos térmicos óptimos, el papel de los intercambiadores de calor (evaporadores y condensadores) adquiere una gran

importancia en lo referente al comportamiento térmico y fluido dinámico de la instalación global de un sistema de refrigeración por compresión de vapor (Lockhart., Martinelli., 1994).

Para la evaluación numérica de intercambiadores, es deseable disponer de un método preciso y computacionalmente beneficioso para simular diferentes propiedades termodinámicas del fluido de trabajo con el objetivo de agilizar la simulación y optimizar los recursos de cómputo. La precisión y la velocidad de cálculo de las propiedades juegan un papel vital en las simulaciones del ciclo de refrigeración, esto es particularmente importante para situaciones que involucran flujo bifásico dentro de tubos, como es el caso de una gran cantidad de intercambiadores de calor (Kandlikar., 1990., Valladares., 2000., & Aute., Radermacher., 2014). El protocolo de Montreal (1995) alienta el uso del refrigerante R134a en aplicaciones de refrigeración. El cual tiene un GWP de 1430, un potencial de agotamiento de la capa de ozono nulo y un potencial de acidificación prácticamente insignificante (Lavrenchenk et al., 1992. & Rowland., Molina., 1974), por tal motivo el presente texto centra su atención en la parametrización matemática del refrigerante R134a.

2. Métodos

El objetivo de este trabajo de investigación es desarrollar e implementar un criterio numérico, el cual permita realizar simulaciones unidimensionales y en estado estacionario del comportamiento térmico y fluido dinámico de evaporadores con flujo bifásico. Las propiedades termofísicas del refrigerante, son evaluadas a través de una serie de polinomios que representan las condiciones de saturación del fluido dentro de un rango de temperatura definido. Es utilizada la técnica “STEP BY STEP” (Escanes et al., 1995., Y García., Valladares., et al 2000), para la modelación y simulación numérica de evaporadores con flujo bifásico, en sus trabajos de investigación se hace una descripción detallada de la misma, la información aquí presentada no pretende un plagio sino un reconocimiento a su trabajo. La principal aportación en este algoritmo es la caracterización de las propiedades termofísicas del refrigerante a través de polinomios que aceleran la

solución del mismo. Cabe mencionar que el modelo presentado en este texto solo resuelve la zona con flujo de fluido refrigerante, y no soluciona la conducción de calor en las paredes del ducto ni la evolución de la temperatura en el aire exterior del intercambiador. Las ecuaciones de transporte que rigen el flujo del fluido del modelo propuesto son las ecuaciones de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento y de la energía, las cuales son integradas sobre volúmenes de control finitos (Patankar.,1988). La figura 1 muestra un volumen de control característico, de sección transversal constante, donde “i” e “i+1” representan las secciones de entrada y salida respectivamente.

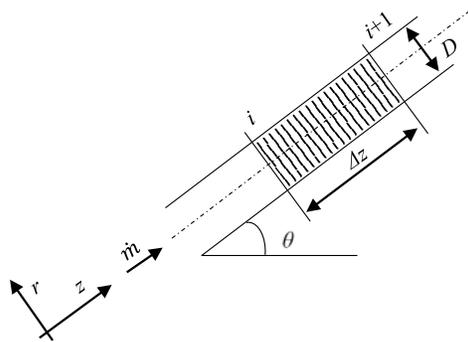


Figura 1 Flujo dentro de un volumen de control característico.

Las ecuaciones básicas requeridas para el análisis son:

- Conservación de masa ecuación 1.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{v_c} \rho dV + \int_{s_c} \rho \vec{v} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (1)$$

- Conservación de cantidad de movimiento ecuación 2.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{v_c} \vec{v} \cdot (\rho dV) + \int_{s_c} \vec{v} (\rho \vec{v} \cdot d\vec{S}) = \vec{F}_{sup} + \int_{v_c} \vec{B} (\rho dV) \quad (2)$$

- Conservación de la energía ecuación 3.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{v_c} \left(h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right) \rho dV + \int_{s_c} \left(h + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \right) \rho \vec{v} \cdot d\vec{S} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (3)$$

Algoritmo de solución

En cada volumen de control, las variables de flujo en la sección de salida (i+1) son obtenidas resolviendo de manera iterativa el conjunto de ecuaciones

discretizadas espacialmente que gobiernan el flujo de fluido en el evaporador, partiendo de valores prestablecidos en la sección de entrada (i). En cada volumen de control las ecuaciones se resuelven iterativamente hasta que se verifique el criterio de convergencia de la ecuación 4.

$$\left| \frac{(Tr_{i+1} + Trr_{i+1})}{2} \right| < 0.00001 \quad (4)$$

Donde Tr hace referencia al valor de la temperatura del refrigerante calculado por el modelo, Trr representa a un valor de la temperatura supuesto al inicio del cálculo y el subíndice “ $i+1$ ” nos indican la posición de la malla en donde es evaluada dicha variable. La figura 2 presenta el diagrama esquemático del proceso de solución del modelo numérico del evaporador.

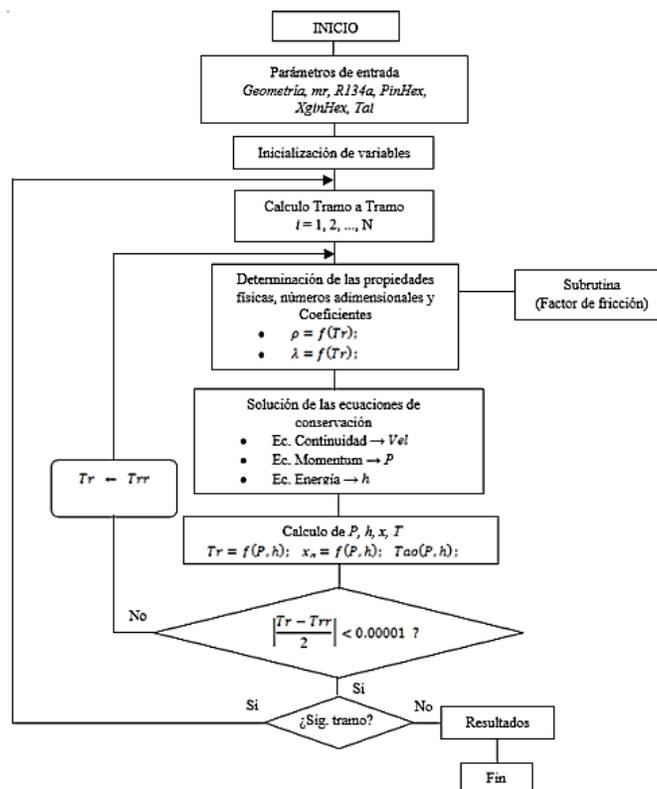


Figura 2 Algoritmo de solución del método STEP BY STEP.

Caracterización matemática del refrigerante R134a

La solución del algoritmo numérico requiere información relativa a las propiedades termofísicas del refrigerante R134a. Las expresiones matemáticas

usadas para calcular las propiedades a lo largo de las líneas de saturación como una función de la temperatura, son definidas para un rango que va desde los -10 hasta los -40 °C. El comportamiento de estos modelos se compara y analiza con los datos obtenidos de la base de datos estándar del NIST REFPROP (22 de diciembre de 2010). El área explorada es el diagrama termodinámico que incluye las regiones tanto de líquido saturado como vapor saturado y la zona de flujo bifásico.

En las figuras 3 y 4 es posible observar las curvas que describen la tendencia física de una propiedad determinada. Para caracterizar las propiedades dependientes exclusivamente de la temperatura del refrigerante, se ha obtenido su ecuación a través de una aproximación polinomial, que se ajusta a la distribución de puntos mostrada en los gráficos.

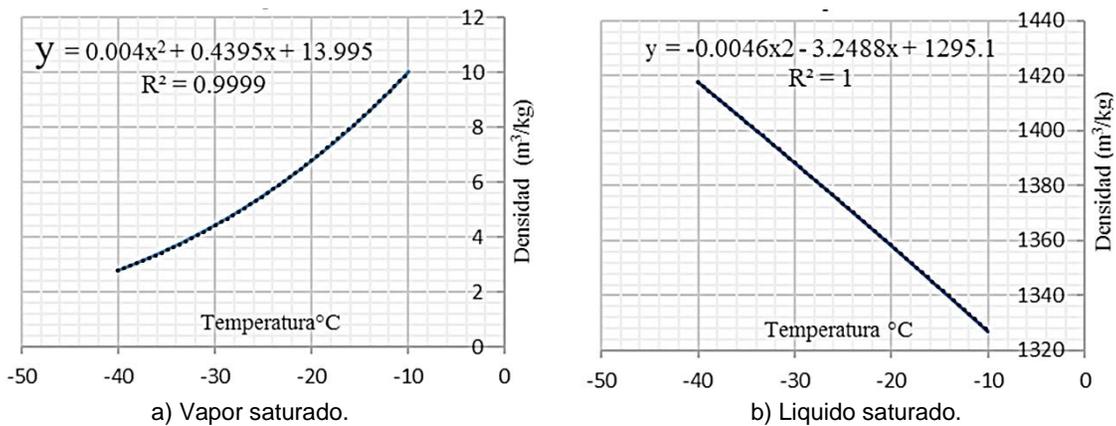


Figura 3 Curva característica de densidad del refrigerante R134a saturado.

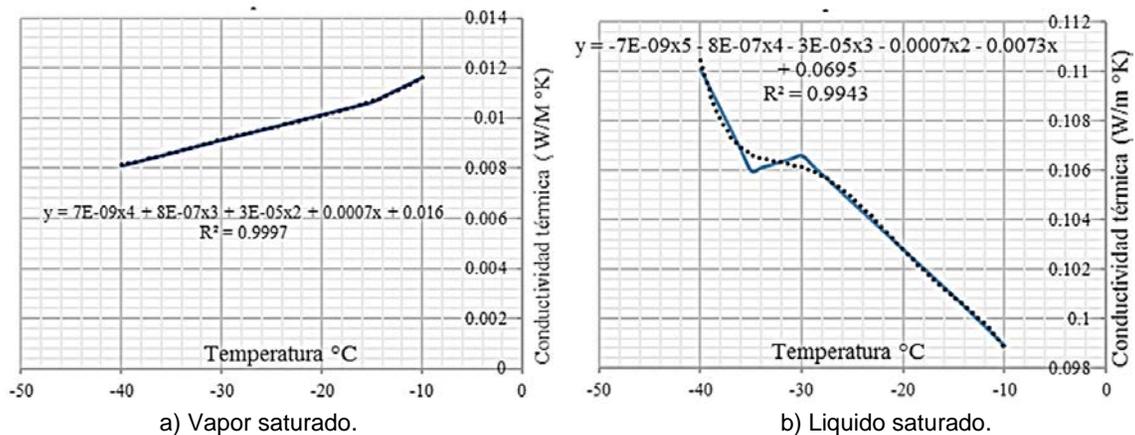


Figura 4 Curva característica de conductividad térmica del refrigerante R134a saturado.

Este proceso se ha realizado similarmente para las propiedades termofísicas más representativas del refrigerante, obteniendo los siguientes polinomios característicos:

- Entalpía fase líquida ecuación 5.

$$h_l = 0.001[Tr]^2 + 1.3366[Tr] + 199.96 \quad (5)$$

- Entalpía fase gaseosa ecuación 6.

$$h_g = 0 - 6227[Tr] + 398.98 \quad (6)$$

- Viscosidad cinemática fase líquida ecuación 7.

$$v_l = 6 \times 10^{-08}[Tr]^2 - 3 \times 10^{06}[Tr] + 0.0003 \quad (7)$$

- Viscosidad cinemática fase gaseosa ecuación 8.

$$v_g = 9 \times 10^{-10}[Tr]^2 - 2 \times 10^{07}[Tr] + 8 \times 10^{06} \quad (8)$$

- Calor específico fase líquida ecuación 9.

$$Cp_l = -4 \times 10^{-07}[Tr]^6 - 6 \times 10^{-05}[Tr]^5 - 0.0028[Tr]^4 - 0.0595[Tr]^3 - 0.2861[Tr]^2 + 9.5489[Tr] + 1417.9 \quad (9)$$

- Calor específico fase gaseosa ecuación 10.

$$Cp_g = 0.0163[Tr]^2 + 4.2913[Tr] + 894.33 \quad (10)$$

Un caso especial son aquellas propiedades que están en función de dos parámetros independientes, la base de datos generada por los valores del refrigerante en un rango definido arroja un gráfico tridimensional (figuras 5 y 6), con la intención de caracterizar la distribución de puntos dentro del plano, se ha resuelto la ecuación del mismo seleccionando aleatoriamente tres puntos que existen dentro del plano y empleando formulación vectorial, obteniendo así la expresión de la entalpía del refrigerante en función de la calidad y presión (zona bifásica) ecuación 11.

$$h(x_g, p) = \frac{26175.699[x_g] - 18.36[p] + 1206.47385}{127.0665} \quad (11)$$

La parametrización del refrigerante se implementa como un código de computadora, lo que facilita la generación rápida de curvas de ajuste que modelan el comportamiento termodinámico de las propiedades del fluido de trabajo R134a.

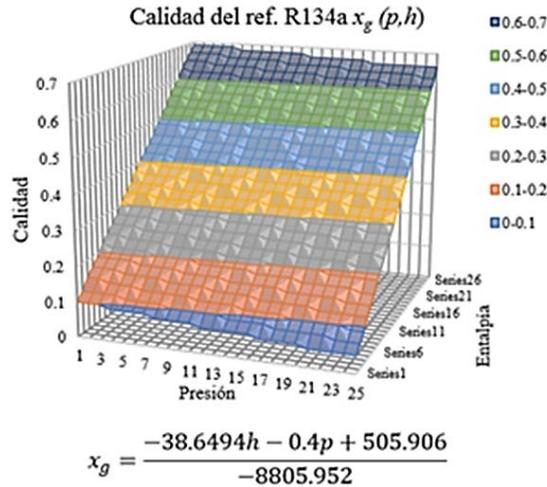


Figura 5 Plano característica de la calidad del refrigerante R134a en función de p-h.

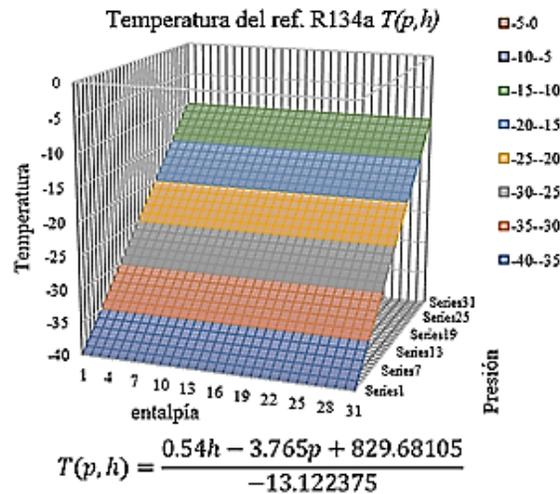


Figura 6 Plano característica de la temperatura del refrigerante R134a en función de p-h.

3. Resultados

En la tabla 1 se presenta el caso de estudio empleado, para la evaluación de las propiedades termofísicas del refrigerante. Se ha elegido un modelo de intercambiador de calor de volumen finito (Esacnes et al., 2008). para evaluar la precisión en el cálculo del refrigerante dentro del entorno de la simulación numérica del componente. Parámetros como la calidad del refrigerante, caída de presión y el coeficiente de transferencia de calor, generalmente requieren de todas las propiedades y, por lo tanto, son una buena métrica para caracterizar las desviaciones locales así como cualquier error acumulado. Este modelo ha sido

analizado bajo el enfoque polinomial propuesto en la sección anterior y empleando la base de datos NIST REFPROP disponible en el software EES.

Tabla 1 Datos de entrada del modelo para un evaporador tipo spine finned.

Caso de estudio:	Geometría del evaporador	
	Evaporador: <i>Spine Fined</i>	
Patente: US5241840A US Grant		
Fluido de trabajo: R134a		
Volúmenes de control	n:	100
Longitud del HEX [m]	L:	7.5
Incremento de longitud, [m]	Δx :	0.075
Conductividad del tubo (usualmente Al) [W/m k]	k:	211
Radio interior del tubo [m]	ri:	0.004
Radio exterior del tubo [m]	ro:	0.004762
Sección transversal del tubo [m ²]	S:	5.02655e-005
Área interior de intercambio de calor. [m ²]	Ai:	0.00188496
Aceleración debida a la gravedad, [m/s ²]	g_a:	9.81
Flujo másico de refrigerante [kg/s]	mr:	0.0008085
Flujo de refrigerante por unidad de área, [kg/m ² *s]	G:	16.0846
temperatura a la entrada del HEX, lado aire [°C]	Tai:	-17
temperatura a la salida del HEX, [°C]	TOutHEX:	-25.4306

Los resultados obtenidos con los diferentes criterios de cálculo muestran una tendencia y comportamiento similar (figuras 7, 8 y 9), y el rango de valores tanto de temperaturas, presiones y calidad del refrigerante se encuentra dentro de la incertidumbre experimental típica para una instalación física real de un evaporador de este tipo.

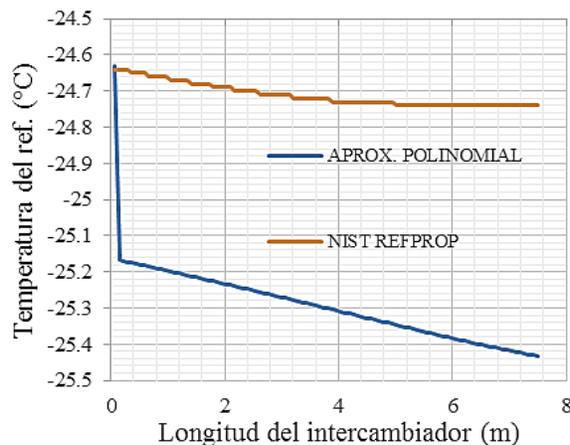


Figura 7 Desarrollo de la temperatura en un evaporador de 7.5 m de longitud. Comparación entre datos de NIST REFPROP vs Aproximación polinomial.

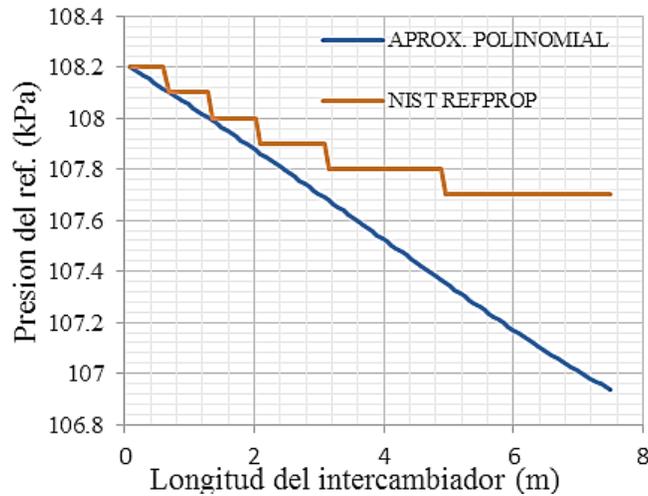


Figura 8 Caída de presión en un evaporador de 7.5 m de longitud. Comparación entre datos de NIST REFPROP vs Aproximación polinomial.

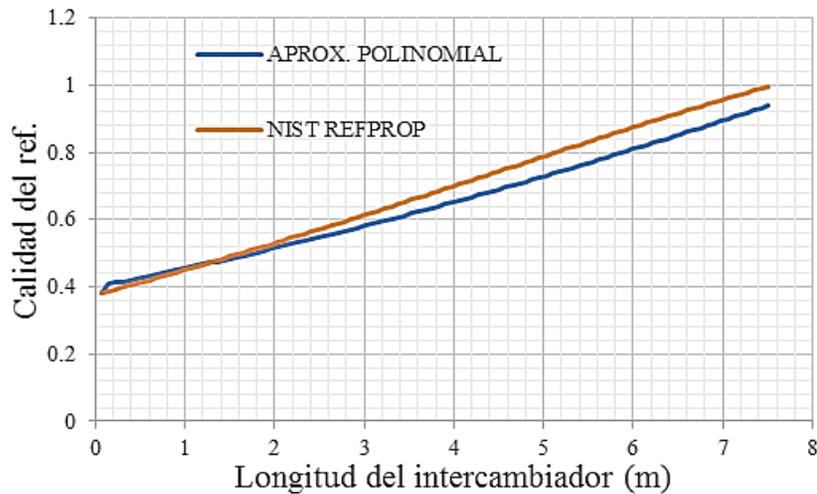


Figura 9 Desarrollo de la calidad del refrigerante en evaporador de 7.5 m de longitud. Comparación entre datos de NIST REFPROP vs Aproximación polinomial.

Se utilizan como referencia las propiedades del refrigerante R134a de la base de datos estándar NIST REFPROP para evaluar el porcentaje de error de los polinomios propuestos. Para cada propiedad el porcentaje de error relativo es calculado usando la ecuación 12.

$$\%Error(\Psi) = \frac{\xi_{RP} - \xi_{POL}}{\xi_{RP}} \times 100 \quad (12)$$

Donde " ξ_{RP} " representa el valor de una variable genérica evaluado con los datos de REFPROP y " ξ_{POL} " representa el valor de la variable obtenido bajo el enfoque polinomial. El error entre los dos criterios de cálculo muestra un porcentaje menor al 6 %.

4. Discusión

Se llevó a cabo un análisis térmico y fluido-dinámico para un evaporador de tipo compacto empleando formulación unidimensional y condiciones estacionarias, para evaluar aspectos característicos de la fenomenología del flujo bifásico en fluidos refrigerantes bajo dos criterios de cálculo, el primero emplea un enfoque polinomial en la obtención de las propiedades termofísicas del refrigerante para solucionar el algoritmo de cálculo del intercambiador, y el segundo toma las propiedades directamente de la base de datos estándar NIST REFPROP. Se realizó una comparativa entre los datos arrojados por el modelo bajo los dos diferentes criterios, obteniendo un porcentaje de error relativamente bajo y aceptable para este tipo de análisis por lo que se considera que el enfoque polinomial presentado en este trabajo de investigación puede ser empleado en el desarrollo de nuevos diseños de equipos intercambiadores a un costo más bajo y sin prototipos físicos.

Como trabajo futuro se pretende emplear el código del modelo del intercambiador de calor, para establecer una comunicación dinámica entre éste y un entorno de simulación 3D (Ablanque et al., 2012 Y Ablanque et al., 2014) con el objetivo de obtener cálculos más precisos de la carga de enfriamiento en un sistema de refrigeración y acelerar la velocidad de las simulaciones, optimizando los recursos de cómputo.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México campus Celaya, a Mabe Tecnología y Proyectos, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por el apoyo brindado en la realización de esta investigación.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] ASHRA HANDBOOK 1997, Fundamentals, SI Edition, ASRAE Inc.
- [2] Ablanque, Nicolas; Oliet, Carles; Rigola, Joaquim; Lehmkuhl, Oriol; and Pérez-Segarra, Carlos D., "Modular Simulation of Vapour Compression Systems With an Object Oriented Tool" (2012). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1277.
- [3] Ablanque, Nicolas; Oliet, Carles; Rigola, Joaquim; Lehmkuhl, Oriol; and Oliva, Assensi, "Dynamic Simulation of Household Refrigerators: Numerical Model and Experimental Comparison" (2014). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1550.
- [4] Belman F.Juan.(2008). Desarrollo de un modelo físico para una instalación de producción de frío por compresión de vapor utilizando el refrigerante R134a. Validación experimental y aplicación para la simulación energética. Tesis Doctoral
- [5] G. K. Lavrenchenko, G. Ya. Ruvinskij, S. V. Iljushenko and V. V. Kanaev. Thermo-physical properties of refrigerant R134a. International Journal of Refrigeration; Vol 15(6), 1992, 386-392.
- [6] Escanes, F., Oliva, A., Perez-Segarra, C.D., Oliva, A., (1995) Thermal and Fluid-Dinamic Behavior of Double-Pipe Condensers and Evaporators, International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, vol. 5, No. 9, pp 781-795
- [7] Kandlikar, S. G. (1990). A General Correlation for Predicting the Two-Phase Flow Boiling Heat Transfer Coefficient Inside Horizontal and Vertical Tubes, Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer, vol, 112, pp 219-228.
- [8] Lockhart, R. W. and Martinelli, R.C. (1994) International Compressor Engineering Conference at Purdue, ed. By Soedel, vol II. Pp. 491-497
- [9] Patankar, S. V. (1988) Recent Delovelments in Computational Heat Transfer. Journal of Heat Transfer.
- [10] Rowland, F. S., and Molina, M. R. (1974). Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atom Catalyzed Destruction of Ozone, Nature, 249. pp. 810-812.

- [11] Shivakumar B, Ramesh A, Vaishnavi P, Avi A Cornelio (2013) Retrospective on Cubic Equation of State for R134a Refrigerant Used in Automotive Application, SIAT, India
- [12] Vikrant Aute, Reinhard Radermacher (2014) Standardized Polynomials for Fast Evaluation of Refrigerant Thermophysical Properties, International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1499.
- [13] Valladares O., (2000). Simulación numérica y validación experimental de evaporadores, condensadores y tubos capilares. Integración en sistemas de refrigeración por compresión. Tesis Doctoral.