

# ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO (CFD) DEL ESPACIO REFRIGERADO DE UN FRIGOBAR COMERCIAL

Alvarado Alcalá Braulio Uciel (1), Alfaro Ayala Jorge Arturo (2)

1 Licenciatura en Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Ingeniería Química, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: bu.alvaradoalcala@ugto.mx

2 Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: ja.alfaroayala@ugto.mx

## Resumen

Este trabajo se centra en predecir la temperatura del espacio refrigerado en estado transitorio y en tres dimensiones por medio un modelo numérico de la dinámica computacional de fluidos (CFD) de un refrigerador comercial que opera mediante el ciclo de difusión-absorción (DAR). En este trabajo se considera la transferencia de calor debido a la convección natural desde el ambiente a las paredes del refrigerador, la conducción en las paredes del refrigerador y la convección en el interior del espacio refrigerado. El efecto de la flotabilidad debido a los cambios de densidad dentro del espacio refrigerado es obtenido debido a que se introdujeron polinomios que describen el cambio de las propiedades del aire con la temperatura. La programación de funciones definidas por el usuario (UDF's) para introducir las condiciones de frontera en el evaporador permitió la simulación en estado transitorio. Los resultados numéricos muestran las distribuciones de temperatura y velocidad, así como el comportamiento de la temperatura del aire en el espacio refrigerado a través del tiempo. El modelo numérico CFD obtenidos muestra un error promedio de 0.1417% en relación a los datos experimentales.

## Abstract

This work is focused to predict the temperature of the cooling cabinet in transient state and three-dimension by a numerical model of the computational fluid dynamics (CFD) of a commercial refrigerator that operates by diffusion-absorption (DAR) technology. This paper considers the heat transfer due to natural convection from the environment to the refrigerator walls, the heat transfer by conduction in the walls and the heat transfer by convection inside the cooling cabinet. The buoyancy effects due to changes of density inside the cooling cabinet are considered by mathematical polynomials that are introduced in the commercial software, they describe the change of fluid properties with the temperature. Programming user defined functions (UDF's) are inserted as boundary conditions in the evaporator wall allowing transient simulations. CFD numerical results show the distributions of temperature inside the cooling cabinet along the time. The CFD results show an average error of 0.1417% relative to the experimental data.

## Palabras Clave

Convección Natural; Difusión-Absorción; Simulación CFD; Experimentación; Flotabilidad.

## INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas los esfuerzos por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y evitar la disminución de la capa de ozono han sido muchas. Los refrigeradores comerciales son los electrodomésticos que tienen mayor consumo de electricidad en nuestros días. Una de las tecnologías de refrigeración es la de difusión-absorción (DAR), la cual utiliza un refrigerante, un absorbente y un gas auxiliar, empleando amoníaco, agua e hidrógeno o helio respectivamente. Esta tecnología se compone principalmente de un generador, una bomba de burbujas, un condensador y un evaporador, además al utilizar un gas auxiliar se elimina el uso de una válvula de expansión presente en otras tecnologías.

Laguerre et al. [1] realizaron mediciones de temperatura en 143 refrigeradores comerciales, sus resultados demuestran que más del 25% no está dentro del rango de temperatura óptima (275.15 K – 281.15 K) para la preservación de alimentos y medicinas. Además, ellos han realizado más estudios tanto experimentales [2] como numéricos [3,4] en los cuales se toman en cuenta los refrigeradores vacíos, así como refrigeradores con cargas térmicas dentro de ellos. Bayer et al. [5] simuló un refrigerador comercial sin ventilador para poder obtener la distribución de temperaturas y velocidades dentro del refrigerador, además lo hizo para dos casos, en el primero tomó en cuenta la radiación y en el segundo no; la comparación de resultados de estos dos casos muestra que el efecto de la radiación en el perfil de temperaturas es despreciable. Belman-Flores et al. [6] realizó simulaciones en estado transitorio para un refrigerador que opera mediante difusión-absorción, para ello tomó como condiciones de frontera los datos experimentales promedio obtenidos durante la última hora de estabilidad térmica. Además, realizó dos simulaciones en la primera tomaba en cuenta las aletas metálicas puestas en la placa del evaporador y los orificios donde son colocadas las parrillas del refrigerador, mientras que en la segunda despreció estos componentes internos. Los resultados que obtuvo demuestran que la distribución de temperaturas y velocidades es prácticamente la misma para

ambos casos y se podría eliminar el uso de dichas aletas para disminuir el costo de manufactura.

Los trabajos anteriormente mencionados son realizados a partir de que el refrigerador llega a un estado estable, siendo que el mayor consumo de energía se lleva al encender el refrigerador, ya que se debe disminuir desde la temperatura ambiente hasta una temperatura adecuada para la preservación de alimentos y medicamentos.

El objetivo de este estudio es obtener un modelo que nos permita predecir la temperatura del espacio refrigerado con simulaciones numéricas mediante CFD y validar con datos experimentales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se dividió en dos partes, la experimental y las simulaciones.

### Experimentación

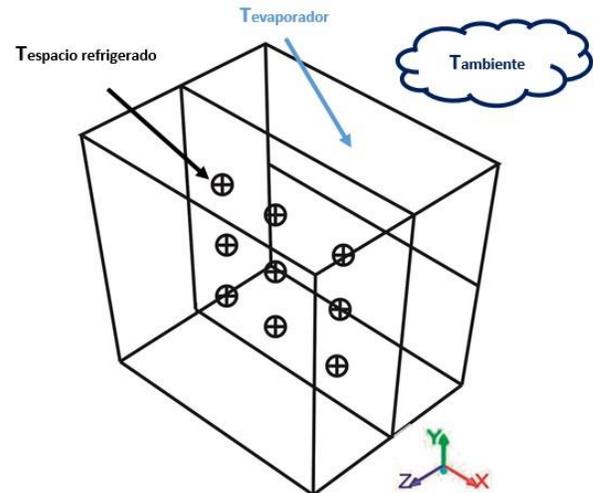
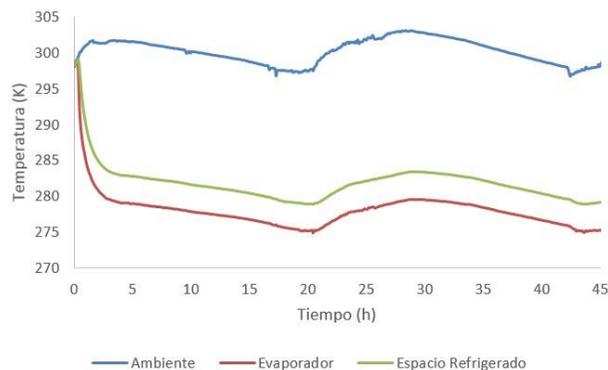


IMAGEN 1.- Posición de los termopares en el sistema.

Para la parte experimental se contó con un refrigerador comercial que opera con la tecnología DAR. Se colocaron 9 termopares tipo K distribuidos en un plano medio paralelo al eje XY para obtener la temperatura promedio del espacio refrigerado, uno en la placa del evaporador y uno afuera del espacio refrigerado con la finalidad de medir la temperatura ambiente (ver imagen 1). Dichos termopares fueron conectados a un

sistema de adquisición de datos, el cual registraba las temperaturas cada 5 minutos.

La imagen 2 muestra el monitoreo de las temperaturas en Kelvin (K) con el tiempo en horas (h) para: i) el ambiente, ii) el espacio refrigerado y iii) la placa del evaporador, obtenidos en la experimentación. Cabe señalar que la temperatura del espacio refrigerado parte de la temperatura ambiente y para después enfriarse hasta llegar a estabilizarse, es decir a su temperatura más baja, en aproximadamente 20h. A partir de aquí, comienzan los ciclos de encendido y apagado (OFF/ON). El refrigerador se apaga y comienza a subir la temperatura del espacio refrigerado, el refrigerador tiene un periodo de 10 h apagado. Después de aquí, nuevamente se vuelve a encender y la temperatura ambiente comienza a disminuir, el refrigerador tiene un periodo de encendido de aproximadamente 15 h. Este proceso OFF/ON continua a partir de aquí.



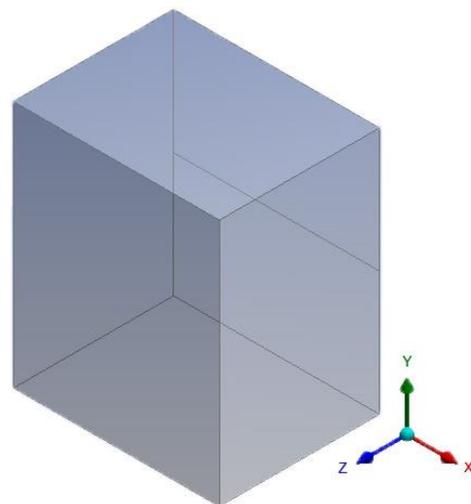
**IMAGEN 2.- Mediciones experimentales de temperatura (K) con respecto al tiempo (h).**

Con los datos experimentales mostrados en la imagen 2 se realizaron regresiones polinomiales para obtener las ecuaciones que describen el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo para el ambiente y el evaporador las cuales fueron utilizadas como condiciones de frontera en el modelo numérico.

## Simulación

### Geometría

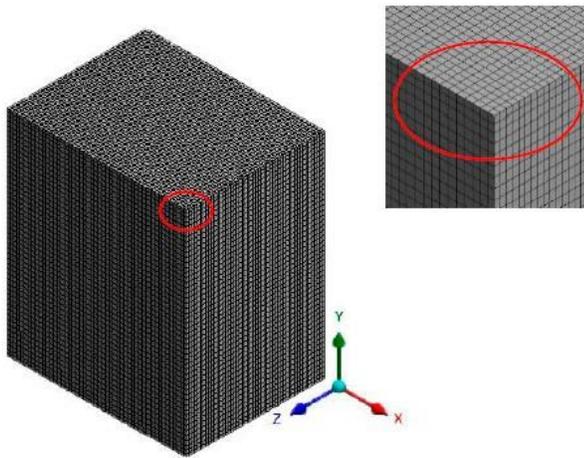
Para resolver este problema se optó por generar únicamente la geometría del espacio refrigerado, ya que es aquí donde se presenta el intercambio de calor principalmente. Para ello se construyó una geometría del espacio refrigerador rectangular con dimensiones de 36 cm, 28 cm y 43.5 cm de largo, ancho y alto respectivamente, además cuenta con 6 cm de aislante en cada una de las paredes. El área de la placa del evaporador es igual a la mitad del área total de la pared posterior del refrigerador. La imagen 3 muestra una vista isométrica de la geometría creada en el software ANSYS-DesignModeler®.



**IMAGEN 3.- Geometría del sistema.**

### Mallado

El mallado dentro de una simulación es de suma importancia, ya que de esto depende, en gran medida, la precisión de los resultados obtenidos. Debido a que la geometría presentada es relativamente sencilla, se generó una malla estructurada con únicamente celdas hexaédricas (ver imagen 4) que nos ayudarán a tener una estabilidad a lo largo de la solución. Se obtuvo un total de 60,900 nodos y 56,346 elementos. Para generar la malla se utilizó ANSYS-Meshing®.



**IMAGEN 4.-** Malla estructurada del sistema.

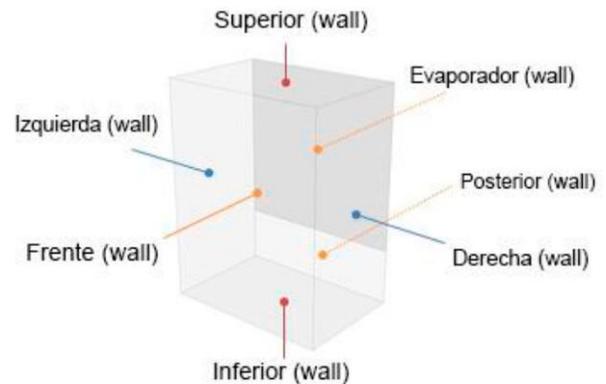
### Simulación Numérica

Las simulaciones numéricas fueron realizadas con el software comercial ANSYS-Fluent®, ya que nos permite simular los aspectos de transferencia de momento y calor al mismo tiempo y que están presentes en nuestro problema. Para su resolución utiliza el método de volumen finito que se fundamenta en resolver el conjunto de ecuaciones gobernantes de los fenómenos de transporte en las tres dimensiones para cada volumen de control dentro del dominio computacional de forma acoplada. Las ecuaciones a solucionar son las ecuaciones de Navier-Stokes, así como la ecuación de energía que rige la transferencia de calor por convección y conducción.

Se utilizaron ecuaciones que describen la capacidad calorífica a presión constante, conductividad térmica y viscosidad dinámica para el aire, y con el fin de tomar en cuenta el efecto de la flotabilidad la ecuación de densidad en función de la temperatura.,

Las ecuaciones para las temperaturas del ambiente y del evaporador obtenidas en la experimentación, fueron tomadas como condiciones de frontera e introducidas mediante UDF's. Además, se consideró convección natural desde el ambiente a las paredes del refrigerador en las paredes superior, izquierda, derecha y frente (ver imagen 5). El valor del coeficiente de transferencia de calor convectivo depende de la diferencia de temperaturas entre el ambiente y la pared del refrigerador, así como del flujo de calor,

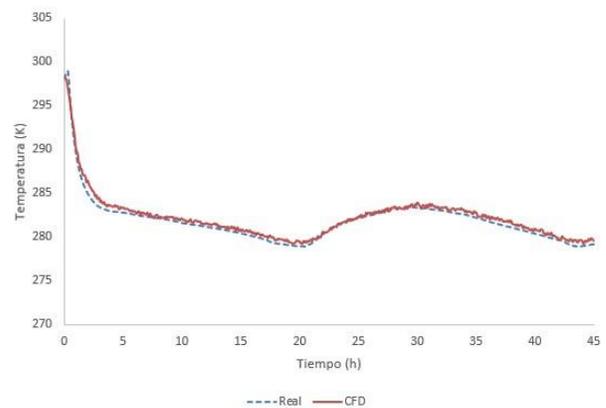
para poder obtener este valor fue necesario implementar un método iterativo mediante el software Engineer Equation Solver (EES®); obteniendo un valor promedio de  $h=0.2221 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



**IMAGEN 5.-** Condiciones de frontera.

La simulación fue llevada a cabo durante 5 horas en un equipo de cómputo que cuenta con un procesador Intel® Core™ i7-3537U, 4M de caché, 2 GHz y 8 MB de RAM.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN



**IMAGEN 6.-** Comparación de resultados para la temperatura del espacio refrigerado (K) en función del tiempo (h).

La imagen 6 muestra los resultados obtenidos en la simulación en estado transitorio para la temperatura del espacio refrigerado. La

temperatura obtenida mediante CFD muestra que es muy similar a la experimental a lo largo de las 45 horas. El porcentaje de error promedio entre los datos los numéricos y experimentales es de 0.1417%.

La imagen 7 muestra los contornos de temperatura a lo largo de un plano YZ medio respecto al eje X, es importante observar que las temperaturas más altas están localizadas en la parte superior del refrigerador y las temperaturas más bajas en la parte inferior del refrigerador, debido al efecto de la flotabilidad.

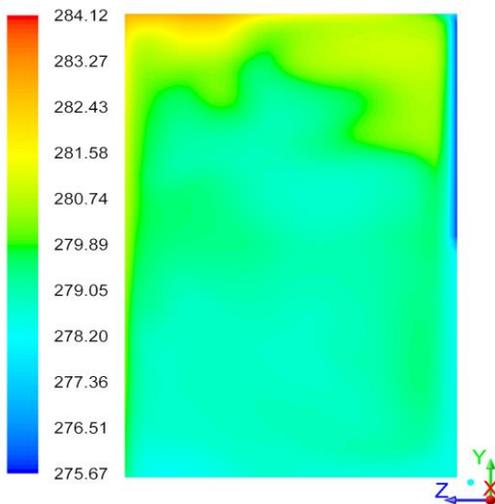


IMAGEN 7.- Contornos de temperatura (K) en un plano medio YZ.

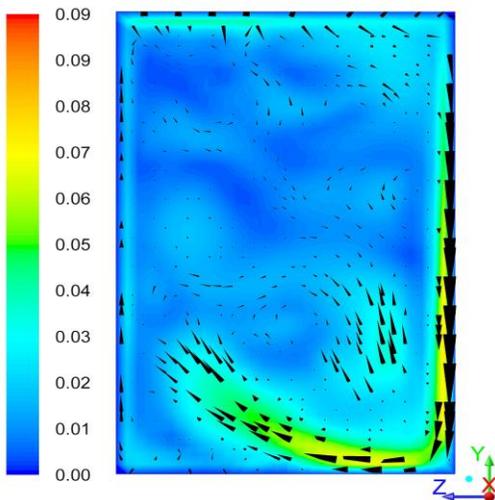


IMAGEN 8.- Distribución de velocidades (m/s) acoplada con vectores.

Para corroborar este fenómeno de flotabilidad, se presenta la distribución de velocidades acoplada con sus vectores (ver imagen 8) que nos muestran la dirección en que se mueve el aire; se debe destacar que las velocidades más altas se obtienen cerca de la placa del evaporador, ya que es aquí donde se presenta la mayor transferencia de calor, por lo tanto, al enfriarse el aire este será más denso y se precipita al fondo del espacio refrigerado.

## CONCLUSIONES

Se logró simular de una manera precisa la transferencia de calor del espacio refrigerado que opera bajo un ciclo de refrigeración por difusión-absorción, obteniendo un error promedio de 0.1417%, por lo cual podemos concluir que se validó nuestro modelo. Todo esto nos permite, con certeza, realizar posteriores modificaciones al refrigerador i. e. para mejorar la distribución de temperaturas dentro del espacio refrigerado y con esto ayudar a la disminución del consumo de energía eléctrica.

## REFERENCIAS

- [1] Laguerre, O., Derens, E., & Palagos, B. (2002). Study of domestic refrigerator temperature and analysis of factors affecting temperature: a French survey. *International Journal of Refrigeration*, 25(5), 653-659.
- [2] Laguerre, O., Ben Amara, S., & Flock, D. (2005). Experimental study of heat transfer by natural convection in a closed cavity: application in a domestic refrigerator. *Journal of Food Engineering*, 70(4), 523-537.
- [3] Laguerre, O., & Flick, D. (2004). Heat transfer by natural convection in domestic refrigerators. *Journal of Food Engineering*, 62(1), 79-88.
- [4] Laguerre, O., Ben Amara, S., Moureh, J., & Flick, D. (2007). Numerical simulation of air flow and heat transfer in domestic refrigerators. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 144-156.
- [5] Bayer, O., Oskay, R., Paksoy, A., & Aradag, S. (2013). CFD simulations and reduced order modeling of a refrigerator compartment including radiation effects. *Energy Conversion and Management*, 69, 68-76.
- [6] Belman-Flores, J. M., & Gallegos-Muñoz, A. (2016). Analysis of the flow and temperature distribution inside the compartment of a small refrigerator. *Applied Thermal Engineering*, 106, 743-752.