

ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA EN CABINAS DE REFRIGERACIÓN

García López, Jusvy Jeraldi (1), Alfaro Ayala, Jorge Arturo (2)

1 [Lic. Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [jj.garcialopez@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

En este trabajo se presenta un estudio numérico para la determinación de transferencia de masa y energía en un espacio refrigerado, utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD). Se simuló una cabina de refrigeración en la cual se consideraron escenarios donde el aire contenía un porcentaje de humedad inicial (vapor de agua) de 50% hasta 90% a condiciones iniciales de 299.29 K y 102.73 KPa. Se estudió el comportamiento de la temperatura, humedad y de fracción masa en estado transitorio en un periodo de 45 horas. Con ayuda de programación de una función definida por el usuario (UDF), se cuantificó el porcentaje de agua condensada y de energía requerida debida a la condensación. La energía que consumió el refrigerador con la finalidad de condensar el agua para llegar a 0.0065 fracción masa dentro de la cabina va de un 7 a 20% con humedades iniciales de 50 y 90 % correspondientemente a una temperatura mínima de 281 K.

Abstract

In this work a numerical study is presented for the determination of mass and energy transfer in a refrigerated space, using Computational Fluid Dynamics (CFD). A cooling cabin was simulated in which scenarios were considered in which the air contained a percentage of initial humidity (water vapor) of 50% up to 90% at initial conditions of 299.29 K and 102.73 KPa. The behavior of the temperature, humidity and mass fraction in transitory state in a period of XX hours was studied. With the help of programming a user defined function (UDF), the percentage of condensed water and energy required due to condensation was quantified. The energy consumed by the refrigerator in order to condense water to reach 0.0065 mass fraction goes from 7 to 20% with initial humidity of 50 and 90% corresponding to a minimum temperature of 281 K.

Palabras Clave

Ecuación de energía 1; Transferencia de especies 2; Condensación de agua 3; Humedad 4;

INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor de regiones de temperatura inferior a regiones de temperaturas más altas se llama refrigeración. Los refrigeradores son dispositivos cíclicos y los fluidos de trabajo utilizados en los ciclos de refrigeración se llaman refrigerantes [1].

Los ciclos de refrigeración más usados son los de compresión mecánica de vapor, pero estos requieren bastante potencia eléctrica que a veces no está disponible y su funcionamiento es ruidoso por culpa del compresor [2]. Otra forma de refrigeración que tiene un atractivo económico cuando se tiene una fuente de energía térmica barata a una temperatura de 100 a 200°C, es la refrigeración por absorción [1].

Sistemas de Refrigeración por Absorción

Los sistemas de refrigeración por absorción implican la absorción de un refrigerante por un medio de transporte. El sistema de refrigeración por absorción más utilizado es el sistema de amoníaco-agua, donde el amoníaco (NH_3) sirve como el refrigerante y el agua (H_2O) es el medio de transporte.

Otros sistemas de refrigeración por absorción son los de agua-bromuro de litio y el de agua-cloruro de litio, en los que el agua sirve como refrigerante.

La máquina de refrigeración de amoníaco-agua fue patentada por el francés Ferdinand Carre en 1859.

El sistema de refrigeración por absorción es muy similar al sistema por compresión de vapor, excepto que el compresor se ha sustituido por un complicado mecanismo de absorción compuesto por un absorbedor, una bomba, un generador, un regenerador, una válvula y un rectificador, como se puede observar en la Imagen 1.

Una vez que la presión del NH_3 es elevada por los componentes en la caja (esto es lo único que tienen que hacer), se enfría y se condensa en el condensador, liberando calor hacia los alrededores; se estrangula hasta la presión del evaporador y absorbe calor del espacio refrigerado cuando fluye a través del evaporador. [1]

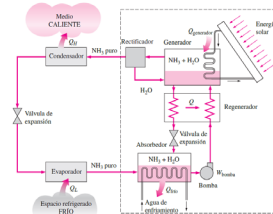


Imagen 1. Ciclo de Refrigeración por absorción de amoníaco

El refrigerador es uno de los electrodomésticos que más consume energía dentro del hogar, al usarlo 9 hrs al día en un mes tenemos un total de 270 hrs y un consumo de 135 kWh; mientras que una televisión usándola 6 horas diarias en un mes realiza un consumo de 25.2 kWh. [3]

La energía que consume el refrigerador no solo es aprovechada en enfriar el espacio de refrigeración sino también en condensar el agua que se encuentra en el aire dentro del espacio refrigerado.

Para poder cuantificar la transferencia de energía y de masa dentro de este espacio se usa un modelo numérico CFD y así poder calcular la energía que se consume en condensar el agua y no es aprovechada en enfriar el espacio refrigerado.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio de transferencia de energía y de masa dentro de una cabina refrigerada, se utilizó un modelo numérico en el cual se cuantificó las temperaturas, la fracción masa, la humedad y la masa de condensación del agua dentro de la cabina al iniciar el aire con diferentes porcentajes de humedad los cuales son: 50%, 60%, 70%, 80% y 90%. Para realizar el estudio nos apoyamos del programa Ansys-Fluent®.

Dentro de Fluent® se activaron la ecuación de energía (Ecuación 1), de continuidad (Ecuación 2) y transporte de especies (Ecuación 3).

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + (\rho \vec{v} Y_i) \quad \text{Ecuación 3}$$

En la simulación se consideró Flujo laminar, un coeficiente de transferencia en las paredes de la cabina de 0.2221 w/m²K, gases ideales al aire y al vapor de agua, puesto que estos se encuentran a baja presión y temperatura.

Para las condiciones de frontera se utilizó una UDF en programación C para aplicar la teoría de transferencia de masa sobre el evaporador (Imagen 2a) [4], ya que Fluent tiene una limitación y no cuenta con un modelo de condensación.

Para las temperaturas del evaporador y las paredes del refrigerador (Imagen 2a), se utilizó polinomios, los cuales fueron obtenidos con las mediciones experimentales realizadas a la cabina de refrigeración previamente y se observan en la Ecuación 4 para el evaporador y la Ecuación 5 para las paredes.

$$\begin{aligned}
 T_{eva}(t) &= -1.8908x10^{-22} \cdot t^6 + 8.3804x10^{-18} \cdot t^5 - 1.4017x10^{-13} \cdot t^4 & t \leq 9,000 \text{ s} \\
 &\quad + 1.0704x10^{-9} \cdot t^3 - 3.2861x10^{-6} \cdot t^2 - 8.8539x10^{-4} \cdot t \\
 &\quad + 2.9929x10^2 \\
 T_{eva}(t) &= -2.3278x10^{-14} \cdot t^3 + 2.6143x10^{-09} \cdot t^2 - 1.5390x10^{-04} \cdot t & 9,000 \text{ s} < t \leq 69,900 \text{ s} \\
 &\quad + 2.8107x10^{02} \\
 T_{eva}(t) &= -1.1442x10^{-21} \cdot t^5 + 5.1680x10^{-16} \cdot t^4 - 9.2912x10^{-11} \cdot t^3 & 69,900 \text{ s} < t \leq 106,800 \text{ s} \\
 &\quad + 8.3069x10^{-06} \cdot t^2 - 3.6903x10^{-01} \cdot t + 6.7871x10^{03} \\
 T_{eva}(t) &= 5.9253x10^{-19} \cdot t^4 - 2.7688x10^{-13} \cdot t^3 + 4.6587x10^{-08} \cdot t^2 & 106,800 \text{ s} < t \leq 158,400 \text{ s} \\
 &\quad - 3.3816x10^{-03} \cdot t + 3.6942x10^{02} \\
 T_{eva}(t) &= 6.1450x10^{-18} \cdot t^4 - 4.5192x10^{-12} \cdot t^3 + 1.2391x10^{-06} \cdot t^2 & 158,400 \text{ s} < t \leq 198,900 \text{ s} \\
 &\quad - 1.5001x10^{-01} \cdot t + 7.0395x10^{03} \\
 T_{eva}(t) &= -1.1205x10^{-04} \cdot t + 3.0205x10^{02} & 198900 < t \leq 241500 \text{ s}
 \end{aligned}$$

Ecuación 4

$$\begin{aligned}
 T_{amb}(t) &= -8.9474x10^{-28} \cdot t^6 + 2.7350x10^{-22} \cdot t^5 - 3.1630x10^{-17} \cdot t^4 & 0 < t \leq 60000 \text{ s} \\
 &\quad + 1.7725x10^{-12} \cdot t^3 - 5.0942x10^{-08} \cdot t^2 + 6.4331x10^{-04} \cdot t \\
 &\quad + 2.9884x10^{02} \\
 T_{amb}(t) &= -3.6698x10^{-28} \cdot t^6 + 1.9555x10^{-22} \cdot t^5 - 3.9874x10^{-17} \cdot t^4 & 60000 \text{ s} < t \leq 140100 \text{ s} \\
 &\quad + 3.7665x10^{-12} \cdot t^3 - 1.4895x10^{-07} \cdot t^2 + 5.6873x10^{-04} \cdot t \\
 &\quad + 3.6788x10^2 \\
 T_{amb}(t) &= -1.87658x10^{-27} \cdot t^6 + 2.04051x10^{-21} \cdot t^5 - 9.16825x10^{-16} \cdot t^4 & 140100 \text{ s} < t \leq 225000 \text{ s} \\
 &\quad + 2.17771x10^{-10} \cdot t^3 - 2.88283x10^{-05} \cdot t^2 + 2.01601 \cdot t \\
 &\quad - 5.78769x10^4
 \end{aligned}$$

Ecuación 5

Para obtener el porcentaje de humedad en el programa Fluent se ingresa con la fracción masa, la cual se calculó con ayuda de la Ecuación 6. Donde: w es la humedad específica, P es la presión total, P_v es la presión de vapor la cual se puede sustituir por la presión de saturación a esa misma temperatura, debido a las condiciones en las que se encuentra el aire.

$$\omega = \frac{0.622P_v}{P - P_v} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde $P_v = \%Humedad * P_s$

Para poder obtener la energía consumida en condensar el agua, primero tenemos que conocer la cantidad de agua condensada y para esto se utiliza la Ecuación 7. En donde m_{agua} es la masa del agua y Y son las fracciones masa iniciales y finales.

$$m_{condensado} = m_{agua}(Y_{Inicial} - Y_{Final}) \quad \text{Ecuación 7}$$

Teniendo la masa del agua condensada se utiliza la Ecuación 8 para conocer la energía consumida al condensar el vapor de agua. Posteriormente obtenemos la energía total consumida por el refrigerador con la ecuación 9 y así poder calcular el porcentaje de energía consumida por la condensación con la Ecuación 10

$$E_{Cond} = m_{Agua}(h_{Inicial} - h_{Final}) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$E_T = E_{Cond} + E_{Aire} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde $E_{Aire} = m_{Aire}(h_{Inicial} - h_{Final})$

$$\%E = \frac{E_{Cond}}{E_T} * 100 \quad \text{Ecuación 10}$$

Se llevó a cabo la realización de la geometría con dimensiones internas de 43.5 x 28 x 36 cm (Imagen 2a), para posteriormente mallarla, con un mallado total de 1950 nodos y 1512 elementos (Imagen 2b)

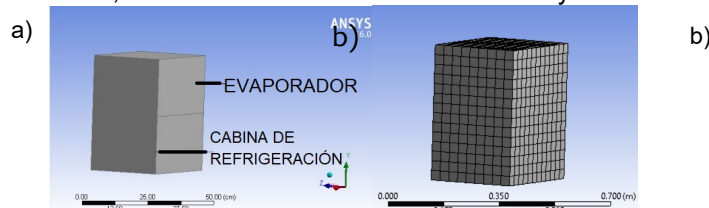


Imagen 2. a) Geometría del Refrigerador, b) Mallado del Refrigerador

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para llevar a cabo la simulación: se agregó el poliuretano como material (material con el cual se aíslan las paredes del refrigerador), se cargó la UDF de forma interpretada para la temperatura de las paredes y evaporador, y para la transferencia de masa en el evaporador. Se simuló en un periodo de 45 hrs con ciclos de ON y OFF.

Se tomó de ejemplo para reportar el aire a una temperatura inicial de 299.29 K, 102.73 kPa (presión promedio en Gto) [5] y humedad inicial de 80%. Dentro de la simulación se monitoreó la fracción masa (Imagen 3), humedad (Imagen 4) y la temperatura dentro de la cabina de refrigeración (Imagen 5) al haber transcurrido un periodo de 45 horas.

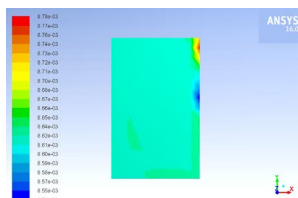


Imagen 3. Contornos de Fracción masa en el plano perpendicular al evaporador al transcurrir 45 hrs.

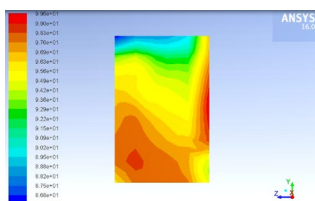


Imagen 4. Contornos de Humedad en el plano perpendicular al evaporador al transcurrir 45 hrs.

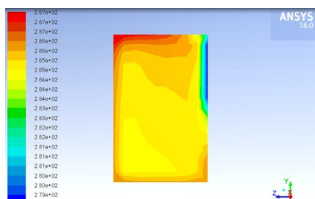


Imagen 5. Contornos de Temperatura en el plano perpendicular al evaporador al transcurrir 45 hrs.

Para la verificación de los resultados se realizó una gráfica comparativa con los valores de las temperaturas medidas experimentalmente y las temperaturas obtenidas del simulador (Imagen 6), con lo cual se obtuvo un porcentaje de error relativo promedio de 0.94% entre la experimental con la del simulador.

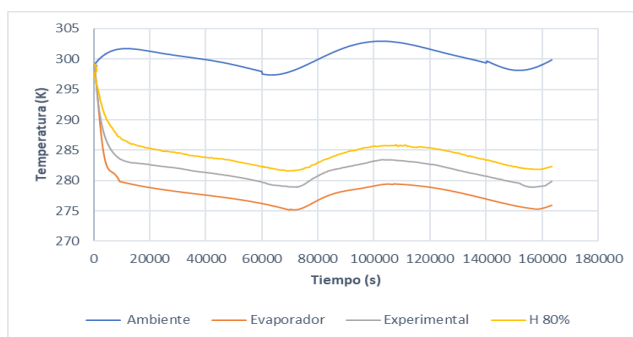


Imagen 6. Gráfica comparativa de temperaturas entre las experimentales y las obtenidas en el simulador.

En la gráfica de la temperatura se monitorearon los ciclos de ON y OFF en los cuales la temperatura baja a 281 K, el refrigerador se apaga, comienza a elevarse la temperatura y al llegar a 285 K se vuelve a encender para que la temperatura vuelva a descender. Al igual que en la temperatura se monitorearon la fracción masa (Imagen 7) se observó que tenía un comportamiento parecido a la de la temperatura, y la fracción más baja reportada fue de 0.0065, y de la humedad (Imagen 8) que al bajar la temperatura esta aumenta, ya que a menor temperatura la presión de saturación es menor.

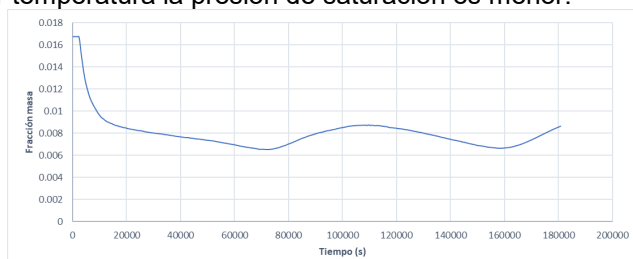


Imagen 7. Gráfica de la Fracción masa con una humedad inicial de 80%

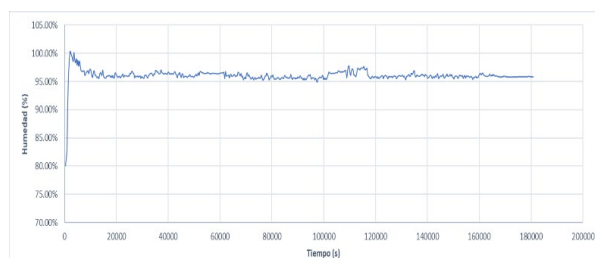


Imagen 8. Gráfica de Humedad con una humedad inicial de 80%

En la Tabla 1 se muestra el concentrado de los resultados obtenidos en el simulador a los diferentes porcentajes de humedad y la energía que se requiere para condensar el agua. Sin importar la humedad que tenga inicialmente la cabina de refrigeración, la fracción masa siempre llega a 0.0065, una temperatura mínima de 281 K y a una humedad de casi el 100%. La energía que consume el refrigerador en enfriar el aire es aproximadamente de 513 KJ y el aumento de energía consumida es consecuencia de una mayor condensación del vapor de agua.

Tabla 1. Concentrado de resultados a las diferentes Humedades

Porcentaje de Humedad inicial	Humedad máxima alcanzada (%)	Fracción masa mínima	Temperatura mínima (K)	Consumo de Energía por condensación (%)
50 %	98.52	0.00655	281.55	7.34
60 %	99.57	0.00654	281.66	10.97
70 %	100.96	0.00654	281.64	50.40
80 %	100.10	0.00654	281.59	17.51
90 %	100.80	0.00654	281.61	20.45

CONCLUSIONES

Un refrigerador de absorción consume en promedio 513 KJ en enfriar el aire que se encuentra en la cabina de refrigeración considerando 0% de humedad, sin embargo, puede aumentar 40.8 KJ si el aire tiene una humedad de 50% hasta 132 KJ si tiene 90% de humedad, es decir, entre mayor es el porcentaje de humedad, el refrigerador consume mayor energía en condensar el agua; así mismo se obtuvieron los comportamientos de la temperatura, humedad y fracción masa al operarlo durante un periodo de 45 hrs, llevándose a cabo a través de simulaciones numéricas CFD. Se pudo observar que la curva de la fracción masa tiene un comportamiento similar a la de la temperatura, mientras que la humedad se eleva hasta casi llegar al 100% y oscila entre 95 y 100%.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Alfaro por la oportunidad de poder realizar el verano de investigación, por su apoyo y disponibilidad durante la elaboración de este. También a Estudiante de Doctorado Oscar por su apoyo y

buena disposición, al igual que a mis compañeros de verano que hicieron ameno y grata mi estancia, así mismo su apoyo.

REFERENCIAS

- [1] Yunus A., Cengel (2006). Termodinámica (5ht ed.) Mexico, D.F: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- [2] Martínez, Isidoro, Termodinamica basica y aplicada. Madrid: DOSSAT, S.A
- [3] Calderón, R. vivienda net-zero en mexicali., B.C, un camino hacia las políticas energéticas en desarrollos habitacionales sustentables. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/12828/06_Calderon_Arredondo_Cardenas_Mayagoitia.pdf?sequence=1&isAllowed=y. (18/07/18)
- [4] Jiménez Z, Alfredo, Estudio de la tasa de formación de condensado en el evaporador de un sistema de acondicionamiento de aire mediante dinámica de fluidos computacional.(Diciembre 2017), Universidad autonoma de Nuevo León
- [5] Tiempo y temperature. Recuperado de <http://tiempoytemperatura.es/mexico/guanajuato.html#por-horas> (2/07/18)