



ANÁLISIS DEL HFO-1234ZE COMO ALTERNATIVA ECOLÓGICA EN LA REFRIGERACIÓN DOMÉSTICA

HFO-1234ZE ANALYSIS AS AN ECOLOGICAL ALTERNATIVE IN DOMESTIC REFRIGERATION

Cristian Andrade Terán^{1,*}

Recibido: 03-05-2020, Revisado: 22-07-2020, Aprobado tras revisión: 05-08-2020

Resumen

La refrigeración de alimentos es un proceso esencial en los hogares, por lo que un refrigerador doméstico se convierte en un electrodoméstico indispensable. Siendo este uno de los mayores consumidores de energía eléctrica y de contaminación por el refrigerante que ocupa para su funcionamiento, es importante buscar alternativas que mejoren este proceso. En este estudio se pretende implementar un HFO, el R12354ze, como alternativa ecológica en la refrigeración doméstica, en respuesta a las demandas ambientales para reducir el cambio climático y el deterioro de la capa de ozono. Mediante un análisis termodinámico y de transferencia de calor con simulaciones del ciclo de refrigeración y el comportamiento del fluido en el intercambio de calor utilizando *software* especializado y CFD, se presenta al HFO como una alternativa aceptable logrando parámetros de refrigeración en rango entre 5 %-8 % de diferencia con refrigeradores comunes utilizados actualmente, con un costo ambiental de hasta un 99 % más bajo, sin alterar su eficiencia energética. Aprovechando las propiedades del HFO en el ciclo de refrigeración se logra mejorar el coeficiente de desempeño del ciclo de refrigeración en un 12 %.

Palabras clave: Acuerdo de París, CFD, HFO, enmienda Kigal, refrigeración, R1234ze

Abstract

Food refrigeration is an essential process in homes, and thus a home refrigerator becomes an indispensable appliance. Being this one of the biggest consumers of electrical energy and contamination due to the refrigerant used for its operation, it is important to look for alternatives that improve this process. This study aims to implement the HFO, R12354ze as an ecological alternative in domestic refrigeration, in response to environmental demands to reduce climate change and deterioration of the ozone layer. Through a thermodynamic and heat transfer analysis, simulating the cooling cycle and the behavior of the fluid in heat exchange using specialized software and CFD, the HFO is presented as an acceptable alternative achieving cooling parameters which are between 5% and 8% different from common refrigerators currently used, with an environmental cost up to 99% lower, without altering their energy efficiency. Taking advantage of the properties of the HFO, it is possible to improve the coefficient of performance of the cooling cycle by 12%.

Keywords: CFD, HFO, Kigal amendment, Paris agreement, refrigeration, R1234ze.

^{1,*}Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador

Autor para correspondencia ✉: candradet@est.ups.edu.ec  <https://orcid.org/0000-0002-0220-7481>

Forma sugerida de citación: Andrade Terán, C. (2021). «Análisis del HFO-1234ze como alternativa ecológica en la refrigeración doméstica». INGENIUS. N.º 25, (enero-junio). pp. 9-19. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n25.2021.01>.

1. Introducción

La refrigeración mecánica que utiliza fluidos para la transferencia de calor, históricamente ha pasado por varias etapas para adaptarse a las necesidades ambientales. Comenzando con el Convenio de Viena para la protección de la capa de ozono (1985), que obligó a llegar al Protocolo de Montreal (1995) con respecto a sustancias que deterioran la misma (CFC y halógenos principalmente); este acuerdo fue exitoso y las metas propuestas fueron cumplidas. En 2003 se lo vio como el protocolo más exitoso hasta esa fecha; en 2015 se lo congeló y se espera para el 2030 eliminar por completo los HCFC en los países desarrollados y en el 2040 para los demás [1].

Consecuentemente las Naciones Unidas crean otros tratados y convenios para la protección de la capa de ozono y el medioambiente, entre estos destaca el Acuerdo de París en 2015 donde se firma la agenda 2030, se pide acelerar la reducción de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, buscando mantener el aumento de la temperatura global en este siglo muy por debajo de los 2 °C [2]. En este contexto, en 2016, con la enmienda Kigali al Protocolo de Montreal, se llega a un acuerdo para eliminar gradualmente los hidrofluorocarbonos (HFC), estos a pesar de que tienen ODP nulo o bajo poseen un GWP alto (*Global Warming Potential*), lo que aumenta la temperatura del planeta. Esta enmienda entró en vigor el 1 de enero del 2019, para reducir la producción y el consumo de HFC en más de 80 % durante los próximos treinta años [3].

Con la reunión en Kigali se acuerda reducir hasta aplacar el uso de refrigerantes con alto GWP, incentivando al cambio por alternativas menos perjudiciales al ambiente y mejorar la eficiencia energética en refrigeración y aire acondicionado. La oportunidad de cambio es muy aceptada y resulta en muchos casos rentable en refrigeración industrial y transporte refrigerado y en menor medida en la refrigeración comercial; sin embargo, al aire acondicionado móvil, comercial y refrigeración doméstica les resulta más costoso el cambio y, por ende, más difícil el alejarse de los HFC. Además, en países subdesarrollados y con alta temperatura ambiental resulta más costoso y difícil el cambio comparado con los países desarrollados [4]. Con las regulaciones y los impuestos a los refrigerantes con alto GWP se busca que sea más complicado para productores generar electrodomésticos con estos refrigerantes, haciendo que la industria y las investigaciones se centren en buscar alternativas más ecológicas, que no resulten en costos relativamente altos en la adaptación o remplazo en equipos de refrigeración y aire acondicionado que se han venido utilizando.

Los HFO, también llamados hidrofluoroolefinas, podrían ser una de las principales alternativas para el campo de la refrigeración, actualmente son la cuarta

generación de refrigerantes. En la Feria Internacional de Energías Verdes en Refrigeración y Aire Acondicionado, la ingeniera química Nohora Clavijo explicó que los HFO son compuestos orgánicos de doble enlace con una menor vida atmosférica, por lo que tienen menos impacto ambiental; además, la empresa Honeywell comunicó que se utilizarán mezclas de HFO/HFC para reducir el uso de los hidrofluorocarbonados.

En análisis experimentales realizados para comparar HFO con HFC-134a en un sistema de compresión de vapor, la diferencia en el COP (coeficiente de desempeño) obtenido para R1234yf está entre el 3 y 11 % menor al obtenido con R134a y para R1234ze está solamente entre el 2 y 8 % por debajo, usando el mismo compresor para los tres casos [5]. Yataganbaba *et al.* [6] en una investigación de análisis de energía en un sistema de compresión de vapor, encontraron al R1234yf y al R1234ze como sustitutos adecuados para R134a, siendo este el refrigerante mayormente usado en refrigeración doméstica. Los HFO podrían trabajar similarmente en sistemas de refrigeración domésticos sin presentar la sanción ambiental del HFC.

1.1. Bajos niveles de GWP y alta seguridad

El GWP o potencial de calentamiento global que una sustancia química posee es producto de la combinación de su forzamiento radiativo o forzamiento climático (cambio en la irradiancia neta en la zona de transición entre la troposfera y la estratosfera debido al cambio en la concentración atmosférica de un gas) y la vida útil atmosférica (tiempo que permanece sin desintegrarse en la atmósfera) [7].

Al ser las hidrofluoroolefinas compuestos fluorados sin carbono, presentan niveles muy bajos de GWP y un ODP nulo, cumpliendo con las normas establecidas para proteger la capa de ozono y el ambiente. Además, los HFO, a diferencia de los hidrocarburos (HC), no presentan riesgo alto de inflamabilidad, con clasificación ASHRAE de seguridad entre A1 y A2, inflamabilidad baja o nula.

Otra gran ventaja de estos refrigerantes es que son compatibles con gran variedad de aceites lubricantes y no es necesario hacer adaptaciones importantes en los sistemas existentes que funcionan con HFC o HCFC. No causa desgaste en los materiales por corrosión y por sus propiedades no ocasiona elevada fatiga en el compresor.

1.2. Implementación de R1234ze a la refrigeración doméstica

La mayoría de refrigeradores domésticos por compresión de vapor utilizan HFC como fluido de trabajo en el ciclo, estos no dañan directamente a la capa de ozono, pero sí contribuyen al efecto invernadero, el más usado es el R134a. También se está utilizando como

sustitutos ideales a hidrocarburos para la refrigeración doméstica, productos como el R600a, que presenta muy bajo aporte al calentamiento global; sin embargo, son altamente inflamables si no se los trata debidamente y es necesario el cambio en la instalación total. Por el contrario, el HFO-1234ze necesita diez veces más concentración y 250 000 veces más energía que los hidrocarburos para inflamarse, solo por encima de 30 °C. Está catalogado como fluido de baja toxicidad y ligeramente inflamable [8–10].

El refrigerante (HFO) R1234ze presenta características de eficiencia muy similares al HFC R134a y trabaja a presiones parecidas por lo que no es necesario cambios importantes en los sistemas ya existentes. La vida atmosférica del refrigerante como residuo es de solo dieciocho días, mucho más baja que los trece años del R134a. Una característica única del R1234ze es la ausencia de inflamabilidad al mezclarse con aire a menos de 30 °C de temperatura ambiente. Por eso se considera no inflamable para manipulación y almacenamiento [11], [12]. Ngoc [13] en su investigación de un ciclo de refrigeración que utiliza HFO-1234ze, HFO-1234yf, R22 y R32 como refrigerantes alternativos a R134a; los resultados muestran que el ciclo que usa R1234ze como refrigerante tiene el coeficiente de rendimiento más alto.

Debido a estas compatibilidades y características, un sistema de refrigeración de presión media o baja, en este caso un refrigerador doméstico convencional, puede ser acoplado a trabajar con R1234ze sin ser necesario el realizar cambios importantes al sistema.

2. Materiales y métodos

El ciclo de refrigeración que trabajará con R1234ze en el estudio, se lo diseña según los datos obtenidos de un refrigerador doméstico funcional que trabaja con R134a. Se utiliza Genetron Properties, *software* proporcionado por Honeywell y la base de datos del laboratorio de Investigación de Buffalo – NY-USA para la modelación de este ciclo termodinámico. Además, para el análisis de transferencia de calor del refrigerante en el ciclo de refrigeración se realiza el estudio CFD utilizando Fluent de ANSYS, en el cual se realiza pruebas de evaporación en el respectivo dispositivo y de distribución de temperaturas en el electrodoméstico, simulando las condiciones reales en las que trabajaría.

2.1. Características del refrigerante

El HFO 1234ze es un fluido puro con baja toxicidad e inflamabilidad, formado por moléculas de flúor, hidrógeno y oxígeno. Las propiedades de este fluido se presentan en la Tabla 1 a manera de comparación con el refrigerante 134a.

Tabla 1. Propiedades de R134a y R1234ze

Propiedad	R134a	R1234ze
Peso molecular (kg/kmol)	102	114
Temp. crítica (°C)	101,1	109,4
Densidad (kg/m ³)	511,9	489,23
Presión crítica (kPa)	4059	3636
ODP	0	0
GWP	1300	1
Clasificación ASHRAE	A1	A2L

Datos tomados del catálogo de Honeywell [12] y REFPROP [14]

2.2. Ciclo de refrigeración

Para el estudio del ciclo de refrigeración se toman las condiciones de ciclo en un refrigerador con R134a para clima subtropical que tiene una potencia nominal de 0,104 kW y trabaja con un compresor Embraco EM3U50HLP de 1/5 de hp. En la Tabla 2 se presenta las características del refrigerador de referencia.

Tabla 2. Características del refrigerador referencial

Característica	Valor
Denominación	Refrigerador doméstico sin escarcha
Tipo de refrigerante	R134a
Masa de refrigerante	95 kg
Potencia nominal	104 W
Volumen nominal	250 l
Volumen congelador	55 l
Volumen refrigerador	184 l

El refrigerador funciona con temperatura de evaporación a -23,3 °C y condensación a 54,4 °C, de acuerdo con estas condiciones se elabora el ciclo termodinámico para R134a. Los parámetros del ciclo se definen mediante las propiedades termodinámicas propias del refrigerante en las condiciones de funcionamiento en el refrigerador. En la Figura 1 se muestra el diagrama P-h del ciclo de refrigeración con R134a que se realizó utilizando EES [15] y los datos obtenidos experimentalmente.

En el cálculo de los parámetros fundamentales de desempeño del ciclo de refrigeración, se obtiene el coeficiente de desempeño (COP) con la Ecuación 1, este parámetro representa la relación de la capacidad de enfriar con el costo energético causado por el ciclo en la compresión.

$$COP = \frac{Q_e}{W_c} \quad (1)$$

$$Q_e = (h_1 - h_4)\dot{m} \quad (2)$$

Donde:

Q_e : Capacidad frigorífica o de enfriamiento, [W]

W_c : Potencia consumida, [W]

h_1 : Entalpía salida del evaporador, [kJ/kg]

h_4 : Entalpía entrada del evaporador, [kJ/kg]

\dot{m} : Flujo másico de refrigerante, [kg/s]

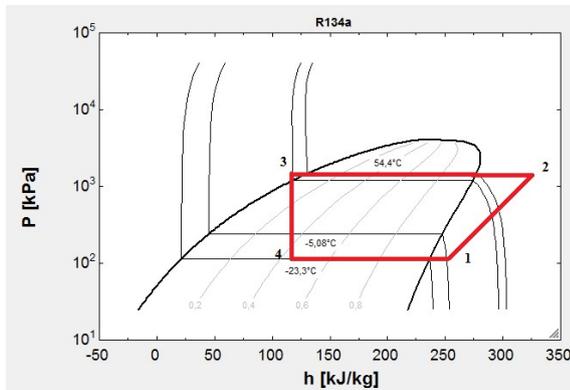


Figura 1. Diagrama P-h, ciclo de refrigeración real con R134a [15]

La eficiencia isentrópica del compresor es la generación de entropía en la compresión real comparada con la generada idealmente. Este parámetro se define por la Ecuación 3.

$$\eta = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad (3)$$

Donde:

η : eficiencia isentrópica

h_{2s} : Capacidad frigorífica, [kJ/kg]

h_{2a} : Potencia consumida, [kJ/kg]

2.3. Ciclo de refrigeración adaptado a R1234ze

Para la comparación de desempeño de R1234ze con R134a se adapta teóricamente el ciclo del refrigerador doméstico de referencia a operar con HFO, sin alterar las condiciones de trabajo. Para esto se diseña el ciclo de refrigeración, utilizando Genetron Properties, se mantiene los parámetros originales del refrigerador de estudio, se ingresa la potencia de consumo, temperatura de condensación, temperatura de evaporación y eficiencia del compresor. Esta simulación será llamada caso A. En la Figura 2 y en la Figura 3 se presentan los diagramas P-h y T-s para el ciclo de refrigeración con R1234ze.

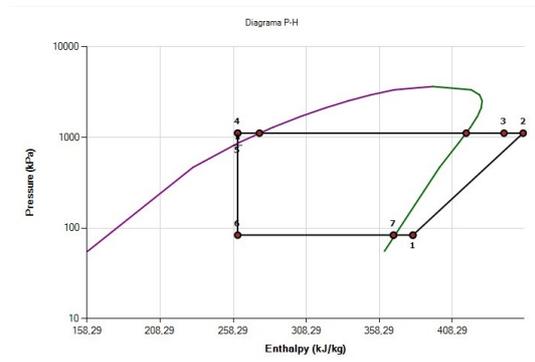


Figura 2. Diagrama P-h, ciclo de refrigeración real con R1234ze

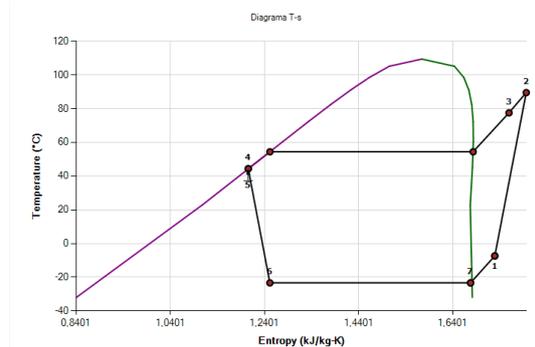


Figura 3. Diagrama T-s, ciclo de refrigeración real con R1234ze

2.3.1. Mejoras al ciclo termodinámico

De acuerdo con las indicaciones de los proveedores de R1234ze se podría mejorar el COP del ciclo compensando la capacidad de enfriamiento del sistema con ciertos ajustes en él, además, al mejorar el rendimiento del compresor se incrementaría la eficiencia del refrigerador con el HFO. La calidad de la mezcla a la salida del evaporador puede ser mejor con R1234ze que con R134a, si el flujo de calor es suficientemente bajo o la velocidad de la masa es suficientemente alta [16], además, se ha visto experimentalmente que el COP mejora para ciclos con R1234ze a mayores valores de temperatura de evaporación [5]. Por otro parte, Sánchez *et al.* [17] indican que se debe usar un compresor con mayor desplazamiento para alcanzar la misma capacidad de enfriamiento que con un sistema con R134a.

Se propone un ciclo mejorado, donde se realizan algunas modificaciones para que el desempeño del ciclo de refrigeración mejore. Se modifican parámetros de funcionamiento del compresor, se reajustan las temperaturas de condensación y evaporación acomodando las presiones de trabajo, se mantienen las características físicas del sistema, así como la potencia de suministro. Cabe recalcar que las modificaciones son teóricas y

para funcionamiento experimental se necesitaría cambios físicos a la instalación del refrigerador doméstico. Sin embargo, estos arreglos son menores comparados con los necesarios para implementar hidrocarburos [10].

En la Figura 4 se presenta el diagrama termodinámico del ciclo de refrigeración para los casos estudiados. En el caso B se mejora el rendimiento del compresor, aumentando el desplazamiento volumétrico y su eficiencia isentrópica. En el caso C se modifican las temperaturas de trabajo, elevando la temperatura de evaporación 5,3 °C y reduciendo la temperatura de condensación 4,4 °C. Todas estas modificaciones buscan mejorar el rendimiento y desempeño del refrigerante en el ciclo de termodinámico de refrigeración.

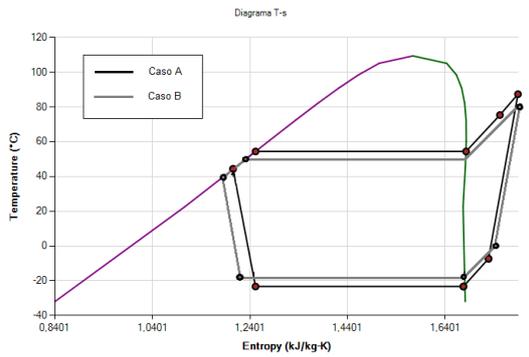


Figura 4. Mejoras al ciclo de refrigeración real con R1234ze Caso A y Caso B, diagrama T-s

2.4. Estudio CFD de transferencia de calor

En el estudio CFD se analiza lo que sucede con el refrigerante en el intercambiador de calor que realiza la absorción del calor, simulando el paso del refrigerante por el evaporador para obtener datos sobre el cambio de fase, temperatura y comportamiento del refrigerante R1234ze. Además, se simula el flujo de aire en el refrigerador con la capacidad de enfriamiento que aporta el HFO, para comparar con las temperaturas alcanzadas en los compartimentos con el R134a las cuales son -13 °C para el congelador y 7 °C para el refrigerador, con un funcionamiento promedio a una temperatura ambiente de 18 °C.

Se realiza el estudio en un modelo geométrico con las dimensiones del refrigerador de referencia que trabaja con R134a. El modelo tiene un volumen total de 239 l de espacio de contenedor de servicio, entre congelador y enfriador. El evaporador está compuesto por tubería de cobre tipo K en forma de serpentín, con diámetro nominal de 3/8 pulgada ubicado en la zona del congelador. La geometría del volumen de control para el refrigerante en el evaporador y el volumen de control para el aire dentro del refrigerador se muestran en la Figura 5.

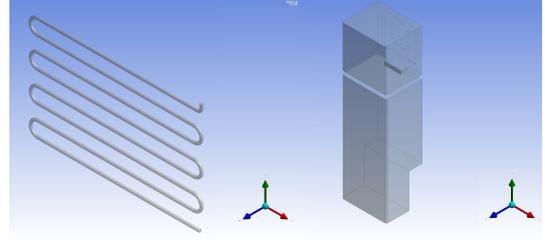


Figura 5. Geometría del volumen de control para simulación. a) Refrigerante en el evaporador. b) Aire dentro del refrigerador

2.4.1. Modelos matemáticos para simulación

Para el aire circundante dentro del refrigerador se utiliza el modelo volumen de fluido para simular la circulación de aire y el cambio de temperatura. Se utiliza el enfoque Euler-Euler para el modelo multifase en el evaporador, este resuelve ecuaciones de momento y continuidad. Se modelan dos fases diferentes que interactúan en el cambio de fase, la primera como líquido o mezcla líquido-vapor y la segunda fase como vapor. Utilizando el concepto de fracción de volumen con ecuaciones de régimen para cada fase, para la concentración de masa en la interacción de las fases se utiliza el modelo establecido por la Ecuación 4.

$$A_i = \frac{6\alpha_p(1 - \alpha_p)}{d_p} \quad (4)$$

Donde:

A_i : Área interfacial

α_p : Fracción de volumen fase q

d_p : Diámetro de burbuja

Los efectos de la viscosidad y turbulencia en el fluido se simulan con el modelo $k-\varepsilon$ RNG, que incluye el efecto de remolino en la turbulencia y se mejora el efecto del número de Reynolds para la viscosidad efectiva [18]. El modelo cuenta con expresiones para cada variable, Ecuación 5 y Ecuación 6.

Para k :

$$\frac{\partial}{\partial r}(pk) + \frac{\partial}{\partial x_i}(pk u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

Para ε :

$$\frac{\partial}{\partial r}(p\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(p\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3s} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (6)$$

Donde:

G_k : Generación de energía cinética de turbulencia debido a la velocidad media

G_b : Generación de energía cinética de turbulencia debido a la flotabilidad

Y_M : Contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible a la tasa de disipación general

S y C : Constantes y términos definidos para cada variable

$R\varepsilon$: Término que se agrega en el método RNG para aumentar la precisión

αk y $\alpha\varepsilon$: Inversos de los números de Prandtl efectivo para k y ε , respectivamente

μ_{eff} : Viscosidad efectiva

La conservación de energía y de masa se establecen mediante balance de la cantidad de materia que entra y la cantidad que sale, bajo el modelo de Euler las leyes que rigen estos parámetros están definidas con la Ecuación 7 y con la Ecuación 8, respectivamente.

Conservación de energía:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q h_q) \\ &= -\alpha_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \bar{t}_q : \nabla \vec{u}_q - \nabla \cdot \vec{q}_q + S_q + \\ & + \sum_{p=1}^n (Q_{pq} + \dot{m}_{pq} h_{pq} - \dot{m}_{qp} h_{qp}) \end{aligned} \quad (7)$$

Conservación de masa:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{u}_q) = \\ & \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} + \dot{m}_{qp}) + S_q \end{aligned} \quad (8)$$

Donde:

h_q : Entalpía específica para la fase secundaria

Q_{pq} : Intensidad de intercambio de calor entre la fase primaria y la secundaria

h_{pq} : Entalpía de cambio de fase

\vec{v}_q : Velocidad de la fase secundaria q

\dot{m}_{pq} : Masa transferida de la fase primaria a la secundaria

\dot{m}_{qp} : Masa transferida de la fase secundaria a la primaria

El modelo de Lee define la transferencia de masa por condensación o evaporación de una fase a otra, se define la fase líquido como la fase primaria y la

fase vapor como secundaria dependiendo de las condiciones del refrigerante al entrar al intercambiador, este modelo está descrito por la Ecuación 9.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{V}_p) \dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq} \quad (9)$$

Donde:

ρ_p : Fase de vapor

\vec{V}_p : Velocidad del vapor

\dot{m}_{pq} : Tasa de masa transferida en evaporación

\dot{m}_{qp} : Tasa de masa transferida en condensación

Además, en la interacción entre fases se integra la correlación de Moraga para definir el coeficiente Lift para simular los efectos que se producen por el remolino causado por el paso del fluido en forma de líquido, el coeficiente de arrastre se define por la correlación Schiller-Naumann para simular el arrastre en la superficie del fluido entre fases [18].

3. Resultados y discusión

Los parámetros termodinámicos obtenidos en el ciclo del refrigerador doméstico con R134a, usados como base para el ciclo con R124ze, están presentados en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del ciclo de refrigeración con R134a

Parámetro	R134a
Temp. de evaporación	-23,3 °C
Sobrecalentamiento	18,3 °C
Temp. de condensación	54,4 °C
Subenfriamiento	8 °C
Flujo másico	0,0012 kg/s
Eficiencia isentrópica	0,688
Potencia consumida	0,104 kW

Con las pruebas termodinámicas realizadas en las simulaciones para R1234ze y los datos obtenidos para R134a se puede observar que la diferencia en el coeficiente de desempeño (COP) del ciclo con R1234ze es reducida en comparación con el de R134a; en la Figura 6 se presentan estos resultados.

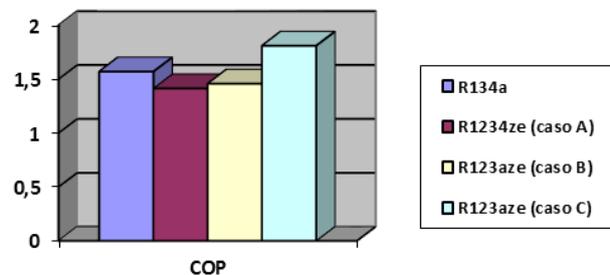


Figura 6. Coeficiente de desempeño (COP)

Lo más importante en un sistema de refrigeración es la capacidad de producir frío o la de eliminar calor, para esto se calcula la capacidad de enfriamiento y la capacidad de calefacción que presenta el ciclo de refrigeración. En la Figura 7 se comparan estos parámetros del ciclo con R134a y los casos A, B y C para R1234ze.

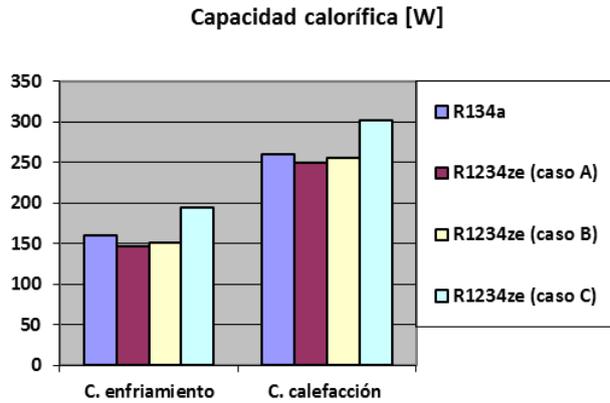


Figura 7. Capacidad de enfriamiento y de calefacción en los ciclos termodinámicos

Se puede observar que el caso C presenta la más alta capacidad calorífica debido a las modificaciones realizadas en las temperaturas de trabajo; sin embargo, para realizar esta modificación es necesario un mayor consumo de energía por parte del compresor lo que disminuiría la eficiencia energética del refrigerador. Por otra parte, los casos A y B presentan capacidades muy similares al ciclo con R134a.

Otro parámetro donde se encontró importantes cambios en el estudio termodinámico es la temperatura de descarga del compresor. Este dato es útil debido a que una elevada temperatura de descarga se traduce en alta fatiga para el compresor, además de no ser favorable en el ciclo termodinámico al aumentar el trabajo consumido por el compresor. En la Figura 8 se presentan los datos obtenidos de variación de temperatura en el compresor para los dos refrigerantes.

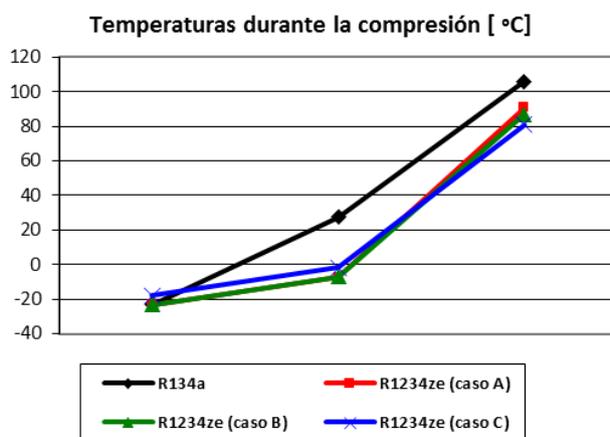


Figura 8. Variación de la temperatura en el proceso de compresión

Debido a las propiedades del HFO se genera menos fatiga en el compresor debido a una menor temperatura de descarga, además, es altamente compatible con varios materiales a diferencia de los hidrocarburos; esto marca una gran ventaja para los HFO en ciclos de compresión de vapor. Un factor importante para el desempeño del compresor también es la velocidad con la que debe fluir el refrigerante. En la Tabla 4 se presenta el flujo másico requerido para cada ciclo estudiado.

Tabla 4. Flujo másico requerido para cada ciclo [kg/s]

R134a	R1234ze (A)	R1234ze (B)	R1234ze (C)
0,0012	0,0013	0,0014	0,0016

3.1. Resultados estudio CFD

3.1.1. Refrigerante en el evaporador

En un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, el evaporador es el encargado de la absorción del calor, de transportarlo hacia el compresor y luego en el condensador expulsarlo al ambiente. En este proceso de absorción, el refrigerante experimenta un cambio de fase de mezcla líquido-vapor a vapor y el desempeño que presente el refrigerante en el proceso es uno de los principales factores que determinan la capacidad de enfriamiento del ciclo.

En la Figura 9 se presenta el cambio de fase a lo largo del evaporador para el refrigerante R1234ze para constatar que el HFO cumple con la evaporación completamente en el intercambiador y no entrega vapor húmedo al compresor, lo que podría causar deterioro en él o mal funcionamiento en la compresión. Se compara el comportamiento con el refrigerante R134a, teniendo una escala de 0 a 1 para la calidad de mezcla, siendo 0 para el estado de ingreso (0,46 para R1234ze y 0,44 para R134a) al evaporador como mezcla líquido-vapor y 1 vapor saturado.

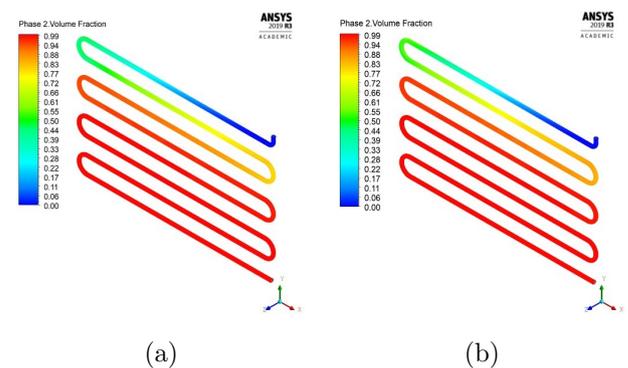


Figura 9. Estado del refrigerante durante el cambio de fase en el evaporador. a) R1234ze, b) R134a

Las características del refrigerante a la entrada del evaporador, tales como presión de trabajo, calidad y

flujo másico, están dadas por el ciclo termodinámico descrito anteriormente para cada refrigerante. Se puede observar que en estas condiciones la evaporación es similar para los dos refrigerantes comparados, el R134a necesita menos longitud de tubería para completar el cambio de fase; sin embargo, el HFO entrega vapor sobrecalentado en mayor porcentaje. En la Figura 10 se muestra un contorno de área promedio medida en la salida del evaporador con la calidad total de la mezcla.

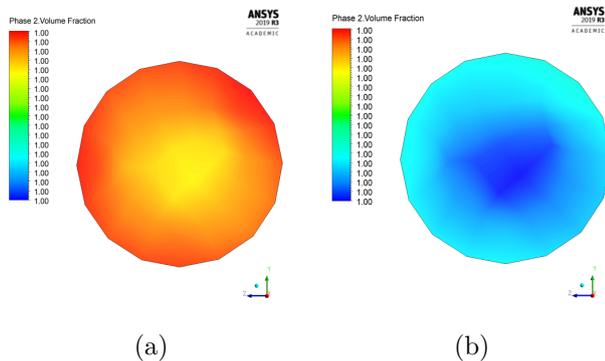


Figura 10. Calidad del refrigerante en la salida del evaporador. a) R1234ze, b) R134a

También se obtiene valores de la temperatura del refrigerante al salir del evaporador, Figura 11. En los resultados se observa que existe sobrecalentamiento durante la absorción del calor, la temperatura es mayor en la superficie del fluido en contacto con la pared del evaporador, llegando a alcanzar en promedio $-6,83\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en el interior del fluido se mantiene en la temperatura de saturación de $-23,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

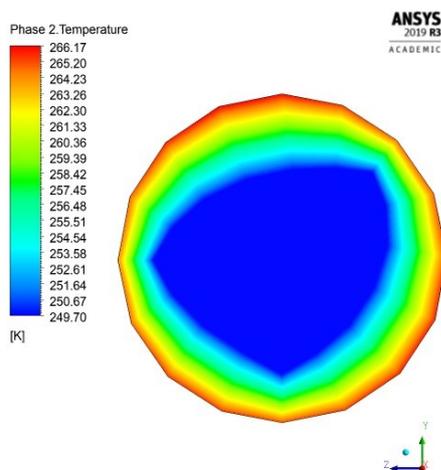


Figura 11. Temperatura del refrigerante (R1234ze) en la salida del evaporador

En comparación con el HFC-134a, el HFO-1234ze alcanza una mayor temperatura de sobrecalentamiento al terminar el proceso de evaporación, esta variación es

muy baja por lo que no causaría un efecto importante en la entrada al compresor. En la Figura 12 se realiza una comparación de la temperatura tomada en varios puntos del fluido al dejar el evaporador.

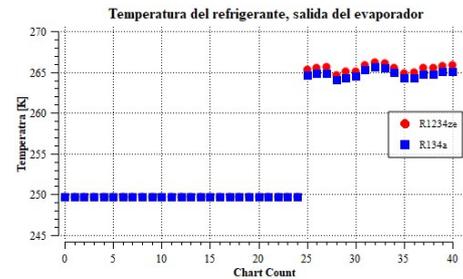


Figura 12. Comparación de temperatura de sobrecalentamiento

Los resultados obtenidos con el estudio CFD de transferencia de calor concuerdan con los resultados hallados con el análisis termodinámico realizado en el evaporador con R1234ze, teniendo los datos para cada estudio respectivamente en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados estudios para el evaporador

Parámetro	CFD	Estudio termodinámico
T. evaporación [$^{\circ}\text{C}$]	-23,3	-23,3
T. sobrecalentamiento [$^{\circ}\text{C}$]	-6,83	-7,3
Flujo másico [kg/s]	0,0013	0,0013
Calidad del fluido	1	1
C. de enfriamiento [W]	146,3	146,4

3.1.2. Flujo de aire dentro del refrigerador

Para el flujo de aire en el volumen de control de 239 l total en los compartimentos, con 55 l para el congelador y 184 l en el enfriador, se simula la circulación de aire a una velocidad promedio de $1,103\text{ m/s}$ generada por un ventilador de refrigerador doméstico *no-frost* que trabaja a 2070 RPM [18]. En la Figura 13 se esquematiza el flujo de aire dentro del refrigerador.

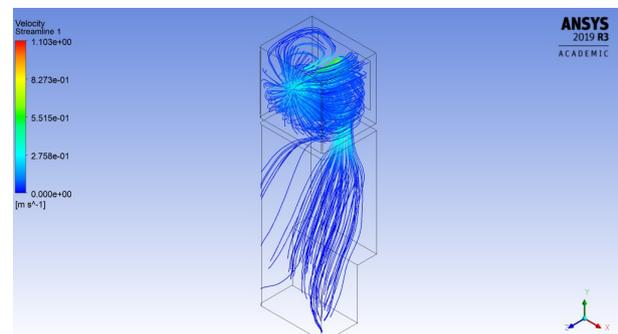


Figura 13. Flujo de aire en el refrigerador

Se realizaron pruebas con este flujo para las capacidades de enfriamiento obtenidas en cada ciclo de

refrigeración con R1234ze en los casos A, B y C de estudio. En la Figura 14 se presentan los resultados en un *volume rendering* de la temperatura en el aire, obtenida con las capacidades de enfriamiento para cada caso. Se simula un flujo de calor de $-146,3$ W para el caso A, $-151,4$ W para el caso B y $-193,7$ W para el caso C.

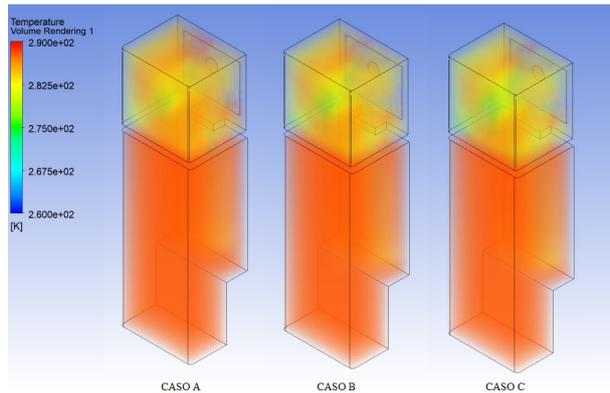


Figura 14. Volume rendering de temperatura en el volumen de control para los casos A, B y C

Las temperaturas alcanzadas en el congelador y el refrigerador no tienen una gran variación en los tres casos de estudio. En la Figura 15 se esquematizan los resultados de las temperaturas en varios puntos del congelador y en la Figura 16 los resultados para partículas en el enfriador.

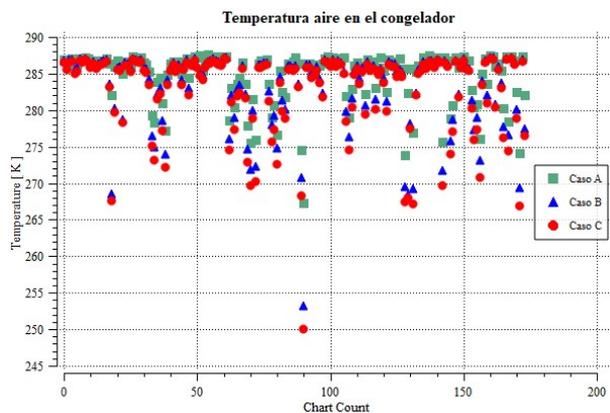


Figura 15. Comparación de temperaturas en el congelador para los casos A, B y C

La temperatura en el congelador en el caso A alcanza un valor promedio de -6 °C, con picos de hasta -8 °C; en el caso B se alcanza un valor promedio de -8 °C, con picos de hasta -18 °C; y en el caso C con rediseño en el sistema se alcanza un valor promedio de -12 °C, con picos de hasta -22 °C.

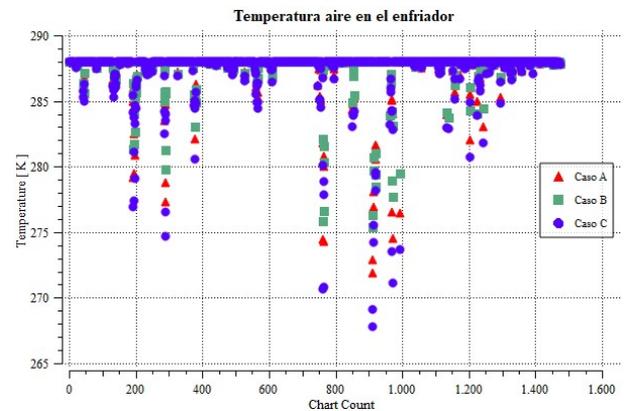


Figura 16. Comparación de temperaturas en el enfriador para los casos A, B y C

La temperatura en el enfriador con el caso A alcanza un valor promedio de 6 °C con picos de hasta 2 °C; en el caso B se alcanza un valor promedio de 4 °C, con picos de hasta 0 °C y en el caso C se alcanza un valor promedio de 2 °C, con picos de hasta -4 °C. Estos resultados no toman en cuenta pérdidas por entrada de aire al abrir las puertas.

4. Conclusiones

Las sustancias de la familia HFO se les considera como la cuarta generación en refrigerantes florados, esto debido a sus propiedades físicas y ambientales y son una excelente opción para diseñar sistemas de refrigeración o aire acondicionado. El HFO-1234ze es una de estas opciones, el cual por sus características es un muy probable remplazo para R134a en sistemas de refrigeración doméstica. Presenta un aporte al calentamiento global $99,9$ % más bajo que el R134a y 75 % más bajo que el R600a, los refrigerantes más usados en refrigeración doméstica y por sus características de nula toxicidad y ligeramente inflamable, cumple con los requisitos ambientales y de seguridad necesarios en la actualidad.

Con los resultados obtenidos en las pruebas termodinámicas y de transferencia de calor realizadas con Genetron Properties y ANSYS Fluent, además del análisis matemático, se puede concluir que el refrigerante HFO-1234ze es apto para trabajar en un refrigerador doméstico, mostrando parámetros de refrigeración necesarios sin presentar el costo ambiental de los HFC convencionales y la alta inflamabilidad de los hidrocarburos.

Con las mismas condiciones de funcionamiento en un refrigerador doméstico, el HFO presenta una capacidad de enfriamiento únicamente 8 % más baja que el HFC-134a; con adaptaciones en el proceso de compresión se logra una capacidad de enfriamiento 5 % más baja y rediseñando el sistema para diferentes temperaturas de trabajo se tiene una capacidad

de enfriamiento 20 % superior; sin embargo, con este rediseño la eficiencia energética disminuye un 2 %. El coeficiente de desempeño (COP) del ciclo es de 1,57 con R134a, 1,41 para R1234ze sin ajustes, 1,46 para R1234ze con mejoras al compresor y 1,8 para R1234ze con rediseño.

La temperatura de descarga en el compresor es notablemente inferior con el refrigerante R1234ze en comparación al R134a, siendo en promedio 16 °C inferior, lo que favorece mucho a la vida útil del compresor y el consumo energético del mismo. También se pudo observar que la temperatura de succión no tiene variaciones importantes entre los dos fluidos y que, en todos los casos, se entrega vapor no húmedo al compresor. Las temperaturas que se logran en el interior del refrigerador tanto en el congelador como en el enfriador son muy similares a las experimentales del refrigerador de referencia con lo cual se espera conseguir una correcta refrigeración al usar el refrigerante R1234ze.

Para realizar adaptaciones físicas a un sistema de refrigeración y trabajar con R134ze, se deben tomar en cuenta los datos sobre la capacidad de enfriamiento, las temperaturas y presiones de trabajo. Se tiene que aprovechar las características termodinámicas del refrigerante en el ciclo, ya que el refrigerante trabaja mejor con temperaturas de evaporación más altas y por sus propiedades lo hace mejor en el proceso de compresión. En futuras investigaciones se recomienda estudiar mezclas de HFO con HFC para remplazar al segundo en totalidad sin tener que remplazar los dispositivos que componen el sistema de refrigeración.

Referencias

- [1] ONU. (2019) Día Internacional de la Preservación de la capa de ozono, 16 de septiembre. [Online]. Available: <https://bit.ly/31DBnQf>
- [2] D. Fahey, P. A. Newman, J. A. Pyle, B. Safari, M. P. Chipperfield, D. Karoly, D. E. Kinnison, M. Ko, M. Santee, and S. J. Doherty, *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 58*. World Meteorological Organization, 01 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3oil19H>
- [3] L. Höglund-Isaksson, P. Purohit, M. Amann, I. Bertok, P. Rafaj, W. Schöpp, and J. Borken-Kleefeld, “Cost estimates of the kigali amendment to phase-down hydrofluorocarbons,” *Environmental Science & Policy*, vol. 75, pp. 138–147, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.05.006>
- [4] A. Mota-Babiloni, J. Navarro-Esbrí, A. Barragán, F. Molés, and B. Peris, “Drop-in energy performance evaluation of r1234yf and r1234ze(e) in a vapor compression system as r134a replacements,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 71, no. 1, pp. 259–265, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.06.056>
- [5] A. Yataganbaba, A. Kilicarslan, and I. Kurtbas, “Exergy analysis of r1234yf and r1234ze as r134a replacements in a two evaporator vapour compression refrigeration system,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 60, pp. 26–37, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.08.010>
- [6] M. O. McLinden, A. F. Kazakov, J. Steven Brown, and P. A. Domanski, “A thermodynamic analysis of refrigerants: Possibilities and tradeoffs for Low-GWP refrigerants,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 38, pp. 80–92, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.09.032>
- [7] D. Sánchez, I. Arauzo, J. Catalán Gil, R. Cabello, R. Doménech, and E. Torrella, “Evaluación energética de una instalación frigorífica empleando refrigerantes de bajo GWP,” in *CYTEF 2016 – VIII Congreso Ibérico / VI Congreso Iberoamericano de las Ciencias y Técnicas del Frío Coimbra-Portugal, 3-6 mayo, 2016*, 05 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/31EdI29>
- [8] W. C. Whitman and W. M. Jonhson, *Tecnología de la refrigeración y aire acondicionado Tomo II*. Editorial Paraninfo, 2000. [Online]. Available: <https://bit.ly/34u3xiN>
- [9] N. Jara and C. Isaza-Roldan, “Análisis comparativo de sistemas de refrigeración doméstica utilizando refrigerantes R600a y R134a,” *Revista I+T+C: Investigación, Tecnología y Ciencia*, vol. 1, pp. 7–15, 08 2015. [Online]. Available: <https://bit.ly/2TnGIXo>
- [10] GASSERVEI, “Ficha técnica R-1234ze,” GASSERVEI, Tech. Rep., 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3dUDJ2e>
- [11] Honeywell, “The environmental alternative to traditional refrigerants. solstice ze refrigerant (HFO-1234ze (E)),” Honeywell, Tech. Rep., 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3mhCY6d>
- [12] N. A. Lai, “Equations of state for HFO-1234ze(E) and their application in the study on refrigeration cycle,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 43, pp. 194–202, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.11.011>
- [13] E. W. Lemmon, I. H. Bell, M. L. Huber, and M. O. McLinden, *REFPROP Documentation Release 10.0*. National Institute of Standards and Technology (NIST), 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3omeSct>

- [14] K. A. Klein and F. L. Alvarado, *EES-Engineering Equation Solver*. Version 6.648 ND, F-Chart Software, Middleton, 2004.
- [15] G. A. Longo, S. Mancin, G. Righetti, and C. Zilio, “R1234yf and R1234ze(e) as environmentally friendly replacements of R134a: Assessing flow boiling on an experimental basis,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 108, pp. 336–346, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.09.008>
- [16] D. Sánchez, R. Cabello, R. Llopis, I. Arauzo, J. Catalán-Gil, and E. Torrella, “Energy performance evaluation of R1234yf, R1234ze(e), R600a, R290 and R152a as low-GWP R134a alternatives,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 74, pp. 269–282, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.09.020>
- [17] ANSYS, *ANSYS Fluent Theory Guide*. SAS IP, Inc., 2013. [Online]. Available: <https://bit.ly/3jk7GtC>
- [18] H. Benjumea, C. Isaza-Roldan, S. Rio, N. Jara, and J. Ospina, “Simulación del flujo de aire al interior de un refrigerador doméstico no frost,” in *VII Congreso Ibérico de Ciencias y Técnicas del Frío*, 06 2014. [Online]. Available: <https://bit.ly/2TnHwvE>