

## Análisis del comportamiento de un eyector para aplicaciones de refrigeración utilizando CFD

### Analysis of an ejector for refrigeration applications using CFD

ROMÁN-AGUILAR, Raúl<sup>1†\*</sup>, HERNÁNDEZ-GUTIERREZ, Jorge Isaac<sup>2</sup>, VALLE-HERNÁNDEZ, Julio<sup>1</sup> y FARFAN-FLORES, Daniel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior de Apan

<sup>2</sup>Instituto de Energías Renovables – UNAM

ID 1<sup>er</sup> Autor: Raúl, Román-Aguilar / ORC ID: 0000-0003-0753-2352, Researcher ID Thomson: I-6746-2018, CVU CONACYT ID: 165332

ID 1<sup>er</sup> Coautor: Jorge Isaac, Hernández-Gutiérrez

ID 2<sup>do</sup> Coautor: Julio, Valle-Hernández / ORC ID - 0000-0001-8957-0066, Researcher ID Thomson: O-7339-2018, CVU CONACYT ID: 210743

ID 3<sup>er</sup> Coautor: Daniel, Farfan-Flores

Recibido 25 Junio, 2018; Aceptado 25 Septiembre, 2018

#### Resumen

Uno de los equipos de mayor consumo energético en cualquier sector son los sistemas de refrigeración y aire acondicionado, los cuales en su mayoría son sistemas de compresión de vapor, donde el compresor mecánico es la pieza clave de estudio, ya sea buscando un reemplazo a este elemento o adicionando piezas que contribuyan a una disminución en el consumo de energía. Una alternativa es el uso de eyectores, los cuales pueden sustituir el compresor si se adiciona además un generador de vapor y una bomba o pueden combinarse con los elementos del sistema de compresión de vapor para disminuir el consumo energético. Esto obliga a entender el comportamiento de estos dispositivos que permitan su adecuada implementación, motivo por el cual en este trabajo se presenta un análisis del comportamiento del eyector aplicando dinámica de fluidos computacionales CFD. El estudio se realiza sobre un modelo bidimensional y se simula con experimentales, siendo el fluido de trabajo refrigerante R134a y se emplea el software ANSYS FLUENT. Como resultado del análisis se obtiene los campos de presión y velocidad, ayudando a entender los fenómenos que ocurren al interior de un eyector para aplicaciones de refrigeración.

#### Eyector, Refrigeración, CFD

#### Abstract

One of the equipment with the highest energy consumption in any sector is the refrigeration and air conditioning systems, which are mostly steam compression systems, where the mechanical compressor is the key piece of study, either looking for a replacement to this element or adding pieces that contribute to decrease in energy consumption. An alternative is the use of ejectors, which can replace the compressor if a steam generator and a pump are also added or can be combined with the elements of the vapor compression system to reduce the energy consumption. which need to understand the behavior of these devices that allow their proper implementation, therefor in this paper an analysis of an ejector behavior is presented using CFD computational fluid dynamics. The study is carried out on a two-dimensional model and is simulated with experimental ones, the R134a refrigerant work fluid being used and the ANSYS FLUENT software is used. As a result, the pressure and velocity fields are obtained, helping to understand the phenomena that occur inside an ejector for refrigeration applications.

#### Ejector, Refrigeration, CFD

**Citación:** ROMÁN-AGUILAR, Raúl, HERNÁNDEZ-GUTIERREZ, Jorge Isaac, VALLE-HERNÁNDEZ, Julio y FARFAN-FLORES, Daniel. Análisis del comportamiento de un eyector para aplicaciones de refrigeración utilizando CFD. Revista de Ingeniería Mecánica. 2018. 2-7: 8-12.

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: roman94340@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La refrigeración es el proceso que permite reducir la temperatura de un espacio mediante la extracción y transporte de calor de una zona de baja temperatura, a otra de alta temperatura, haciendo uso de sistemas y leyes termodinámicas. La refrigeración es una necesidad que interviene en múltiples actividades del ser humano, siendo las principales la conservación de diversos productos biológicos y el desarrollo de procesos industriales, no obstante, su mayor problema es el elevado consumo de energía por parte de los sistemas comúnmente utilizados que son los sistemas de compresión de vapor. Estos sistemas se componen de un compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador, principalmente, siendo el primer elemento el que mueve todo el sistema y que es motivo de estudio para su mejoramiento o reemplazo por otros componentes o sistemas como los denominados de eyecto-compresión.

En Europa, en 2012, se consumieron 546 millones de toneladas equivalentes de petróleo de energía final, en calefacción y refrigeración. Del total, el 45% de la energía se consumió en el sector residencial, el 18% en el sector terciario y el 37% en la industria (Álvarez Pelegry, 2017), lo que hace necesario una profunda investigación en este campo a fin de disminuir el elevado consumo energético de estos sistemas.

El sistema de eyecto-compresión se encuentra dentro del grupo de los llamados sistemas térmicos de refrigeración, los cuales utilizan una fuente de calor para elevar la presión y temperatura de un fluido, que en conjunto con una bomba mecánica generan el funcionamiento del sistema. Lo cual es atractivamente económico al utilizar calor de desecho de algún proceso industrial o energías alternativas como es la solar térmica, disminuyendo así el consumo de energía eléctrica.

En función de lo anteriormente descrito es que en este estudio se propone el análisis del comportamiento de un eyector para aplicaciones de refrigeración, mismo que permita entender los fenómenos que se desarrollan en el interior de estos elementos por parte de la dinámica de fluidos para generar diseños óptimos que cumplan con los requerimientos de esta aplicación.

Este estudio se desarrolla con el uso de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD), resolviendo ecuaciones que se derivan de los principios de conservación de energía, masa y momento.

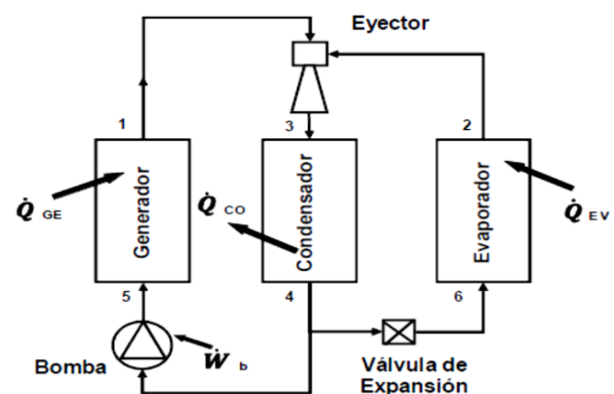
La simulación en CFD de eyectores ofrece la posibilidad de visualizar cual será el comportamiento y que fenómenos se desarrollarán dentro del eyector, al trabajar con datos experimentales se obtienen resultados apegados a procesos reales, según (Zhaoqiu Ding, 2016), para modelos en 2D y 3D comparados con resultados experimentales obtuvieron un error relativo medio aproximado del 6.26% y 4.38 respectivamente; lo que nos indica el grado de confiabilidad que la técnica CFD proporciona.

## Metodología a desarrollar

Este trabajo se enfoca en particular a conocer el grado de arrastre que se puede generar a través del comportamiento de la presión y velocidad del fluido primario, ya que de ello depende el funcionamiento del eyector y además saber si el eyector cumple con un comportamiento adecuado, al compararlo con resultados de la literatura. Para lograr esto, se realizará la simulación del eyector en el software ANSYS FLUENT versión 17.2

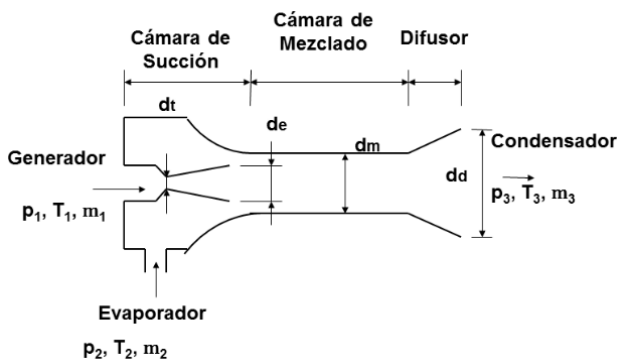
## Descripción del sistema

Un sistema de refrigeración por Eyecto-compresión, está formado por un generador, condensador, un evaporador, un eyector, una bomba y una válvula de expansión (Allhouse, Turmquis, & Bracciano, 2000) como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1** Sistema de refrigeración por eyecto-compresión  
Fuente: Elaboración Propia

El eyector es el principal componente y es el que realiza la termo-compresión del fluido proveniente del evaporador, con la ayuda del fluido motor que proviene del generador. En la figura 2 se muestra la configuración de un eyector, siendo las tres partes principales una cámara de succión donde se aloja la boquilla principal, cámara de mezclado y difusor. Su principio de operación básicamente consta de hacer pasar un fluido  $m_1$  a través de la boquilla principal a una alta velocidad y generando una baja presión a su salida, capaz de arrastrar el fluido  $m_2$ , mezclándose y saliendo a una presión intermedia en el difusor; de acuerdo a la teoría de flujo compresible.



**Figura 2** Partes de un eyector  
Fuente: Elaboración Propia

La eficiencia energética del sistema de refrigeración por eyecto-compresión está dada por el coeficiente de operación del sistema, COPs, y se define como:

$$COPs = \frac{\dot{Q}_{EV}}{\dot{Q}_{GE} + \dot{W}_b} \quad (1)$$

Donde  $\dot{Q}_{EV}$  es el calor que ingresa al evaporador,  $\dot{Q}_{GE}$  El calor que ingresa al Generador y  $\dot{W}_b$  el trabajo de la bomba. En función de las entalpías, la ecuación queda expresada como

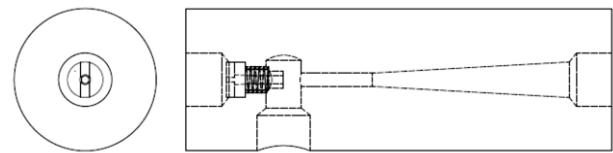
$$COPs = \frac{\dot{m}_2(h_2 - h_6)}{\dot{m}_1(h_1 - h_4)} \quad (2)$$

Donde  $m$  representa el flujo masico y  $h$  las entalpías. Observando que la eficiencia del sistema de refrigeración por eyecto-compresión está ligada directamente a la relación de flujos másicos que ingresa al eyector (Adriano Milazzo, 2014), definiéndose esta relación como la tasa de arrastre del eyector  $U$ .

$$COPs = U \frac{(h_2 - h_6)}{(h_1 - h_4)} \quad (3)$$

La figura 3 muestra la configuración del eyector real sobre el cual se obtuvieron resultados experimentales y en este trabajo se desarrolla el estudio de simulación.

En ella se muestra el ensamble de la tobera convergente divergente en el cuerpo del eyecto compresor, la cual se introduce de forma roscada hasta que topa con un asiento, de manera que la salida de la boquilla de la tobera primaria se encuentra después de la mitad del diámetro de la sección de entrada del flujo secundario.



**Figura 3** Eyector de trabajo para el presente análisis  
Fuente: Elaboración Propia

## Desarrollo

### Dinámica de fluidos Computacionales.

El presente estudio emplea el software ANSYS FLUENT versión 17.2, el cual se basa en el uso del método de volúmenes finitos, donde se resuelve la forma integral las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía, y el dominio de estudio es subdividido en un número finito de volúmenes de control.

En el centro de cada uno de estos, existe un punto que se le conoce como nodo computacional y se calcula el valor de las variables.

Las integrales superficiales se aproximan usando la discretización directa de las ecuaciones de conservación mencionadas. El resultado es una ecuación discretizada que relaciona los valores de las variables en un grupo de puntos nodales. La ecuación 4 muestra los parámetros de solución y consta de los términos transitorio, de Convección, de difusión y generación, respectivamente.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_v \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi V = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA + \oint_v S_\phi dV \quad (4)$$

## Flujo compresible

El comportamiento de fluidos que atraviesan toberas y difusores, está regido por la teoría de flujo compresible, siendo el eyector una combinación de estos, cuyas ecuaciones gobernantes son (White, 1991).

Ecuación de continuidad

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div} u = 0 \quad (5)$$

Ecuación de momento

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g - \nabla p + \nabla \tau_{ij} = 0 \quad (6)$$

Ecuación de energía

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \operatorname{div}(k\nabla T) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

Donde el tensor de esfuerzos es

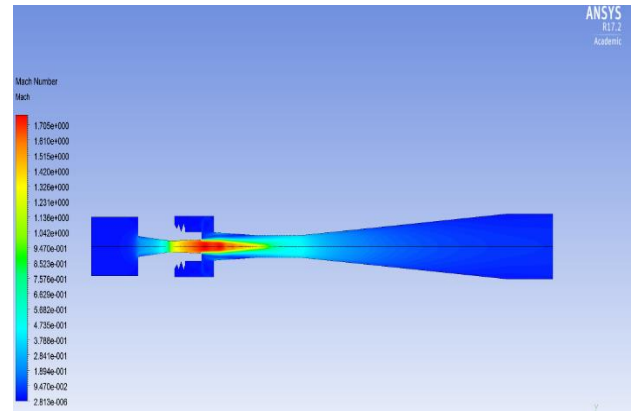
$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} I \operatorname{div} u \right) \quad (8)$$

El eyector fue simulado bajo condiciones simétricas, doble precisión, condiciones de estado estable y modelo k-epsilon, basado en densidad.

## Resultados y análisis

La figura 4 muestra el comportamiento del número de mach, a lo largo de la geometría del eyector, donde de acuerdo a la escala numérica y de colores, el mayor número se tiene a la salida de la tobera primaria, en concordancia con la teoría de flujo compresible la cual menciona que el número de Mach es unitario en el punto donde el área del flujo es mínima y se le conoce como la garganta (Cengel & Boles, 2017).

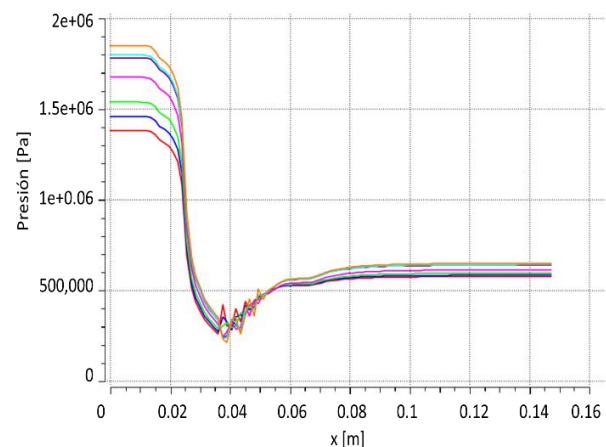
Después de esta sección, la velocidad del fluido continúa incrementándose al igual que el área de flujo. Este aumento de velocidad después de atravesar la garganta se debe a un decremento acelerado de la densidad del fluido. Esto se utiliza para acelerar gases a velocidades supersónicas y es la parte que se aprovecha para la operación de los eyectores.



**Figura 4** Comportamiento del número de mach a lo largo de la geometría del eyector

Fuente: *Elaboración Propia*

Las figuras 5 y 6 muestran los perfiles de presión y velocidad a lo largo del eje del eyector, respectivamente, mostrando 7 líneas de acuerdo a 7 puntos obtenidos de forma experimental (Roman, 2012).

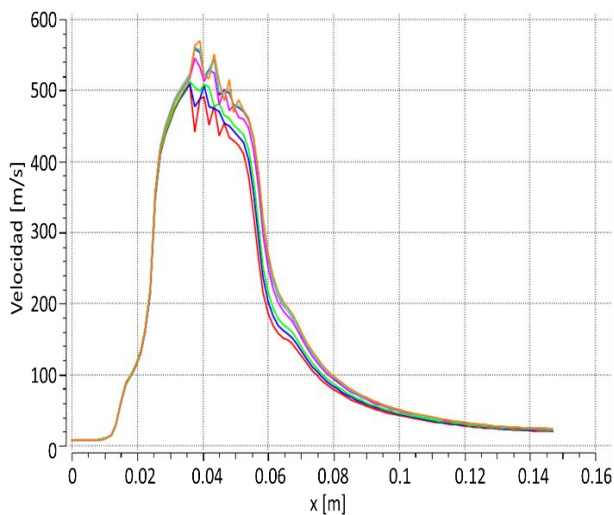


**Grafica 1** Perfil de presión a lo largo del eje del eyector

Fuente: *Elaboración Propia*

En la gráfica 1 se aprecia las diferentes condiciones de entrada relativos a la presión, es decir, experimentalmente se incrementando la temperatura del generador y velocidad de giro de la bomba para generar un punto experimental diferente. De acuerdo a la geometría del eyector, la sección recta es la sección de entrada, después inicia una caída de presión debido a una reducción de área, esta caída de presión continúa más allá de la sección de área mínima llamada garganta, mencionada anteriormente, hasta un punto mínimo que es a la salida de la tobera convergente-divergente primaria, donde experimenta una inestabilidad, debido a la turbulencia generada al final de la expansión y se encamina hacia la entrada de la tobera convergente divergente secundaria, de tan manera que incrementa la presión hasta una zona de estabilidad para salir del eyector.

La grafica 2 muestra de igual forma los 7 puntos experimentales, pero en un perfil de velocidad, la cual esta a su vez ligada con el número de Mach, que al compararse con la figura 5, la zona de inestabilidad coincide con la salida de la tobera convergente divergente primaria. Donde de acuerdo a la figura 5 se está alcanzando un Mach de casi 1.8.



**Grafica 2** Perfil de velocidad a lo largo del eje del eyector  
Fuente: Elaboración Propia

Mismos comportamientos se han reportado por otros autores. (Michal, Jacek, Andrzej, Krzysztof, & Armin, 2017) y (Krzysztof, y otros, 2014).

## Conclusiones

El trabajo presentado reproduce los comportamientos de la dinámica de fluidos por otros autores, lo que va de la mano con el trabajo experimental, es decir, los resultados experimentales se están reproduciendo, de manera que este trabajo se puede tomar de base para predecir el comportamiento bajo otras condiciones de operación, lo que facilitaría avanzar en generar un mapa de comportamiento para definir cuestiones de diseño de un eyector.

Las herramientas computacionales nos muestran que ocurre al interior del eyector, algo que no se aprecia de forma experimental, de forma que podemos entender de una mejor forma la operación del sistema y tomar acciones necesarias para el buen funcionamiento.

Los resultados obtenidos permiten avanzar en el entendimiento del comportamiento de eyectores y determinar su uso para aplicaciones de refrigeración, que en conjunto con los demás componentes del sistema determinar su campo de acción.

## Agradecimientos

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Ciencias Básicas CB-2014-01, 0240382.

## Referencias

Adriano Milazzo, A. R. (2014). Theoretical and experimental activity on Ejector Refrigeration. *Energy Procedia*, 45, 1245-1254.

Allhouse, Turmqis, & Bracciano. (2000). *Modern refrigeration and air conditioning*. Goodheart-Willcox Pub.

Álvarez Pelegry, E. L. (2017). Energías renovables en calefacción y refrigeración en los sectores residencial y terciario. *Documentos de Energía*. España: Cuadernos Orkestra.

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2017). *Termodinámica* (Septima ed.). Mc.GrawHill.

Krzysztof, B., Michał, P., Armin, H., Zbigniew, B., Jacek, S., Andrzej, J. N., & Adam, F. (2014). A CFD-based investigation of the energy performance of two-phase R744 ejectors to recover the expansion work in refrigeration systems: An irreversibility analysis. *International Journal of refrigeration*, 328-337. doi:doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.12.002

Michal, P., Jacek, S., Andrzej, J. N., Krzysztof, B., & Armin, H. (2017). Shape optimisation of a two-phase ejector for CO2 refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration*, 210-221.

Roman, R. (2012). *Estudio teórico-experimental de un sistema de enfriamiento de eyecto-compresión*. Mexico: Tesis UNAM.

White, F. (1991). Viscous Fluid Flow. En F. White, *Viscous Fluid Flow*. McGraw Hill.

Zhaoqiu Ding, L. W. (2016). Numerical study and design of a two-stage ejector for subzero refrigeration. *Applied Thermal Engineering*, 108.