



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
ESCUELA SUPERIOR DE APAN

TESIS:

**ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DE UN EYECTOR
UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONALES PARA UN SISTEMA DE
REFRIGERACIÓN POR EYECTO-COMPRESIÓN**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
**LICENCIADO EN INGENIERÍA
EN
TECNOLOGÍA DEL FRÍO**

PRESENTA:

Daniel Farfán Flores

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Raúl Román Aguilar

CO-DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Julio Valle Hernández



Oficio Numero: ESAp-122/2020
Asunto: Autorización de impresión de tesis

MTRO. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Por este medio le comunico que el jurado asignado al pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Tecnología del Frío, **Daniel Farfán Flores** quien Presenta el trabajo de titulación **“Análisis de funcionamiento de un eyector utilizando dinámica de fluidos computacionales para un sistema de refrigeración por eyecto-compresión”**, después de revisar el trabajo ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad del jurado:

Presidente: Dr. Alejandro Morales Peñalosa

Secretario: Dr. Julio Valle Hernández

Vocal: Dr. Raúl Román Aguilar

Primer suplente: M en C Víctor Castillo Jiménez

Segundo suplente: Dr. José Esteban Aparicio Burgos

ATENTAMENTE
“Amor, Orden Y Progreso”
 Apan Hidalgo, a 22 de julio de 2020

Ing. Minerva Rosales Gayosso
Directora de la Escuela Superior de Apan



Carretera Apan-Calpulalpan, Km.8.,
 Chimalpa Tlalayote s/n, Colonia Chimalpa,
 Apan, Hgo., México. C.P. 43900
 Teléfono: 52 01 (771) 71 720-00 Ext. 5800, 5801
 esap@uaeh.edu.mx

AGRADECIMIENTOS:

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por la oportunidad que me brindo para formarme como Licenciado en Ingeniería en Tecnología del Frío.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo recibido a través de una beca para poder concluir la presente tesis, a partir del proyecto de Ciencias Básicas “Diseño de un sistema de refrigeración por efecto-compresión” con CLAVE CB-2014-01-240382.

Índice

Lista de Figuras.....	I
Lista de Tablas.....	II
Nomenclatura.....	II
I. Introducción.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Justificación.....	4
1.3 Hipótesis.....	5
1.4 Objetivos.....	6
II. Marco teórico.....	7
2.1 Refrigeración.....	8
2.2 Sistemas de refrigeración.....	8
2.2.1 Sistema de refrigeración de compresión de vapor.....	8
2.2.2 Sistemas de refrigeración por absorción.....	11
2.2.3 Sistema de refrigeración por eyecto-compresión.....	12
2.3 Fluidos de trabajo.....	17
2.4 Flujo compresible.....	18
2.4.1 Velocidad del sonido.....	19
2.4.2 Número de Mach.....	21
2.4.3 Variación de la velocidad del fluido con el área de flujo en toberas y difusores.....	21
2.4.4 Toberas convergentes divergentes.....	22
2.4.5 Ondas de choque.....	24
2.5 Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD).....	25
2.5.1 Procesado.....	25
2.5.2 Cálculo.....	27
2.5.3 Post procesado.....	31
III. Metodología.....	32
3.1 Planteamiento.....	33

3.2 Desarrollo de la simulación	33
IV. Resultados y análisis	45
4.1 Resultados y análisis trabajando con R-134a para validación	46
4.2 Resultados y análisis trabajando con R-152a y R-1234yf comparando con R-134a	48
Conclusiones.....	51
Bibliografía.....	52

Lista de Figuras

Figura 1. Sistema de refrigeración de compresión a vapor.....	9
Figura 2. Sistema de refrigeración por absorción.....	11
Figura 3. Estructura del eyector	13
Figura 4. Sistema de refrigeración por eyecto-compresión y ciclo termodinámico	15
Figura 5. Volúmenes de control en un émbolo.....	19
Figura 6. Toberas y Difusores	22
Figura 7. Comportamiento de una tobera convergente divergente	24
Figura 8. Diagrama $h - S$ de las curvas de Fanno y Reyligh.....	25
Figura 9. Descripción del solucionador basado en densidad	29
Figura 10. Diagrama de flujo	34
Figura 11. Plano del eyector en 2D	35
Figura 12. Propiedades de la geometría	35
Figura 13. Generación de la malla	36
Figura 14. Calidad de la malla.....	37
Figura 15. Condiciones generales.....	38
Figura 16. Modelos.....	38
Figura 17. Selección de refrigerante de la base de datos	39
Figura 18. Propiedades del refrigerante	40
Figura 19. Condiciones de presión y temperatura.....	41
Figura 20. Controles de solución.....	41
Figura 21. Valores residuales.....	42
Figura 22. Inicialización híbrida	43
Figura 23. Iteraciones de la solución.....	43
Figura 24. Visualización de resultados.....	44
Figura 25. Número de Mach al interior del eyector en R-134a	46
Figura 26. Presión y velocidad de R-134a	47
Figura 27. Número de Mach al interior del eyector en R-134a, R-152a y R-1234yf.....	49

Figura 28. Presión y velocidad en los refrigerantes R-134a, R-152a, y R-1234yf.....	50
---	----

Lista de Tablas

Tabla 1. Propiedades de los refrigerantes.....	18
Tabla 2. Parámetros de calidad de la malla	26
Tabla 3. Datos experimentales.....	33

Nomenclatura

R-152a	1,1-difluoroetano
R-123	2,2-dicloro-1,1,1-trifluoroetano
R-134a	1,1,1,2-tetrafluoroetano
R-717, NH_3	Amoníaco
R-11	Triclorofluorometano
CO_2	Dióxido de carbono
H_2O	Agua
U	Tasa de arrastre
η_ϵ	Eficiencia del eyector
P	Presión
c	Velocidad del sonido
A	Área

K	Razón de calores específicos
R	Constante del gas
T	Temperatura
Ma	Número de Mach
\dot{m}	Flujo másico
$h_{1,2,3,4,5\dots}$	Entalpías de los procesos
S	Entropía
ϕ	Variable transportada
ρ	Densidad
Γ	Constante de difusión
V	Velocidad
S_ϕ	Término fuente

I. Introducción

1.1 Introducción

La refrigeración es una de las principales técnicas que ha utilizado el hombre desde la antigüedad para poder conservar sus alimentos y actualmente persiste, no obstante, en nuestra era suena difícil prescindir de ella al ser utilizada para diferentes procesos industriales, condiciones de confort, almacenamiento de productos biológicos, entre otros. Esto sin duda ha permitido que en el transcurso del tiempo se desarrollen nuevas tecnologías, las cuales han ido en aumento desde el uso de los métodos químicos y físicos, entre los que se encuentra el sistema de refrigeración por eyecto-compresión.

En la actualidad, la eficiencia energética juega un papel cada vez más importante debido a la creciente demanda mundial de energía y en la refrigeración, esto no es la excepción. Es por ello que es necesario avanzar en el desarrollo de dispositivos de recuperación de trabajo, como los eyectores, que recuperan parcialmente la energía cinética liberada durante la expansión en lugar de disiparla en un proceso de estrangulamiento como ocurre en un sistema de refrigeración por compresión de vapor.

Una máquina de enfriamiento por eyecto-compresión pertenece a la clase de máquinas de enfriamiento por calor, en este caso, el eyector realiza las funciones de un compresor, pero no tiene elementos móviles y es estructuralmente mucho más simple que el compresor. Los eyectores generalmente se usan cuando se dispone de grandes cantidades de vapor o gas como fluidos motrices a bajo costo (Torrella Alcaraz, 2010).

Las primeras investigaciones sobre los sistemas de eyecto-compresión, fueron por chorro de vapor de agua, donde (Jackson D. H., 1936) presento datos de la capacidad de enfriamiento del evaporador y consumo de flujo de agua en el generador, además del enfriamiento del condensador, siendo la década de 1930 donde las unidades de refrigeración por chorro de vapor experimentaron popularidad por el aire acondicionado de grandes edificios.

En un estudio teórico y experimental de un refrigerador por chorro de vapor de agua realizado por (I.W Eames, 1995), el cual probó con temperaturas de generador en un rango de 120-140 °C, mostrando que los datos experimentales estaban dentro del 85% de los valores teóricos, por otra parte el Coeficiente de Operación (COP) máximo se obtuvo cuando el eyector se trabajó en condiciones de flujo crítico.

Años más tarde los estudios no solo se realizaron con agua, sino que ahora se implementaron refrigerantes, como el desarrollado por (Da- Wen Sun, 1999) que eligió dos fluidos de trabajo para el sistema de refrigeración por eyección, agua y R-152a. Con la finalidad de comparar los resultados, que demuestran que los sistemas de chorro de vapor de agua tienen un COP muy bajo, mientras que el sistema que usa R-152a como refrigerante tiene un mejor rendimiento.

(K. Cizungu, 2001) realizó una simulación por computadora de un sistema de refrigeración por chorro de vapor de agua utilizando un modelo basado en las ecuaciones de masa, momento y energía. La comparación del sistema se realiza para la misma geometría del eyector utilizando los fluidos de trabajo R-123, R-134a, R-152a y R-717. Los resultados sugieren que, para diferentes temperaturas del generador, la relación de arrastre y la eficiencia del sistema dependen principalmente de la geometría del eyector y de la relación de presión.

En México se han realizado diversos estudios sobre eyectores, esto con la finalidad de aportar más información sobre los sistemas de eyecto-compresión como lo son; “Estudio termodinámico de un sistema de refrigeración solar híbrido de eyector y compresor mecánico” (Hernández Gutiérrez, 2005) en el cual muestra una comparación en la producción de 100 kg de hielo de un Sistema de Refrigeración de Eyector con Compresor Auxiliar (SIERCA) contra un Sistema de Refrigeración Híbrido de Eyector y Compresor (SIRHEC) utilizando como fluido de trabajo R-134a y trabajando a las mismas condiciones de presión y temperatura, siendo más eficiente el SIRHEC.

Un “Estudio teórico-experimental de un sistema de enfriamiento de eyecto-compresión. I. Análisis teórico empleando refrigerantes halogenados e hidrocarburos. II. Evaluación experimental de un prototipo operando con R-134a”

(Román Aguilar, 2012) en el cual se realiza un análisis sobre los intervalos de temperatura entre 5°C y 35°C para el evaporador, 25°C y 35°C al condensador y para el generador 70°C y 100°C, utilizando refrigerantes halogenados e hidrocarburos.

Otro estudio presentado por (Román & Hernández, 2011) utilizan como fluidos de trabajo propano, butano, isobutano, R152a y R134a. Donde el eyector funciona como un termocompresor el cual es simulado con un modelo matemático variando las temperaturas de generación, condensación y evaporación. Los datos obtenidos del mejor rendimiento del sistema corresponden al que usa propano, ya que con este se obtiene el coeficiente de operación más alto y el eyector alcanza la más grande tasa de arrastre.

1.2 Justificación

En la actualidad los sistemas de refrigeración por compresión de vapor son los más utilizados, no obstante, requieren una gran demanda de energía eléctrica. Muestra de ello es que la Agencia Internacional de Energía (AIE) estima que en 2016 la mayor demanda de electricidad por enfriamiento se registró en Estados Unidos con el 16%, Medio Oriente con el 15%, México con el 14% y Japón con el 10%.

Además, un análisis de la Dirección General de Eficiencia y Sustentabilidad Energética de México sugiere que al mejorar un 30% en el rendimiento global de aires acondicionados para 2030 podrá reducir la carga máxima en una equivalencia a 710 centrales eléctricas. Así mismo, como parte del aumento en las emisiones globales de CO_2 , la refrigeración es responsable de alrededor del 18%, mientras que, en México, la refrigeración representa más del 25% del aumento en las emisiones totales, lo que refleja el fuerte crecimiento de la demanda de refrigeración (Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, 2018).

Otro punto importante es que la electricidad para el uso de la refrigeración está aumentando y es necesario que se mejoren las tecnologías (Kate McGowan, 2018), es por ello que se necesita recurrir a tecnologías alternativas como lo son los sistemas de refrigeración por eyecto-compresión, los cuales al no emplear un

compresor y sustituirlo por una bomba un generador y un eyector, por consecuencia hacen que baje considerablemente el consumo de energía eléctrica. Sin embargo, al no ser un sistema común, esto nos obliga a evaluar el funcionamiento del eyector, ya que su comportamiento es de vital importancia para estos sistemas.

En función de lo anterior, es que se propone el análisis de funcionamiento de un eyector, utilizando Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) para un sistema de refrigeración por eyecto-compresión, a fin de conocer la actividad interna y determinar su buen desempeño, mismo que nos permita conocer y mejorar el diseño del dispositivo.

1.3 Hipótesis

Los sistemas de refrigeración por eyecto-compresión son parte de los sistemas no convencionales de refrigeración, ya que dichos sistemas no son tan comunes en el sector comercial e industrial, por lo que a través de esta investigación se busca analizar y comprender el comportamiento del funcionamiento de un eyector que nos permita en un momento dado generar un diseño óptimo, mediante el uso de la dinámica de flujos computacionales donde se obtendrán valores de presión y velocidad, los cuales nos permitirán obtener campos de comportamiento al interior del eyector, para analizar el funcionamiento del eyector operando con diferentes fluidos de trabajo.

1.4 Objetivos

Objetivo general

- Analizar el funcionamiento de un eyector que opera en un sistema de refrigeración por eyecto-compresión, mediante técnicas de dinámica de fluidos computacionales.

Objetivos específicos

- Analizar la información teórica que nos permita conocer los principios básicos de funcionamiento del eyector y su trabajo en un sistema de refrigeración por eyecto-compresión.
- Analizar la información teórica del uso de dinámica de fluidos computacionales para flujo de fluidos compresibles.
- Elaborar la geometría del eyector en un software de diseño de CAD.
- Realizar el mallado de la geometría atendiendo las recomendaciones teóricas.
- Desarrollar la simulación con el software ANSYS Fluent.
- Analizar e interpretar los resultados generados.

II. Marco teórico

2.1 Refrigeración

La refrigeración estudia los procesos de reducción y mantenimiento de la temperatura de un espacio o material por debajo de la temperatura del ambiente que lo rodea (Sánchez Pineda de las Infantas , 2001).

A principios del siglo XX, el hielo ya se fabricaba mediante sistemas de refrigeración e incluso algunas compañías ya fabricaban el refrigerador doméstico, el cual tardó en ser popular. En la actualidad la mayoría de los hogares tienen un refrigerador con un compartimiento de congelación, los refrigeradores modernos se han convertido en aparatos con tecnología de punta y algunos modelos incluyen dispensadores automáticos de hielo y bebidas, pantallas de televisión y conexiones a internet. (Bill Whitman, 2012).

2.2 Sistemas de refrigeración

Los sistemas empleados para eliminar el calor se basan en métodos químicos y físicos. Los químicos se basan generalmente en absorción de calor mediante disoluciones de sales las cuales retiran el calor que las rodea, mientras que los métodos físicos son aquellos que atienden el principio básico de refrigeración absorbiendo el calor de un foco frío para después liberarlo al medio ambiente mediante un dispositivo mecánico (Sánchez Pineda de las Infantas , 2001).

2.2.1 Sistema de refrigeración de compresión de vapor

Un ciclo de refrigeración de compresión de vapor consta, esencialmente, de un compresor, un condensador, un evaporador, una válvula de expansión, un fluido de trabajo y las tuberías de unión de todos estos elementos para conseguir un circuito cerrado. El ciclo que resulta se denomina ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor, y se muestra de manera esquemática y en diagrama $T - S$ en la figura 1.

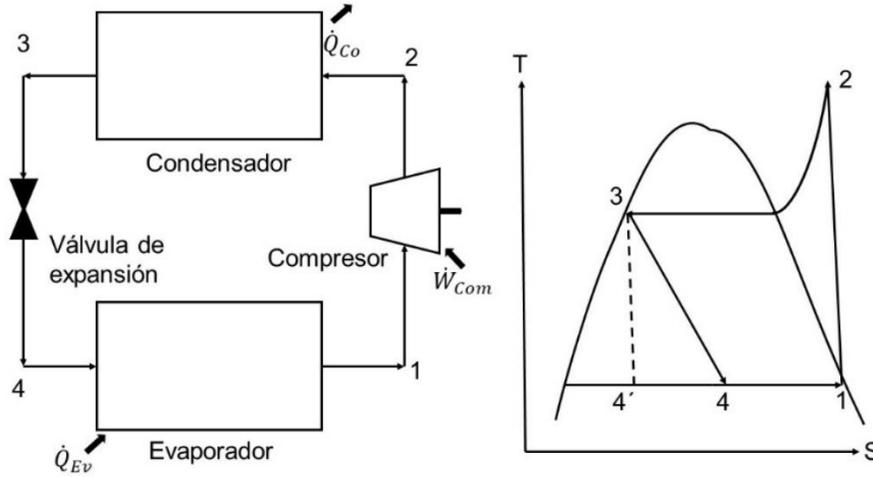


Figura 1. Sistema de refrigeración de compresión a vapor.

Fuente: Imagen de (Cengel & Boles , 2012).

El funcionamiento del sistema se compone de cuatro procesos:

- 1→2 Compresión isentrópica en un compresor
- 2→3 Rechazo de calor a presión constante en un condensador
- 3→4 Estrangulamiento en un dispositivo de expansión
- 4→1 Absorción de calor a presión constante en un evaporador

Para el diseño de un sistema de refrigeración es importante saber las ganancias o pérdidas de energía de cada uno de los componentes de refrigeración como lo son el evaporador, condensador y compresor, partiendo de la primera ley de la termodinámica, donde después de un análisis en ganancia o pérdida de calor y trabajo, expresados a través de una diferencia de entalpía, se obtienen las siguientes ecuaciones tomadas de (Cengel & Boles , 2012).

Carga térmica del evaporador

$$\dot{Q}_{Ev} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (2.1)$$

Donde:

\dot{m} = Flujo másico del sistema

h_1 = Entalpía a la salida del evaporador

h_4 = Entalpía a la entrada del evaporador

\dot{Q}_{Ev} = Tasa de calor que ingresa al evaporador

El trabajo del compresor, el cual suministra energía al sistema de refrigeración se determina mediante:

$$\dot{W}_{Com} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2. 2)$$

Donde:

\dot{m} = Flujo másico del sistema

h_2 = Entalpía de salida del compresor

h_1 = Entalpía de entrada del compresor

\dot{W}_{Com} = Trabajo de entrada en el compresor

La cantidad de energía que se libera en el condensador puede ser expresada como:

$$\dot{Q}_{Co} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (2. 3)$$

Donde:

\dot{m} = Flujo másico del sistema

h_2 = Entalpía a la entrada del condensador

h_3 = Entalpía a la salida del condensador

\dot{Q}_{Co} = Tasa de calor que sale del condensador.

La tasa de calor en el condensador también puede obtenerse de la suma de la energía que entra al evaporador y el trabajo mecánico del compresor.

$$\dot{Q}_{Co} = \dot{Q}_{Ev} + \dot{W}_{Com} \quad (2.4)$$

El coeficiente de operación (COP) de un sistema de refrigeración por compresión de vapor es determinado por la relación de la energía que entra al evaporador entre el trabajo utilizado en el compresor de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{Ev}}{\dot{W}_{Com}} \quad (2.5)$$

2.2.2 Sistemas de refrigeración por absorción

El sistema refrigeración por absorción en comparación con el de compresión de vapor, incorpora un generador, un intercambiador de calor, una bomba y un absorbedor, como se muestra en la figura 2.

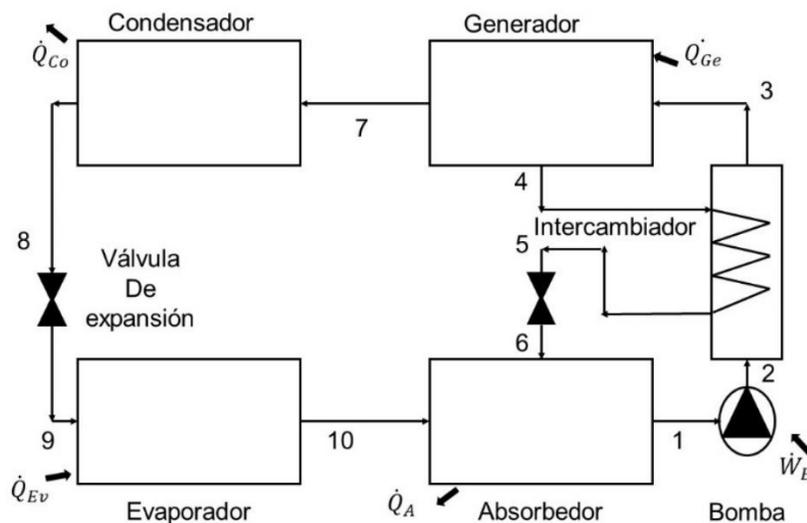


Figura 2. Sistema de refrigeración por absorción

Fuente: Imagen de (Hernández Gutiérrez, 2002)

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 absorbente. 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. Los últimos dos sistemas están limitados para aplicaciones como el acondicionamiento

de aire, en las que la temperatura mínima queda por arriba del punto de congelación del agua (Hernández Gutiérrez, 2002).

El funcionamiento del sistema de refrigeración por absorción, consiste en la absorción de calor por medio del evaporador del cuarto frío (9→10) el cual circulará al absorbedor donde se realizará una mezcla de refrigerante y absorbente (10→1), la bomba en este sistema circula el flujo másico (1→2) hacia un intercambiador de calor (2→3). En el generador se eleva la temperatura y por consiguiente la presión del sistema, en el cual, por la diferencia en los puntos de ebullición de los fluidos, se separa el absorbente y el refrigerante, pasando este último al condensador (3→7), mientras el absorbente que sale del generador pasa por el intercambiador de calor para transferir energía (4→5), al salir del intercambiador pasara por una válvula de expansión para bajar su temperatura y presión (5→6). Por otra parte, el refrigerante que sale del generador con dirección al condensador se enfría al intercambiar energía con el medio ambiente (7→8) después bajará la presión mediante una válvula de expansión (8→9) y se reincorpora al evaporador para continuar con el ciclo.

El COP del sistema de refrigeración por absorción se obtiene de la siguiente ecuación:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{Ev}}{\dot{Q}_{Ge} + \dot{W}_B} \quad (2.6)$$

2.2.3 Sistema de refrigeración por eyecto-compresión

En los sistemas de refrigeración por eyecto-compresión, la compresión del fluido de trabajo se realiza en el eyector, donde la presión del fluido que proviene del evaporador aumenta y se desarrolla un intercambio de energía cinética con el fluido proveniente del generador. Este incremento de presión dará lugar en el difusor de un eyector (Lapuerta A. & Armas , 2012). Este sistema, a diferencia del de compresión de vapor, utiliza una bomba para la recirculación del fluido de trabajo,

el cual después ingresa a un generador para agregar calor y así incrementar presión y temperatura al fluido; a esta sección se le da el nombre de sistema de potencia.

Los componentes del sistema de refrigeración por eyecto-compresión son: evaporador, condensador, válvula de expansión, generador, bomba de recirculación, fluido de trabajo y eyector. Este último está constituido por dos toberas convergentes divergentes, denominadas tobera primaria y tobera secundaria, y es el dispositivo que realiza la termocompresión del fluido proveniente del evaporador.

La figura 3 muestra las secciones de un eyector, donde la tobera primaria conducirá el fluido principal acelerado a la cámara de mezcla para ser combinado con el flujo secundario proveniente del evaporador, una vez que se mezclan los dos fluidos pasan por el difusor el cual estará conectado a la línea que va al condensador para que el fluido combinado realice el intercambio de energía al medio ambiente a través un proceso isobárico.

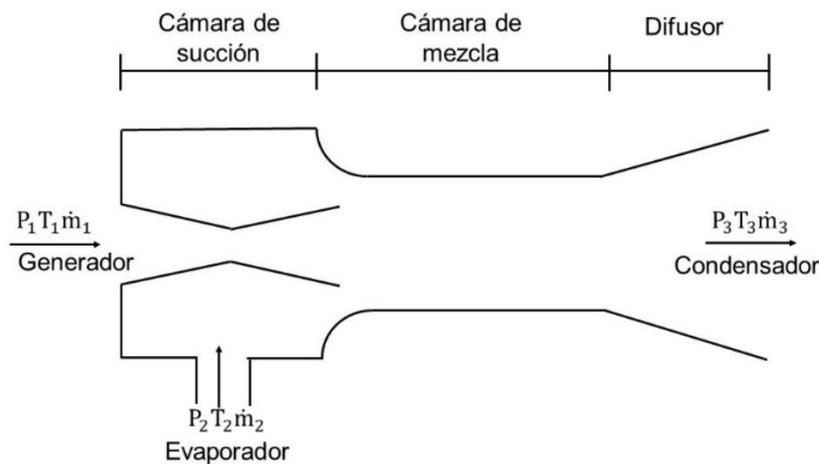


Figura 3. Estructura del eyector

Fuente: Elaboración propia

El ciclo termodinámico del sistema de refrigeración por eyecto-compresión está constituido por dos ciclos térmicos, uno de potencia representado por los estados 1-3-4-5-1 y el otro de refrigeración representado por los estados 2-3-4-6-2, los cuales se ilustran en la figura 4.

El primer ciclo inicia en el estado 1 el cual corresponde al vapor producido en el generador (suministrando carga térmica de algún proceso industrial o energía solar) con una alta presión y una alta temperatura, el vapor ingresa al eyector y en la tobera principal se lleva a cabo un proceso de expansión adiabática entre los estados 1 y 2', lo cual dará como resultado una caída de presión inferior a la del evaporador, esta caída de presión produce una succión y aceleración del vapor proveniente del evaporador, proceso representado por los estado 2 y 2". Después se lleva a cabo un proceso de mezclado que resulta del intercambio de la cantidad de movimiento entre el flujo proveniente del generador y del evaporador para alcanzar el estado supersónico 2m, dando por resultado un vapor con una presión intermedia al salir del eyector en el estado 3. Después, el vapor ingresa al condensador en donde cambia a la fase líquida mediante la liberación de energía al medio ambiente o a una zona con menor temperatura y alcanza el estado 4 de saturación, proceso isobárico de extracción de energía representado por los estados 3 a 4.

A continuación, el fluido se divide en dos partes; uno en dirección a la válvula de expansión (ciclo de refrigeración) y el otro a la bomba de recirculación (ciclo de potencia), en donde la bomba de recirculación suministra trabajo mecánico al fluido de trabajo para alcanzar el estado 5. De inmediato, el flujo entra al generador y sale en fase vapor a alta temperatura y alta presión en estado 1, proceso isobárico de transferencia de energía representado por los estados 5 a 1. Este vapor ingresa al eyector para iniciar nuevamente el ciclo de potencia. (Román Aguilar, 2012).

El ciclo de refrigeración inicia con la parte del líquido que sale del condensador en dirección a la válvula de expansión, donde a la salida de esta, sale como una mezcla saturada de líquido y vapor a una baja presión, proceso isoentálpico representado por los estados 4 a 6. Esta mezcla ingresa al evaporador para extraer el calor de la zona a refrigerar y realizarse así el cambio de fase a vapor en el estado 2, proceso isobárico de absorción de energía indicado por los estados 6 a 2. Este vapor estará en condiciones de ser succionado nuevamente por el fluido primario del eyector y

alcanzar el estado 3 para pasar por el condensador y llegar a la condición 4, cerrándose de esta forma este ciclo de refrigeración.

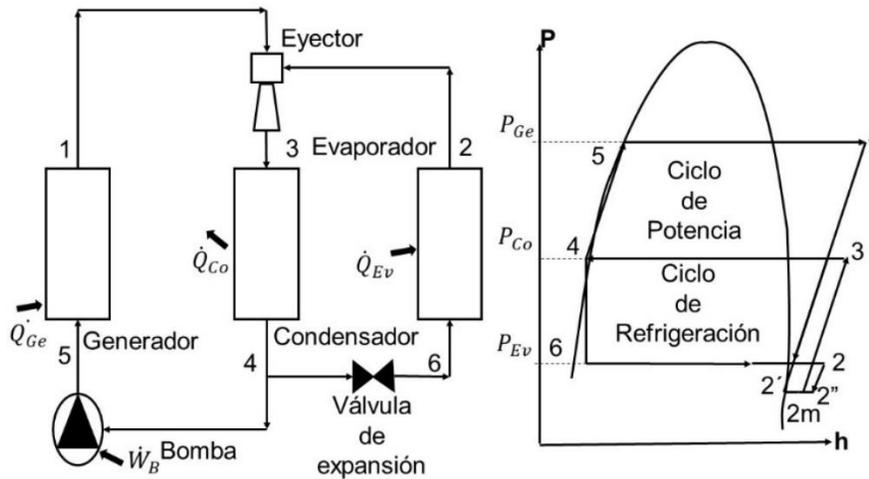


Figura 4. Sistema de refrigeración por eyecto-compresión y ciclo termodinámico
Fuente: Imagen de (Román Aguilar, 2012).

Las ecuaciones de ciclo termodinámico son similares a las del sistema de compresión y son las siguientes:

Generador:

$$\dot{Q}_{Ge} = \dot{m}_1(h_1 - h_5) \quad (2.7)$$

Condensador:

$$\dot{Q}_{Co} = \dot{m}_3(h_3 - h_4) \quad (2.8)$$

Evaporador:

$$\dot{Q}_{Ev} = \dot{m}_2(h_2 - h_6) \quad (2.9)$$

Bomba:

$$\dot{W}_B = \dot{m}_1(h_5 - h_4) \quad (2.10)$$

Eyector:

La eficiencia del eyector se define como:

$$\eta_{\varepsilon} = \frac{U}{U_i} \quad (2.11)$$

Donde U es la tasa de arrastre obtenida a partir de la relación de flujos masicos reales expresados como:

$$U = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \quad (2.12)$$

Donde U_i es la tasa de arrastre ideal para los procesos reversibles de expansión y compresión del eyector expresado como:

$$U_i = \frac{h_1 - h_{3i}}{h_{3i} - h_2} \quad (2.13)$$

Donde h_{3i} corresponde al estado 3_i de mezclado ideal a la salida del eyector y a h_3 al estado real a la salida del eyector. El cual se obtiene mediante las ecuaciones de conservación de masa y energía, definido como:

$$h_3 = \frac{h_1 + U h_2}{1 + U} \quad (2.14)$$

Una vez definida la condición de salida del eyector, el trabajo de compresión que realiza se define como:

$$\dot{W}_{Ce} = \dot{m}_2 (h_3 - h_2) \quad (2.15)$$

El coeficiente de operación del sistema de refrigeración por eyecto-compresión está definido por:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{Ev}}{\dot{Q}_{Ge} + \dot{W}_B} \quad (2.16)$$

En función de entalpías se expresa como:

$$COP = \frac{\dot{m}_2(h_2 - h_6)}{\dot{m}_1(h_1 - h_4)} \quad (2.17)$$

Donde la relación de flujos máscicos $\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1}$ es la relación de compresión, quedando finalmente como:

$$COP = U \frac{(h_2 - h_6)}{(h_1 - h_4)} \quad (2.18)$$

2.3 Fluidos de trabajo

Los fluidos de trabajo en un sistema de refrigeración, tienen como función principal transportar el calor absorbido de la zona de baja temperatura a la zona de alta temperatura del sistema para liberar el calor absorbido.

Los gases de refrigeración se evalúan conforme al daño que hacen a la capa de ozono denominado como el Ozone Depletion Potencial (ODP). Este se mide utilizando como medida patrón la unidad atribuida al R-11 ya que es el más destructivo para la capa de ozono al poseer 3 átomos de cloro en su molécula, es por ello que actualmente en la industria se buscan nuevos gases refrigerantes que no destruyan la capa de ozono como lo es el refrigerante R-1234yf el cual no contiene cloro ya que es un gas refrigerante que se clasifica como Hidro Fluoro Olefinas (HFO), pues este refrigerante es fluorado y son actualmente la mejor respuesta para el uso y cuidado del medio ambiente. Otro efecto importante a tomar en cuenta en la selección de los refrigerantes es el Global Warming Potential (GWP), que es la forma de medir el efecto invernadero que producen.

En este trabajo se utilizan tres refrigerantes que tienen propiedades similares como lo es el R-134a, R-1234yf, y el R-152a (Román Aguilar , Farfán Flores, & Hernández Gutiérrrez, 2019). En la tabla 1 se muestran sus propiedades.

Características	Refrigerante R-134a	Refrigerante R-152a	Refrigerante R -1234yf
ODP	0	0	0
GWP	1300	124	4
T° critica [K]	374.21	386.41	367.85
P critica [kPa]	4059.3	4516.8	3382.2
T° ebullición [K]	247.06	249.1	243.65
Densidad de Vapor [kg/m ³]	32.35	18.47	37.92

Tabla 1. Propiedades de los refrigerantes

Fuente: Información de Fichas técnicas de Quimobásicos.

La compatibilidad que existen entre los refrigerantes R-134a, R-152a, y R-1234yf se debe a sus características químicas equivalentes lo que nos permite usar los mismos componentes en un sistema frigorífico.

En un sistema por compresión de vapor, el refrigerante R-152a tiene características termodinámicas mayores al R-134a y R-1234yf donde el coeficiente de transferencia de calor del R -152a en el evaporador aumenta en torno a un 20% lo cual se debe al tener mejores propiedades termodinámicas. Por otra parte, ya que el R-152a tiene una menor viscosidad, la pérdida de carga en líneas de aspiración se verá reducida en un 30% pues al tener un menor peso molecular le otorga un alto calor latente de vaporización y una mayor eficiencia volumétrica en el compresor. Lo que provoca un mayor rendimiento en el COP (INTARCON, 2019).

2.4 Flujo compresible

Cuando se habla de flujo compresible nos referimos a que existe una variación significativa en la densidad del fluido, esto sucede cuando la velocidad de flujo es cercana a la velocidad del sonido. Estos cambios principalmente se dan en los gases ya que la compresibilidad de un flujo es básicamente una medida en el cambio de la densidad.

Estos flujos compresibles se encuentran en dispositivos que incluyen el flujo de gases a altas velocidades, los flujos compresibles combinan la dinámica de fluidos y la termodinámica, ambas son necesarias para el desarrollo de los fundamentos teóricos.

2.4.1 Velocidad del sonido

La velocidad del sonido es la velocidad a la que una onda con una presión infinitamente pequeña viaja a través de un medio (Cengel & Cimbala, 2006).

Se considera un volumen de control para definir la ecuación que describe la velocidad del sonido como se muestra en la figura 5. Donde un émbolo desplaza una presión y una densidad hacia la derecha a una velocidad dV , lo cual genera una onda de presión a una velocidad c mientras tanto la presión y densidad cambiarán.

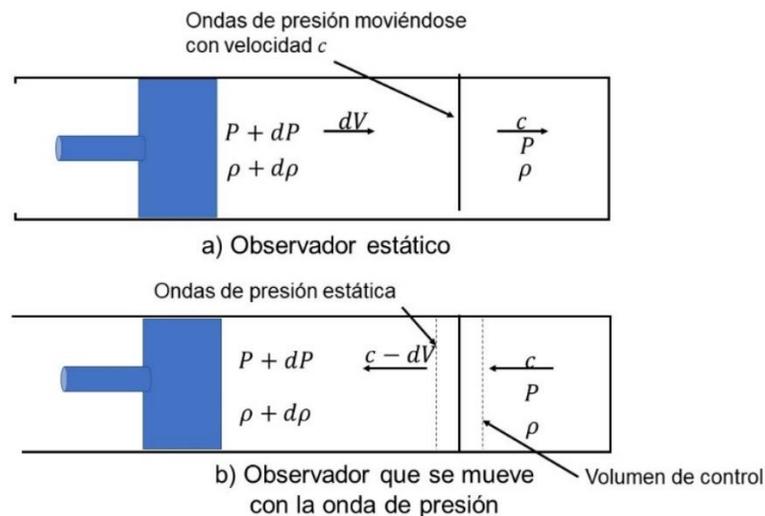


Figura 5. Volúmenes de control en un émbolo

Fuente: Imagen de (Franzini & Finnemore , 1999).

La ecuación de la continuidad, tomadas de (Franzini & Finnemore , 1999), relaciona la velocidad del sonido de la siguiente forma:

$$\rho A c = (\rho - d\rho) A (c - dV) \quad (2.19)$$

Donde la amplitud de la onda es infinitesimal, por lo que dV y $d\rho$ se desprecian

$$\rho dV = c d\rho \quad (2.20)$$

Empleando la ecuación de cantidad de movimiento en el volumen de control queda:

$$PA - (p + dP)A = \rho Ac [(c - dV) - c] \quad (2.21)$$

La cual en su forma reducida es:

$$dP = c\rho dV \quad (2.22)$$

Al combinar las ecuaciones 2.20 y 2.22 se obtiene:

$$c^2 = \frac{dP}{d\rho} \quad (2.23)$$

Y debido a que cuando una onda sónica se desplaza a través de un fluido con una alta velocidad, no le da tiempo a que realice transferencia de calor, es por ello que la fricción es despreciable, generándose un proceso isentrópico:

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s} \quad (2.24)$$

Por otro lado, en un gas perfecto un proceso isentrópico la presión y la densidad se relacionan por:

$$P = c\rho^k \quad (2.25)$$

En el cual al derivar la densidad ρ da como resultado:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s = ck\rho^{k-1} = kc\left(\frac{P^k}{\rho^k}\right) = k\left(\frac{P}{\rho}\right) = kRT \quad (2.26)$$

Donde kRT se puede sustituir en la ecuación (2.24) y se obtiene la ecuación de la velocidad del sonido en la siguiente forma:

$$c = \sqrt{kRT} = \sqrt{\frac{kP}{\rho}} \quad (2.27)$$

2.4.2 Número de Mach

El número de Mach, ecuación 2.28, es la relación entre la velocidad real del fluido y la velocidad del sonido, circulando en el mismo fluido y en el mismo estado (Cengel & Boles , 2012).

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (2.28)$$

Donde V es la velocidad de flujo y c la velocidad del sonido. Si $Ma < 1$, el flujo es subsónico, si $Ma = 1$ el flujo es sonico y si $Ma > 1$ el flujo es supersónico.

2.4.3 Variación de la velocidad del fluido con el área de flujo en toberas y difusores.

La ecuación que gobierna el comportamiento de una tobera o un difusor, de acuerdo a (Cengel & Boles , 2012), se define como:

$$\frac{dA}{A} = \frac{dV}{V} (1 - Ma^2) \quad (2.29)$$

Donde la relación que existe entre la velocidad del fluido con el área del flujo se ve afectada por el régimen de operación, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Para flujo subsónico } (Ma < 1) \frac{dA}{dV} < 0 \quad (2.30)$$

$$\text{Para flujo supersónico } (Ma > 1) \frac{dA}{dV} > 0 \quad (2.31)$$

$$\text{Para flujo sónico } (Ma = 1) \frac{dA}{dV} = 0 \quad (2.32)$$

La figura 6 muestra el comportamiento de la presión, velocidad, número de Mach, temperatura y densidad, al pasar por una tobera o un difusor, dependiendo del régimen de operación.

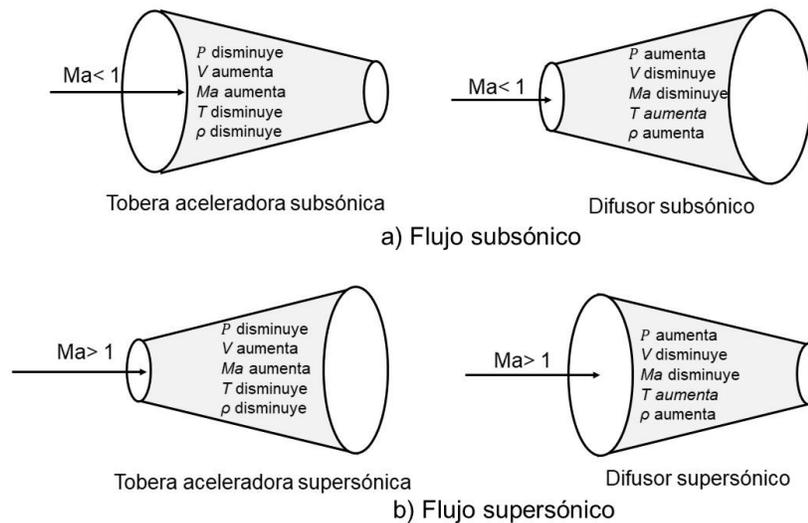


Figura 6. Toberas y Difusores

Fuente: Imagen de (Cengel & Boles , 2012).

2.4.4 Toberas convergentes divergentes

Cuando se une una tobera convergente a una tobera divergente cómo se muestra en la figura 7, se le llama tobera convergente divergente, cuyas aplicaciones son diversas, incluyendo en las turbinas de aviones supersónicos o en cohetes de propulsión, teniendo como objetivo acelerar el fluido, aunque esto no siempre se cumple, ya que, al forzar un fluido a través de una tobera convergente divergente,

este puede desacelerar si la contrapresión no se encuentra en las condiciones ideales.

El flujo dentro de la tobera convergente divergente está determinado por la razón de presiones P_b/P_0 donde P_b es la contrapresión (Cengel & Boles , 2012).

El comportamiento del flujo se expresa conforme a la contrapresión, es decir, cuando un fluido ingresa a una presión donde $P_b = P_0$ no existirá un flujo a través de la tobera y cuando la contrapresión disminuye se presentan principalmente cuatro escenarios que se describen a continuación:

I.- Si $P_0 > P_b > P_c$ el flujo será subsónico y la velocidad aumentará en la sección convergente y llega a un valor máximo en la garganta, pero éste no llegará a ser unitario. No obstante, al ingresar a la sección divergente la velocidad disminuirá. Por su parte, la presión tendrá un efecto contrario, es decir, en la sección convergente disminuirá y en la sección divergente aumentará.

II.- Si $P_b = P_c$ en estas condiciones la presión será la más baja que hay en la garganta y por consecuencia se llega a la velocidad sónica, pero la sección divergente funciona como un difusor reduciendo la velocidad y aumentando su presión.

III.- Si $P_c > P_b > P_E$ en esta condición el fluido llega a una velocidad sónica en la garganta, pero por otra parte en la sección divergente la presión continúa bajando y la velocidad aumenta. Sin embargo, la aceleración se detiene al provocarse una onda de choque normal entre la garganta y la salida de la sección divergente, perdiendo velocidad y ganando presión. En un choque normal se realiza un proceso irreversible en el cual el fluido ya no podrá evaluarse isentrópicamente.

IV.- Si $P_E > P_b > 0$ en esta condición la presión es la más baja a la salida de la sección divergente y la velocidad es la máxima, aun así existen condiciones si $P_b = P_F$ no se presentan ondas de choque dentro o fuera de la tobera, pero si $P_b < P_F$ habrá ondas de expansión y de mezclado irreversible.

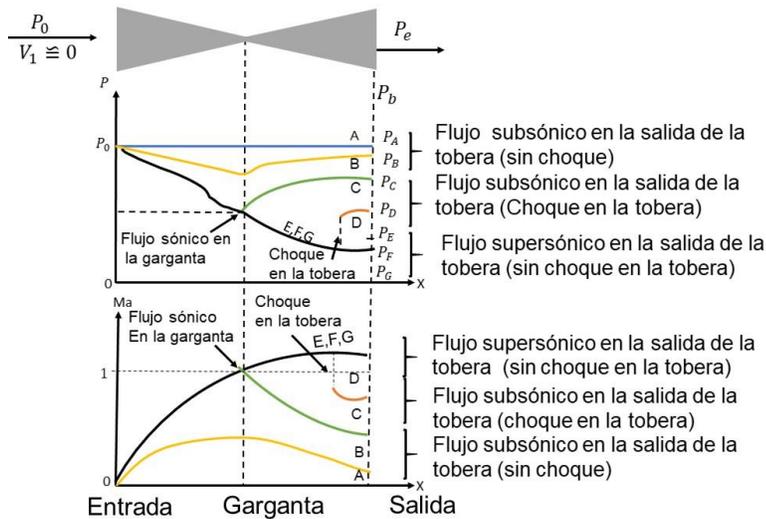


Figura 7. Comportamiento de una tobera convergente divergente

Fuente: Imagen de (Cengel & Boles , 2012).

2.4.5 Ondas de choque

Las ondas de choque normal se originan a través de cambios abruptos en las propiedades del fluido en un espesor extremadamente pequeño de una tobera convergente divergente en la cual el fluido no puede considerarse isentrópico.

En la figura 8 se muestra las llamadas líneas de Fano y Reyligh. La primera resulta de combinar las ecuaciones de la conservación de la masa y la energía; mientras que la segunda se obtiene al combinar las ecuaciones de conservación de la masa y de cantidad de movimiento y se grafican en un diagrama $h - S$. En esta figura 8 se observa que los puntos A y B corresponden al $Ma = 1$ y sus intersecciones en C y D representan los estados donde se satisfacen las tres ecuaciones de conservación. El punto D representa el movimiento antes del choque y C el punto después del choque, donde D es supersónico y C es subsónico, considerando que entre mayor es Ma antes del choque más fuerte será el choque normal.

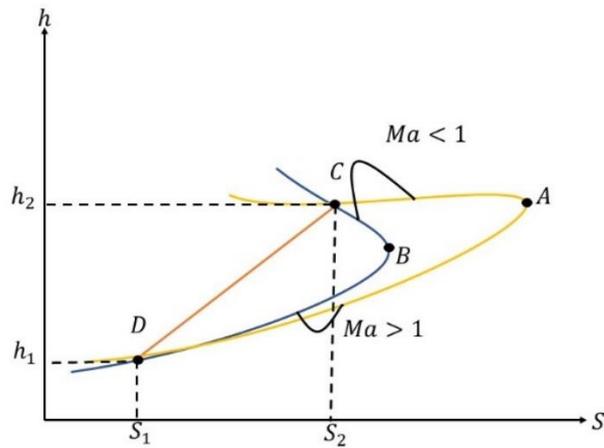


Figura 8. Diagrama $h - S$ de las curvas de Fanno y Rayleigh

Fuente: Imagen de (Cengel & Boles , 2012).

2.5 Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD)

La Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) modela el comportamiento de los fluidos, la transferencia de calor, transferencia de masa y reacciones químicas, resolviendo ecuaciones termodinámicas y de fenómenos de transporte como son la conservación de la masa, momento y energía para proporcionar información detallada como puede ser la distribución de presión, velocidad, temperatura, etc.

CFD se puede utilizar en todas las etapas del proceso de ingeniería, por ejemplo, en estudios de nuevos diseños, desarrollo de producto, solución de problemas o de rediseño. El proceso de simulación se lleva a cabo mediante tres etapas que son el Procesado, Cálculo y Post procesado.

2.5.1 Procesado

Para el desarrollo de la simulación es importante definir las condiciones físicas que son la base fundamental para el cálculo de la simulación, entre las más importantes se destacan las siguientes.

- I. Geometría del objeto de estudio
- II. Malla

III. Las propiedades del fluido

IV. Condiciones de contorno

I. Geometría del objeto de estudio

La Geometría depende de lo que se quiera analizar ya que todos los sistemas comienzan con la definición de su geometría. Se puede crear la geometría desde SCDM 2019 R1, que es parte de los programas que maneja ANSYS, o en su defecto importar una geometría modelada en algún programa de diseño de formatos CAD.

II. Malla

Para realizar la malla ANSYS Fluent utiliza estructuras de datos internos para ordenar las celdas, caras y puntos de la cuadrícula en una malla y para figuras 2D generalmente se utilizan celdas cuadriláteras.

La calidad se verifica mediante la ortogonalidad y es un parámetro trascendental en la precisión y estabilidad del cálculo numérico. En la tabla 2 se muestran los rangos numéricos de este parámetro (ANSYS. Inc, 2020).

Inaceptable	Malo	Aceptable	Buena	Muy buena	Excelente
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Tabla 2. Parámetros de calidad de la malla

Fuente: Guía de la teoría fluida de ANSYS Fluent

III. Propiedades del fluido

ANSYS Fluent utiliza la base de datos Propiedades de Refrigerantes (REFPROP), creada por el National Institute of Standards and Technology (NIST) de Estados Unidos, el cual cuenta con algoritmos propios y los vincula al modelo que se esté trabajando para obtener los valores termodinámicos requeridos.

IV. Condiciones de contorno

Consisten en agregar los límites externos, internos y periódicos de la simulación, ejemplo:

- Condiciones de límite de entrada de presión
- Condiciones límite de entrada de velocidad
- Condiciones límite de entrada de flujo másico
- Entre otras más.

2.5.2 Cálculo

Para realizar el cálculo de la simulación ANSYS Fluent involucra conceptos importantes para la simulación como lo son:

- I. Método de volúmenes finitos
- II. Solución basada en densidad
- III. Modelo de turbulencia
- IV. Controles de solución
- V. Convergencia de solución de monitoreo
- VI. Inicialización

I. Método de volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos permite resolver numéricamente ecuaciones diferenciales utilizando la modelación matemática para la mecánica del medio continuo mediante los principios de conservación (masa, movimiento y energía). El método de formación general envuelve los siguientes pasos:

- a. Descomponer el dominio en volúmenes de control
- b. Realizar ecuaciones integrales de conservación para un volumen de control
- c. Aproximar las integrales
- d. Aproximar las derivadas con las variables nodales
- e. Ensamblar y resolver sistemas algebraicos

Al descomponer el dominio en volúmenes de control las variables son almacenadas en los nodos los cuales se ubican en los vértices de la malla o en los centros de los volúmenes.

Una vez definidos los volúmenes de control las ecuaciones de conservación son descritas en su forma integral para cada volumen durante el proceso de la divergencia, para convertir integrales de volumen sobre operadores de divergencia y gradientes a integrales de superficie.

En este proceso la ecuación de transporte general es representada de la siguiente manera

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \mathbf{V} \phi \cdot d\mathbf{A} = \oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\phi dV \quad (2.33)$$

Donde

ϕ = Variable transportada

ρ = Densidad

Γ = Constante de difusión

V = Velocidad

S_ϕ = Término fuente

De la ecuación anterior (2.33) se obtiene un sistema algebraico de ecuaciones las cuales son resueltas a través de métodos segregados, por otro lado, algoritmos de solución de inversión de matrices aumentan la eficiencia del uso de recursos computacionales y la velocidad de las soluciones (Osses, 2016).

II. Solución basada en densidad

El solucionador basado en densidad resolverá las ecuaciones que gobiernan la continuidad, el impulso, el transporte de especies químicas y energía simultáneamente. Como las ecuaciones gobernantes no son lineales se realizan

iteraciones del bucle de solución antes de obtener una solución convergente. Cada iteración consta de los pasos que se visualizan en el diagrama de flujo para obtener la convergencia.

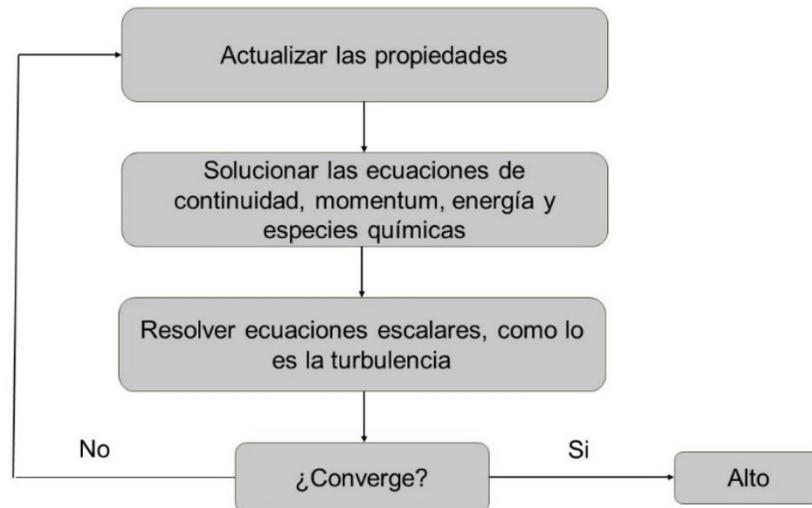


Figura 9. Descripción del solucionador basado en densidad

Fuente: Información de la guía de la teoría fluida de ANSYS Fluent

III. Modelo de turbulencia

El modelo de turbulencia que se utiliza en este trabajo es el modelo de turbulencia SST k omega el cual traducido al español significa modelo de turbulencia de transporte de tensión de corte k omega. Pues es un modelo de viscosidad híbrido que combina dos modelados k omega y k epsilon. Donde el modelo k omega simula el flujo en la subcapa viscosa y el modelo k epsilon simula el comportamiento del flujo en regiones alejadas de la pared, este modelo es el más preciso y fiable para la clase más amplia de fluidos (AUTODESK., 2018).

IV. Controles de solución

Para los controles de solución ANSYS Fluent tiene como control principal al número de Courant, el cual es definido como el coeficiente entre el intervalo de tiempo y el tiempo de resistencia en un volumen finito. El objetivo principal del número de Courant es dar tiempos más largos para obtener una convergencia más rápida, por

lo que es conveniente establecer números de Courant lo más grande posible dentro de un rango permitido en este caso el número de Courant predeterminado es de 5 para solucionadores basados en densidad (ANSYS. Inc, 2020).

V. Convergencia de solución de monitoreo

El proceso de la convergencia de la solución de monitoreo consiste en realizar la suma residual para cada una de las variables conservadas donde se almacenan y se registran en un historial de convergencia al término de cada iteración. En el solucionador basado en densidad, el residuo es la tasa de cambio temporal de la variable conservada.

Se utiliza una escala para la normalización de los residuos la cual está habilitada para una convergencia predeterminada de 10^{-6} para ecuaciones de energía y 10^{-3} para todas las demás ecuaciones. (ANSYS. Inc, 2020).

VI. Inicialización

ANSYS dispone de dos métodos de inicialización híbrido y estándar, la inicialización híbrida es un método de interpolación de límites el cual resuelve la ecuación de la Place para, determinar campos de presión y velocidad. Por otra parte, la inicialización estándar permite definir valores para variables de flujo e inicializar el campo de flujo de estos valores (ANSYS. Inc, 2020).

2.5.3 Post procesado

Una vez que se calculan los valores se procede a analizar los resultados de las variables que se desea estudiar y que permita la opción de visualizarlo en imágenes o gráficos. Con la finalidad de obtener datos más precisos sobre problemas físicos y así poderlos comparar con otros datos.

I. Representación gráfica

La representación gráfica nos permite visualizar datos de zona de superficie en un formato grafico X, Y. Las coordenadas X, Y pueden especificar un nombre o usar uno predeterminado por el usuario.

II. Mapas de contorno

En los mapas de contorno se controla la visualización de los gráficos de contorno y perfil, en Fluent nos da opciones en las cuales contiene los botones de verificación que configuran varias opciones de visualización de contorno como el relleno, valores de nodo, líneas de contorno y dibujo de la malla.

III. Animación y exportación de resultados

En la ventana principal de Workbench de ANSYS, existe una herramienta “Results” la cual nos ayuda a poder tener una mejor representación visual de los resultados y comparar simultáneamente un conjunto de resultados.

III. Metodología

3.1 Planteamiento

En la tabla 3 se presentan los datos experimentales obtenidos de (Román Aguilar, Hernández Gutierrez, Valle Hernández , & Farfán Flores, 2018), a partir de los cuales se pretende desarrollar la simulación en CFD, debido a que la obtención de estos representó diversos problemas y complicaciones en la operación del sistema de eyecto-compresión, además de tiempos y costos de operación; es por ello que a través de herramientas alternativas, como la propuesta en el presente trabajo, nos permitan conocer el funcionamiento interno del dispositivo principal que es el eyector.

Prueba 1			Prueba 2		
Condiciones	Presión	Temperatura	Condiciones	Presión	Temperatura
Entrada 1	15.25 atm	332.23 K	Entrada 1	16.47 atm	339.5 K
Entrada 2	3.56 atm	278.12 K	Entrada 2	3.48 atm	287.04 K
Salida	5.9 atm	299.44 K	Salida	6.16 atm	300.67 K
Prueba 3			Prueba 4		
Condiciones	Presión	Temperatura	Condiciones	Presión	Temperatura
Entrada 1	17.66 atm	338.14 K	Entrada 1	18.78 atm	350.55 K
Entrada 2	3.33 atm	285.94 K	Entrada 2	3.23 atm	285.47 K
Salida	6.29 atm	301.23 K	Salida	6.5 atm	312.37 K

Tabla 3. Datos experimentales

Fuente: Datos obtenidos de (Román Aguilar, 2012),

3.2 Desarrollo de la simulación

Para el desarrollo de la simulación se utilizó el software ANSYS 2019 R1, el cual sigue el procedimiento que se muestra en la figura 10.

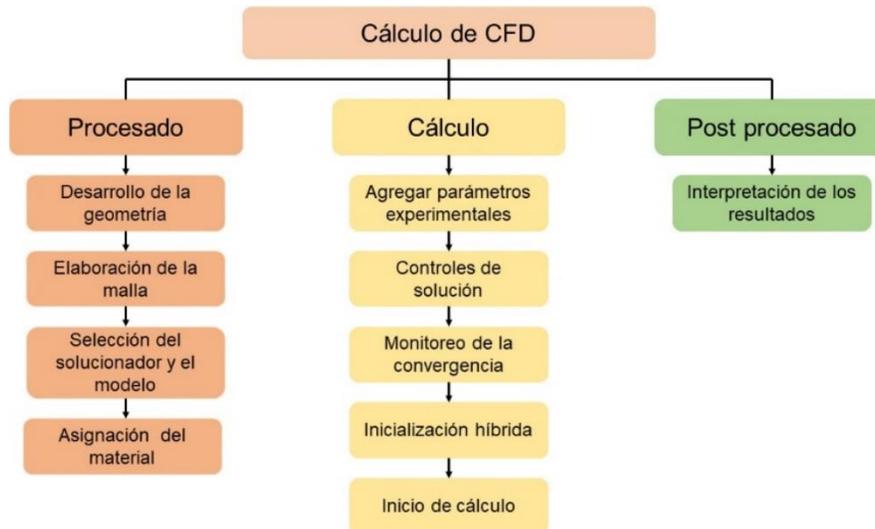


Figura 10. Diagrama de flujo

Fuente: Elaboración propia

1. Procesado

Desarrollo de la geometría

La geometría se desarrolló a través de la aplicación de ANSYS Fluent llamada SCDM 2019 R1 la cual nos permite dibujar el modelo del eyector en un plano 2D como se muestra en la figura 11. Como se trata de un plano axisimétrico se toma la decisión de modelar el plano, tomando la mitad del eyector.

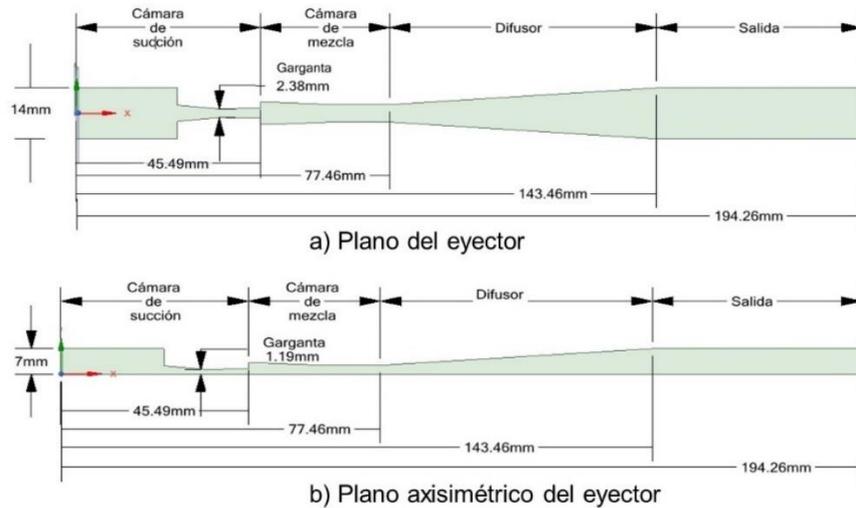


Figura 11. Plano del eyector en 2D

Fuente: Elaboración en SCDM ANSYS 2019 R1

Después de haber realizado la geometría es necesario que este cargada con todas sus propiedades en ANSYS Workbench donde se realiza la simulación, figura 12.

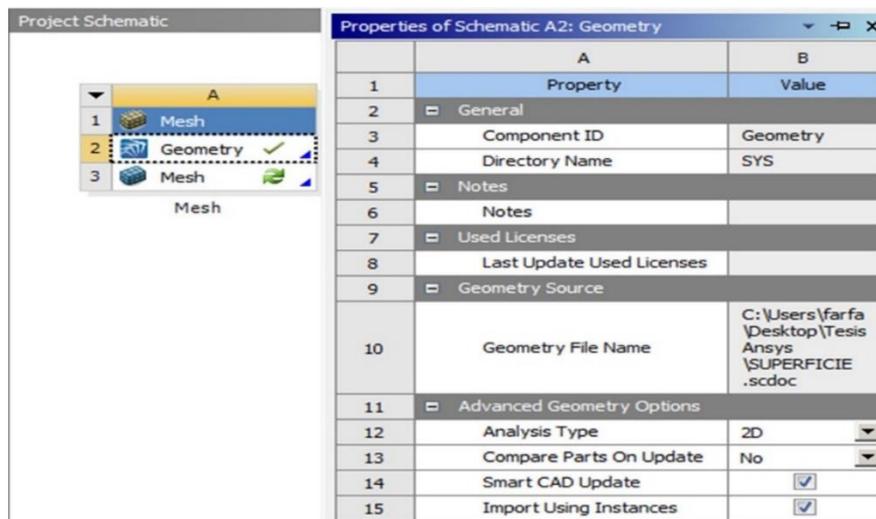


Figura 12. Propiedades de la geometría

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

Elaboración de malla

Para el proceso de mallado, se seleccionó la herramienta de Mesh incluida en el software ANSYS. En la figura 13 se muestra la generación de la malla después de

realizar una selección, y observar que a esta densidad de mallado es la mínima necesaria para obtener resultados confiables, resultando 7388 nodos y 6851 elementos.

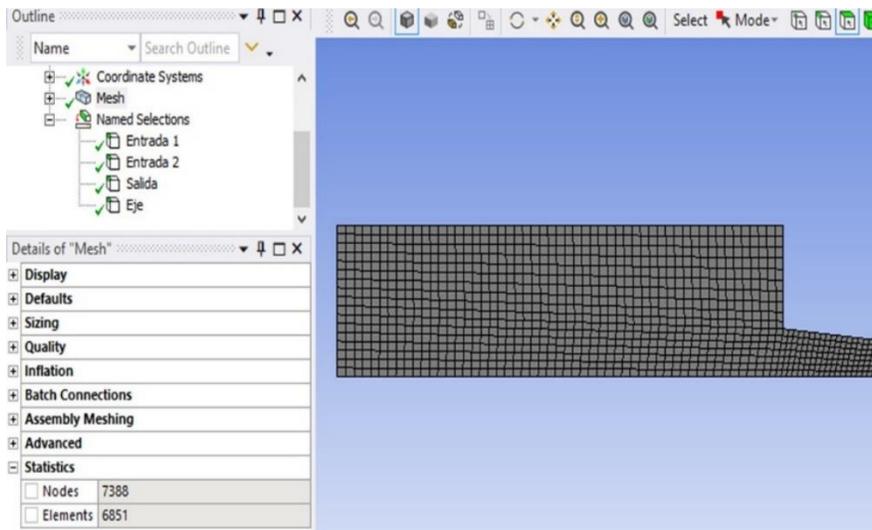
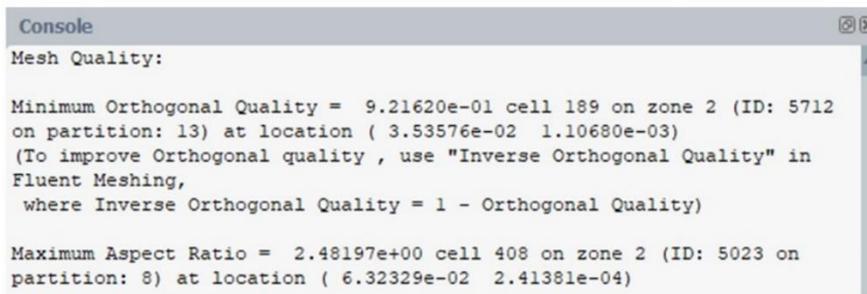


Figura 13. Generación de la malla

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

Es importante revisar la calidad de la malla para determinar, si es aceptada o no. Para ello es necesario realizar pruebas de calidad dentro del programa de Fluent, para tener un mejor desempeño en el cálculo de la solución, figura 14, en la que se obtuvo una calidad mínima ortogonal de 0.92162.



```
Console
Mesh Quality:

Minimum Orthogonal Quality = 9.21620e-01 cell 189 on zone 2 (ID: 5712
on partition: 13) at location ( 3.53576e-02 1.10680e-03)
(To improve Orthogonal quality , use "Inverse Orthogonal Quality" in
Fluent Meshing,
where Inverse Orthogonal Quality = 1 - Orthogonal Quality)

Maximum Aspect Ratio = 2.48197e+00 cell 408 on zone 2 (ID: 5023 on
partition: 8) at location ( 6.32329e-02 2.41381e-04)
```

Figura 14. Calidad de la malla

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

Selección del solucionador y el modelado

En este apartado se agregan los valores de contornos iniciales y se elige el modelo que se emplea en la simulación para obtener los resultados de las variables que son nuestro análisis de estudio.

De acuerdo a la figura 15 se selecciona el tipo de solucionador basado en densidad, ya que habilita el algoritmo de la solución de Navier-Stokes basado en esta propiedad de igual manera se selecciona el estado estable y plano axisimétrico.

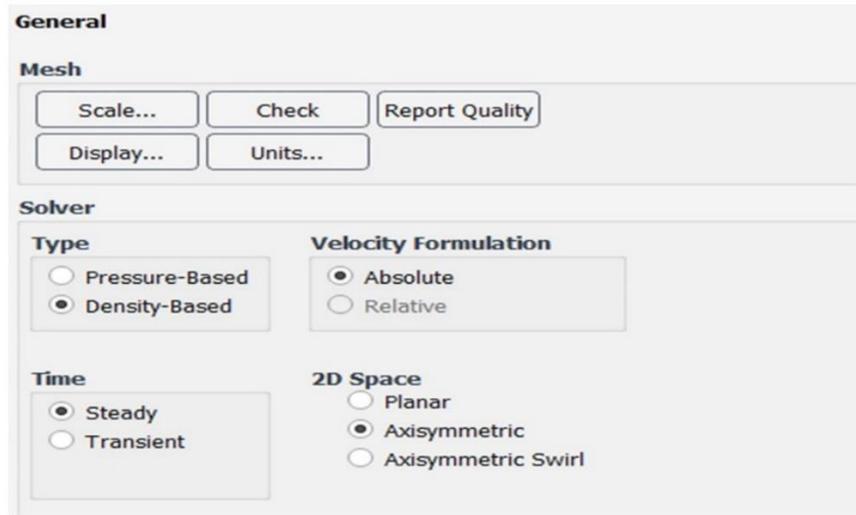


Figura 15. Condiciones generales

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

En la figura 16, se muestran los modelos a utilizar, los cuales serán el de energía y turbulencia SST k omega.

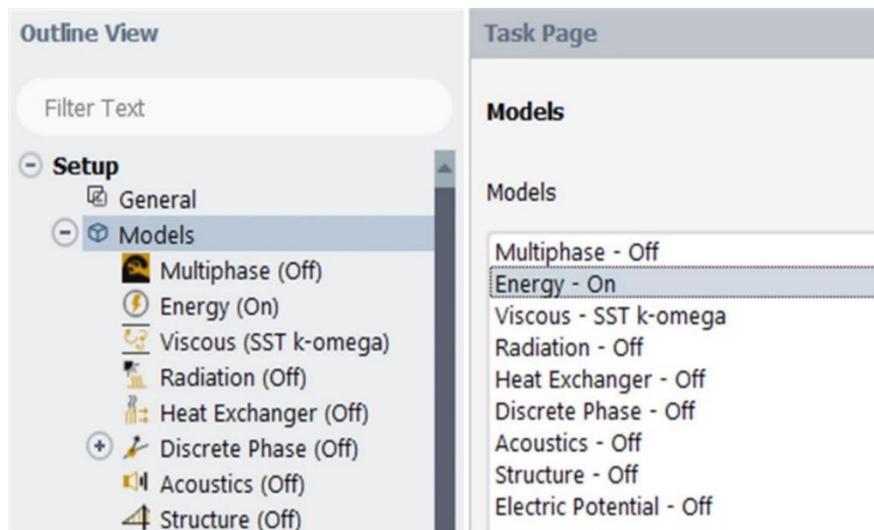


Figura 16. Modelos

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

Asignación del material

En ANSYS Fluent se necesita agregar desde la consola la base de datos de REFPROP, la cual contiene una biblioteca compartida con los modelos del NIST.

Todas las funciones que contiene mostrarán las propiedades termodinámicas y de transporte del refrigerante, en este caso R-134a, R-152a y el R-1234yf.

En este paso se tiene que activar los modelos de gas real NIST donde en la consola de ANSYS se ingresa el siguiente comando

```
> define/user-defined/real-gas-models/nist-real-gas-model
use NIST real gas? [no] yes
```

El siguiente paso es seleccionar el material de la lista de la base de datos, figura 17.

```
lbutene.fld acetone.fld air.ppf ammonia.fld argon.fld
benzene.fld butane.fld c12.fld clcc6.fld c2butene.fld
c3cc6.fld c4f10.fld c5f12.fld cf3i.fld co.fld
co2.fld cos.fld cyclohex.fld cyclopen.fld cyclopro.fld
d2.fld d2o.fld d4.fld d5.fld d6.fld
decane.fld dee.fld dmc.fld dme.fld ebenzene.fld
ethane.fld ethanol.fld ethylene.fld fluorine.fld h2s.fld
hcl.fld helium.fld heptane.fld hexane.fld hmx.bnc
hydrogen.fld ibutene.fld ihexane.fld ioctane.fld ipentane.fld
isobutan.fld isobutan.fld krypton.fld md3m.fld md4m.fld
mdm.fld methane.fld methanol.fld mlinolea.fld mlinolen.fld
mm.fld moleate.fld mpalmita.fld mstearat.fld mxylene.fld
n2o.fld neon.fld neopentn.fld nf3.fld nitrogen.fld
nonane.fld novec649.fld octane.fld orthohyd.fld oxygen.fld
oxylene.fld parahyd.fld pentane.fld propane.fld propylen.fld
propyne.fld pxylene.fld r11.fld r113.fld r114.fld
r115.fld r116.fld r12.fld r1216.fld r123.fld
r1233zd.fld r1234yf.fld r1234ze.fld r124.fld r125.fld
r13.fld r134a.fld r14.fld r141b.fld r142b.fld
r143a.fld r152a.fld r161.fld r21.fld r218.fld
r22.fld r227ea.fld r23.fld r236ea.fld r236fa.fld
r245ca.fld r245fa.fld r32.fld r365mfc.fld r40.fld
r404a.ppf r407c.ppf r41.fld r410a.ppf r507a.ppf
rc318.fld rel43a.fld re245cb2.fld re245fa2.fld re347mcc.fld
sf6.fld so2.fld t2butene.fld toluene.fld water.fld
xenon.fld

126 archivos 2,502,051 bytes
0 dirs 293,570,117,632 bytes libres
select real-gas data file ["r134a.fld"]
```

Figura 17. Selección de refrigerante de la base de datos

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

Una vez agregado los refrigerantes, es importante observar que las propiedades termodinámicas estén cargadas en el software de simulación como se observa en la figura 18.

```
Matl name: "R134a"  
          : "1,1,1,2-tetrafluoroethane"           !full name"  
          : "811-97-2"  
Mol Wt   : 102.032  
  
Critical properties:  
Temperature : 374.21 (K)  
Pressure    : 4.05928e+06 (Pa)  
Density     : 5.01705 (mol/L) 511.9 (kg/m^3)  
  
Equation Of State (EOS) used:  
Helmholtz Free Energy (FEQ)  
EOS:"FEQ Helmholtz equation of state for R-134a of Tillner-Roth  
& Baehr (1994)."  
  
EOS Range of applicability  
Min Temperature: 169.85 (K)  
Max Temperature: 455 (K)  
Max Density     : 1591.7 (kg/m^3)  
Max Pressure    : 7e+07 (Pa)  
  
Thermal conductivity Range of applicability  
Min Temperature: 169.85 (K)|  
Max Temperature: 455 (K)  
Max Density     : 2040.64 (kg/m^3)  
Max Pressure    : 2e+07 (Pa)  
  
Viscosity Range of applicability  
Min Temperature: 169.85 (K)
```

Figura 18. Propiedades del refrigerante

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

2. Cálculo

Agregar parámetros experimentales

Las condiciones iniciales son los factores sobre los cuales se desarrolla la simulación, en este caso la temperatura y presión que están involucradas en el eyector. Donde se agregan los datos experimentales de la tabla 3, para la entrada 1 que es la entrada de vapor caliente proveniente del generador, la entrada 2 es el vapor proveniente del evaporador y la salida es el vapor que sale al condensador figura 19. Esto aplica para todas las condiciones de entrada y salida de las demás pruebas y refrigerantes.

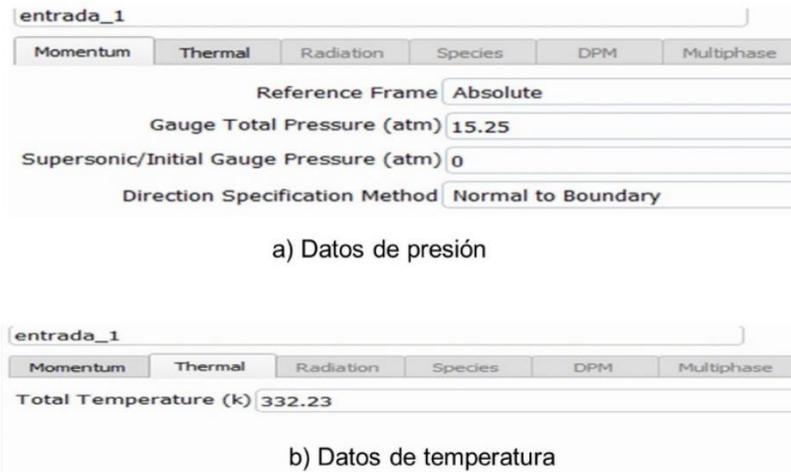


Figura 19. Condiciones de presión y temperatura

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

Controles de solución

En esta parte se establece el número de Courant el cual es el factor de paso de tiempo, cuando se está utilizando el solucionador basado en densidad como se observa en la figura 20.

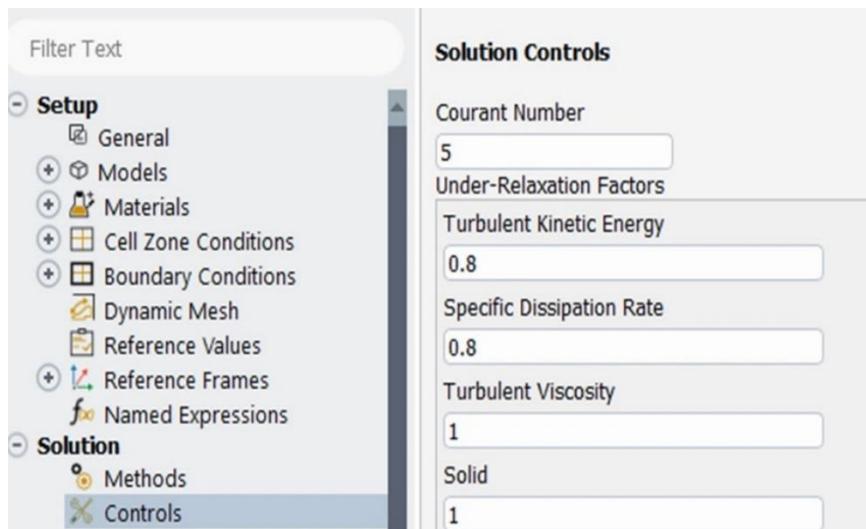


Figura 20. Controles de solución

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

Monitoreo de la convergencia

El monitoreo residual determina la convergencia de los resultados donde 1×10^{-6} es el parámetro residual para estudios de energía como se muestra en la figura 21.

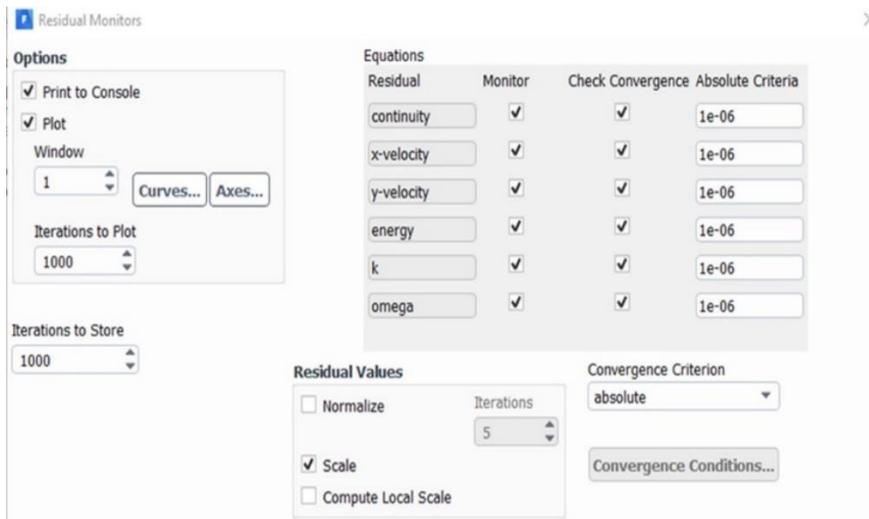


Figura 21. Valores residuales

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

Inicialización híbrida

En este paso se selecciona la opción híbrida, ya que contiene una colección de métodos de interpolación de límites para obtener campos de presión y velocidad figura 22.

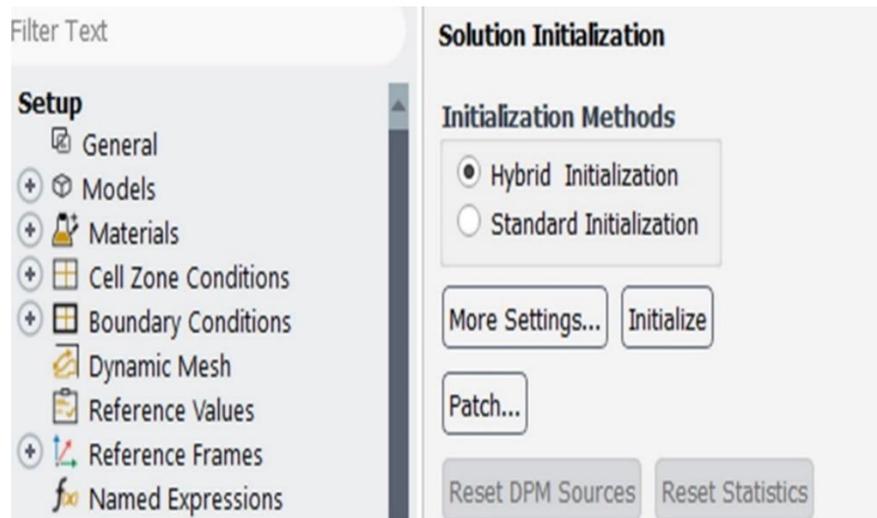


Figura 22. Inicialización híbrida

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

Inicio de cálculo

Cuando se inicia el cálculo, Fluent comienza la simulación, posteriormente en el monitor se mostrará una gráfica en la cual estará representando las ecuaciones y como se van realizando la cantidad de iteraciones, hasta que la solución converja.

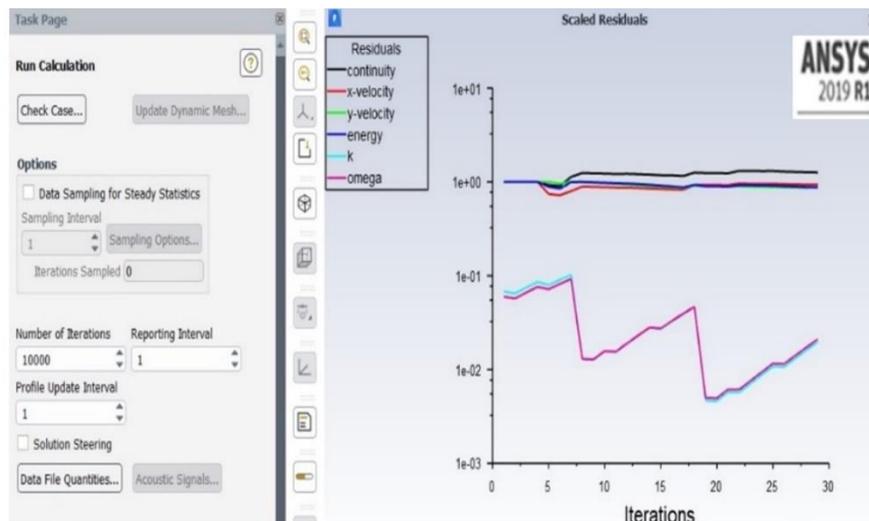


Figura 23. Iteraciones de la solución

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

3. Post procesado

Interpretación de los resultados

Una vez que la solución converge es posible visualizar los resultados configurando adecuadamente los campos como se muestra en la figura 24.

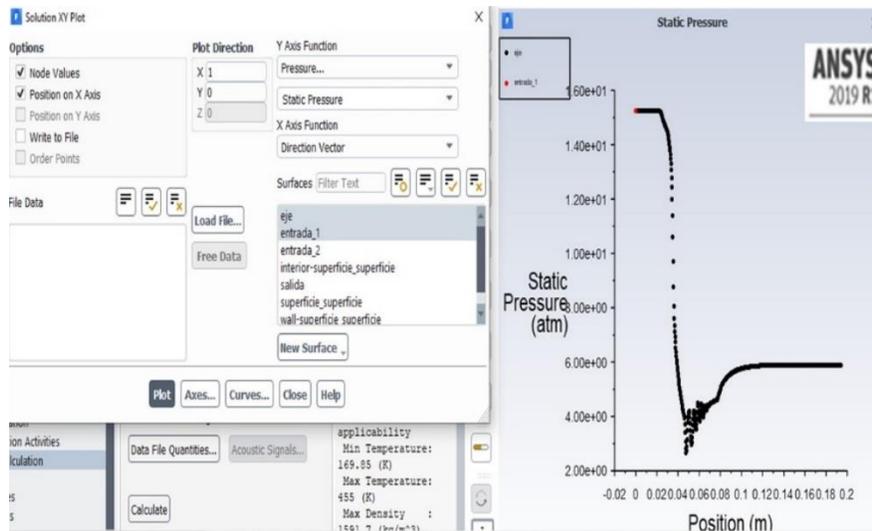


Figura 24. Visualización de resultados

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

IV. Resultados y análisis

4.1 Resultados y análisis trabajando con R-134a para validación

Los resultados que se muestran a continuación son los obtenidos en la simulación trabajando con R-134a, mostrando el comportamiento del número de Mach, presión y velocidad, teniendo como parámetros de entrada 4 puntos experimentales para la validación del modelo.

En la figura 25 se muestra el comportamiento del número de Mach en función del desplazamiento del fluido al interior del eyector, donde la denominación prueba 1, 2, 3 y 4 corresponde a los datos experimentales utilizados.



Figura 25. Número de Mach al interior del eyector en R-134a

Fuente: Capturas de pantalla de ANSYS 2019 R1

En la figura anterior se puede apreciar como el número de Mach es unitario en la garganta, cumpliendo con la teoría de flujo compresible para toberas convergentes divergentes y que trabajan con flujo supersónico a la salida de la tobera sin ondas de choque en la sección divergente de la tobera principal, como se describió en la figura 7 del capítulo 2.

Aunado a lo anterior, en la misma figura se puede visualizar que en la sección divergente de la tobera primaria el número de Mach aumenta y es diferente entre cada una de las pruebas, esto debido a las condiciones de entrada diferentes, es decir, para la prueba 1 donde la presión de entrada es menor, se alcanza un Mach máximo de aproximadamente 1.83, mientras que para la prueba 4 donde la presión de entrada es mayor, se alcanza un Mach máximo de aproximadamente 2.26.

Una vez que el flujo sale de la cámara de mezcla continua su trayectoria en el difusor de la segunda tobera convergente divergente, se puede observar que el flujo se comienza a normalizar, disminuyendo su velocidad y por lo tanto el número de Mach hasta valores subsónicos para poder ingresar a la tubería que va al condensador.

En la figura 26 se gráfica el comportamiento de presión y velocidad en función del desplazamiento del fluido en el eje central del eyector, correspondiente a los 4 puntos experimentales.

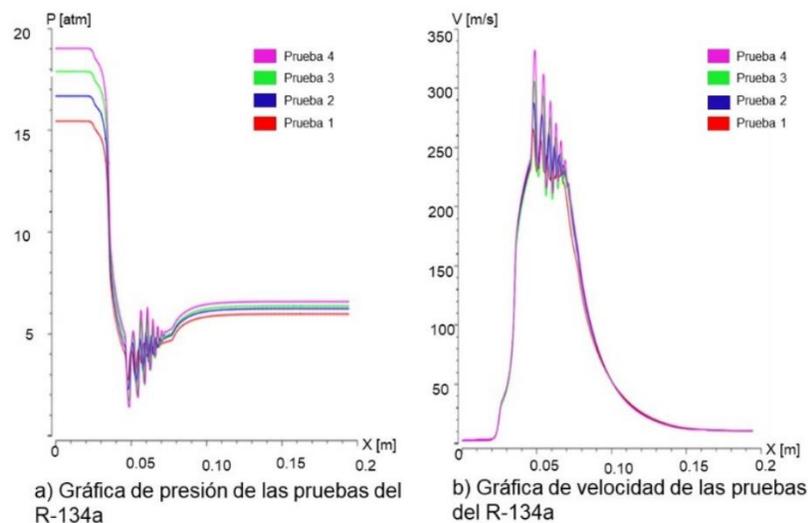


Figura 26. Presión y velocidad de R-134a

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

Teniendo en cuenta que el límite de la primera tobera convergente divergente se encuentra a una distancia de 45.48 mm, contados a partir de la entrada del eyector, se puede apreciar en la figura anterior que en este punto corresponde a la presión

mínima y velocidad máxima en todas las pruebas, correspondiendo este comportamiento a lo mencionado en el capítulo 2 figura 7, donde es precisamente el comportamiento al que se desea llegar, de tal manera que esta presión sea lo más baja posible para que exista un efecto de succión del flujo secundario, contraponiéndose con una velocidad mayor para poder obtener el máximo arrastre posible.

Un dato importante a destacar en el comportamiento de la misma figura, es que se puede observar que todas las perturbaciones después de la salida del flujo de la tobera convergente divergente, corresponde a la sección de la cámara de mezcla, la cual está entre las cotas 45.48mm a 77.46mm, donde es normal ese comportamiento por la interacción de los fluidos primario y secundario durante el proceso de mezclado.

Finalmente se puede observar una normalización de los flujos que ocurre en la sección del difusor, el cual está entre las cotas 77.46mm a 143.46mm, donde la presión aumenta hasta una presión intermedia entre el generador y el evaporador, en contraste con la velocidad, la cual disminuye.

4.2 Resultados y análisis trabajando con R-152a y R-1234yf comparando con R-134a

Los resultados que se muestran a continuación, corresponden al número de Mach, presión y velocidad, obtenidos a través de la simulación del eyector y trabajando con R-152a y R-1234yf, a las mismas condiciones de la prueba 1 del R-134a, a fin de conocer el comportamiento de estos refrigerantes al interior del eyector.

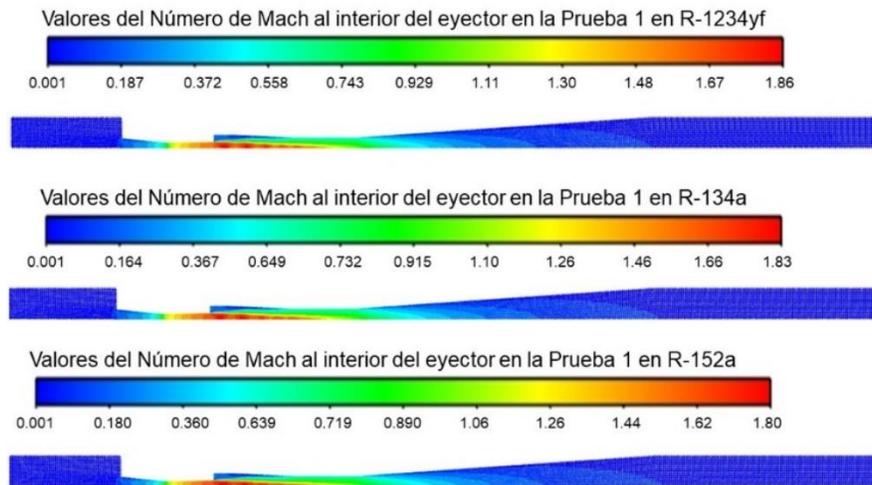


Figura 27. Número de Mach al interior del eyector en R-134a, R-152a y R-1234yf

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

En la figura anterior, se puede observar que el flujo del fluido tiene un comportamiento similar para todos los refrigerantes, correspondiendo con la teoría de flujo compresible, incluido en la garganta del eyector donde se tiene un Mach unitario, independientemente del fluido de trabajo, no obstante, los Mach máximos alcanzados si varían, obteniendo un número mayor para el refrigerante R-1234yf de 1.86, mientras que el valor correspondiente al R-152a se encuentra por debajo del R-134a, variaciones que tienen que ver con las propiedades de los fluidos, como la densidad, la cual tiene un orden similar en cuanto a su magnitud como se observa en la tabla 1 del capítulo 2.

En la figura 28 se gráfica el comportamiento de presión y velocidad en función del desplazamiento del fluido en el eje central del eyector, correspondiente a los refrigerantes R-134a, R-152a y R-1234yf

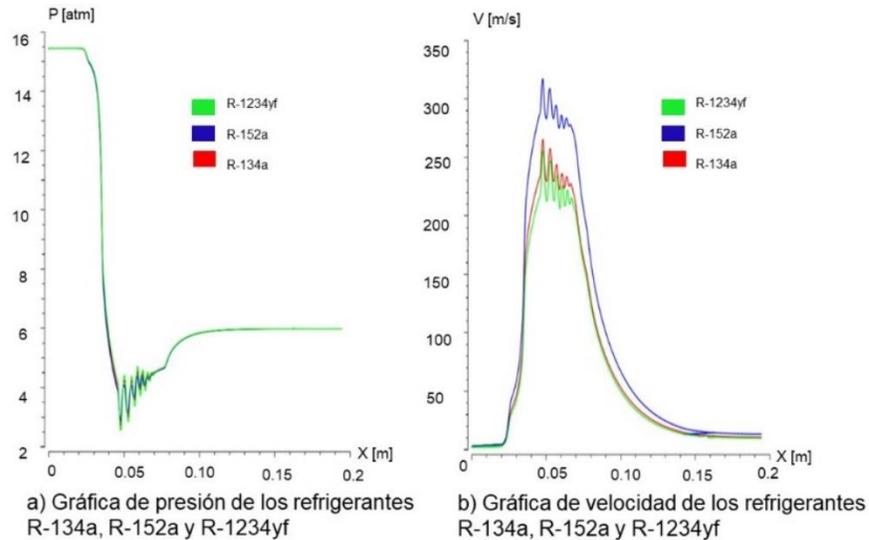


Figura 28. Presión y velocidad en los refrigerantes R-134a, R-152a, y R-1234yf

Fuente: Captura de pantalla en ANSYS 2019 R1

En la figura anterior se puede observar que la mayor caída de presión se obtiene con el refrigerante R-1234yf, seguido del R-134a y finalmente el R-152a, mientras que por lo contrario la mayor velocidad se obtiene con el R-152a, seguido por R-134a y finalmente el R-1234yf, variaciones que corresponden también con las características del fluido, es decir, en este caso la mayor velocidad del fluido se tiene con el fluido de menor densidad, de acuerdo a la tabla 1 del capítulo 2.

Aunque las velocidades son diferentes por las propiedades del fluido, el comportamiento del R-152a y R-1234yf sigue siendo el mismo a través de la trayectoria interna del eyector, como se expuso en la figura 26.

Conclusiones

Como primera conclusión se tiene que fue posible utilizar la herramienta de dinámica de fluidos computacionales para observar y analizar el comportamiento de distintos refrigerantes al interior del eyector, el cual constituye la parte más importante de un sistema de refrigeración por eyecto-compresión, permitiendo conocer el funcionamiento y operación del software ANSYS Fluent que en conjunto con los conocimientos de ingeniería pueden dar lugar a solución de diversos problemas de fenómenos físicos.

Como segunda conclusión se puede mencionar, a partir del análisis de resultados, que el fenómeno desarrollado al interior del eyector sigue el comportamiento de la teoría de flujo compresible en toda su trayectoria, particularmente en lo que corresponde a la primera tobera convergente divergente que nos permite alcanzar una baja presión y en correspondencia una alta velocidad a la salida de esta, a fin de lograr la mayor tasa de arrastre posible, misma que está relacionada directamente con la eficiencia del sistema.

Como tercera conclusión, se tiene que, en el funcionamiento del eyector, se puede lograr una menor presión a la salida de la primera tobera convergente divergente si se trabaja con otros fluidos, como es el caso del R-1234yf en comparación con el R-134a o con R-152a, donde las características físicas de estos refrigerantes toman relevancia.

Finalmente, este análisis del comportamiento del eyector nos permite conocer su buen o mal funcionamiento sobre una geometría determinada y a condiciones de operación específica para poder proponer mejoras en su diseño, mismas que nos ayuden a aumentar la eficiencia del equipo de refrigeración en su conjunto, redundando en sistemas con menor consumo de energía, como se planteó en la justificación de este trabajo.

Bibliografía

- Subsecretaría de Planeación y Transición Energética. (2018). Eficiencia Energética. *Dirección General de Eficiencia y Sustentabilidad Energética*, Boletín N° 03.
- ANSYS. Inc. (2020). *Chapter 3: Flows Usings Sliding And Dynamic Meshes*. Obtenido de 3.2.1.Conservation Equations: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/cor/v194/flu_th/flu_th_dynam_mesh_cons_eqns.html
- ANSYS. Inc. (2020). *Chapter 37: Task Page Reference Guide*. Obtenido de 37.17. Run Calculation Task Page: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/cor/v182/flu_ug/flu_ug_Solution_Steering.html?q=Courant
- ANSYS. Inc. (2020). *Part III: Solution Mode Chapter 37: Using The Solver 37.15. Minitoring Solution Convergence*. Obtenido de 37.15.1 Monitoring Residuals: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/cor/v194/flu_ug/flu_ug_sec_monitor_residuals.html
- ANSYS. Inc. (2020). *Part III: Solution Mode Chapter 37: Using The Solver*. Obtenido de 37.11. Hybrid Initialization: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/cor/v194/flu_ug/flu_ug_sec_init_hybrid.html
- AUTODESK. (2018). *Learning Guide*. Obtenido de SST K- Omega Turbulence Models: <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/SimCFD-Learning/files/GUID-0F5C4828-9F91-46B6-A16A-2578D72DCFCC-htm.html>
- Bill Whitman. (2012). *Tecnología de refrigeración y aire acondicionado (Tomo 1)*. México: DELMAR CENGAGEL learning.
- Cengel , Y., & Boles , M. (2012). *Termodinámica* . New York: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Cengel , Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. México: McGraw-Hill Interamericana.
- Da- Wen Sun. (1999). Comparative study of the performance of an ejector refrigeration cycle operating with various refrigerants. *Energy Conversion and Management*, 873-884.
- Franzini, J., & Finnemore , E. (1999). *Mecánica de Fluidos con aplicaciones en Ingeniería*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.

- Hernández Gutiérrez, J. (2002). *Los sistemas de absorción y su aplicación en el acondicionamiento de aire*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández Gutiérrez, J. (2005). Estudio termodinámico de un sistema de refrigeración solar de eyector y compresor mecánico. *Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería UNAM*, 17-50.
- I.W Eames, S. A. (1995). A theoretical and experimental study of a small-scale steam jet refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 378-386.
- INTARCON. (2019). *Gases Refrigerantes*. Obtenido de El Desconocido Pero Sorprendente R-152a: <https://www.intarcon.com/refrigerante-r152a/>
- Jackson D. H. (1936). Vacuum Refrigeration. *Industrial and Engineering Chemistry*, 522-526.
- K. Cizungu, A. M. (2001). Performance comparison of vapour jet refrigeration system with environment friendly working fluids. *Applied Thermal Engineering*, 585-598.
- Kate McGowan, M. (2018). Mexico busca la eficiencia para compensar las demandas de energía. *ASHRAE Journal's Guia Ferial AHR EXPO-México*, 10-16.
- Lapuerta A., M., & Armas , O. (2012). *Frío Industrial y Aire Acondicionado*. La Mancha : Ediciones de la Universidad de Castilla- La Mancha .
- Osses, J. (2016). *Blog Ess*. Obtenido de El Método De Volúmenes Finitos: <https://www.esss.co/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>
- Román Aguilar , R., Farfán Flores, D., & Hernández Gutiérrez, J. (2019). Análisis en CDF de un eyector para sistemas de refrigeración operando con distintos refrigerantes. *International Energy Conference: IEC 2019*, 480-483.
- Román Aguilar, R. (2012). Estudio teórico-experimental de un sistema de enfriamiento de eyecto-compresión- I. Análisis teórico empleando refrigerantes halogenados e hidrocarburos. II. Evaluación experimental de un prototipo operado con R134a. *Centro de Investigación en Energía. UNAM* , 49-55.
- Román Aguilar, R., Hernández Gutierrez, J., Valle Hernández , J., & Farfán Flores, D. (2018). Análisis del comportamiento de un eyector para aplicaciones de refrigeración utilizando CFD. *Revista de Ingeniería Mecánica*, 8-12.

Román, R., & Hernández, J. (2011). Performance of ejector cooling systems using low ecological impact refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, 1707-1716.

Sánchez Pineda de las Infantas , M. (2001). *Ingeniería del frío: Teoría y Práctica*. Madrid: AMV EDICIONES.

Torrella Alcaraz, E. (2010). *Frío Industrial: Metodos de Producción de Frío*. Madrid: AMV Ediciones.