

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



TÍTULO DE LA TESIS

“Tiempo de vida útil de la espuma formada en mezclas de refrigerantes R134a y R1234yf con aceite POE ISO10 cuando son sometidas a una caída de presión controlada”

Tesis para optar el grado académico de Magíster en Energía

AUTOR

Ing. José Abelardo Novoa Piedra

ASESOR

Julio César Cuisano Egúsqiza

LIMA – PERU

2021

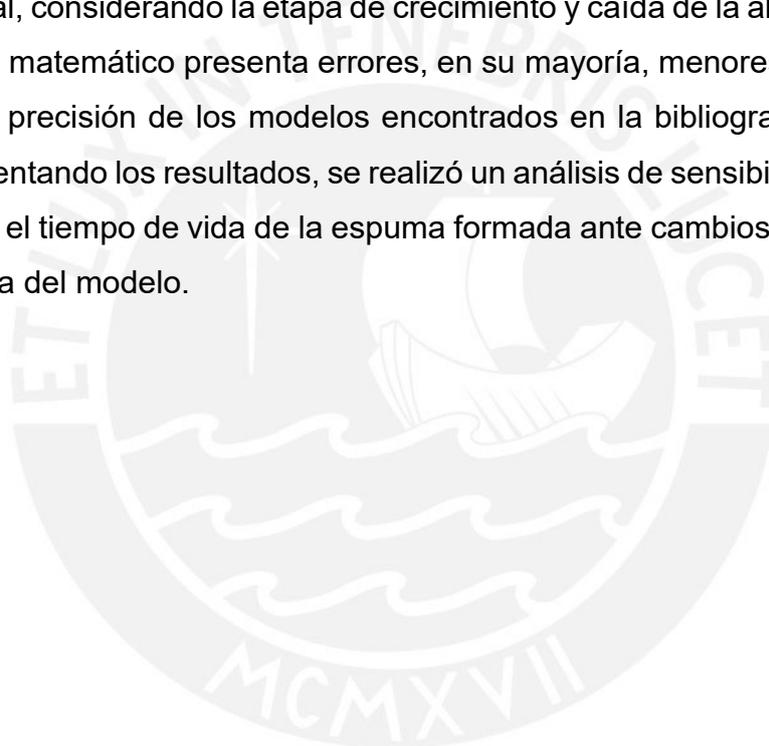
RESUMEN

Los sistemas de refrigeración por compresión de vapor tienen, entre sus principales componentes, un compresor el cual para su correcto funcionamiento necesita de un circuito de lubricación que transporta el aceite desde el cárter hacia los componentes mecánicos. En los sistemas actuales, a efectos de controlar la temperatura del ambiente a refrigerar, los compresores son apagados constantemente dependiendo del nivel de temperatura requerido; es decir, cuando la temperatura de la cámara disminuye debajo de lo necesario el compresor se apaga hasta que la temperatura aumenta por encima de lo requerido y el sistema vuelve a encenderse. Cuando el compresor se apaga, la presión del sistema se estabiliza a un nivel intermedio entre la presión del evaporador y la del condensador, esta condición origina que el refrigerante sea absorbido por el aceite presente en el cárter formando una mezcla líquida caracterizada por una temperatura y una concentración de refrigerante. Cuando el sistema vuelve a funcionar, la presión en el cárter disminuye rápidamente originando que el refrigerante, contenido en la mezcla líquida, cambie de fase y forme una capa de espuma, la cual trae problemas en el compresor y los demás componentes del sistema de refrigeración.

En el presente trabajo, se realizó un análisis de los datos experimentales obtenidos en la bibliografía sobre el proceso de formación de espuma en mezclas R134a/POE ISO10 y R1234yf/POE ISO10, llegando a identificarse que dicho proceso consta de dos etapas principales: una etapa de crecimiento y otra de caída de la altura de la capa de espuma, las cuales se dan a velocidades distintas. Asimismo, se identificó que el fenómeno de formación de espuma se caracteriza por dos parámetros: la altura máxima de la espuma y el tiempo de vida de la espuma, y que dichos parámetros pueden ser controlados variando las condiciones iniciales de la mezcla (temperatura y concentración de refrigerante).

Asimismo, se implementó un modelo matemático que permitió estudiar el fenómeno de formación de espuma en mezclas aceite – refrigerante, el cual a partir de la ecuación de conservación de masa permitió obtener la altura de la espuma formada a lo largo del tiempo de duración del fenómeno descrito. El

modelo implementado, presentó errores diferenciados en cada una de las etapas de la formación de espuma. Durante el crecimiento de la capa de espuma, el modelo matemático presenta un error elevado durante los primeros segundos, donde la velocidad de crecimiento es alta, pero luego disminuye el error conforme se va alcanzando la altura máxima llegando a ser en promedio menor al 15%. Durante la etapa de caída de la altura de espuma, el modelo matemático tiene una buena precisión en los instantes iniciales cuando la velocidad de caída es baja, pero conforme la altura de la capa va disminuyendo de su valor máximo el error aumenta de manera constante llegando a ser en promedio mayor al 30%. En general, considerando la etapa de crecimiento y caída de la altura de espuma, el modelo matemático presenta errores, en su mayoría, menores al 20%, lo cual mejora la precisión de los modelos encontrados en la bibliografía. Finalmente, complementando los resultados, se realizó un análisis de sensibilidad de la altura máxima y el tiempo de vida de la espuma formada ante cambios en las variables de entrada del modelo.



Contenido

RESUMEN	2
SÍMBOLOS Y SIGLAS	7
INTRODUCCIÓN	9
I.1. Antecedentes	10
I.2. Hipótesis	12
I.3. Objetivos	13
I.3.1. Objetivo general.....	13
I.3.2. Objetivos específicos.....	13
I.4. Metodología	13
I.5. Alcance	15
I.6. Descripción de los capítulos	15
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO.....	17
1.1. Sistemas de refrigeración	17
1.1.1. Aplicaciones	17
1.1.2. Clasificación de sistemas de refrigeración	17
1.1.3. Refrigerantes.....	18
1.2. Sistemas de refrigeración por compresión de vapor.....	19
1.2.1. Componentes del sistema de refrigeración por compresión de vapor... 19	
1.3. Lubricación.....	21
1.3.1. Circuito de lubricación	21
1.3.2. Funciones del aceite en el compresor	23
1.3.3. Tipos de aceites para lubricación	23
1.3.4. Problemas generados por el aceite en el sistema de refrigeración.....24	
1.4. Mezclas aceite – refrigerante	24
1.4.1. Propiedades de mezclas aceite – refrigerante	25

1.5. Formación de espuma en mezclas aceite – refrigerante.....	28
CAPÍTULO 2	30
ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES	30
2.1. Análisis de resultados obtenidos.....	30
2.1.1. Presión	30
2.1.2. Altura de espuma y líquido	33
2.2. Análisis de sensibilidad.....	38
CAPÍTULO 3	48
MODELO MATEMÁTICO.....	48
3.1. Condiciones generales del modelo	48
3.1.1. Condiciones iniciales y simplificaciones del modelo	49
3.1.2. Procesos involucrados en el fenómeno	50
3.2. Modelo de procesos dinámicos	52
3.2.1. Ecuación de conservación de masa	52
3.2.2. Variación de propiedades respecto al tiempo.....	56
3.2.3. Ecuación de la fracción media de vapor	57
3.2.4. Flujo másico de formación de burbujas y adherido a la superficie de las burbujas	58
3.2.5. Flujo másico de drenaje.....	63
CAPÍTULO 4	66
RESULTADOS Y ANÁLISIS	66
4.1. Resultados obtenidos del modelo matemático	66
4.2. Error relativo del modelo matemático	79
4.3. Análisis de los resultados obtenidos	81
4.3.1. Análisis de sensibilidad.....	81
4.3.2. Análisis del error.....	87

CONCLUSIONES 89

BIBLIOGRAFÍA 92



SÍMBOLOS Y SIGLAS

SIMBOLOS

X_R :	Porcentaje de masa de refrigerante en la mezcla líquida
T_{mezcla} :	Temperatura de la mezcla líquida aceite refrigerante, en °C
H_E :	Altura de la capa de espuma, en m
t_{vida} :	Tiempo de vida de la espuma formada, en segundos
P :	Presión del sistema, en kPa
H_L :	Altura de la capa líquida, en m
H_V :	Altura de la capa de vapor, en m
Z :	Factor de compresibilidad
A :	Parámetro adimensional de atracción molecular
B :	Parámetro adimensional de repulsión molecular
ω_R :	Solubilidad del refrigerante
ΔX_R :	Diferencia entre el porcentaje de masa de refrigerante y la solubilidad
m_{RL} :	Masa de refrigerante en estado líquido, en kg
m_O :	Masa de aceite, en kg
$P_{sat.R}$:	Presión de saturación de refrigerante, en kPa
ρ_L :	Densidad de la mezcla líquida aceite refrigerante, en kg/m ³
ρ_R :	Densidad del refrigerante, en kg/m ³
ρ_O :	Densidad del aceite, en kg/m ³
σ_L :	Tensión superficial de la mezcla líquida aceite refrigerante, en N/m
σ_R :	Tensión superficial del refrigerante, en N/m
σ_O :	Tensión superficial del aceite, en N/m
μ_L :	viscosidad de la mezcla líquida aceite refrigerante, en cP
μ_R :	viscosidad del refrigerante, en cP
μ_O :	viscosidad del aceite, en cP
\tilde{x}_O :	Fracción molar del aceite en la mezcla líquida
\tilde{x}_R :	Fracción molar del refrigerante en la mezcla líquida
m_N :	Tasa de formación de burbujas, en kg/s Flujo másico de líquido adherido en las paredes de las burbujas, en kg/s
m_c :	
m_d :	Flujo másico de retorno a la mezcla líquida, en kg/s
m_L :	Masa de la mezcla líquida aceite refrigerante, en kg
V :	Volumen de la mezcla líquida aceite refrigerante, en m ³
Area:	Área del cilindro, en m ²
V_E :	Volumen de la capa de espuma, en m ³
V_{EV} :	Volumen de la capa de espuma en estado vapor, en m ³
ε_V :	Fracción media de vapor de la capa de espuma

V_{EL} :	Volumen de la capa de espuma en estado líquido, en m ³
H:	Altura del cilindro, en m
ε_{VB} :	Fracción de vapor en la base de la capa de espuma
ε_{VT} :	Fracción de vapor en el tope de la capa de espuma
J:	Tasa de nucleación
J_0 :	Factor de proporcionalidad en la tasa de nucleación
G _b :	Número de Gibbs
N_A :	Número de avogadro
M:	Masa molecular de la mezcla líquida, en kg/kmol
N:	Densidad de moléculas de líquido, en kmol/m ³
P _i :	Presión interior en la burbuja, en kPa
P _e :	Presión exterior de la burbuja, en kPa
R:	Radio de la burbuja, en m
R _c :	Radio crítico de la burbuja, en m
ΔP_c :	Presión crítica para la formación de burbujas, en kPa
W_{BC} :	Energía necesaria para formar burbujas, en kJ
W_s :	Energía superficial de la burbuja, en kJ
W_{CV} :	Trabajo de cambio de volumen hecho por la burbuja, en kJ
k_b :	Constante de Boltzmann
T:	Temperatura, en °C
h_{iv} :	Entalpía de vaporización del refrigerante, en kJ/kg
ρ_v :	Densidad del refrigerante en estado vapor, en kg/m ³
$\bar{\rho}$:	Densidad media de la capa de espuma, en kg/m ³
g:	Aceleración de la gravedad, en m/s ²
H _c :	Altura característica del proceso de drenaje, en m
U _D :	Velocidad característica del proceso de drenaje, en m/s
K:	Permeabilidad del medio poroso
dB:	Diámetro de la burbuja, en m
$A_{experimental}$:	Área bajo la curva obtenida experimentalmente, en m ²
A_{modelo} :	Área obtenida bajo la curva obtenida en el modelo matemático, en m ²

SIGLAS

COP:	Coeficiente de Performance
EES:	Engineering Equation Solver
POE:	Aceite Poliéster Sintético
PAG:	Aceite Polialquilenglicol
HFC:	Hidrofluorocarburos
HFO:	Hidrofluoroolefinas

INTRODUCCIÓN

Los compresores de los sistemas de refrigeración por compresión de vapor utilizan aceite con la finalidad de lubricar sus partes móviles y proteger las juntas de goma del circuito, evitando fugas de refrigerante. Cuando el sistema alcanza la temperatura deseada en la cámara de refrigeración, el compresor se apaga para no seguir disminuyendo la temperatura. Mientras el compresor se encuentra apagado, el aceite y el refrigerante se mezclan en una solución líquida caracterizada por un porcentaje de masa de refrigerante (X_R) y una temperatura (T_{mezcla}). Después de eso, la temperatura de la cámara vuelve a subir, con lo cual el compresor arrancará nuevamente compensando dicho aumento en la temperatura. Con estos arranques continuos, se generarán caídas de presión en el cárter del compresor originando que el refrigerante cambie de fase y se separe de la mezcla, proceso conocido como “desorption” (Barbosa & Neto, 2012). Dicho proceso origina la formación de espuma en la interfaz de la mezcla líquida y el refrigerante gaseoso que se encuentran en el compresor. La espuma formada se caracteriza por una altura (H_E) y un tiempo de vida (t_{vida}), los cuales dependen de la cantidad de refrigerante contenido en la mezcla líquida (X_R), de la temperatura de la mezcla (T_{mezcla}) y de la presión del sistema (P).

El proceso de formación de espuma descrito trae como consecuencias problemas tales como sobrepresiones (generadas por la compresión de líquidos) y variación del coeficiente de performance (COP) del sistema (Kiranmai et al., 2014).

El presente trabajo estudia el ciclo de vida de la espuma formada cuando existe una caída de presión en la mezcla líquida de aceite POE ISO10 con los refrigerantes R134a y R1234yf, los cuales fueron seleccionados pues el primero es uno de los más utilizados en sistemas de refrigeración a pesar que es contaminante, mientras que el R1234yf es propuesto como reemplazante del R134a pues tiene similar comportamiento térmico con un menor nivel contaminante. El estudio busca obtener la influencia de dos parámetros del sistema: la concentración de refrigerante en la mezcla (X_R) y la temperatura de la mezcla (T_{mezcla}), en el ciclo de vida de la espuma. Se realizó un modelo matemático, el cual fue validado utilizando datos experimentales de trabajos

encontrados en la bibliografía. En el trabajo experimental tomado como referencia se utilizó un banco de pruebas en el cual la mezcla líquida fue sometida a una caída de presión, lo cual generó que se iniciara la formación de espuma. Dicho fenómeno fue grabado con ayuda de una videocámara de alta definición obteniéndose como resultado el comportamiento de la altura de espuma a lo largo del tiempo. El modelo matemático desarrollado utiliza las ecuaciones de difusión y conservación de masa en la mezcla líquida y en la capa de espuma formada con el objetivo de obtener la ecuación diferencial que gobierna el comportamiento de la altura de espuma a lo largo del tiempo; en dicho modelo se definen como variables dinámicas a las alturas de espuma, de líquido y de gas (H_E , H_L y H_V), la presión del sistema (P), y la concentración de refrigerante en la mezcla líquida (X_R). Finalmente, se utilizó el software EES para implementar el modelo matemático y realizar la simulación de la formación de espuma obteniéndose como resultado el ciclo de vida de la espuma formada a partir de la mezcla líquida.

I.1. Antecedentes

Barbosa y Ortalan (2007) realizaron un análisis experimental y teórico de la absorción de refrigerantes en aceites lubricantes. Los refrigerantes estudiados fueron el R134a y el R600a; mientras que los aceites lubricantes fueron el POE ISO5, ISO7 e ISO10. Los resultados obtenidos mostraron que el proceso de absorción en el R600a se debe únicamente a la difusión, mientras que en el caso del R134a el mecanismo principal es la convección natural. Además, se obtuvieron dos modelos matemáticos para predecir el comportamiento de la temperatura y la presión a lo largo del tiempo obteniéndose resultados con un error máximo de 1.16%.

Neto y Barbosa realizaron varios trabajos relacionados a las mezclas aceite – refrigerante. En el año 2008, realizaron un modelo experimental para estudiar el proceso de absorción de R134a en aceite lubricante POE ISO10; llegando a la conclusión que dicho proceso de transferencia de masa es gobernado por la convección. En el año 2011, utilizaron un modelo matemático para determinar las propiedades termodinámicas de la mezcla de refrigerante R600a con aceite AB ISO5. Para obtener el modelo utilizaron la ecuación de estado Peng Robinson

y el método de *departure functions*. Los resultados obtenidos mostraron que la presencia de aceite es perjudicial en las propiedades del refrigerante y afecta los parámetros de funcionamiento del sistema de refrigeración. En el año 2012, utilizaron la misma relación para determinar las propiedades termodinámicas de la mezcla aceite - refrigerante, pero en esta oportunidad utilizaron dos aceites con distinta solubilidad. Como resultado obtuvieron que, a mayor solubilidad del aceite, el refrigerante se deteriora de una manera más drástica. En el mismo año, realizaron un modelo experimental para estudiar la formación de espuma ante una caída de presión controlada. En esta oportunidad utilizaron una mezcla de refrigerante R134a con aceite POE ISO10. Los resultados obtenidos mostraron el ciclo de vida de la espuma, el cual lo dividieron en tres etapas: inicio de espuma, crecimiento y caída. En el año 2014, realizaron un experimento para elaborar un modelo matemático con el objetivo de estudiar el proceso de absorción de R1234yf y R134a con aceite POE ISO10 en un sistema cerrado, llegando a concluir que dicho proceso es de transferencia de masa por convección.

Dias, Barbosa y Prata (2012) obtuvieron un modelo numérico para simular el proceso de formación de burbujas de refrigerante. Dicho modelo utilizó las ecuaciones de conservación de momento y de masa en la interfaz de la burbuja formada, obteniendo como resultados la presión interna y la tasa de crecimiento de la burbuja. Kiranmai, *et al.* (2014) analizaron el efecto de la presencia de aceite en el funcionamiento del compresor y en el coeficiente de performance del sistema de refrigeración. Utilizaron una mezcla de R134a con tres aceites distintos: POE ISO22, ISO32 e ISO46; llegando a la conclusión que el COP del sistema es máximo para el ISO46 con una concentración de 3 ml de aceite/g de refrigerante. En el año 2015, Fortkamp y Barbosa obtuvieron un modelo matemático para simular el comportamiento de la formación de espuma que se presenta al someter una mezcla aceite refrigerante a una caída de presión. La mezcla utilizada fue de R134a y R1234yf con aceite POE ISO10. Los resultados obtenidos tuvieron errores bajos durante el inicio del ciclo de vida de la espuma, pero el error aumentó hasta valores cercanos al 20% conforme la espuma desaparecía. Yanagisawa, *et al.* (2017) realizaron un estudio experimental para

medir la tensión superficial de una mezcla aceite refrigerante mediante el método de la presión máxima de burbuja. La mezcla utilizada fue de CO₂ con aceite PAG (polyalkylene glicol). Como resultado se obtuvo la relación entre la tensión superficial de la mezcla y tres parámetros de la mezcla: concentración de refrigerante, concentración de aceite y temperatura.

De la literatura revisada, se puede concluir que existe un mecanismo de absorción de refrigerante en aceites lubricantes que, bajo determinadas condiciones, permite la formación de mezclas líquidas, caracterizadas por una concentración de refrigerante. En el caso de los compresores que operan en sistemas de refrigeración, parte de la mezcla aceite refrigerante cambia de fase durante el arranque formando una capa de espuma, la cual al ser comprimida genera problemas en el funcionamiento tanto del compresor como de los otros componentes del sistema llegando a disminuir el COP de refrigeración. La formación de espuma se caracteriza por una altura de espuma máxima y un tiempo de vida, los cuales dependen de la concentración del refrigerante y de la temperatura de la mezcla.

En tal sentido, existen trabajos experimentales que buscan explicar el proceso de formación de espuma, tanto de manera experimental como mediante modelos matemáticos, llegando a identificar una etapa de crecimiento y otra de caída de la altura de la capa de espuma. Los modelos matemáticos desarrollados son imprecisos en el estudio de la etapa de caída de la altura de espuma, además que, no realizan un análisis de sensibilidad de la altura máxima y el tiempo de vida de la espuma respecto de la concentración de refrigerante y la temperatura de la mezcla líquida.

1.2. Hipótesis

El presente trabajo estudiará la formación de espuma en mezclas aceite - refrigerante sometidas a una caída de presión brusca, para lo cual se modelará la altura de la espuma (H_E) a lo largo de su tiempo de vida (t_{vida}). El proceso mencionado depende de dos parámetros: la temperatura (T_{mezcla}) y la concentración de refrigerante (X_R) iniciales de la mezcla líquida. A una menor temperatura de la mezcla, la altura máxima de espuma y su tiempo de vida serían

mayores; lo mismo ocurriría cuando la concentración de refrigerante fuera menor. Las tendencias de los resultados esperados se basan en los resultados obtenidos por Barbosa y Prata (2012) y Fortkamp (2015).

I.3. Objetivos

I.3.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo matemático para estudiar el proceso de formación de espuma que ocurre en las mezclas de refrigerantes R134a y R1234yf con aceite POE ISO10 cuando son sometidas a depresiones rápidas.

I.3.2. Objetivos específicos

- Obtener datos experimentales de la bibliografía sobre la altura de espuma a lo largo de su tiempo de vida.
- Reconocer los fenómenos físicos presentes en el proceso de formación de espuma.
- Aplicar las ecuaciones de difusión y conservación de masa para el fenómeno de formación de espuma.
- Establecer una relación entre las ecuaciones utilizadas a través de un modelo matemático que describa el fenómeno de formación de espuma.
- Implementar el modelo matemático del proceso de formación de espuma utilizando un software especializado.
- Validar el modelo matemático en base a los resultados experimentales obtenidos de la bibliografía.

I.4. Metodología

La presente investigación estudiará el proceso de formación de espuma en una mezcla aceite – refrigerante sometida a un proceso de despresurización. En el estudio se utilizarán como refrigerantes al HFC-R134a y al HFO-R1234yf, y como aceite lubricante al POE ISO10. Dicho estudio se realizará implementando un modelo matemático, el cual será implementado en el software EES y los resultados serán validados con los datos experimentales obtenidos del estado del arte.

Para la validación del modelo matemático se requiere un estudio experimental del ciclo de vida de la espuma formada en mezclas aceite refrigerante sometidas a un proceso de despresurización, el cual debe tener resultados referidos a la altura de la espuma a lo largo del tiempo de duración del proceso para distintas condiciones de concentración de refrigerante y temperatura de la mezcla líquida aceite refrigerante; asimismo, debe ser un estudio que se encuentre en el estado del arte. En tal sentido, se seleccionaron los resultados obtenidos por Fabio Fortkamp en el año 2014 durante la realización de su trabajo “*Análisis experimental y teórico de la formación de espuma en mezclas aceite – refrigerante*”. En el mencionado experimento, se varío la concentración de refrigerante en el aceite, la temperatura de la mezcla y la velocidad de despresurización; obteniéndose como resultado la altura de la espuma formada desde que se inició hasta que desapareció completamente.

En el modelo matemático a desarrollar, se analizará el proceso de difusión de refrigerante que se da desde la mezcla aceite - refrigerante en estado líquido hacia la espuma formada. Dicho proceso está constituido por tres fenómenos: la nucleación de refrigerante cuando la mezcla es sometida a una caída de presión, la adhesión de líquido en las burbujas y el retorno de refrigerante desde la espuma hacia la mezcla líquida. Combinando las ecuaciones de los procesos descritos con la ecuación de conservación de masa en la capa de espuma se obtendrá la ecuación diferencial que gobierna el comportamiento de la altura de espuma, la cual será resuelta utilizando el software EES. Para hallar las propiedades de la mezcla se utilizarán la ecuación de estado Peng-Robinson¹ y

¹ La ecuación de Peng Robinson puede expresarse de la siguiente manera:

$$Z^3 - (1 - B) * Z^2 + (A - 3 * B^2 - 2 * B) * Z - (A * B - B^2 - B^3) = 0$$

Donde Z es el factor de compresibilidad, A es el parámetro adimensional de atracción molecular y B es el parámetro adimensional de repulsión molecular, estos últimos parámetros dependen de la temperatura crítica, de la presión crítica y del factor acéntrico.

el método de *departure functions*² como se describe en el trabajo realizado por Barbosa y Neto (2014).

I.5. Alcance

Del modelo implementado se espera obtener los valores de la altura de espuma a lo largo de su ciclo de vida; esto es, desde que inicia la formación de espuma hasta que desaparece completamente. Los resultados obtenidos se mostrarán en gráficos relacionando a la altura de espuma (HE) versus el tiempo (t), para distintos valores de temperatura de la mezcla, concentración de refrigerante, y caída de presión. Con esto se podrá analizar la influencia de dichos parámetros en el ciclo de vida de la espuma, esperando obtener los valores que minimizan la formación de espuma para las mezclas aceite-refrigerante estudiadas. Además, tomando como referencia resultados experimentales se determinará el error del modelo matemático. Se espera lograr errores promedios menores al 15% en todos los casos analizados.

I.6. Descripción de los capítulos

En un primer capítulo, se hará una revisión de los conceptos básicos relacionados con el trabajo de tesis. Primero, se explicarán los sistemas de refrigeración, sus aplicaciones y su clasificación, poniendo énfasis en los sistemas de refrigeración por compresión de vapor (ciclo de refrigeración y componentes). Luego se introducirá el tema de lubricación como parte de los sistemas de refrigeración, explicando el circuito de lubricación básico, las funciones del aceite en el compresor, los tipos de aceite para lubricación y los problemas generados por el aceite en los sistemas de refrigeración.

En un segundo capítulo, se analizarán los resultados experimentales obtenidos de la bibliografía, en lo que respecta a la presión, y a la altura de espuma y líquido

² El método de *departure functions* utiliza el estado de referencia de un gas ideal a una presión de referencia, p_o . Esto permite obtener la variación de una propiedad molar entre dos estados utilizando la siguiente expresión:

$$\tilde{\Psi}_2 - \tilde{\Psi}_1 = [\tilde{\psi}(\tilde{v}_2, T_2) - \tilde{\psi}^{ig}(\tilde{v}_o, T_2)] + [\tilde{\psi}^{ig}(\tilde{v}_o, T_2) - \tilde{\psi}^{ig}(\tilde{v}_o, T_1)] - [\tilde{\psi}(\tilde{v}_1, T_1) - \tilde{\psi}^{ig}(\tilde{v}_o, T_1)]$$

a lo largo del tiempo de duración del fenómeno estudiado. Asimismo, se realizará un análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos con el fin de obtener una relación entre la caída de presión, la altura máxima y el tiempo de vida de la espuma formada con las condiciones iniciales del sistema, temperatura y concentración de refrigerante.

Luego, en el capítulo tres se explicarán las ecuaciones que forman parte del modelo matemático utilizado para el modelado del proceso de formación de espuma. En primer lugar, se establecerán las condiciones generales del modelo, las cuales involucran las condiciones iniciales de los parámetros del modelo, así como, los procesos involucrados en el proceso. Luego, se obtendrán las ecuaciones dinámicas del proceso. Para ello, primero se utilizará la ecuación de conservación de masa, la cual relaciona los flujos másicos involucrados con la altura de espuma estudiada. Finalmente, se obtendrán las ecuaciones de los flujos másicos involucrados: flujo de nucleación, flujo adherido a la superficie de las burbujas y flujo de drenaje, con lo cual será posible obtener el valor de la altura de espuma a lo largo del tiempo de duración del proceso estudiado.

Finalmente, en el cuatro capítulo se analizarán los resultados obtenidos del modelo matemático comparándolos con los experimentales, a fin de validar la confiabilidad del modelo implementado. En primer lugar, se graficará la altura de espuma obtenida, a partir del modelo matemático implementado, para cada una de las mezclas aceite-refrigerante estudiada (se trabajó con 3 condiciones para cada mezcla). Luego, se calculará el error del modelo matemático teniendo como base los resultados experimentales obtenidos de la revisión bibliográfica considerada como base del estudio desarrollado. Finalmente, se realizará un análisis de los resultados obtenidos, a partir de un análisis de sensibilidad y un análisis de errores.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se hace una revisión de los conceptos relacionados con los sistemas de refrigeración, sistemas de refrigeración por compresión de vapor, lubricación, las mezclas aceite – refrigerante, las propiedades de las mezclas y la formación de las espumas en las mezclas aceite – refrigerante.

1.1. Sistemas de refrigeración

La refrigeración es una de las principales áreas de aplicación de la termodinámica y consiste en la transferencia de calor desde una región de una temperatura inferior hacia una de temperatura superior.

1.1.1. Aplicaciones

La refrigeración tiene diversas aplicaciones, entre las que se encuentran principalmente:

- uso doméstico en viviendas para conservar los alimentos o enfriar bebidas en los llamados refrigeradores;
- uso comercial, para mantener los productos a una baja temperatura en supermercados;
- uso industrial, para refrigerar la producción en grandes fábricas, por ejemplo, en fábricas de procesamiento de pescado es necesario enfriar la materia prima para evitar su descomposición;
- transporte de productos, por ejemplo, el transporte de pescado en contenedores refrigerados;
- aire acondicionado para mantener la temperatura adecuada en ambientes o vehículos.

1.1.2. Clasificación de sistemas de refrigeración

Los encargados de producir refrigeración son los sistemas de refrigeración, los cuales se pueden clasificar de acuerdo con su principio de funcionamiento en (Fernández, 2000):

- sistemas por compresión mecánica de vapor, un compresor aspira y comprime los vapores que luego serán condensados;
- sistemas por absorción, se añade calor al sistema, lo cual forma vapores que son absorbidos y recuperados mediante un absorbente líquido;
- sistemas por ciclo de gas, utilizan aire como fluido refrigerante;
- sistemas por eyección, los vapores son arrastrados por el efecto Venturi que se genera por el paso de otro fluido a gran velocidad;
- sistemas por adsorción, utilizan un absorbente sólido para captar los vapores;
- sistemas por efecto termoeléctrico, también denominado efecto Peltier. La corriente eléctrica en un circuito compuesto por dos conductores distintos unidos por un par de soldadura origina que una de las uniones se enfríe, mientras que la otra se calienta;
- sistemas por efecto Haas-Keenson, permiten alcanzar temperaturas próximas a 0 °K mediante la desimantación de una sal paramagnética;
- sistemas por efecto termo-magneto-eléctrico, también denominado efecto Ettingshausen. La corriente eléctrica que circula, en presencia de un campo magnético, por un conductor origina un gradiente de temperaturas en este, por lo cual uno de sus extremos absorbe calor, mientras que el otro lo desprende;
- sistemas por efecto Torbellino, también llamado efecto de Ranke-Hilsh. Estos sistemas se basan en el hecho de que una corriente de aire comprimido inyectada tangencialmente a velocidad sónica en una cámara tubular origina un movimiento circular ciclónico, enfriando el aire en la zona cercana al eje del cilindro, mientras que el aire situado en la periferia se calienta.

1.1.3. Refrigerantes

El fluido portador de energía en los sistemas de refrigeración es el encargado de absorber el calor del ambiente a refrigerar y puede ser una de las siguientes sustancias:

- refrigerantes halogenados: puros y mezclas (CFC, HCFC, HFC, blends);
- amoníaco;

- dióxido de carbono;
- aire frío;
- hidrocarburos: Propano, Butano;
- en sistemas de absorción: Amoniaco/Agua, Agua/Bromuro de Litio, Soluciones Ternarias;
- refrigerantes secundarios: Salmueras, Glicoles.

De todos los sistemas de refrigeración mencionados, el más utilizado en la práctica es el sistema por compresión de vapor el cual será descrito brevemente en la sección 1.2.

1.2. Sistemas de refrigeración por compresión de vapor

Los sistemas de refrigeración por compresión de vapor entran al grupo de los denominados sistemas mecánicos de refrigeración, pues utilizan energía mecánica en el compresor para aumentar la presión del vapor previo a la condensación. En general, los sistemas de refrigeración por compresión de vapor operan en los denominados ciclos de refrigeración.

1.2.1. Componentes del sistema de refrigeración por compresión de vapor

Un sistema de refrigeración por compresión de vapor está formado por 4 componentes principales, los cuales son los siguientes (Franco, 2006):

a. Compresor

La función del compresor es aspirar el fluido refrigerante a la presión de evaporación establecida y lo comprime elevando su presión y temperatura hasta valores que permitan realizar la condensación.

Los tipos de compresores, de acuerdo con su principio de funcionamiento, usados en la refrigeración son:

- alternativos;
- de tornillo o helicoidales;
- rotativos;
- centrífugos.

Otra clasificación de los compresores se realiza de acuerdo con su hermeticidad, teniendo 3 tipos:

- compresores herméticos;
- compresores semi-herméticos;
- compresores abiertos.

La lubricación en los compresores cumple un papel importante en su funcionamiento y será descrita en la sección 1.3 del presente trabajo.

b. Condensador

El condensador es el componente que se encarga del cambio de fase del refrigerante, desde vapor sobrecalentado hasta líquido saturado. En algunos casos, el condensador subenfía el refrigerante llevándolo a una temperatura menor que la de saturación a la presión de condensación.

Los condensadores se clasifican de acuerdo con el agente condensante que se emplee en:

- condensadores por agua;
- condensadores por aire;
- condensadores mixtos.

c. Evaporador

La función del evaporador es permitir el cambio de fase del refrigerante, el cual ingresa como vapor húmedo y sale como vapor sobrecalentado; en algunos casos existe sobrecalentamiento llevando el refrigerante a una temperatura mayor que la de saturación a la presión de evaporación. El proceso en el evaporador requiere absorber calor del ambiente a refrigerar con lo cual permite acondicionar la cámara a la temperatura deseada.

Los evaporadores se clasifican según el estado del fluido refrigerante en su interior en: inundados, semi-inundados y secos. En los primeros, el fluido refrigerante en la salida está en mezcla líquido-gas con una calidad de vapor baja; en los semiinundados, la velocidad del refrigerante es baja por lo cual el

líquido se va depositando en la parte inferior de los tubos y el vapor circula por la parte superior; finalmente, en los evaporadores secos el fluido refrigerante sale en estado completamente gaseoso (vapor saturado).

Otra clasificación de los evaporadores es según su construcción y pueden ser de tubo liso o de tubo con aletas. El primero consiste en un tubo de cobre recocado que puede presentar distintas formas (las más usadas son en zigzag y en espiral); el segundo consiste en un banco de tubo con aletas las cuales pueden ser circulares o rectangulares, la circulación del aire puede ser natural o forzada con lo cual es posible aumentar la capacidad de evaporación.

d. Dispositivo de expansión

El dispositivo de expansión tiene como función disminuir la presión y temperatura del líquido que sale del condensador hasta valores que permitan realizar la evaporación. También sirve como control del flujo de refrigerante que ingresa al evaporador y que define la carga térmica del sistema de refrigeración.

Los dispositivos de expansión pueden ser de varios tipos, siendo los más empleados:

- tubos capilares, los cuales se emplean en pequeñas instalaciones con pocas variaciones de la carga frigoríficas;
- válvulas de expansión termostáticas. Estas válvulas cumplen dos funciones: controlar el caudal de refrigerante que ingresa al evaporador y controlar el sobrecalentamiento a la salida de este;
- válvulas reguladoras de nivel (flotador) mayormente utilizadas en los evaporadores del tipo inundado.

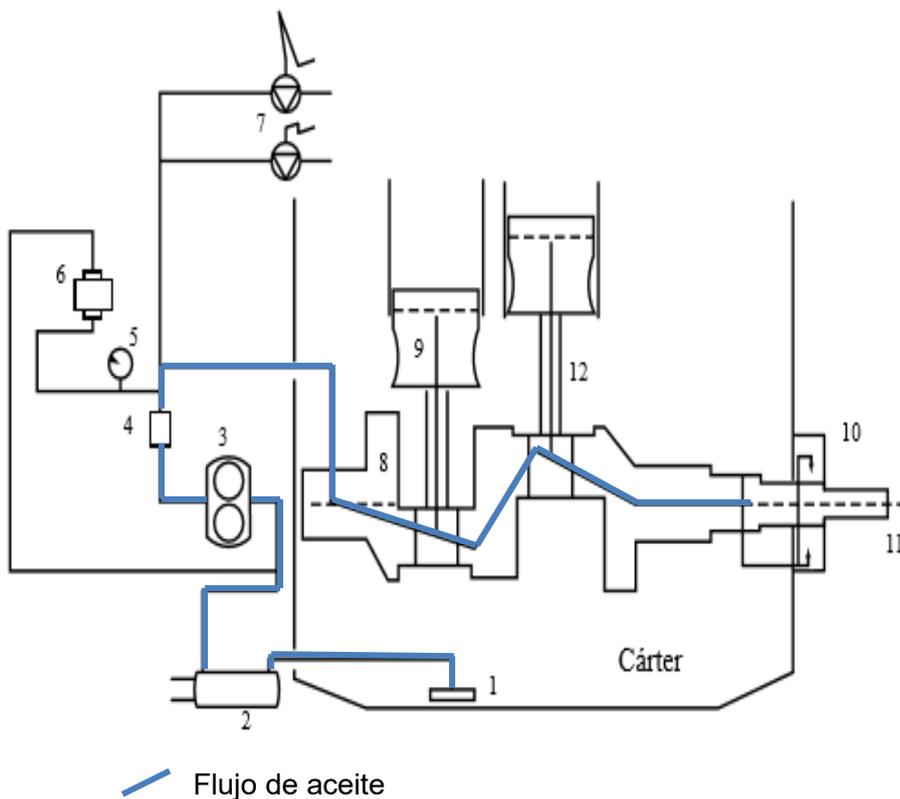
1.3. Lubricación

1.3.1. Circuito de lubricación

En los sistemas de refrigeración, la lubricación es uno de los aspectos más importantes del compresor y por lo tanto de la instalación. En la mayoría de los compresores, el tipo de lubricación empleado es el forzado con ayuda de una bomba de aceite que es accionada por el mismo motor eléctrico permitiendo al

aceite recorrer un circuito de lubricación como el mostrado en la figura 1.1 (Franco, 2006).

El extremo del cigüeñal (11) recibe el movimiento del motor eléctrico; el otro extremo se conecta a la bomba de aceite (3), del tipo de engranaje cuya conexión no se muestra en la figura. La bomba aspira el aceite del cárter a través de un filtro (1), pasa por el enfriador (2) y lo descarga al filtro (4) para después ir a los componentes del compresor: cojinetes (8), pistones (9), bielas (12), prensaestopas (10) y a otros componentes a través de electroválvulas (7). El aceite retorna al cárter para ser bombeado nuevamente. Adicionalmente, el circuito cuenta con elementos de control tales como presostatos diferenciales (6) y manómetros (5).



N°	Elemento
1	Filtro
2	Enfriador
3	Bomba de engranajes
4	Filtro
5	Manómetro
6	Presostato diferencial
7	Electroválvula
8	Cojinete
9	Pistón
10	Prensaestopas
11	Extremo de cigüeñal
12	Biela

Figura 1.1. Circuito de lubricación. (Franco, 2006)

1.3.2. Funciones del aceite en el compresor

Las funciones que cumple el aceite dentro del compresor son las siguientes:

- Disminuir la fricción y el desgaste de los componentes móviles del compresor durante la operación del sistema. Por ejemplo, en los compresores alternativos disminuye la fricción en los pistones.
- Función térmica, pues absorbe el calor producido durante el trabajo del compresor.
- Proteger las juntas de goma del circuito evitando fugas de refrigerante, así como actuar como barrera separando el gas del lado de la descarga, del de la succión. (Yáñez, 2018)
- Reducir el ruido producido por la operación del compresor; una mala lubricación se ve reflejada en ruidos durante la operación del sistema.
- En el caso de compresores herméticos o semi – herméticos el aceite circula dentro del conjunto motor – compresor, por lo cual debe ser dieléctrico para actuar como aislante eléctrico.

1.3.3. Tipos de aceites para lubricación

Los aceites lubricantes utilizados en sistemas de refrigeración se pueden dividir en dos grupos cada uno con sus propias características (Yáñez, 2018):

a) Lubricantes sintéticos tipo alquibenceno AB

Se trata de una modificación de los lubricantes minerales totalmente compatibles con los refrigerantes HCFC (como el R-22), pero incompatibles con los refrigerantes HFC (como el R-134A). Su nivel higroscópico es aceptable, es decir no se vuelven húmedos muy rápidamente. Pueden mezclarse con otros aceites alquibencénicos siempre y cuando tengan la misma viscosidad, pero no son compatibles con aceites POE.

b) Lubricantes sintéticos tipo poliéster

Se trata de aceites sintéticos obtenidos a partir de la reacción entre un alcohol y un ácido dando como resultado agua y éter, que es el lubricante. Dentro de sus principales propiedades destacan que son compatibles con cualquier refrigerante, pero son altamente higroscópicos (el solo contacto con el aire

atmosférico aumenta sus niveles de humedad a valores por encima de los permitidos).

1.3.4. Problemas generados por el aceite en el sistema de refrigeración

Dentro de las características de los aceites lubricantes en los sistemas de refrigeración encontramos la miscibilidad de estos en el refrigerante, es decir que son capaces de mezclarse en pequeñas proporciones con el refrigerante. En tal sentido, es inevitable que el aceite circule por todos los componentes del sistema de refrigeración generando algunos problemas de funcionamiento principalmente en el evaporador.

Al disminuir la presión de aspiración, el retorno de aceite al compresor se dificulta y origina que el aceite se quede en el evaporador. Además, considerando que el evaporador es la parte más fría, la que tiene los tubos más largos y donde el aceite alcanza las menores velocidades dentro del sistema de refrigeración, el problema de acumulación de aceite se vuelve considerable (Yañez, 2018). Esta acumulación genera problemas tanto en el evaporador, en el compresor y en la válvula de expansión; tales como:

- Disminución del rendimiento del evaporador en hasta 20%, pues el aceite forma una capa en el evaporador actuando como aislante.
- Disminución del nivel de aceite en el cárter del compresor, lo que se ve reflejado en ruido y sobrecalentamiento durante la operación del compresor.
- Problemas en la válvula de expansión para controlar el sobrecalentamiento en el sistema.

1.4. Mezclas aceite – refrigerante

Durante la operación del sistema existen dos niveles de presión: la de evaporación y la de condensación ($P_{\text{evaporación}} < P_{\text{condensación}}$); la función del compresor es aumentar la presión del refrigerante desde el menor valor hacia el mayor. Sin embargo, cuando el sistema se encuentra apagado ya sea porque la temperatura de la cámara llegó al valor deseado o debido a temas de mantenimiento a los equipos, la presión tiende a estabilizarse en un valor intermedio ($P_{\text{evaporación}} < P_{\text{intermedia}} < P_{\text{condensación}}$) con lo cual en el cárter del

compresor existe un aumento de presión desde la de evaporación hasta la de estabilización ($P_{intermedia}$). Este aumento de presión genera que el refrigerante en la succión, que se encontraba como vapor saturado, empiece a cambiar de fase formando una mezcla líquida con el aceite que se encuentra en el cárter, este proceso es conocido en la bibliografía como “absorption” (Barbosa, 2007).

En el presente trabajo se utilizaron dos tipos de refrigerantes: R134a y R1234yf, mezclados con aceite POE ISO10.

1.4.1. Propiedades de mezclas aceite – refrigerante

La mezcla aceite – refrigerante tiene propiedades que deben ser determinadas para poder conocer sus características termodinámicas.

a) Grado de sobresaturación

Esta propiedad de la mezcla aceite – refrigerante relaciona la fracción másica de refrigerante presente en la mezcla con su solubilidad mediante la expresión mostrada en la ecuación 1.1 (Pinto, 2014):

$$\Delta x_R = x_R - \omega_R(P, T) \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

donde x_R es la fracción másica de refrigerante en la mezcla y ω_R es la solubilidad del refrigerante. Este último término representa la cantidad máxima de refrigerante que podría existir en la mezcla encontrándose esta en equilibrio termodinámico para las condiciones de presión y temperatura del sistema. Las ecuaciones 1.2 y 1.3 muestran las expresiones para determinar la fracción másica y la solubilidad del refrigerante, respectivamente.

$$x_R = \frac{m_{R,L}}{m_{R,L} + m_o} \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

$$\omega_R = \left(\frac{m_{R,L}}{m_{R,L} + m_o} \right)_{sat} \quad (\text{Ecuación 1.3})$$

donde $m_{R,L}$ y m_o son las masas, en kg, de refrigerante y aceite presentes en la mezcla, respectivamente. Una aproximación para la solubilidad del refrigerante

se realiza utilizando la Ley de Raoult, la cual trabaja en base molar y se muestra en la ecuación 1.4:

$$\tilde{\omega}_R = \frac{P}{P_{sat.R}(T)} \quad (\text{Ecuación 1.4})$$

Donde $\tilde{\omega}_R$ es la solubilidad del refrigerante utilizando fracciones molares, P es la presión de la mezcla, en kPa, y $P_{sat.R}$ es la presión de saturación del refrigerante a la temperatura de la mezcla, en kPa.

b) Densidad

La densidad es una propiedad que relaciona la cantidad de masa de una sustancia por unidad de volumen, siendo sus unidades kg/m^3 . Para el caso de la mezcla líquida aceite – refrigerante que se estudió, la densidad puede determinarse a partir de las fracciones másicas y de las densidades individuales del refrigerante y el aceite, utilizando la ecuación 1.5.

$$\rho_L(T) = \left(\frac{x_R}{\rho_R(T)} + \frac{1-x_R}{\rho_o(T)} \right)^{-1} \quad (\text{Ecuación 1.5})$$

donde x_R es la fracción másica de refrigerante, ρ_R y ρ_o son las densidades, en kg/m^3 , del refrigerante y del aceite a la temperatura de la mezcla, respectivamente. Para el caso del refrigerante la densidad se obtuvo directamente del software EES (*Engineering Equation Solver*); mientras que, para el aceite, la densidad se calculó utilizando la ecuación 1.6 obtenida del trabajo de Fortkamp en el año 2014.

$$\rho_o = -0.0071 * T^2 - 0.1715 * T + 960.39 \quad (\text{Ecuación 1.6})$$

donde T es la temperatura, en $^{\circ}\text{C}$, y ρ_o es la densidad aceite, en kg/m^3 .

c) Tensión superficial

Para obtener la tensión superficial de la mezcla se utilizó la expresión mostrada en la ecuación 1.7 recomendada por Pizarro – Recabarren en el 2014, siendo sus unidades N/m.

$$\sigma_L^{1/7} = \tilde{x}_o * \sigma_o^{1/7} + \tilde{x}_R * \sigma_R^{1/7} \quad (\text{Ecuación 1.7})$$

donde σ_o y σ_R son las tensiones superficiales, en N/m, del aceite y del refrigerante, respectivamente; mientras que \tilde{x}_o y \tilde{x}_R son las fracciones molares del aceite y refrigerante, respectivamente. Para el refrigerante la tensión superficial se obtuvo directamente en el programa EES, mientras que para el aceite se utilizó el valor de 0.03502 N/m, obtenido por Pizarro – Recabarren en el año 2014.

d) Viscosidad

Para obtener la viscosidad de la mezcla se utilizó la ecuación 1.8 que relaciona las viscosidades del aceite y del refrigerante para obtener la viscosidad de la mezcla de acuerdo con las fracciones molares de cada componente. Dicha expresión se obtuvo utilizando el método de Grunberg e Nissan que se encuentra descrito en el libro *“The properties of gases and liquids”* (Poling, 2007).

$$\ln(\mu_L) = \tilde{x}_o * \ln(\mu_o) + \tilde{x}_R * \ln(\mu_R) \quad (\text{Ecuación 1.8})$$

donde μ_o y μ_R son las viscosidades, en cP, del aceite y del refrigerante, respectivamente; mientras que \tilde{x}_o y \tilde{x}_R son las fracciones molares del aceite y refrigerante, respectivamente. Para obtener la viscosidad del aceite se utilizó la ecuación 1.9 obtenida del trabajo de Fortkamp del año 2014; mientras que la viscosidad del refrigerante se obtuvo del software EES considerando la temperatura de la mezcla.

$$\mu_o = 43.152 * e^{-0.035*T} \quad (\text{Ecuación 1.9})$$

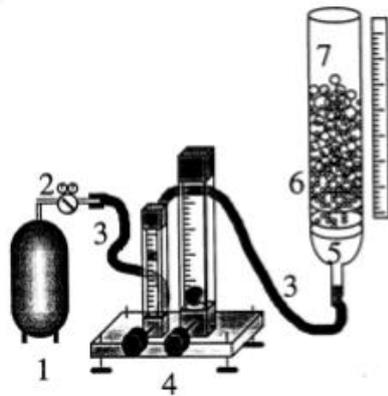
donde T es la temperatura en °C y μ_o es la viscosidad en centipoise.

1.5. Formación de espuma en mezclas aceite – refrigerante

Como se mencionó anteriormente, cuando el sistema de refrigeración se encuentra apagado el aceite y el refrigerante se mezclan en el cárter del compresor formando una solución líquida a una presión intermedia entre la de evaporación y la de condensación.

Cuando el compresor arranca nuevamente la presión en la succión disminuye bruscamente hasta el valor de la presión de evaporación. Esta caída de presión produce el cambio de fase del refrigerante de la mezcla líquida proceso conocido en la bibliografía como “desorption” (Barbosa, 2012). El mencionado proceso tiene como consecuencia el fenómeno de formación de espuma debido a la formación de burbujas de refrigerante producto de la nucleación que junto con el aceite líquido forman una capa de espuma, la cual tiene un tiempo de vida determinado que depende de la concentración de refrigerante, de la temperatura y de la caída de presión.

En la figura 1.2 se muestra el fenómeno de formación de espuma debido a una caída de presión brusca. Inicialmente el sistema se encuentra en equilibrio y en el contenedor cilíndrico sólo se encuentran en equilibrio las capas de mezcla líquida aceite – refrigerante (5) y la de refrigerante gaseoso (7). Luego, se produce una caída de presión repentina lo que origina que parte del refrigerante contenido en la mezcla líquida cambie de fase originando la formación de burbujas, las cuales en su superficie llevan adherida una fracción de la mezcla aceite - refrigerante originando la formación de una capa de espuma mostrada en la figura con el número (6), la cual alcanzará una altura máxima en un tiempo determinado para luego disminuir su valor hasta que la capa de espuma desaparece completamente.



N°	Elemento
1	Contenedor de refrigerante
2	Manómetro
3	Manguera
4	Medidor de flujo
5	Capa líquida
6	Capa de espuma
7	Capa de gas

Figura 1.2. Fenómeno de formación de espuma. (Yogi, 1998)

Esta espuma formada traerá problemas en el compresor, pues se podría producir la compresión del aceite que se encuentra en estado líquido presente en pequeñas proporciones en la capa de espuma; lo que traería como consecuencias sobrepresiones que en algunos casos pueden llegar a generar la falla del compresor.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES

En el presente capítulo se analizan los resultados experimentales del estudio realizado por Fortkamp (2014), a partir del cual se seleccionaron los datos con los que se compararán los resultados del modelo matemático propuesto.

Los refrigerantes estudiados por Fortkamp (2014) fueron el R134a y el R1234yf, mezclados con aceite POE ISO10. La mezcla de R134a/POE ISO10 es muy utilizada en la industria de refrigeración doméstica, mientras que la mezcla R1234yf/POE ISO10 es el reemplazante del R134a, especialmente en sistemas de acondicionamiento de aire en vehículos, debido a que reduce el impacto ambiental del sistema de refrigeración. El investigador trabajó a distintas concentraciones iniciales de refrigerante y distintas temperaturas, con la finalidad de estudiar la influencia de estas propiedades sobre el fenómeno de formación de espuma.

2.1. Análisis de resultados obtenidos

A continuación, se comentan algunos resultados obtenidos por Fortkamp (2014), en lo que respecta a la presión, altura de líquido y altura de espuma formada a lo largo del proceso estudiado.

2.1.1. Presión

Se realizó la medición de la presión, en kPa, durante el tiempo que duró el fenómeno de formación de espuma obteniéndose los resultados que se observan en las figuras 2.1 a 2.4, los cuales corresponden a 4 ensayos a diferentes condiciones de temperatura y concentración de refrigerante iniciales: 2 para la mezcla R134a/POE ISO10 y 2 para la mezcla R1234yf/POE ISO10.

En todos los ensayos, el cilindro se estabilizó a una presión inicial cuyo valor fue igual a una presión intermedia entre la presión de evaporación y la de condensación de un sistema de refrigeración típico. Al abrir la válvula que permitía la salida de refrigerante se inició al proceso de despresurización, el cual, como se puede observar en las figuras, se caracterizó por tener gradientes de

presión mayores durante los instantes iniciales, mientras que conforme el tiempo transcurría los gradientes disminuían hasta que la presión alcanzaba el equilibrio.

Las figuras 2.1 y 2.2 corresponden a ensayos con la mezcla R134a/POE ISO10 a distintos valores de temperatura y concentración de refrigerante iniciales. Como se puede observar en las figuras, la caída de presión varió de acuerdo a las condiciones de temperatura y concentración iniciales; notándose que para una temperatura y una concentración iniciales de 10.4 °C y 0.739, respectivamente, la caída de presión fue un poco más lenta en comparación con el caso de una temperatura y una concentración iniciales de 20.4 °C y 0.706, respectivamente. Es decir, para la mezcla R134a/POE ISO10, la temperatura inicial tiene una relación inversa con el tiempo en el que el sistema alcanza el equilibrio, para una menor temperatura el tiempo será mayor; lo contrario ocurre con la concentración inicial, pues a una mayor concentración inicial el tiempo de estabilización será mayor.

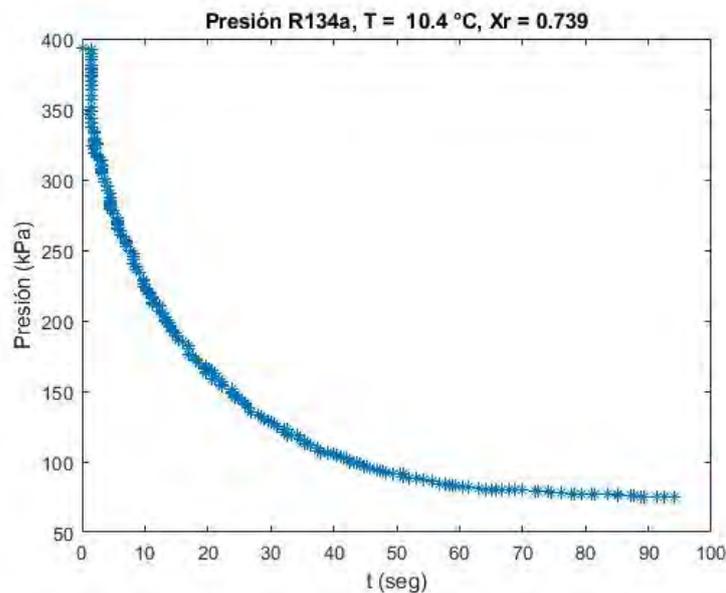


Figura 2.1. Presión vs tiempo para el ensayo 2. Adaptado de Fortkamp (2014).

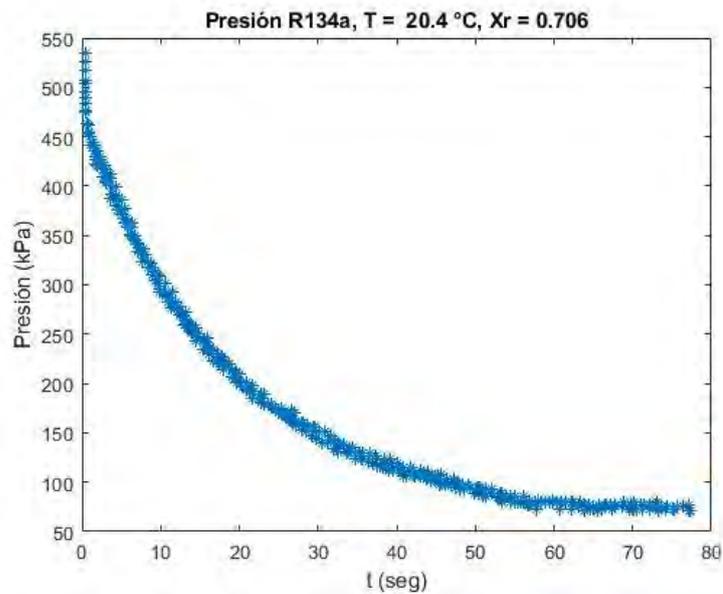


Figura 2.2. Presión vs tiempo para el ensayo 70. Adaptado de Fortkamp (2014).

Las figuras 2.3 y 2.4 corresponden a ensayos con la mezcla R1234yf/POE ISO10 a distintos valores de temperatura y concentración de refrigerante iniciales. Como se puede observar en las figuras, la caída de presión varió de acuerdo a las condiciones de temperatura y concentración iniciales; notándose que para una temperatura y una concentración iniciales de 19.4 °C y 0.458, respectivamente, la caída de presión fue más rápida en comparación con el caso de una temperatura y una concentración iniciales de 30.2 °C y 0.744, respectivamente. Es decir, para la mezcla R1234yf/POE ISO10, la temperatura inicial tiene una relación directa con el tiempo en el que el sistema alcanza el equilibrio, para una menor temperatura el tiempo será menor; lo mismo ocurre con la concentración inicial, pues a una menor concentración inicial el tiempo de estabilización será menor.

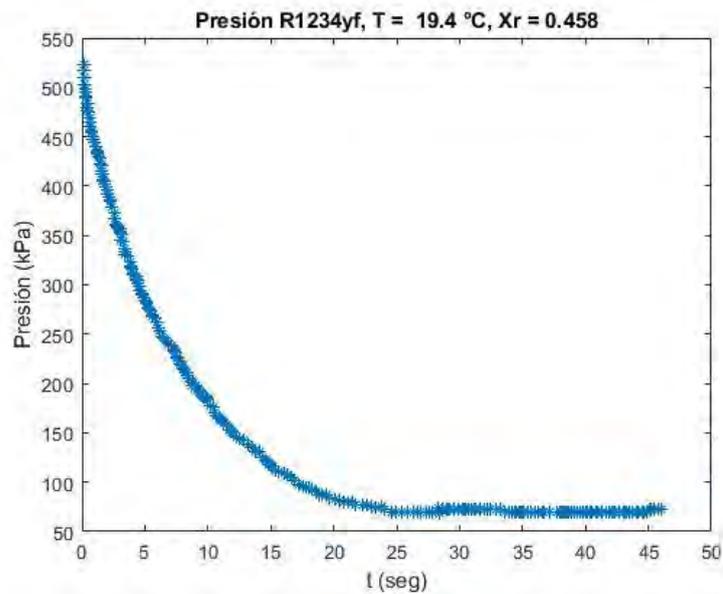


Figura 2.3. Presión vs tiempo para el ensayo 38. Adaptado de Fortkamp (2014).

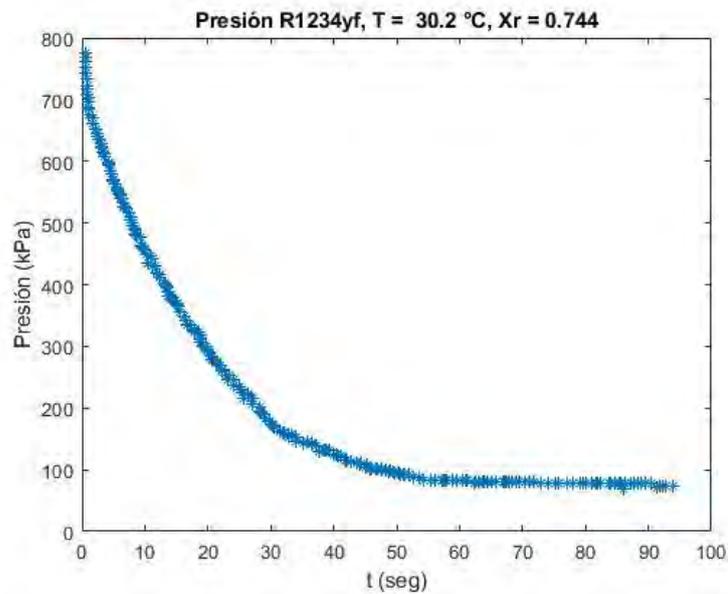


Figura 2.4. Presión vs tiempo para el ensayo 49. Adaptado de Fortkamp (2014).

2.1.2. Altura de espuma y líquido

Para realizar el estudio experimental de la formación de espuma en el proceso de despresurización de la mezcla, fue necesario registrar la altura de espuma, en cm, desde que empezó a formarse hasta que desapareció completamente.

De manera análoga, se registró la altura de líquido con la finalidad de verificar el desprendimiento de refrigerante de la mezcla líquido aceite – refrigerante.

Las figuras 2.5 y 2.6 muestran las gráficas obtenidas para la altura de espuma de las mezclas R134a/POE ISO10 y R1234yf/POE ISO10, respectivamente. Se puede observar que existieron cuatro etapas que se pudieron distinguir fácilmente: una etapa de crecimiento hasta un valor de altura máxima y tres tramos para la etapa de caída con pendientes distintas hasta que la espuma desapareció completamente.

En el caso de la mezcla R134a/POE ISO10, la primera etapa tuvo una duración de aproximadamente 10 segundos alcanzando una altura máxima de 6cm, mientras que en la etapa de caída se pueden distinguir tres tramos con duraciones de 30, 10 y 10 segundos, respectivamente. En el primer tramo de la etapa de caída se puede notar que la altura de espuma disminuyó de 6 a 3 cm, a una velocidad de 0.1 cm/s; en el segundo tramo, la altura de la espuma disminuyó de 3 a 1 cm, a una velocidad de 0.2 cm/s; finalmente, en el último tramo desapareció completamente a una velocidad de 0.1 cm/s.

Las etapas características del tiempo de vida útil de la altura de espuma tienen relación con la caída de presión producida. Inicialmente, se tiene un tramo donde la presión disminuye originando el inicio de la formación de espuma, este proceso de crecimiento tiene su fin cuando la variación en la presión no representa la energía necesaria para la nucleación de burbujas de refrigerante. Una vez se alcance el valor límite, la altura de espuma empieza a caer a una velocidad determinada durante el denominado tramo 1 de la etapa de caída que coincide con el tramo de 10 a 40 segundos de la figura 2.5. Durante el período de tiempo de 40 a 50 segundos se produce el tramo 2, en el cual la velocidad de caída de presión disminuye como se puede observar en la figura 2.5, lo cual coincide con una caída en la altura de espuma más acelerada. Finalmente, durante el período de tiempo de 50 a 60 segundos, la presión llega al equilibrio con lo cual la espuma desaparece, acelerando la velocidad de caída de la altura de espuma.

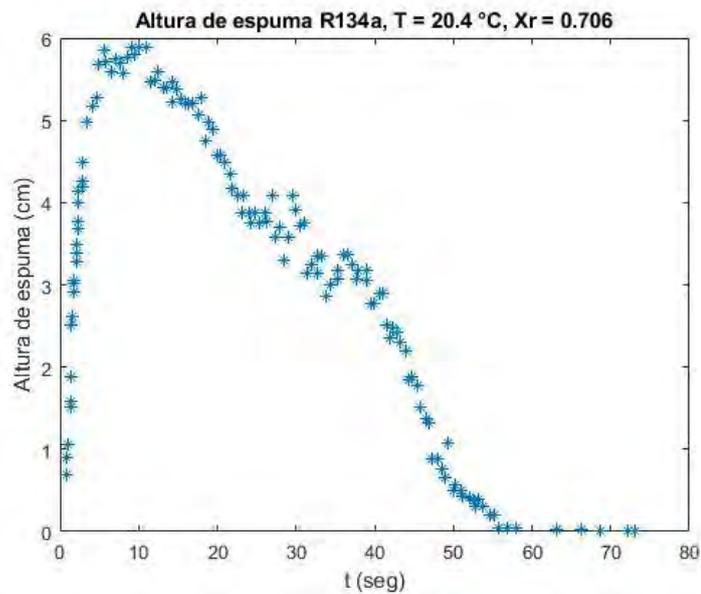


Figura 2.5. Altura de espuma vs tiempo para el ensayo 70. Adaptado de Fortkamp (2014).

En el caso de la mezcla R1234yf/POE ISO10, la primera etapa tuvo una duración de aproximadamente 10 segundos alcanzando una altura máxima de 7 cm, mientras que en la etapa de caída se pueden distinguir tres tramos con duraciones de 5 segundos cada uno. En el primer tramo de la etapa de caída se puede notar que la altura de espuma disminuyó de 7 a 2 cm, a una velocidad de 1 cm/s; en el segundo tramo, la altura de la espuma disminuyó de 2 a 1 cm, a una velocidad de 0.5 cm/s; finalmente, en el último tramo desapareció completamente a una velocidad de 0.5 cm/s.

Las etapas características del tiempo de vida útil de la altura de espuma tienen relación con la caída de presión producida. Inicialmente, se tiene un tramo donde la presión disminuye originando el inicio de la formación de espuma, este proceso de crecimiento tiene su fin cuando la variación en la presión no representa la energía necesaria para la nucleación de burbujas de refrigerante. Una vez se alcance el valor límite, la altura de espuma empieza a caer a una velocidad determinada durante el denominado tramo 1 de la etapa de caída que coincide con el tramo de 10 a 15 segundos de la figura 2.6. Durante el período de tiempo de 15 a 20 segundos se produce el tramo 2, en el cual la velocidad de caída de presión disminuye como se puede observar en la figura 2.5, lo cual coincide con una caída en la altura de espuma más acelerada. Finalmente,

durante el período de tiempo de 20 a 25 segundos, la presión llega al equilibrio con lo cual la espuma desaparece, acelerando la velocidad de caída de la altura de espuma.

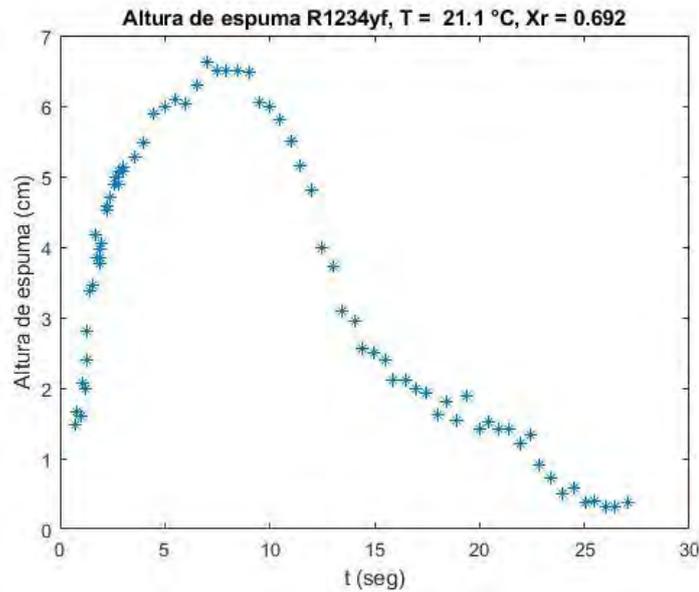


Figura 2.6. Altura de espuma vs líquido para el ensayo 57. Adaptado de Fortkamp (2014).

Realizando una comparación entre las dos mezclas estudiadas se puede notar que el tiempo de vida de la espuma formada durante la despresurización de la mezcla R1234yf/POE ISO10 fue menor que en el caso de la mezcla R134a/POE ISO10; mientras que la altura máxima de espuma se comportó de manera contraria.

Las figuras 2.7 y 2.8 muestran las gráficas obtenidas para la altura de líquido de las mezclas R134a/POE ISO10 y R1234yf/POE ISO10, respectivamente. Se puede observar que las gráficas tuvieron una pendiente negativa con un gradiente que disminuía conforme aumentaba el tiempo (llegándose a distinguir tres tramos); es decir, para tiempos pequeños (menores a 10 segundos) la disminución en la altura del líquido fue rápida y la velocidad de caída iba disminuyendo conforme aumentaba el tiempo.

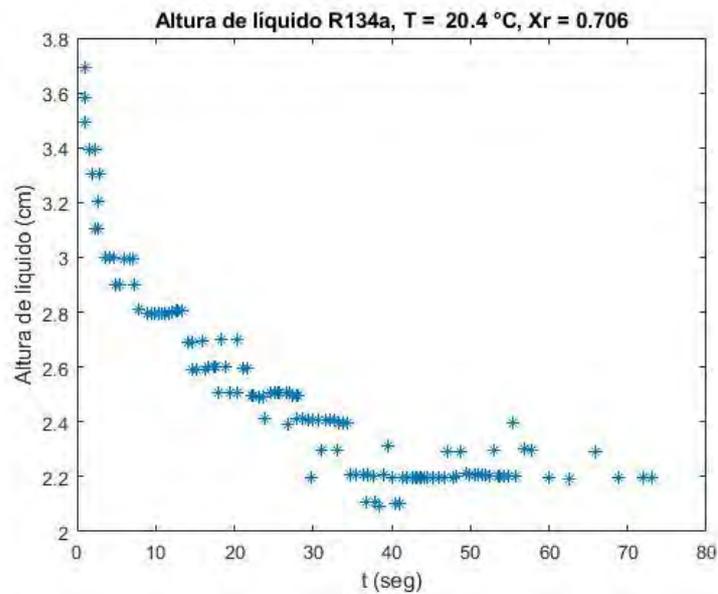


Figura 2.7. Altura de líquido vs tiempo para el ensayo 70. Adaptado de Fortkamp (2014).

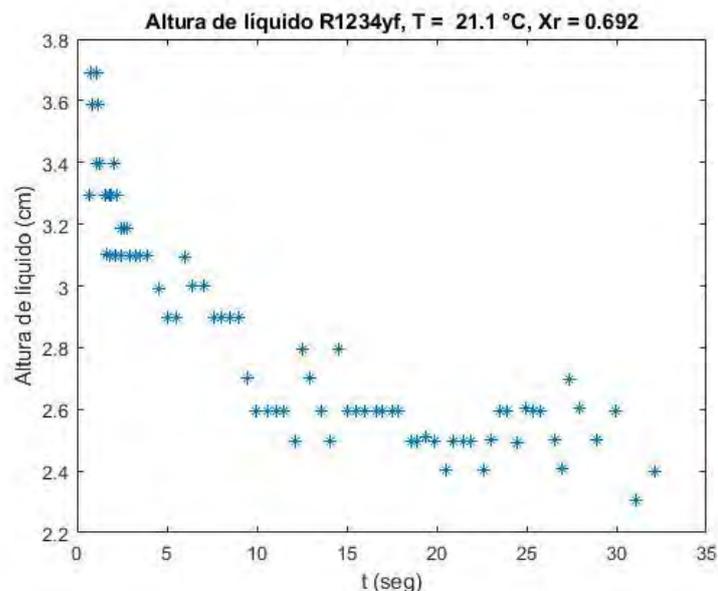


Figura 2.8. Altura de líquido vs tiempo para el ensayo 57. Adaptado de Fortkamp (2014).

La caída en la altura de líquido presente se debió al desprendimiento de refrigerante, el cual cambió de fase líquida a gaseosa y se separó de la mezcla refrigerante – aceite, proceso conocido como “desorption”, originado por la caída de presión a la que está sometida la mezcla. En el primer tramo de la caída de altura de la capa líquida, la tasa de desprendimiento aumentaba, la caída de altura en la capa líquida fue rápida, llegando a disminuir de 3.8 a 2.8 cm en un tiempo igual a 10 segundos, una velocidad igual a 0.1 cm/s, como se puede

observar en la figura 2.7. Cuando la tasa de desprendimiento alcanzó su valor máximo y empezó a disminuir, en la gráfica de la altura de líquido se pudo notar un segundo tramo con una velocidad de caída menor, llegando a caer de 2.8 a 2.2 cm en un intervalo de tiempo igual a 30 segundos, una velocidad igual a 0.02 cm/s. Finalmente, en el tercer tramo, cuando la tasa de desprendimiento disminuyó hasta cero, la altura de líquido llegó a su valor estacionario y el proceso terminó.

En el caso de la mezcla R134a/POE ISO10, la altura final de la capa líquida alcanzó un valor de 2.2 cm en un tiempo igual a 40 segundos como se muestra en la figura 2.7; mientras que para la mezcla R1234yf/POE ISO10, la altura final de la capa líquida alcanzó un valor de 2.5 cm en un tiempo igual a 20 segundos como se puede inferir de la figura 2.8. Se puede notar que para la primera mezcla se alcanzó una menor altura final en un mayor tiempo con una velocidad de 0.04 cm/s, mientras que para la segunda mezcla se alcanzó mayor altura final en un tiempo menor con una velocidad de 0.065 cm/s.

2.2. Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos de presión, y altura de espuma ante variaciones en las condiciones iniciales de temperatura y concentración de refrigerante.

a) Presión

El análisis de la presión se hizo para cada refrigerante manteniendo constante una de las condiciones iniciales del sistema (temperatura y concentración de refrigerante). Las figuras 2.9 a 2.12 muestran los resultados obtenidos manteniendo la temperatura constante; mientras que las figuras 2.13 a 2.15, los resultados obtenidos manteniendo la concentración de refrigerante constante.

Las figuras 2.9 y 2.10 corresponden a los resultados obtenidos para la mezcla R134a/POE ISO10 a temperaturas iniciales de 10 y 30 °C, respectivamente; mientras que las figuras 2.11 y 2.12 corresponden a la mezcla R1234yf/POE ISO10 a temperaturas iniciales de 20 y 25 °C, respectivamente. En cada una de las gráficas se muestran los resultados para dos valores iniciales de concentración de refrigerante en la mezcla líquida.

En la figura 2.9, se puede observar que, para la mezcla R134a/POE ISO10, cuando se aumenta concentración inicial de refrigerante, el tiempo en el que la presión alcanza el equilibrio es mayor pues para una concentración inicial de 0.86 el sistema se estabilizó en 200 segundos, mientras que para una concentración inicial de 0.77 el sistema se estabilizó en 120 segundos.

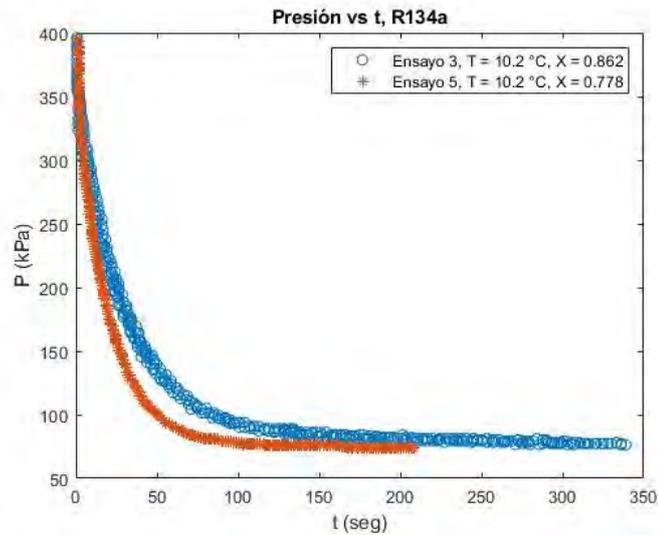


Figura 2.9. Curva de Presión vs t para la mezcla R134a/POE ISO10 a una temperatura constante igual a 10 °C. Adaptado de Fortkamp (2014).

En la figura 2.10, se puede observar lo explicado anteriormente con más facilidad pues la variación en el tiempo de estabilización es mayor al variar la concentración inicial de refrigerante entre dos valores distantes. Para una concentración inicial de 0.86 el sistema se estabilizó en 200 segundos, mientras que para una concentración inicial de 0.77 el sistema se estabilizó en 120 segundos. Con esto queda comprobado que, para la mezcla R134a/POE ISO10, el tiempo de estabilización de la presión varía de manera directa con la concentración inicial de refrigerante, a mayor concentración inicial mayor será el tiempo en el que la presión se estabilizará.

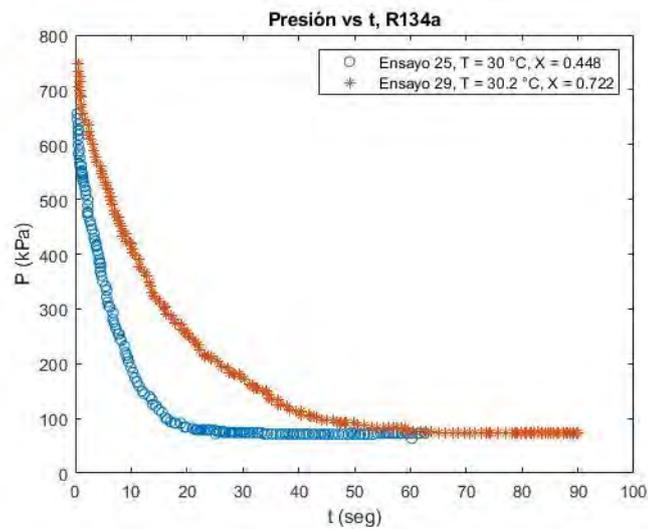


Figura 2.10. Curva de Presión vs t para la mezcla R134a/POE ISO10 a una temperatura constante igual a 30 °C. Adaptado de Fortkamp (2014).

En la figura 2.11, se puede observar que, para la mezcla R1234yf/POE ISO10, cuando se aumenta concentración inicial de refrigerante, el tiempo en el que la presión alcanza el equilibrio es mayor pues para una concentración inicial de 0.69 el sistema se estabilizó en 40 segundos, mientras que para una concentración inicial de 0.46 el sistema se estabilizó en 25 segundos.

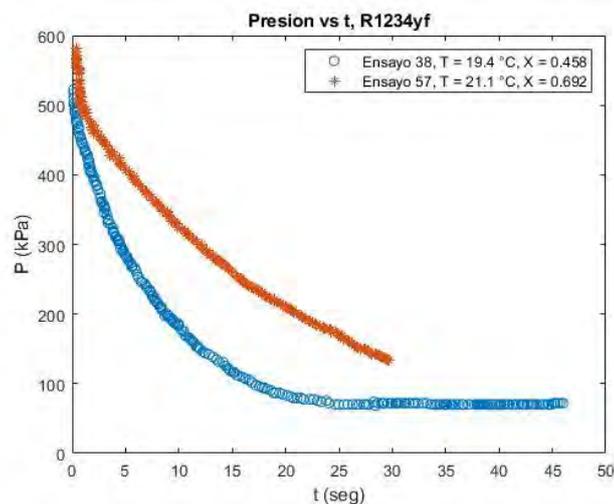


Figura 2.11. Curva de Presión vs t para la mezcla R1234yf/POE ISO10 a una temperatura constante igual a 20 °C. Adaptado de Fortkamp (2014).

En la figura 2.12, se puede observar lo explicado anteriormente con más facilidad pues la variación en el tiempo de estabilización es mayor al variar la

concentración inicial de refrigerante entre dos valores distantes. Para una concentración inicial de 0.79 el sistema se estabilizó en 100 segundos, mientras que para una concentración inicial de 0.22 el sistema se estabilizó en 20 segundos. Con esto queda comprobado que, para la mezcla R1234yf/POE ISO10, el tiempo de estabilización de la presión varía de manera directa con la concentración inicial de refrigerante, a mayor concentración inicial mayor será el tiempo en el que la presión se estabilizará.

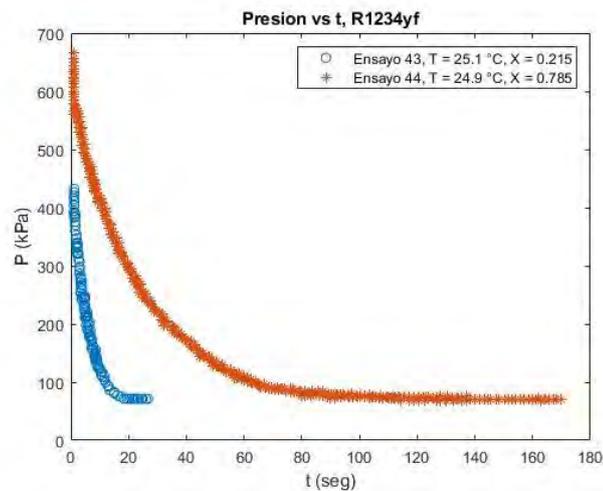


Figura 2.12. Curva de Presión vs t para la mezcla R1234yf/POE ISO10 a una temperatura constante igual a 25 °C. Adaptado de Fortkamp (2014).

Los resultados obtenidos para las dos mezclas utilizadas (R134a/POE ISO10 y R1234yf/POE ISO10) muestran que la velocidad de la caída de presión varió de manera directa con la concentración de refrigerante en la mezcla líquida, es decir que la despresurización fue más rápida cuando la concentración de refrigerante era mayor. Estos resultados fueron los esperados pues cuando existe más refrigerante en la mezcla líquida, una mayor cantidad de este se evapora teniendo como resultado que el flujo másico de refrigerante es mayor y por ende la caída de presión en la mezcla es más rápida. Cabe mencionar que, de los resultados obtenidos se puede inferir que la mezcla R1234yf/POE ISO10 llega al equilibrio más rápido que la mezcla R134a/POE ISO10

Las figuras 2.13 y 2.14 corresponden a los resultados obtenidos para la mezcla R134a/POE ISO10 a concentraciones iniciales de refrigerante iguales a 0.7 y 0.735, respectivamente; mientras que la figura 2.15 corresponde a la mezcla R1234yf/POE ISO10 a una concentración inicial de refrigerante igual a 0.75. En cada una de las gráficas se muestran los resultados para dos valores iniciales de temperatura de la mezcla líquida.

En la figura 2.13, se puede observar que, para la mezcla R134a/POE ISO10, cuando se aumenta la temperatura inicial de la mezcla, el tiempo en el que la presión alcanza el equilibrio es menor pues para una temperatura inicial de 25 °C el sistema se estabilizó en 50 segundos, mientras que para una temperatura inicial de 20 °C el sistema se estabilizó en 70 segundos.

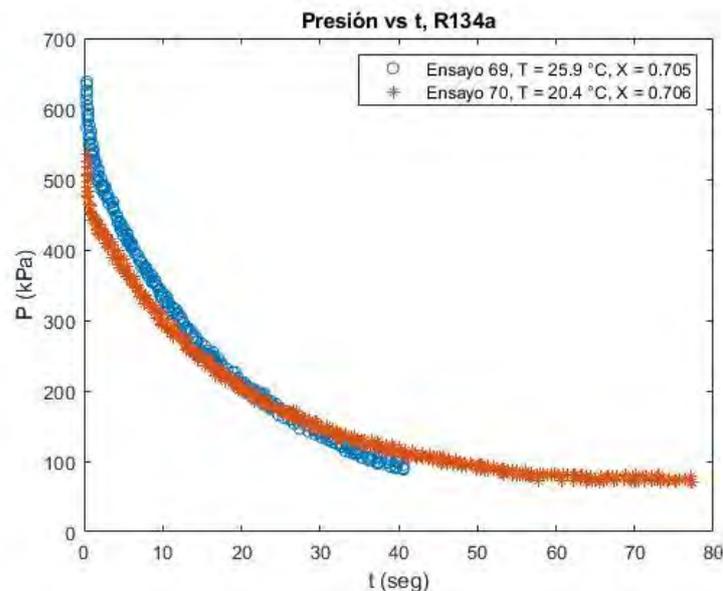


Figura 2.13. Curva de Presión vs t para la mezcla R134a/POE ISO10 a una concentración de refrigerante constante igual 0.7. Adaptado de Fortkamp (2014).

En la figura 2.14, se puede observar lo explicado anteriormente con más facilidad pues la variación en el tiempo de estabilización es mayor al variar la temperatura inicial de la mezcla entre dos valores distantes. Para una temperatura inicial de 30 °C el sistema se estabilizó en 60 segundos, mientras que para una temperatura inicial de 10 °C el sistema se estabilizó en 100 segundos. Con esto queda comprobado que, para la mezcla R134a/POE ISO10, el tiempo de estabilización de la presión varía de manera indirecta con la temperatura inicial

de la mezcla, a mayor temperatura inicial menor será el tiempo en el que la presión se estabilizará.

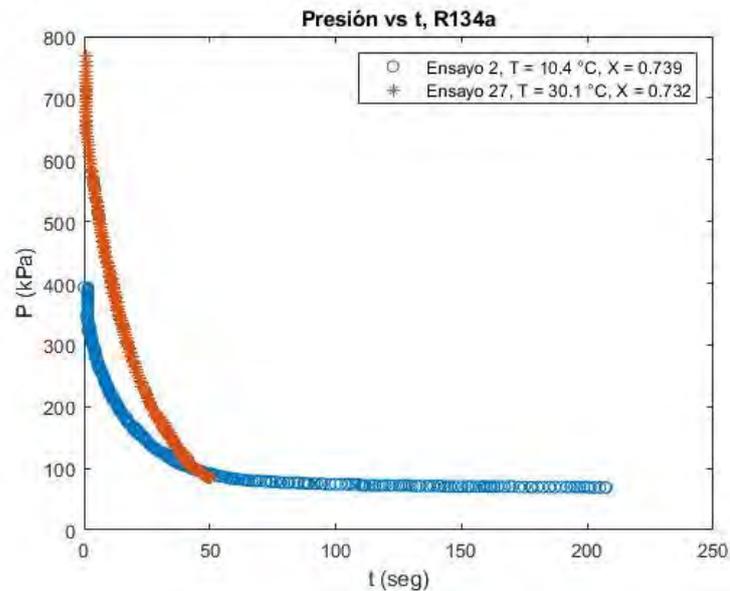


Figura 2.14. Curva de Presión vs t para la mezcla R134a/POE ISO10 a una concentración de refrigerante constante igual 0.735. Adaptado de Fortkamp (2014).

En la figura 2.15, se puede observar que, para la mezcla R1234yf/POE ISO10, cuando se aumenta la temperatura inicial de la mezcla, el tiempo en el que la presión alcanza el equilibrio es menor pues para una temperatura inicial de 25 °C el sistema se estabilizó en 100 segundos, mientras que para una temperatura inicial de 30 °C el sistema se estabilizó en 60 segundos.

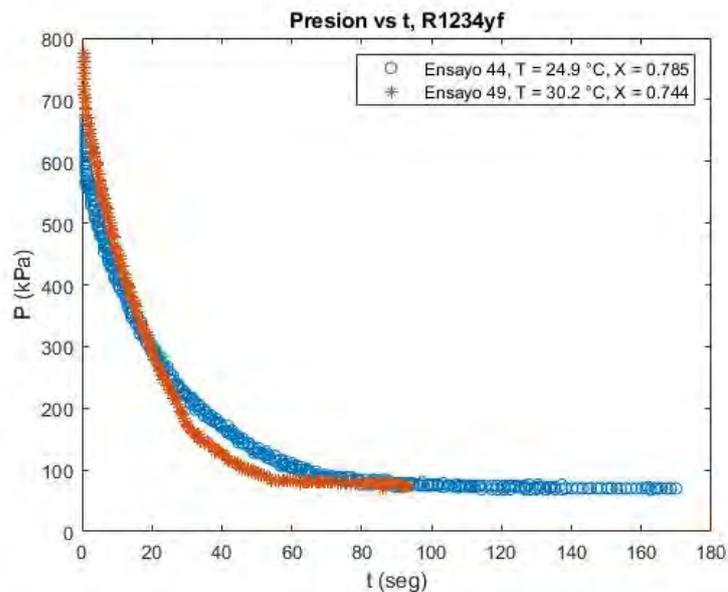


Figura 2.15. Curva de Presión vs t para la mezcla R1234yf/POE ISO10 a una concentración de refrigerante constante igual 0.75. Adaptado de Fortkamp (2014).

Los resultados obtenidos para las dos mezclas utilizadas (R134a/POE ISO10 y R1234yf/POE ISO10) muestran que la velocidad de la caída de presión varió de manera directa con la temperatura de la mezcla líquida, es decir que la despresurización fue más rápida cuando la temperatura era mayor. Estos resultados fueron los esperados pues una mayor temperatura de la mezcla líquida implica una mayor presión inicial de equilibrio. Al abrirse la válvula el refrigerante empieza a fluir fuera del sistema, que se encuentra a una mayor presión que el ambiente, con lo cual disminuye la presión; por ello si la presión inicial en el sistema es mayor, el flujo de refrigerante que sale también lo va a ser y por ende la caída de presión en la mezcla es más rápida.

b) Altura de espuma

El análisis de la altura de espuma formada se hizo para cada refrigerante manteniendo constante la concentración inicial de refrigerante mientras se varió la temperatura de la mezcla. Las figuras 2.16 y 2.17 muestran los resultados obtenidos para cada mezcla aceite – refrigerante utilizada. En los gráficos obtenidos se pueden observar las etapas descritas en el apartado 2.6.2, se identifican la etapa de crecimiento y los tres tramos de la etapa de caída de la altura de espuma.

La figura 2.16 corresponde a los resultados obtenidos para la mezcla R134a/POE ISO10 a una concentración de refrigerante igual a 0.705 y temperaturas iniciales de 20, 25 y 30 °C; mientras que las figura 2.17 corresponden a la mezcla R1234yf/POE ISO10 a una concentración inicial igual a 0.77 y a temperaturas iniciales de 25 y 30 °C.

En la figura 2.16, se puede observar que la altura máxima alcanzada por la espuma tiene valores de 6, 5 y 4.5 cm para temperaturas iniciales de 20, 25 y 30 °C, respectivamente. Analizando el tiempo de vida útil de la espuma, se puede observar que para los valores de temperatura inicial de 20, 25 y 30 °C, la espuma se encuentra presente durante 60, 40 y 35 segundos, respectivamente; pudiéndose identificar los tres tramos en la etapa de caída de la espuma los cuales son de 10 a 35, de 35 a 50 y de 50 a 60 segundos para una temperatura inicial de 20 °C; de 10 a 30, de 30 a 35 y de 35 a 40 segundos para una temperatura inicial de 25 °C; y de 15 a 25, 25 a 30 y 30 a 35 segundos para una temperatura inicial de 30 °C. Con esto queda comprobado que, para la mezcla R134a/POE ISO10, la altura máxima de la espuma formada y su tiempo de vida útil son inversamente proporcionales a la temperatura inicial de la mezcla líquida.

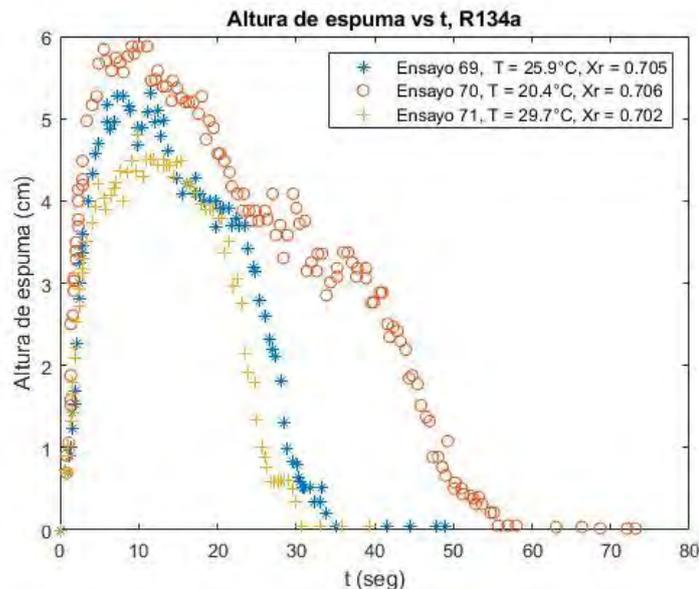


Figura 2.16. Curva de Altura de espuma vs t para la mezcla R134a/POE ISO10 a una concentración de refrigerante constante igual 0.7. Adaptado de Fortkamp (2014).

En la figura 2.17, se puede observar que la altura máxima alcanzada por la espuma tiene valores de 9 y 6.5 cm para temperaturas iniciales de 25 y 30 °C, respectivamente. Analizando el tiempo de vida útil de la espuma, se puede observar que para los valores de temperatura inicial de 25 y 30 °C, la espuma se encuentra presente durante 50 y 35 segundos, respectivamente; pudiéndose identificar los tres tramos en la etapa de caída de la espuma los cuales son de 10 a 30, de 30 a 40 y de 40 a 50 segundos para una temperatura inicial de 25 °C; y de 10 a 25, 25 a 30 y 30 a 35 segundos para una temperatura inicial de 30 °C. Con esto queda comprobado que, para la mezcla R134a/POE ISO10, la altura máxima de la espuma formada y su tiempo de vida útil son inversamente proporcionales a la temperatura inicial de la mezcla líquida.

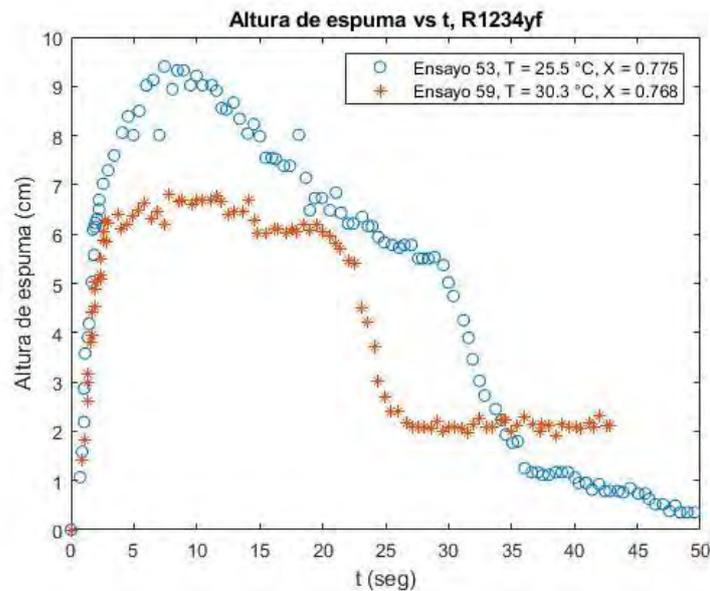


Figura 2.17. Curva de Altura de espuma vs t para la mezcla R1234yf/POE ISO10 a una concentración de refrigerante constante igual 0.77. Adaptado de Fortkamp (2014).

Los resultados obtenidos para las dos mezclas utilizadas (R134a/POE ISO10 y R1234yf/POE ISO10) mostraron que la altura máxima de la espuma formada y su tiempo de vida variaron de manera inversa con la temperatura, es decir que a mayor temperatura se formó una capa de espuma con menores altura máxima y tiempo de vida.

En la tabla 2.1 se muestran las relaciones obtenidas entre las condiciones de entrada: temperatura y concentración de refrigerante, y los parámetros del proceso: velocidad de despresurización, altura y duración de la espuma

Tabla 2.1. Tipo de relación entre los parámetros.

Condición inicial	Presión	Espuma	
	Velocidad despresurización	Altura máxima	Duración
Temperatura	Directa	Inversa	Inversa
Concentración	Directa		



CAPÍTULO 3

MODELO MATEMÁTICO

En este capítulo se presenta el modelo matemático utilizado para estudiar el comportamiento de la espuma formada en el proceso de despresurización de una mezcla líquida aceite – refrigerante que se encuentra en equilibrio. En primer lugar, se definieron las condiciones iniciales y las simplificaciones del modelo utilizado, luego se utilizaron las ecuaciones de conservación de masa y de difusión para formar un sistema de ecuaciones que permitió conocer la altura de la espuma formada a lo largo del tiempo que dura el proceso.

3.1. Condiciones generales del modelo

El modelo matemático buscó simular el comportamiento de la espuma formada en el proceso de despresurización de una mezcla líquida aceite – refrigerante mediante el planteamiento de un sistema de ecuaciones diferenciales cuya solución permitió obtener los valores de la altura de la capa de espuma formada durante el tiempo de duración del fenómeno.

Como se mencionó en el capítulo 1, el aceite en los compresores es necesario, principalmente, para la lubricación de los componentes, pero también puede llegar a generar problemas como la formación de espuma, estudiada en el presente trabajo. El aceite se encuentra en el cárter del compresor a la presión de evaporación del sistema de refrigeración (presión de entrada al compresor). Cuando el sistema se apaga y el compresor deja de funcionar, la presión en los componentes se estabiliza en un valor intermedio, el cual tiene un valor mayor que la presión de evaporación del sistema, pero menor que la de condensación; esto significa que el cárter del compresor presenta un aumento en la presión desde el valor de evaporación hasta el valor intermedio alcanzado en el equilibrio. Este aumento en la presión y la presencia de refrigerante en estado gaseoso originan un proceso conocido en la bibliografía como absorción (Barbosa, 2007), lo cual induce que el refrigerante se mezcle con el aceite contenido en el cárter formando una mezcla líquida caracterizada por la fracción másica de refrigerante (X_R) y una temperatura de la mezcla; de estas dos

variables depende el valor de la presión intermedia de equilibrio alcanzada. Cuando el sistema se vuelve a encender la presión en la entrada del compresor cae rápidamente hasta el valor de evaporación lo cual genera un proceso conocido en la bibliografía como desorción (Barbosa, 2012), el cual se caracteriza por la formación de espuma en la interface líquido – vapor del sistema. El mencionado fenómeno de formación de espuma es el que se estudió con ayuda del modelo matemático implementado, el cual tuvo ciertas condiciones iniciales y fue validado con los resultados experimentales mostrados en el capítulo 2.

3.1.1. Condiciones iniciales y simplificaciones del modelo

Como se puede observar en la figura 3.1, Las variables dinámicas del proceso a estudiar fueron las alturas de espuma, de líquido y de gas (H_E , H_L , H_V), la presión del sistema (P), y la concentración de refrigerante en la mezcla líquida (X_R). El valor inicial de la altura de líquido quedó definido de acuerdo con la cantidad de aceite y refrigerante añadida en la mezcla; la altura de espuma inicialmente tuvo un valor nulo pues el sistema partía del equilibrio y el valor de la altura de vapor dependió de la altura de líquido (pues la altura total del cilindro era constante); mientras el fenómeno ocurría la altura de espuma aumentó hasta alcanzar un valor máximo para luego disminuir hasta desaparecer nuevamente, la altura de líquido disminuyó desde su valor inicial hasta el valor final cuando alcanzaba el equilibrio, y la altura de vapor inicialmente disminuyó para finalmente alcanzar el equilibrio a un valor mayor que el inicial.

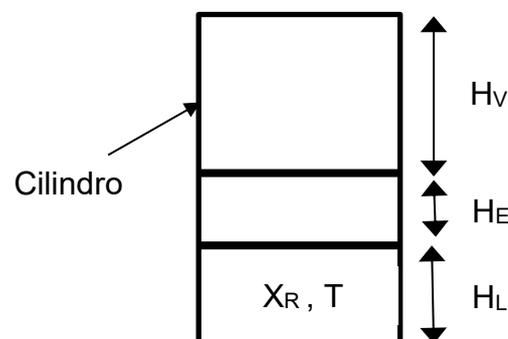


Figura 3.1. Esquema utilizado en el modelo matemático.

En el caso de la presión, el valor inicial quedó definido de acuerdo a la cantidad de refrigerante que ingresó al sistema antes de iniciar los ensayos y su valor fue registrado en el medidor de presión del ensayo experimental; durante la duración del fenómeno, la presión fue disminuyendo hasta llegar al equilibrio. Finalmente, en el caso de la concentración de refrigerante en la mezcla líquida, su valor inicial fue definido considerando que el sistema parte del equilibrio y este valor fue disminuyendo pues la cantidad final de refrigerante en la mezcla líquida era menor.

En el desarrollo del modelo se consideraron dos premisas con la finalidad de simplificar el análisis: la primera de ellas fue considerar que el proceso ocurría a temperatura constante, esto fue válido debido a que el tiempo de duración del fenómeno fue pequeño y no se generaron gradientes de temperatura significativos. La segunda consideración fue tener en cuenta que el aceite no cambió de fase durante el desarrollo del proceso, pues la presión de vapor del aceite era mucho menor que los valores de presión obtenidos en el desarrollo de los ensayos.

3.1.2. Procesos involucrados en el fenómeno

El ciclo de vida de la espuma a estudiar inició con la apertura de la válvula que restringía la salida de refrigerante del cilindro y, como consecuencia de ello, mantenía la presión del sistema en equilibrio. Una vez que inició la evacuación de refrigerante, la presión del sistema disminuyó con lo cual el valor de la solubilidad (ω) cayó con una tasa que fue directamente proporcional a la velocidad de despresurización.

Simultáneamente al proceso de despresurización, parte del refrigerante contenido en la mezcla líquida cambió de fase disminuyendo la concentración de refrigerante presente (X_R), a una velocidad que dependía de la tasa de cambio de fase del refrigerante. Comparando las velocidades con que disminuyen la solubilidad y la concentración de refrigerante, se concluyó que la solubilidad disminuía más rápido esto debido a que se requiere menos energía para que el refrigerante salga por la válvula en comparación con la energía necesaria para que ocurra el cambio de fase; en tal sentido, durante el fenómeno la mezcla

líquida presentaba un exceso de energía proveniente del grado de sobresaturación que se puede cuantificar con la ecuación 3.1.

$$\Delta X_R = X_R - \omega \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Este grado de sobresaturación representó la energía necesaria para llevar a cabo el proceso de cambio de fase, que en este caso se refleja por la formación de burbujas, las cuales llevan en su interior el refrigerante en estado gaseoso, mientras que su capa externa es de aceite. Es decir, la energía de sobresaturación se convirtió en la energía de activación necesaria para iniciar el proceso de cambio de fase, el cual representó el primer proceso en el fenómeno estudiado y originó un flujo másico que salía de la mezcla líquida presente.

Las burbujas formadas llevaron en su superficie una fracción de la mezcla líquida, lo cual originó un segundo flujo másico que salía de la mezcla líquida presente. Las burbujas formadas y el líquido llevado por ellas formaron la capa de espuma, cuya altura fue aumentando hasta un valor máximo para luego disminuir hasta desaparecer completamente.

La altura de espuma disminuyó debido al colapso de las burbujas que se encontraban en la parte superior de la capa formada, lo cual originó un flujo másico que retornaba a la capa líquida y el cual iba aumentando conforme aumentaba la altura de la espuma. El colapso ocurrió debido a que la presión externa disminuía hasta llegar al punto en que la presión interna de la burbuja fue lo suficientemente grande para hacer que reviente.

Los tres flujos másicos descritos visualizados en la figura 3.2 permitieron utilizar la ecuación de conservación de masa en la capa líquida y de espuma para obtener el sistema de ecuaciones diferenciales cuya solución permitió conocer la altura de espuma a lo largo del tiempo de duración del fenómeno estudiado.

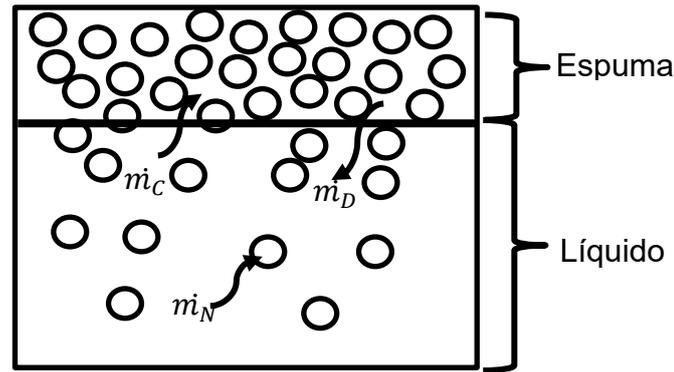


Figura 3.2. Flujos másicos generados en el proceso.

Cuando el sistema alcanzó el equilibrio, la concentración de refrigerante inicial disminuyó hasta el valor de la solubilidad a la presión ambiental con lo cual la altura de la capa líquida fue menor debido a que la cantidad de refrigerante presente disminuyó; mientras que la altura de la capa de vapor aumentó pues como se dijo anteriormente la altura del cilindro fue constante.

3.2. Modelo de procesos dinámicos

Como se mencionó anteriormente, se utilizó la ecuación de conservación de masa en la interfaz de las capas líquida y de espuma, junto con las leyes de difusión que permitieron obtener ecuaciones que relacionan los flujos másicos que se presentaron entre las capas y por consiguiente permitieron armar el sistema de ecuaciones del modelo matemático utilizado.

En la capa líquida se consideró que las propiedades fueron las de la mezcla líquida, a pesar que se inició la formación de burbujas, las cuales tuvieron un volumen muy pequeño en comparación con el volumen de líquido presente. Las propiedades de la mezcla líquida se definieron en el capítulo 1 del presente trabajo.

3.2.1. Ecuación de conservación de masa

La figura 3.2 muestra las capas de líquido y espuma, junto con los flujos másicos relacionados en el proceso.

Estableciendo los límites del volumen de control en la capa líquida se puede notar que existen tres flujos másicos, dos que salen y uno que ingresa, atravesando la frontera, siendo estos:

- a) m_N , es la tasa de formación de burbujas las cuales se originan a partir de la fase líquida que cambia de fase, en kg/s.
- b) m_C , es el flujo másico de la mezcla que sale de la capa líquida adherida a las paredes de las burbujas, en kg/s.
- c) m_D , es el flujo másico de retorno a la mezcla líquida cuando las burbujas colapsan, en kg/s.

Aplicando la ecuación de conservación de masa a la capa líquida se obtuvo la expresión mostrada en la ecuación 3.2.

$$\frac{dm_L}{dt} = m_D - (m_N + m_C) \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

La masa de líquido se relacionó con la densidad de la mezcla líquida, ρ_L , y con el volumen, V , mediante la siguiente expresión:

$$m_L = \rho_L * V \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

El volumen se calculó multiplicando el área del cilindro, A , con la altura de la capa líquida, H_L .

$$V = Area * H_L \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Reemplazando las ecuaciones 3.4 y 3.3 en la ecuación 3.2, se obtuvo la siguiente expresión:

$$\frac{d(\rho_L * Area * H_L)}{dt} = m_D - (m_N + m_C) \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

Utilizando la propiedad de la derivada de un producto para el primer término de la ecuación 3.5 y ordenando convenientemente, se obtuvo:

$$\frac{dH_L}{dt} = \frac{1}{\rho_L} * \left[\frac{m_D - (m_N + m_C)}{Area} - H_L * \frac{d\rho_L}{dt} \right] \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

La capa líquida estuvo formada por una mezcla de dos componentes: aceite y refrigerante, en una proporción que era definida por la concentración de refrigerante. En tal sentido, fue posible aplicar la ecuación de conservación de masa a cada componente de la mezcla. En el caso del aceite, como se dijo anteriormente no cambiaba de fase por lo cual se pudo afirmar que todo el aceite

que sale de la mezcla líquida durante la formación de espuma regresaría cuando las burbujas colapsaban y la espuma desaparecía; por lo tanto, aplicar la ecuación de conservación de masa en este componente no sería de mucha utilidad. En el caso del refrigerante, la masa de refrigerante presente en la mezcla dependía de la concentración de refrigerante, X_R , y de la masa de líquido total. Como parte de la simplificación en el análisis, se consideró que la mezcla líquida que se adhería a la superficie de las burbujas y que retornaba a la capa líquida tendrían la misma concentración, X_R ; mientras que las burbujas se formaban únicamente por refrigerante, es decir, el flujo másico debido a la nucleación fue refrigerante puro. En tal sentido la ecuación de conservación de masa utilizada para el refrigerante se muestra en la ecuación 3.7.

$$\frac{d(x_R m_L)}{dt} = x_R \dot{m}_D - (\dot{m}_N + x_R \dot{m}_C) \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

Usando la regla del producto para el primer término de la ecuación 3.7, se obtuvo:

$$x_R \frac{d(m_L)}{dt} + m_L \frac{d(x_R)}{dt} = x_R \dot{m}_D - (\dot{m}_N + x_R \dot{m}_C) \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

Finalmente, reemplazando la ecuación 3.2 en la ecuación 3.8 y considerando que la masa de líquido dependía de la densidad y del volumen, se obtuvo la ecuación diferencial para la concentración de refrigerante, X_R , mostrada en la ecuación 3.9.

$$\frac{dx_R}{dt} = - \frac{(1-x_R)\dot{m}_N}{\rho_L * Area * H_L} \quad (\text{Ecuación 3.9})$$

Para analizar la capa de espuma, en primer lugar, fue necesario conocer la fracción media de vapor que se definió como la relación entre el volumen de la fase gaseosa presente y el volumen total de la capa de espuma como se puede observar en la ecuación 3.10. Para efectos del presente modelo, se consideró que la fracción media de vapor tuvo un valor constante durante todo el proceso.

$$\varepsilon_V = \frac{V_{E,V}}{V_E} \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

Donde $V_{E.V}$ es el volumen de espuma que se encuentra en fase vapor y V_E es el volumen de espuma total, el cual se pudo determinar multiplicando el área del cilindro, Área , con la altura de espuma, H_E , como se muestra en la ecuación 3.11.

$$V_E = \text{Area} * H_E \quad (\text{Ecuación 3.11})$$

El volumen de espuma que se encontraba en fase líquida se obtuvo con la resta del volumen total y el volumen en fase vapor como se muestra la ecuación 3.12.

$$V_{E.L} = V_E - V_{E.V} \quad (\text{Ecuación 3.12})$$

Combinando las ecuaciones 3.10, 3.11 y 3.12 se obtuvo la ecuación 3.13 que relacionó el volumen de la espuma en fase líquida con tres parámetros del sistema: la altura de espuma, el área del cilindro y la fracción media de vapor.

$$V_{E.L} = (1 - \varepsilon_V) * \text{Area} * H_E \quad (\text{Ecuación 3.13})$$

En el caso de la capa de espuma se aplicó la ecuación de conservación de masa a la fase líquida, teniendo en cuenta que solo se consideró el flujo que entraba a la capa de espuma adherido a la superficie de las burbujas y el flujo de drenaje que retornaba a la mezcla líquida cuando las burbujas colapsaban. La ecuación 3.14 muestra la ecuación de conservación de masa aplicada a la fase líquida de la espuma.

$$\frac{dm_{E.L}}{dt} = \dot{m}_C - \dot{m}_D \quad (\text{Ecuación 3.14})$$

La masa de la fase líquida de la capa de espuma se expresó en función de la densidad del líquido, ρ_L , y del volumen de la fase líquida, obtenido en la ecuación 3.13, utilizando la expresión mostrada en la ecuación 3.15:

$$m_{E.L} = \rho_L * (1 - \varepsilon_V) * \text{Area} * H_E \quad (\text{Ecuación 3.15})$$

Reemplazando la ecuación 3.15 en la ecuación 3.14 se obtuvo la siguiente expresión:

$$\frac{d(\rho_L * (1 - \varepsilon_V) * \text{Area} * H_E)}{dt} = \dot{m}_C - \dot{m}_D \quad (\text{Ecuación 3.16})$$

Aplicando la propiedad de la derivada de un producto al primer término de la ecuación 3.16 y agrupando convenientemente se obtuvo la siguiente expresión:

$$\frac{dH_E}{dt} = \frac{1}{\rho_L} * \left[\frac{\dot{m}_C - \dot{m}_D}{Area * (1 - \varepsilon_V)} - H_E * \frac{d\rho_L}{dt} \right] \quad (\text{Ecuación 3.17})$$

Las ecuaciones 3.6, 3.9 y 3.17 formaron un sistema de ecuaciones diferenciales cuya solución permitía conocer la concentración de refrigerante y las alturas de líquido y espuma a lo largo del tiempo que duraba el proceso. En dicho sistema de ecuaciones faltaría conocer los flujos másicos involucrados para poder resolverlo utilizando las condiciones iniciales previamente definidas.

No fue necesario resolver una ecuación diferencial para conocer la altura de vapor en el cilindro, pues ésta se pudo calcular en todo instante de tiempo utilizando los valores de la altura del cilindro (valor constante), altura de líquido y altura de espuma mediante la ecuación 3.18.

$$H_V = H - H_E - H_L \quad (\text{Ecuación 3.18})$$

3.2.2. Variación de propiedades respecto al tiempo

Para obtener la variación de propiedades respecto al tiempo se utilizó el concepto de derivadas parciales. En general, cualquier propiedad de la mezcla líquida era función de la concentración de refrigerante, X_R , de la temperatura, T , y de la presión, P .

$$\phi_L = f(X_R, T, P) \quad (\text{Ecuación 3.19})$$

En el caso del presente trabajo, se supuso que la temperatura era constante. En tal sentido, las propiedades dependían únicamente de la concentración de refrigerante y la presión; y una variación de cualquier propiedad respecto del tiempo pudo obtenerse utilizando el concepto de derivadas parciales como se muestra en la ecuación 3.20.

$$\frac{d\phi_L}{dt} = \frac{d\phi_L}{dX_R} \frac{dX_R}{dt} + \frac{d\phi_L}{dP} \frac{dP}{dt} \quad (\text{Ecuación 3.20})$$

En las ecuaciones explicadas anteriormente apareció, en particular, la variación de la densidad de la mezcla líquida respecto del tiempo. En el caso de la

densidad, su valor dependía únicamente de la concentración de refrigerante y de la temperatura.

$$\rho_L = f(X_R, T) \quad (\text{Ecuación 3.21})$$

Como la temperatura se consideró constante, la derivada de la densidad respecto del tiempo se calculaba con la expresión mostrada en la ecuación 3.22.

$$\frac{d\rho_L}{dt} = \frac{d\rho_L}{dX_R} \frac{dX_R}{dt} \quad (\text{Ecuación 3.22})$$

Para el caso de la capa de vapor, a una temperatura constante las propiedades dependían únicamente de la presión (ecuación 3.23); y la variación de cualquier propiedad respecto del tiempo se obtendría, utilizando derivadas parciales, con la expresión mostrada en la ecuación 3.24.

$$\phi_V = f(P) \quad (\text{Ecuación 3.23})$$

$$\frac{d\phi_V}{dt} = \frac{d\phi_V}{dP} \frac{dP}{dt} \quad (\text{Ecuación 3.24})$$

3.2.3. Ecuación de la fracción media de vapor

En la sección 3.2.1, se introdujo el concepto de fracción media de vapor que relacionaba el volumen de la espuma en fase vapor con el volumen total de la capa de espuma; por ello fue necesario conocer su valor, el cual se consideró constante, para la solución de las ecuaciones del modelo. En esta sección se explica cómo se obtuvo el valor de la fracción media de vapor.

En la capa de espuma, la fracción de vapor no fue uniforme. Como se mencionó anteriormente, existió un flujo de drenaje de líquido originado a partir del colapso de las burbujas en la parte superior de la capa de espuma; esto hizo que en la base exista una mayor acumulación de líquido con lo cual la fracción de vapor disminuyó.

En la base, se consideró que las burbujas formaron una estructura tipo cúbica centrada en las caras como la mostrada en la figura 3.3, que garantizaba una mayor concentración de burbujas (Callister, 2016), para la alta cantidad de líquido presente. En tal sentido, la fracción de vapor en la base fue igual a la

fracción de volumen ocupado por las burbujas en un arreglo de ese tipo, cuyo valor es $\varepsilon_{V,B} = 0.74$.

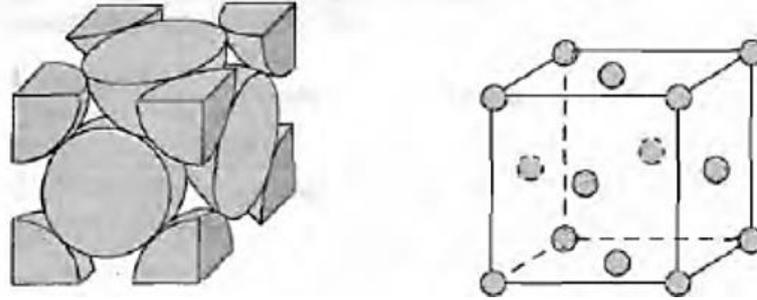


Figura 3.3. Estructura tipo cúbica centrada en las caras (Callister,2016).

En la parte superior de la capa de espuma, se asumió que no había líquido presente debido al constante drenaje y colapso de burbujas por lo cual se consideró que la fracción de vapor alcanzaba un valor igual a $\varepsilon_{V,T} = 0.99$.

Pilon (2002) estudió el perfil adoptado por la fracción de vapor a lo largo de la capa de espuma, obteniendo como resultado que se forma un perfil parabólico. Además, al considerar que la variación de fracción de vapor en el tope de la capa tiene un valor nulo (condición de derivada nula) fue posible obtener una relación entre el valor de la fracción media de vapor y las fracciones de vapor en la base y en el tope como se muestra en la ecuación 3.25.

$$\varepsilon_V = \frac{2\varepsilon_{V,T} + \varepsilon_{V,B}}{3} \quad (\text{Ecuación 3.25})$$

Reemplazando los valores de la fracción de vapor en el tope y en la base se obtuvo que la fracción media de vapor (ε_V) tuvo un valor igual a 0.91.

3.2.4. Flujo másico de formación de burbujas y adherido a la superficie de las burbujas

Al haber formado el sistema de ecuaciones diferenciales del modelo, hacía falta conocer los flujos másicos involucrados en las ecuaciones: tasa de formación de burbujas (\dot{m}_N), flujo másico adherido a la burbuja (\dot{m}_C) y flujo debido al drenaje originado por el colapso de las burbujas (\dot{m}_D). En esta sección se muestran las

ecuaciones utilizadas para modelar los flujos originados en el fenómeno de formación de burbujas y el adherido a la superficie exterior de las burbujas.

3.2.4.1. Tasa de formación de burbujas

El fenómeno de formación de burbujas se asemejó al proceso de nucleación, pues la cavitación, originada con la caída de presión rápida, fue el mecanismo principal de cambio de fase en el presente modelo.

En 1995, Segundo Brennen utilizó la expresión general de la relación entre el número de Gibbs, G_b , y la tasa de nucleación, J , definida como el número de eventos de nucleación en una unidad de volumen por unidad de tiempo, mostrada en la ecuación 3.26.

$$J = J_o * \exp(-G_b) \quad (\text{Ecuación 3.26})$$

donde J_o es un factor de proporcionalidad para cuya determinación se utilizó la expresión obtenida por Blander y Katz extraída de libro “Cavitation and Bubble Dynamics” escrito por Brennen (1995), que se muestra en la ecuación 3.27.

$$J_o = N * \sqrt{\left(\frac{2 * \sigma_L * N_A}{\pi * M}\right)} \quad (\text{Ecuación 3.27})$$

donde, σ_L es la tensión superficial de la mezcla líquida, en N/m, N_A es el número de Avogadro cuyo valor es igual a $6.022 \times 10^{20} \text{ kmol}^{-1}$, M es la masa molecular de la mezcla líquida, en kg/kmol, y N es la densidad de moléculas de líquido, en kmol/m³.

Ahora, se debió determinar una expresión para obtener el número de Gibbs. Para esto se recordó que la tensión superficial en líquidos es una manifestación macroscópica de las fuerzas entre moléculas que les permiten mantenerse unidas. En la formación de burbujas, la tensión superficial se relaciona con el radio de la burbuja, R , y las presiones interior y exterior de una burbuja, p_i y p_e , mediante la expresión mostrada en la ecuación 3.28.

$$p_i - p_e = \frac{2 * \sigma_L}{R} \quad (\text{Ecuación 3.28})$$

Cuando la temperatura es constante y la burbuja contiene únicamente vapor, la presión interior es igual a la presión de saturación a la temperatura de la burbuja. Si la presión exterior a la burbuja, presión del líquido, es menor que la de saturación, el radio de la burbuja empieza a aumentar hasta que la presión exterior alcanza el valor de la presión interior originando el colapso de la burbuja al haber alcanzado su radio crítico denominado R_c . La expresión para obtener la diferencia de presión crítica que originaba burbujas con un radio igual al crítico (R_c) se muestra en la ecuación 3.29.

$$\Delta p_C = \frac{2 * \sigma_L}{R_c} \quad (\text{Ecuación 3.29})$$

Ahora se determinó el incremento de energía, W_{BC} , necesario para iniciar la formación de una burbuja cuyo radio llegaba al valor crítico. Dicha energía se obtuvo de la diferencia entre la energía superficial, W_s , y el trabajo de cambio de volumen hecho por la burbuja, W_{CV} , mediante la expresión mostrada en la ecuación 3.30.

$$W_{BC} = W_s - W_{CV} \quad (\text{Ecuación 3.30})$$

El valor de la energía superficial se obtuvo multiplicando el área superficial de la burbuja por la tensión superficial del líquido, mientras que el trabajo de cambio de volumen, multiplicando el volumen de la burbuja por el cambio de presión crítica como se muestra en las ecuaciones 3.31 y 3.32, respectivamente.

$$W_s = 4 * \pi * R_c^2 * \sigma_L \quad (\text{Ecuación 3.31})$$

$$W_{CV} = \frac{4}{3} * \pi * R_c^3 * \Delta p_C \quad (\text{Ecuación 3.32})$$

Combinando las ecuaciones 3.29 a 3.32, se obtuvo la ecuación 3.33 utilizada para obtener el incremento de energía, W_{BC} .

$$W_{BC} = \frac{16 * \pi * \sigma_L^3}{3 * \Delta p_C^2} \quad (\text{Ecuación 3.33})$$

Finalmente, las teorías de nucleación relacionan el incremento de energía para iniciar la formación de burbujas con la energía cinética de las moléculas, $k_b * T$

(donde k_b es la constante de Boltzmann y T la temperatura), utilizando el número de Gibbs como se muestra en la ecuación 3.34.

$$Gb = \frac{W_{BC}}{k_b * T} \quad (\text{Ecuación 3.34})$$

Combinando las ecuaciones 3.33 y 3.34 se obtuvo la ecuación 3.35 que definió el número de Gibbs de la siguiente manera:

$$Gb = \frac{16 * \pi * \sigma_L^3}{3 * \Delta p_C^2 * k_b * T} \quad (\text{Ecuación 3.35})$$

La ecuación 3.35 fue obtenida por Brennen (1995) en su estudio sobre cavitación, en el cual la variación de presión crítica, Δp_C , representó la energía libre por unidad de volumen necesaria para que ocurra el fenómeno de cavitación y es igual a la diferencia entre la presión de saturación y la presión exterior. En el presente modelo, la energía libre por unidad de volumen se calculó como una función de la entalpía de vaporización del refrigerante, h_{lv} , y el grado de sobresaturación de la mezcla líquida, Δx_R , modificándose la expresión obtenida para el cálculo del número de Gibbs, la cual se muestra en la ecuación 3.36.

$$Gb' = \frac{\sigma_L^3}{(\Delta x_R * \rho_L * h_{lv})^2 * k_b * T} \quad (\text{Ecuación 3.36})$$

Con estos cambios la ecuación 3.26 para el cálculo de la tasa de nucleación por unidad de volumen fue modificada como se muestra en la ecuación 3.37.

$$J' = J_o' * \exp(-C_1 Gb') \quad (\text{Ecuación 3.37})$$

donde J_o' es el factor de proporcionalidad modificado debido a la naturaleza del proceso, el cual involucró una mezcla líquida aceite – refrigerante, y se obtenía con la ecuación 3.38; mientras que C_1 es una constante de ajuste originada debido a que el proceso de formación de espuma fue un proceso de nucleación heterogéneo y el estudio realizado por Brennen (1995) era para un proceso homogéneo.

$$J_o' = N' * \sqrt{\left(\frac{2 * \sigma_L * N_A}{\pi * M}\right)} \quad (\text{Ecuación 3.38})$$

La densidad de moléculas de líquido modificada, N' , se obtuvo como una función de la densidad del líquido, ρ_L , y el grado de sobresaturación de la mezcla líquida, Δx_R , como se muestra en la ecuación 3.39.

$$N' = C_2 * \rho_L * \Delta x_R \quad (\text{Ecuación 3.39})$$

donde C_2 es una segunda constante de ajuste.

Finalmente, para obtener el flujo másico debido al proceso de nucleación se multiplicó la tasa de nucleación por unidad de volumen, J' , por el volumen de la mezcla líquida, $A * H_L$, como se puede notar en la ecuación 3.40.

$$\dot{m}_N = J' * Area * H_L \quad (\text{Ecuación 3.40})$$

3.2.4.2. Flujo de líquido adherido a la superficie de las burbujas

Una vez obtenido el flujo másico debido al proceso de nucleación, fue posible determinar una expresión para obtener el flujo másico de líquido que salía de la mezcla adherido a las superficies de las burbujas formadas. Para esto se utilizó la definición de fracción volumétrica de vapor y de líquido en la base de la capa de espuma, $\varepsilon_{V,B}$ y $\varepsilon_{L,B}$, respectivamente.

$$\varepsilon_{V,B} = \frac{V_{E,V}}{V_E} \quad (\text{Ecuación 3.41})$$

$$\varepsilon_{L,B} = \frac{V_{E,L}}{V_E} \quad (\text{Ecuación 3.42})$$

$$\varepsilon_{V,B} + \varepsilon_{L,B} = 1 \quad (\text{Ecuación 3.43})$$

Combinando las ecuaciones 3.41, 3.42 y 3.43 se obtuvo una expresión que relacionaba los volúmenes de la espuma en fases líquida y gaseosa, mostrada en la ecuación 3.44.

$$V_{E,L} = \frac{1 - \varepsilon_{V,B}}{\varepsilon_{V,B}} * V_{E,V} \quad (\text{Ecuación 3.44})$$

Aplicando la derivada respecto al tiempo y considerando que la fracción volumétrica de vapor en la base de la capa de espuma era constante, se obtuvo

la siguiente expresión que relacionaba los flujos volumétricos de vapor y de líquido en la capa de espuma.

$$\dot{V}_{E,L} = \frac{1-\varepsilon_{V,B}}{\varepsilon_{V,B}} * \dot{V}_{E,V} \quad (\text{Ecuación 3.45})$$

Finalmente, utilizando las densidades de la mezcla líquida y del refrigerante gaseoso presentes en la capa de espuma se pudo obtener una expresión que relacionaba los flujos másicos debidos a la nucleación (formación de burbujas) y el flujo de líquido que se adhería a las superficies de las burbujas. La ecuación 3.46 muestra la relación entre los flujos másicos descritos.

$$\dot{m}_C = \frac{\rho_L}{\rho_V} * \frac{1-\varepsilon_{V,B}}{\varepsilon_{V,B}} * \dot{m}_N \quad (\text{Ecuación 3.46})$$

3.2.5. Flujo másico de drenaje

En esta parte se analiza el modelo para predecir el flujo de drenaje que salía de la capa de espuma y retornaba a la capa líquida. En tal sentido, hay que recordar las gráficas altura de espuma vs tiempo obtenidas en las figuras 2.38 y 2.39. Al inicio del proceso, la altura de espuma crecía de manera casi lineal, con una pendiente constante, debido a que el proceso de nucleación (formación de burbujas) se daba con mayor rapidez que el proceso de colapso y drenaje de las burbujas, es decir, que la rápida formación de burbujas impidió que el líquido sea drenado a la capa líquida. Conforme transcurría el tiempo, el sistema alcanzaba el equilibrio, con lo cual la velocidad de nucleación disminuía, mientras que el flujo de drenaje aumentaba originando una disminución en la altura de la capa de espuma.

El drenaje (retorno) de líquido se originó debido a la acción de la fuerza de gravedad y otros factores que no son constantes en el tiempo. Además, como se describió anteriormente, el flujo de drenaje fue mayor conforme transcurría el tiempo. En tal sentido, se utilizó el modelo para la tasa de drenaje extraído del trabajo de Fortkamp en el año 2014.

$$\dot{m}_D = C_3 * \dot{m}' * e^{C_4 * t / \tau} \quad (\text{Ecuación 3.47})$$

donde \dot{m}' es el flujo másico que se originó en la base de la capa de espuma debido al efecto de la gravedad, C_3 y C_4 son constantes empíricas, t es el tiempo y τ es una constante de tiempo característica del proceso.

Para obtener el flujo másico originado debido al efecto de la gravedad se debió calcular la velocidad en la base de la capa de espuma, la cual multiplicada por el área transversal del cilindro, $Area$, y la densidad media, $\bar{\rho}$, permitió obtener el parámetro buscado como se muestra en la ecuación 3.48.

$$\dot{m}' = \bar{\rho} * Area * \sqrt{2 * g * H_E} \quad (\text{Ecuación 3.48})$$

donde g es el valor de la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2) y H_E es la altura de espuma.

Para obtener el valor de la densidad media se utilizó la expresión mostrada en la ecuación 3.49 que relaciona las densidades de la fase líquida y de vapor presentes en la capa de espuma con sus respectivas fracciones medias volumétricas.

$$\bar{\rho} = (1 - \varepsilon_V) * \rho_L + \varepsilon_V * \rho_V \quad (\text{Ecuación 3.49})$$

La constante de tiempo característica del proceso, τ , se obtuvo relacionando la altura y velocidad características del proceso como se muestra en la ecuación 3.50.

$$\tau = \frac{H_c}{U_D} \quad (\text{Ecuación 3.50})$$

Como altura característica se debió utilizar la altura de la capa de espuma en cada instante de tiempo. Debido a que inicialmente la altura de la capa de espuma tuvo un valor nulo, el modelo presentó problemas para su solución numérica. Debido a esto, se utilizó la altura inicial de la capa líquida, $H_L(0)$, como altura característica, considerando que la magnitud de la altura de la capa líquida fue muy cercana al valor promedio de la altura de espuma durante todo el proceso.

Para el cálculo de la velocidad característica se utilizó la expresión obtenida a partir de la Ley de Darcy para el flujo a bajas velocidades en medios porosos, extraída del libro “Principles of Heat Transfer in Porous Media” (Kaviany, 1995)

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{\mu_L}{K} * U_D \quad (\text{Ecuación 3.51})$$

donde μ_L es la viscosidad del líquido y K es la permeabilidad del medio poroso que se obtuvo con el modelo de Carman-Kozeny (Kaviany, 1995), como se muestra en la ecuación 3.52.

$$K = \frac{(1-\varepsilon_V)^3 * (d_B)^2}{180 * \varepsilon_V^2} \quad (\text{Ecuación 3.52})$$

donde d_B es el diámetro de la burbuja, el cual se obtuvo por análisis visual durante la etapa experimental y se consideró un valor igual a 2 mm, dato extraído del trabajo de Fortkamp en el año 2014.

Para obtener el gradiente de presión se consideró que su valor fue igual al gradiente de presión hidrostático pues el sistema se encontraba en equilibrio mecánico.

$$\frac{dP}{dz} = -\bar{\rho} * g \quad (\text{Ecuación 3.53})$$

Combinando las ecuaciones 3.51, 3.52 y 3.53 se obtuvo la expresión para calcular la velocidad característica en función de los parámetros del modelo como se muestra en la ecuación 3.54.

$$U_D = \frac{\bar{\rho} * g}{\mu_L} * \frac{(1-\varepsilon_V)^3 * (d_B)^2}{180 * \varepsilon_V^2} \quad (\text{Ecuación 3.54})$$

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del modelo matemático implementado para seis condiciones iniciales diferentes de la mezcla aceite – refrigerante, tres para cada mezcla aceite - refrigerante estudiada: R134a/POE ISO10 y R1234yf/POE ISO10; el reducido número de pruebas del modelo matemático propuesto se justifica por el limitado acceso que se tuvo a los datos experimentales utilizados. Además, se calcula el error del modelo matemático a partir de la comparación de los resultados obtenidos con los resultados experimentales tomados de la bibliografía. Finalmente, se realiza un análisis de sensibilidad de la formación de espuma ante diferentes condiciones iniciales de la mezcla aceite – refrigerante.

4.1. Resultados obtenidos del modelo matemático

A partir de la solución del sistema de ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento de la formación de espuma en mezclas aceite – refrigerante, se obtiene como resultado la altura de la espuma formada a lo largo del tiempo.

Las figuras 4.1, 4.3, 4.5, 4.7, 4.9 y 4.11 muestran los resultados obtenidos para las dos mezclas aceite – refrigerante estudiadas. En cada gráfico, se pueden observar los resultados obtenidos en los modelos matemático y experimental, con lo cual se puede inferir el grado de precisión del modelo matemático implementado. Por otro lado, las figuras 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10 y 4.12 muestran la evolución del error a lo largo del tiempo de duración del fenómeno estudiado; cabe mencionar que, no se pudo obtener el error de manera continua a lo largo del tiempo debido a los limitados datos experimentales que se tuvieron como referencia.

Para la mezcla R134a/POE ISO10, el modelo matemático utilizó como condiciones iniciales una concentración de refrigerante (X_r) igual a 0.7, y temperaturas iguales a 20, 25 y 30 °C; los resultados obtenidos se muestran en las figuras 4.1, 4.3 y 4.5, respectivamente. En la primera gráfica correspondiente

a una temperatura de 20 °C, el modelo matemático muestra una buena precisión durante la etapa de crecimiento de la capa de espuma, pero conforme transcurre el tiempo el error aumenta originando que, en la etapa de caída de la capa de espuma, la precisión disminuya.

En las figuras 4.3 y 4.5 se puede notar que el modelo matemático tiene una muy buena precisión durante la etapa de crecimiento de la capa de espuma, mientras que conforme transcurre el tiempo, la precisión disminuye ligeramente, sin llegar a tener errores tan grandes, en la etapa de caída de la capa de espuma, como en el caso de la figura 4.1.

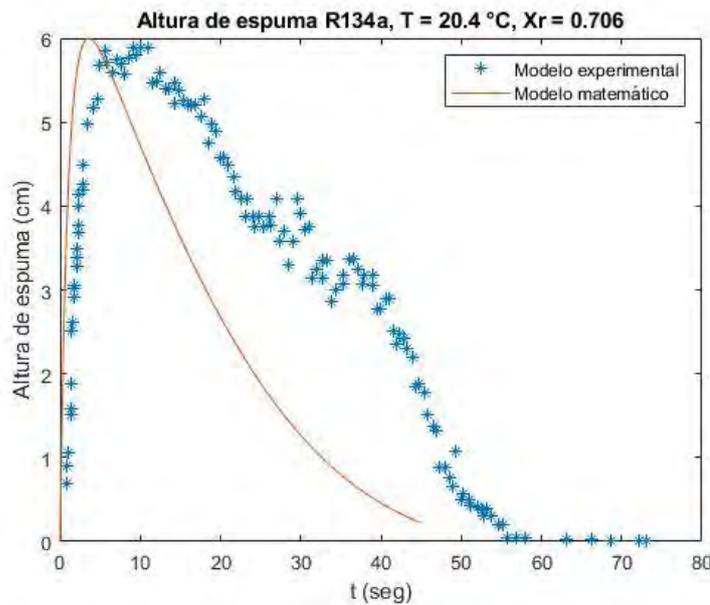


Figura 4.1. Resultado del modelo matemático para el ensayo 70.

La figura 4.1. muestra una comparación de los resultados obtenidos experimentalmente y matemáticamente para la mezcla R134a/POE ISO10 a una temperatura y concentración de refrigerante iniciales de 20.4 °C y 0.706, respectivamente. Se puede identificar la etapa de crecimiento de la altura de espuma, en la cual el modelo matemático se aproxima al experimental; lo contrario ocurre en la etapa de caída de la altura de espuma donde se puede observar que el modelo matemático se aleja de lo esperado en base a los resultados experimentales.

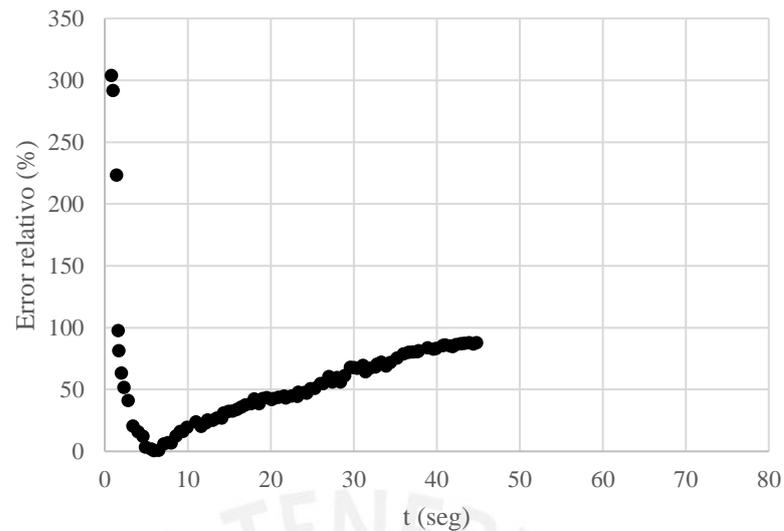


Figura 4.2. Evolución del error relativo del modelo matemático para el ensayo 70.

En la figura 4.2, se muestra la evolución del error relativo a lo largo de la duración del proceso de formación de espuma estudiado. Durante los primeros segundos, se puede observar que existe un error relativo máximo el cual llega a tener un valor de casi 300%, dicho tramo coincide con la etapa donde la velocidad de crecimiento de la capa de espuma fue máxima (llegando a subir de 0 a 5 cm en un tiempo menor a 2 segundos). Durante el tramo de 5 a 10 segundos, que también corresponde a la etapa de crecimiento de la altura de espuma, se observa que el error relativo disminuyó oscilando entre 0% y 20%. En general, en la etapa de crecimiento de la altura de espuma se puede notar que, al inicio, el error relativo es alto debido a que la velocidad de crecimiento de la espuma es alta y esto tiene como consecuencia que se pierda precisión en el modelo matemático, sin embargo, el error disminuye cuando el proceso de crecimiento de la altura se hace más lento, llegando a valores menores al 20%. En el caso de la etapa de caída de la altura de espuma, se puede observar que el modelo matemático tiene una precisión muy baja, pues el error relativo aumenta de 20% a 100% en el tramo de 10 a 45 segundos, por lo cual el modelo matemático no simula el comportamiento de la caída de espuma para el ensayo estudiado a condiciones de 20°C de temperatura y 0.706 de concentración de refrigerante.

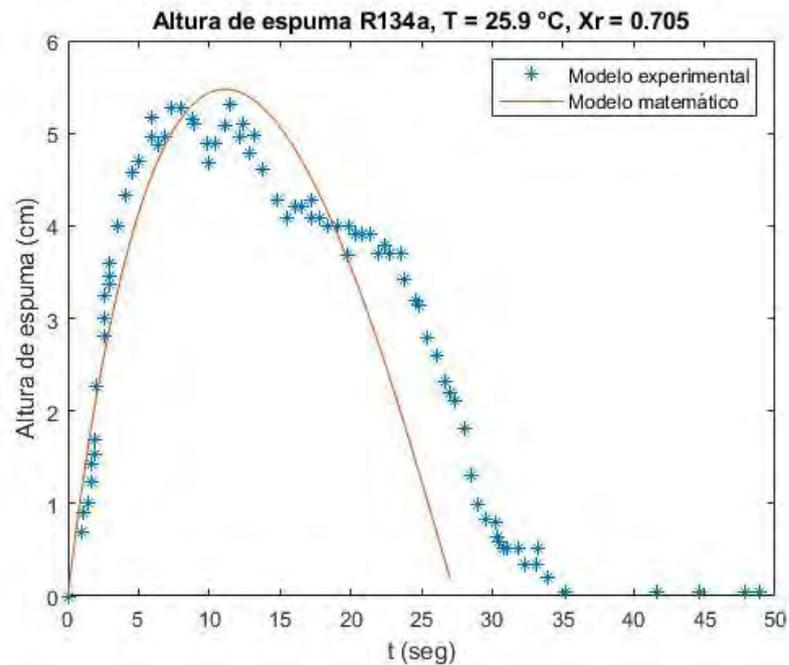


Figura 4.3. Resultado del modelo matemático para el ensayo 69.

La figura 4.3. muestra una comparación de los resultados obtenidos experimentalmente y matemáticamente para la mezcla R134a/POE ISO10 a una temperatura y concentración de refrigerante iniciales de 25.9 °C y 0.705, respectivamente. Se puede identificar la etapa de crecimiento de la altura de espuma, en la cual el modelo matemático se aproxima al experimental; lo contrario ocurre en la etapa de caída de la altura de espuma donde se puede observar que el modelo matemático se aleja ligeramente de lo esperado en base a los resultados experimentales.

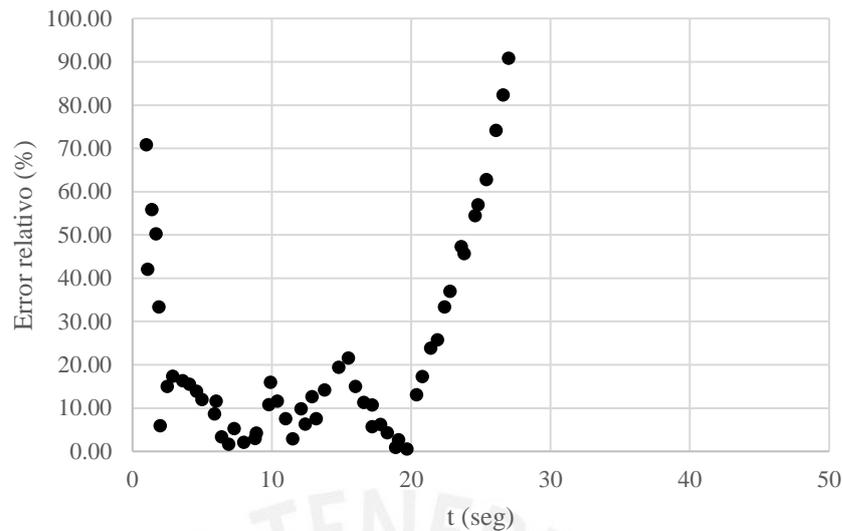


Figura 4.4. Evolución del error relativo del modelo matemático para el ensayo 69.

En la figura 4.4, se muestra la evolución del error relativo a lo largo de la duración del proceso de formación de espuma estudiado. Durante los primeros segundos, se puede observar que existe un error relativo máximo el cual llega a tener un valor de 70%, dicho tramo coincide con la etapa donde la velocidad de crecimiento de la capa de espuma fue máxima (llegando a subir de 0 a 5 cm en un tiempo de casi 5 segundos). Durante el tramo de 5 a 12 segundos, que corresponde a la etapa de crecimiento de la altura de espuma a una velocidad menor, se observa que el error relativo disminuyó oscilando entre 0% y 20%. En general, en la etapa de crecimiento de la altura de espuma se puede notar que, al inicio, el error relativo es alto debido a que la velocidad de crecimiento de la espuma es alta y esto tiene como consecuencia que se pierda precisión en el modelo matemático, sin embargo, el error disminuye cuando el proceso de crecimiento de la altura se hace más lento, llegando a valores menores al 20%. En el caso de la etapa de caída de la altura de espuma, se puede observar que el modelo tiene un error relativo menor al 20% en el tramo de 10 a 20 segundos cuando la velocidad de caída de la altura de espuma es baja, mientras que luego de los 20 segundos el error aumenta de manera constante hasta llegar al 100% lo cual coincide con un aumento en la velocidad de caída de la altura de espuma. En este ensayo, el modelo matemático tiene errores menores que en el caso del ensayo 70 y se puede notar que existe una tendencia que cuando la velocidad,

ya sea de crecimiento o caída de la capa de espuma, es mayor, el modelo matemático pierde precisión.

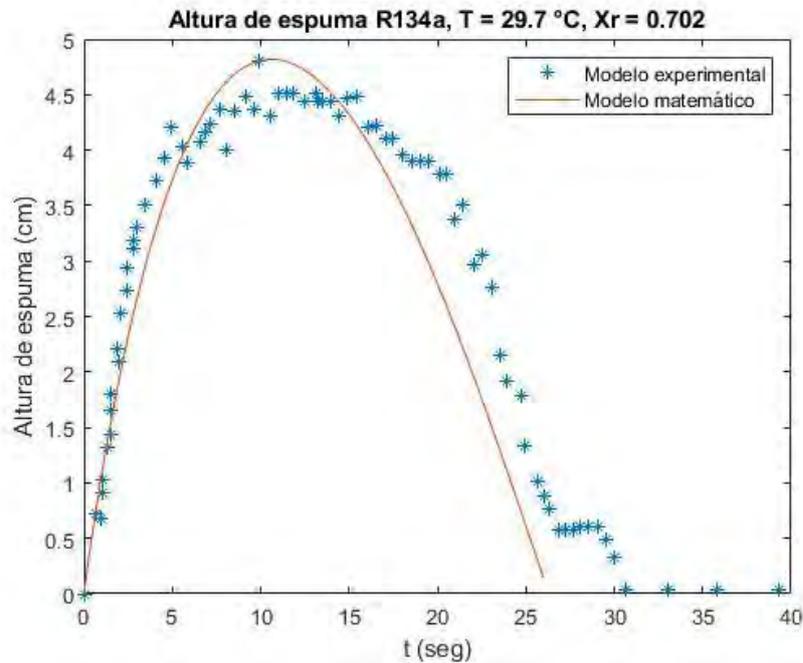


Figura 4.5. Resultado del modelo matemático para el ensayo 71.

La figura 4.5. muestra una comparación de los resultados obtenidos experimentalmente y matemáticamente para la mezcla R134a/POE ISO10 a una temperatura y concentración de refrigerante iniciales de 29.7 °C y 0.702, respectivamente. Se puede identificar la etapa de crecimiento de la altura de espuma, en la cual el modelo matemático se aproxima al experimental; lo contrario ocurre en la etapa de caída de la altura de espuma donde se puede observar que el modelo matemático se aleja ligeramente de lo esperado en base a los resultados experimentales.

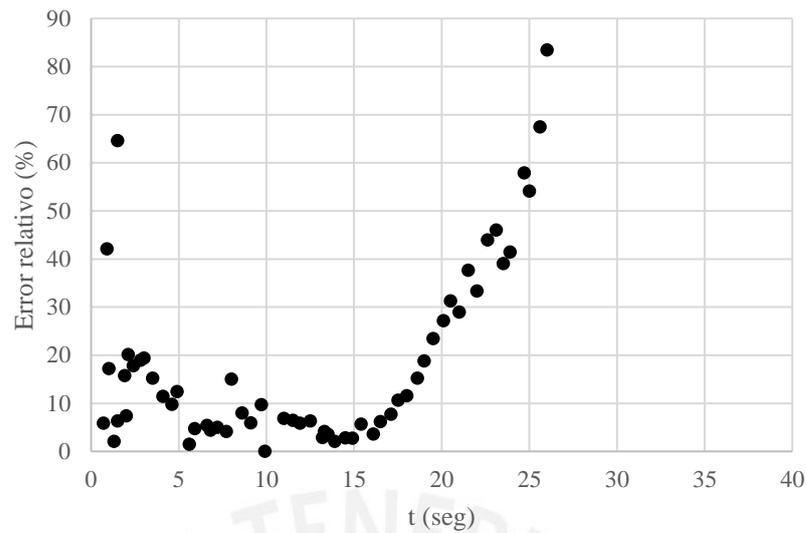


Figura 4.6. Evolución del error relativo del modelo matemático para el ensayo 69.

En la figura 4.6, se muestra la evolución del error relativo a lo largo de la duración del proceso de formación de espuma estudiado. Durante los primeros segundos, se puede observar que existe un error relativo máximo el cual llega a tener un valor de 40%, dicho tramo coincide con la etapa donde la velocidad de crecimiento de la capa de espuma fue máxima (llegando a subir de 0 a 3 cm en un tiempo de casi 2 segundos). Durante el tramo de 2 a 10 segundos, que corresponde a la etapa de crecimiento de la altura de espuma a una velocidad menor, se observa que el error relativo disminuyó oscilando entre 0% y 15%. En general, en la etapa de crecimiento de la altura de espuma se puede notar que, al inicio, el error relativo es alto debido a que la velocidad de crecimiento de la espuma es alta y esto tiene como consecuencia que se pierda precisión en el modelo matemático, sin embargo, el error disminuye cuando el proceso de crecimiento de la altura se hace más lento, llegando a valores menores al 15%. En el caso de la etapa de caída de la altura de espuma, se puede observar que el modelo tiene un error relativo menor al 20% en el tramo de 10 a 15 segundos cuando la velocidad de caída de la altura de espuma es baja, mientras que luego de los 15 segundos el error aumenta de manera constante hasta llegar al 100% lo cual coincide con un aumento en la velocidad de caída de la altura de espuma. De los 3 ensayos con los que se evaluó la precisión del modelo matemático podemos inferir que, para la mezcla R134a/POE ISO10, el modelo matemático

tiene buena precisión en los tramos de tiempo cuya velocidad, ya sea de crecimiento o caída de la capa de espuma, es menor, mientras que conforme aumenta la velocidad el modelo matemático pierde precisión.

Para la mezcla R1234yf/POE ISO10, el modelo matemático utilizó como condiciones iniciales concentraciones de refrigerante (X_r) iguales a 0.775, 0.692 y 0.768, y temperaturas iguales a 25, 20 y 30 °C, respectivamente; los resultados obtenidos se muestran en las figuras 4.7, 4.9 y 4.11. En la primera gráfica correspondiente a una temperatura de 25 °C y una concentración de refrigerante igual a 775, el modelo matemático muestra una muy buena precisión durante la etapa de crecimiento de la capa de espuma, pero conforme transcurre el tiempo el error aumenta originando que, en la etapa de caída de la altura de espuma, la precisión disminuya ligeramente.

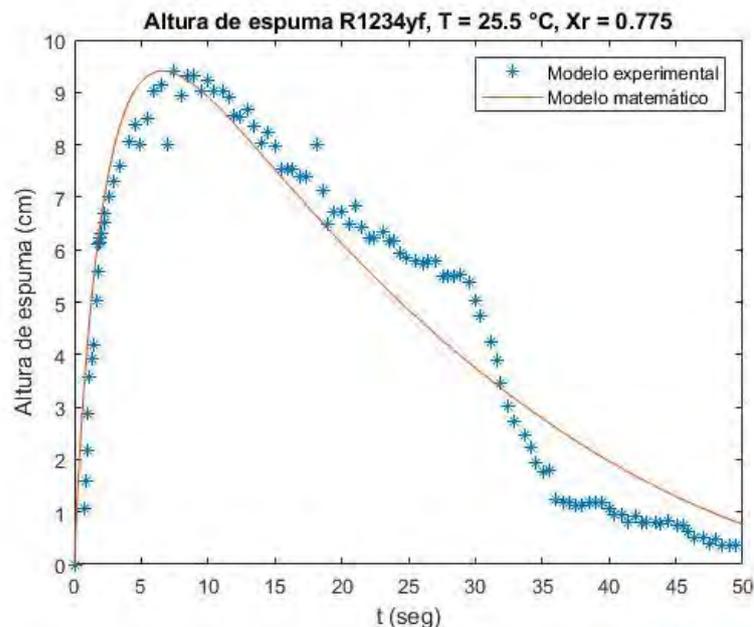


Figura 4.7. Resultado del modelo matemático para el ensayo 53.

La figura 4.7. muestra una comparación de los resultados obtenidos experimentalmente y matemáticamente para la mezcla R1234yf/POE ISO10 a una temperatura y concentración de refrigerante iniciales de 25.5 °C y 0.775, respectivamente. Se puede identificar la etapa de crecimiento de la altura de espuma, en la cual el modelo matemático se aproxima al experimental; lo contrario ocurre en la etapa de caída de la altura de espuma donde se puede

observar que, en los primeros 10 segundos, el modelo matemático aproxima al experimental para luego ir alejándose conforme la altura de espuma va cayendo.

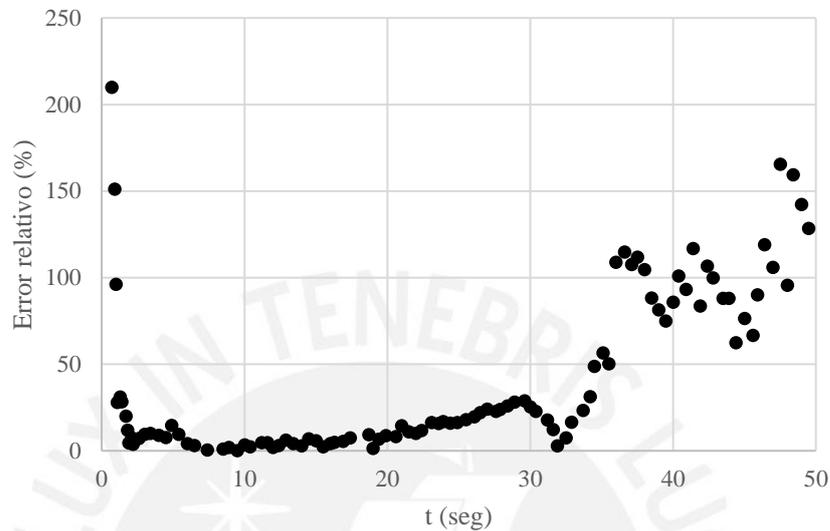


Figura 4.8. Evolución del error relativo del modelo matemático para el ensayo 53.

En la figura 4.8, se muestra la evolución del error relativo a lo largo de la duración del proceso de formación de espuma estudiado. Durante los primeros segundos, se puede observar que existe un error relativo máximo el cual llega a tener un valor de 210%, dicho tramo coincide con la etapa donde la velocidad de crecimiento de la capa de espuma fue máxima (llegando a subir de 0 a 7 cm en un tiempo de casi 3 segundos). Durante el tramo de 3 a 10 segundos, que corresponde a la etapa de crecimiento de la altura de espuma a una velocidad menor, se observa que el error relativo disminuyó oscilando entre 0% y 20%. En general, en la etapa de crecimiento de la altura de espuma se puede notar que, al inicio, el error relativo es alto debido a que la velocidad de crecimiento de la espuma es alta y esto tiene como consecuencia que se pierda precisión en el modelo matemático, sin embargo, el error disminuye cuando el proceso de crecimiento de la altura se hace más lento, llegando a valores menores al 20%. En el caso de la etapa de caída de la altura de espuma, se puede observar que el modelo tiene un error relativo menor al 20% en el tramo de 10 a 20 segundos cuando la velocidad de caída de la altura de espuma es baja, mientras que luego

de los 20 segundos el error aumenta de manera constante hasta superar el 100% lo cual coincide con un aumento en la velocidad de caída de la altura de espuma.

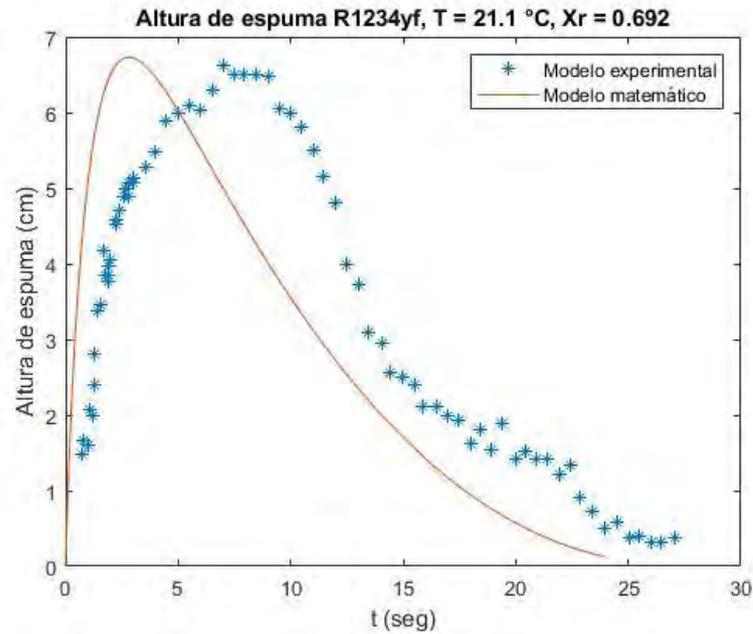


Figura 4.9. Resultado del modelo matemático para el ensayo 57.

La figura 4.9. muestra una comparación de los resultados obtenidos experimentalmente y matemáticamente para la mezcla R1234yf/POE ISO10 a una temperatura y concentración de refrigerante iniciales de 21.1 °C y 0.692, respectivamente. Se pueden identificar las etapas de crecimiento y caída de la altura de espuma, pero el modelo matemático se aleja de los resultados esperados en base al modelo experimental.

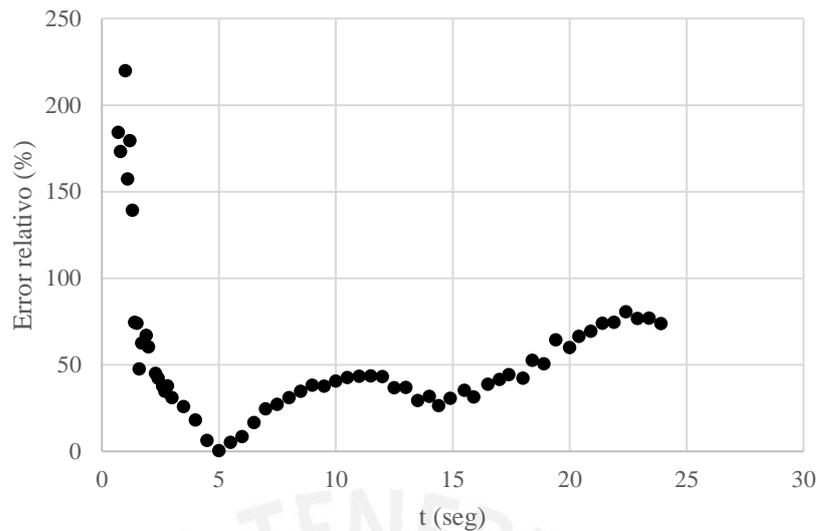


Figura 4.10. Evolución del error relativo del modelo matemático para el ensayo 57.

En la figura 4.10, se muestra la evolución del error relativo a lo largo de la duración del proceso de formación de espuma estudiado. Durante los primeros segundos, se puede observar que existe un error relativo máximo el cual llega a tener un valor mayor a 200%, dicho tramo coincide con la etapa donde la velocidad de crecimiento de la capa de espuma fue máxima (llegando a subir de 0 a 4 cm en un tiempo de 2 segundos). Durante el tramo de 2 a 10 segundos, que corresponde a la etapa de crecimiento de la altura de espuma a una velocidad menor, se observa que el error relativo disminuyó oscilando entre 0% y 50%. En general, en la etapa de crecimiento de la altura de espuma se puede notar que, al inicio, el error relativo es alto debido a que la velocidad de crecimiento de la espuma es alta y esto tiene como consecuencia que se pierda precisión en el modelo matemático, sin embargo, el error disminuye ligeramente cuando el proceso de crecimiento de la altura se hace más lento, llegando a valores menores al 50%. En el caso de la etapa de caída de la altura de espuma, se puede observar que el modelo tiene un error relativo menor al 50% en el tramo de 10 a 15 segundos cuando la velocidad de caída de la altura de espuma es baja, mientras que luego de los 15 segundos el error aumenta de manera constante hasta llegar al 100% lo cual coincide con un aumento en la velocidad de caída de la altura de espuma. En este ensayo, se puede notar que existe una

tendencia que cuando la velocidad, ya sea de crecimiento o caída de la capa de espuma, es mayor, el modelo matemático pierde precisión.

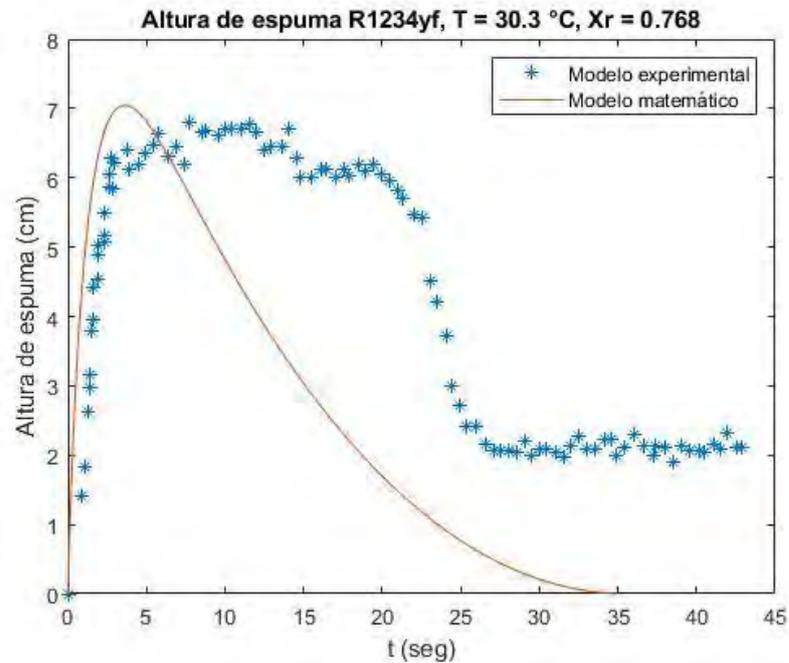


Figura 4.11. Resultado del modelo matemático para el ensayo 59.

En la figura 4.11, correspondiente a una temperatura igual a 30 °C y una concentración de refrigerante igual a 0.768, se puede notar que el modelo matemático tiene una muy buena precisión durante la etapa de crecimiento de la capa de espuma, mientras que, en la etapa de caída de la altura de espuma se observa que el error aumenta considerablemente. En la última gráfica se puede notar que el modelo experimental, con el cual se comparan los resultados del modelo matemático, tiene un comportamiento extraño durante la etapa de caída de la altura de espuma (se mantiene a una altura alrededor de 2 cm, a partir de 25 segundos), lo cual lo vuelve poco confiable para realizar la validación del modelo matemático.

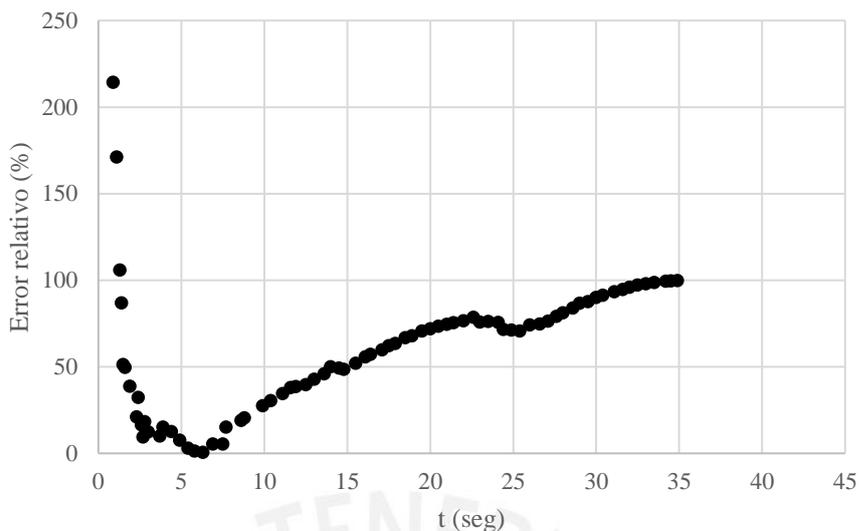


Figura 4.12. Evolución del error relativo del modelo matemático para el ensayo 59.

En la figura 4.12, se muestra la evolución del error relativo a lo largo de la duración del proceso de formación de espuma estudiado. Durante los primeros segundos, se puede observar que existe un error relativo máximo el cual llega a tener un valor de 220%, dicho tramo coincide con la etapa donde la velocidad de crecimiento de la capa de espuma fue máxima (llegando a subir de 0 a 5 cm en un tiempo de casi 3 segundos). Durante el tramo de 3 a 10 segundos, que corresponde a la etapa de crecimiento de la altura de espuma a una velocidad menor, se observa que el error relativo disminuyó oscilando entre 0% y 30%. En general, en la etapa de crecimiento de la altura de espuma se puede notar que, al inicio, el error relativo es alto debido a que la velocidad de crecimiento de la espuma es alta y esto tiene como consecuencia que se pierda precisión en el modelo matemático, sin embargo, el error disminuye cuando el proceso de crecimiento de la altura se hace más lento, llegando a valores menores al 30%. En el caso de la etapa de caída de la altura de espuma, se puede observar que el modelo matemático tiene un error relativo que aumenta de manera constante hasta llegar al 100%; sin embargo, este ensayo no es muy significativo dado que en los datos experimentales se ve que en la caída hay una tendencia irregular lo cual puede haberse originado debido a problemas durante la toma de datos. De los 3 ensayos con los que se evaluó la precisión del modelo matemático podemos inferir que, para la mezcla R134a/POE ISO10, el modelo matemático

tiene buena precisión en los tramos de tiempo cuya velocidad, ya sea de crecimiento o caída de la capa de espuma, es menor, mientras que conforme aumenta la velocidad el modelo matemático pierde precisión.

En suma, en todos los ensayos analizados se puede observar que, durante la etapa de crecimiento de la altura de espuma se pueden identificar dos tendencias del error del modelo matemático implementado. En una primera parte, el error del modelo es elevado llegando a superar el 100% en algunos casos, esto debido a que en esa etapa la velocidad de crecimiento de la capa de espuma es elevada (en promedio 1.5 cm/s); luego, conforme la altura de espuma tiende a alcanzar su valor máximo el error relativo del modelo matemático disminuye, llegando a ser menor al 15%. Lo contrario ocurre en la etapa de caída de la altura de espuma, en la cual en una primera etapa el error relativo, en algunos ensayos, empieza con un valor menor al 20% y se mantiene durante una primera etapa, para luego aumentar su valor de manera constante hasta el 100% conforme la velocidad de caída de la altura de espuma aumenta. Esto tiene su origen en el hecho que una mayor velocidad, ya sea de crecimiento o caída en la altura de la espuma, significa una mayor caída de presión lo cual, en el modelo matemático implementado significa una variación mayor en la solubilidad la cual es un parámetro básico en el análisis del proceso de formación de espuma.

4.2. Error relativo del modelo matemático

Para el cálculo del error relativo que se obtiene con el modelo matemático para los distintos ensayos realizados se comparará el área bajo la curva experimental con el área bajo la curva obtenida en el modelo mediante la expresión mostrada en la ecuación 4.1.

$$error = \frac{|A_{experimental} - A_{modelo}|}{A_{experimental}} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

donde, $A_{experimental}$ es el área bajo la curva obtenida con los resultados experimentales y A_{modelo} es el área bajo la curva obtenida en el modelo matemático.

Adicionalmente, para cada caso estudiado se obtuvo el error relativo en las etapas de crecimiento y caída de la capa de espuma para poder comparar la precisión del modelo matemático en cada una de las etapas mencionadas.

A partir de las figuras 4.1, 4.3 y 4.5 se obtuvo el error relativo para el modelo matemático cuando la mezcla estudiada es de R134a con aceite POE ISO10. Los valores del error relativo para cada ensayo se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Error relativo para pruebas con mezcla R134a/POE ISO10.

		Ensayo 69	Ensayo 70	Ensayo 71
Todo el proceso	Aexperimental	112.86	189.83	95.37
	Amodelo	99.22	117.15	83.54
	Error	12.09%	38.29%	12.41%
Etapa de crecimiento	Aexperimental	42.50	54.18	60.43
	Amodelo	39.20	51.89	58.24
	Error	7.76%	4.24%	3.62%
Etapa de caída	Aexperimental	70.36	135.64	34.95
	Amodelo	60.01	65.26	25.30
	Error	14.71%	51.89%	27.61%

A partir de las figuras 4.7, 4.9 y 4.11 se obtuvo el error relativo para el modelo matemático cuando la mezcla estudiada es de R1234yf con aceite POE ISO10. Los valores del error relativo para cada ensayo se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Error relativo para pruebas con mezcla R1234yf/POE ISO10.

		Ensayo 53	Ensayo 57	Ensayo 59
Todo el proceso	Aexperimental	249.72547	88.6547932	284.498598
	Amodelo	244.47466	71.92271	98.1881478
	Error	2.10%	18.87%	65.49%
Etapa de crecimiento	Aexperimental	65.4131963	34.3635191	32.2829112
	Amodelo	64.98678	39.92075	31.54624
	Error	0.65%	13.92%	2.28%
Etapa de caída	Aexperimental	184.312273	54.2912742	252.215687
	Amodelo	179.48788	32.00196	66.6419078
	Error	2.62%	41.06%	73.58%

En todos los casos estudiados con el modelo matemático se puede observar que para la etapa de crecimiento de la capa de espuma se tienen errores relativos menores a 10%, a excepción del ensayo 57 donde el error relativo tiene un valor de 13.92%. Para la etapa de caída de la altura de espuma se puede notar que el error relativo es mayor a 15%, a excepción de los ensayos 53 y 69 donde el error relativo tiene valores de 2.62% y 14.71%, respectivamente. De manera general, durante todo el proceso estudiado el modelo matemático tiene un error relativo menor al 15% en los ensayos 53, 69 y 71 con valores iguales a 2.1%, 12.09% y 12.41%, respectivamente; mientras que para los ensayos 57, 59 y 70 el error relativo tiene valores iguales a 18.87%, 65.49% y 38.29%, respectivamente.

4.3. Análisis de los resultados obtenidos

De los resultados obtenidos, se pueden distinguir las dos etapas del proceso de formación de espuma: etapa de crecimiento y etapa de caída de la capa de espuma, ambas caracterizadas por la altura máxima de espuma y el tiempo de duración del proceso. La altura máxima de espuma representa el fin de la etapa de crecimiento y el inicio de la etapa de caída. Fue posible realizar un análisis de sensibilidad de las variables características del proceso ante cambios en las condiciones iniciales de la mezcla líquida. Además, se formuló un análisis de los errores relativos del modelo matemático, tanto en la etapa de crecimiento como en la de caída de la capa de espuma.

4.3.1. Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de los resultados obtenidos para cada ensayo estudiado utilizando el modelo matemático, se evaluó la sensibilidad de la altura y el tiempo de vida de la espuma formada ante cambios en las variables de entrada del modelo. Las figuras 4.13, 4.14 y 4.15 muestran, en un mismo gráfico, los resultados obtenidos utilizando el modelo matemático para las mezclas R134a/POE ISO10 y R1234yf/POE ISO10, con lo cual es posible realizar las comparaciones necesarias.

En la figura 4.13 se muestran los resultados para la mezcla R134a/POE ISO10 a dos niveles de temperatura distintos y una misma concentración de refrigerante

inicial igual a, aproximadamente, 0.7. Se puede notar que al aumentar el nivel de temperatura de 25.9 °C, en el ensayo 69, a 29.7 °C, en el ensayo 71, la altura máxima de espuma disminuyó de 5.5 cm a 4.9 cm, mientras que el tiempo de vida de la espuma disminuyó de 28 segundos a 26 segundos.

La disminución en la altura máxima de la capa de espuma se explica a partir del valor de la entalpía de vaporización del refrigerante y la temperatura de la mezcla. Cuando la temperatura es de 25.9 °C y la concentración de refrigerante es igual a 0.705, la entalpía de vaporización es igual a 176.9 kJ/kg; mientras que para un valor de temperatura igual a 29.7 °C y la concentración de refrigerante es igual a 0.702, la entalpía de vaporización es igual a 173.4 kJ/kg. Como se puede observar en la ecuación 3.36, el número de Gibbs, para un mismo fluido, varía de manera inversa con el producto $h_l v^{2*} T$, es decir que si el producto aumenta el número de Gibbs disminuye y la tasa de nucleación por unidad de volumen aumenta, como se puede concluir de la ecuación 3.37, con lo cual la altura máxima de espuma sería mayor. En la tabla 4.5, se muestran los valores del mencionado producto para los ensayos 69 y 71. En dicha tabla, se puede observar que para el ensayo 71 el producto mencionado es menor con lo cual el número de Gibbs es mayor, la tasa de nucleación por unidad de volumen es menor y la altura máxima de la capa de espuma es menor en comparación con el ensayo 69.

En lo que respecta al tiempo de vida, su valor depende inversamente del factor ρ_L/μ_L . Es decir, que si el valor del factor es mayor entonces la tasa de drenaje de líquido a la mezcla es mayor y el tiempo de vida de la espuma formada es menor. En la tabla 4.5, se muestran valores del mencionado factor para los ensayos 69 y 71. En dicha tabla, se puede observar que para el ensayo 71 el factor es mayor con lo cual la tasa de drenaje es mayor y el tiempo de vida de la espuma es menor en comparación con el ensayo 69.

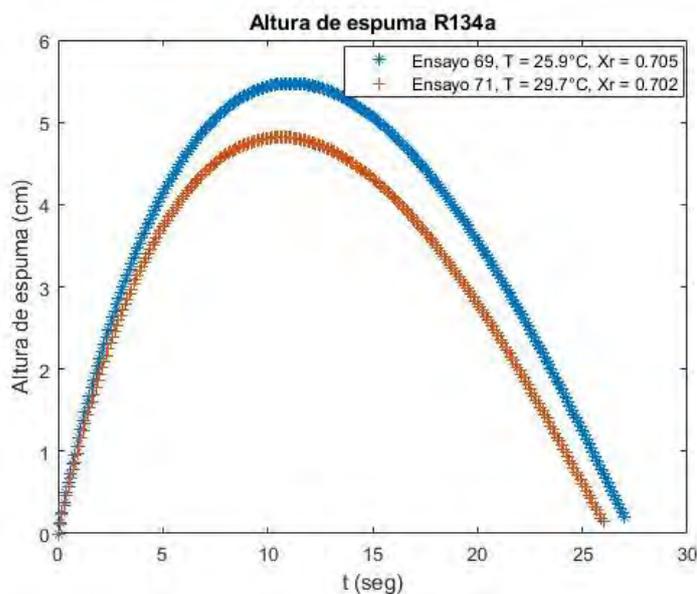


Figura 4.13. Resultados del modelo matemático para la mezcla R134a/POE ISO10 a diferentes niveles de temperatura.

Tabla 4.3. Comparación de entalpía y temperatura para los ensayos 69 y 71.

N° Ensayo	T (°C)	h (kJ/kg)	Densidad (kg/m ³)	h ² *T	viscosidad (kg/m-s)	ρ_L/μ_L
69	25.9	176.9	1203	9353660	0.0001922	6259105.1
71	29.7	173.4	1189	9101450	0.0001834	6483097.06

En la figura 4.14 se muestran los resultados para la mezcla R1234yf/POE ISO10 a dos niveles de temperatura distintos y una misma concentración de refrigerante inicial igual a, aproximadamente, 0.77. Se puede notar que al aumentar el nivel de temperatura de 25.5 °C, en el ensayo 53, a 30.3 °C, en el ensayo 59, la altura máxima de espuma disminuyó de 9.5 cm a 7 cm, mientras que el tiempo de vida de la espuma disminuyó de más de 50 segundos a 35 segundos.

La disminución en la altura máxima de la capa de espuma se explica a partir del valor de la entalpía de vaporización del refrigerante y la temperatura de la mezcla. Cuando la temperatura es de 25.5 °C y la concentración de refrigerante es igual a 0.775, la entalpía de vaporización es igual a 146 kJ/kg; mientras que para un valor de temperatura igual a 30.3 °C y la concentración de refrigerante es igual a 0.768, la entalpía de vaporización equivale a 142.1 kJ/kg. Como se

puede observar en la ecuación 3.36, el número de Gibbs varía de manera directa con el producto $h\nu^2 T$, es decir que si el producto aumenta el número de Gibbs disminuye y la tasa de nucleación por unidad de volumen aumenta, como se puede concluir de la ecuación 3.37, con lo cual la altura máxima de espuma sería mayor. En la tabla 4.5, se muestran los valores del mencionado producto para los ensayos 53 y 59. En dicha tabla, se puede observar que para el ensayo 59 el producto mencionado es menor con lo cual el número de Gibbs es mayor, la tasa de nucleación por unidad de volumen es menor y la altura máxima de la capa de espuma es menor en comparación con el ensayo 53.

En lo que respecta al tiempo de vida, su valor depende inversamente del factor ρ_L/μ_L . Es decir, que si el valor del factor es mayor entonces la tasa de drenaje de líquido a la mezcla es mayor y el tiempo de vida de la espuma formada es menor. En la tabla 4.5, se muestran valores del mencionado factor para los ensayos 53 y 59. En dicha tabla, se puede observar que para el ensayo 59 el factor es mayor con lo cual la tasa de drenaje es mayor y el tiempo de vida de la espuma es menor en comparación con el ensayo 53.

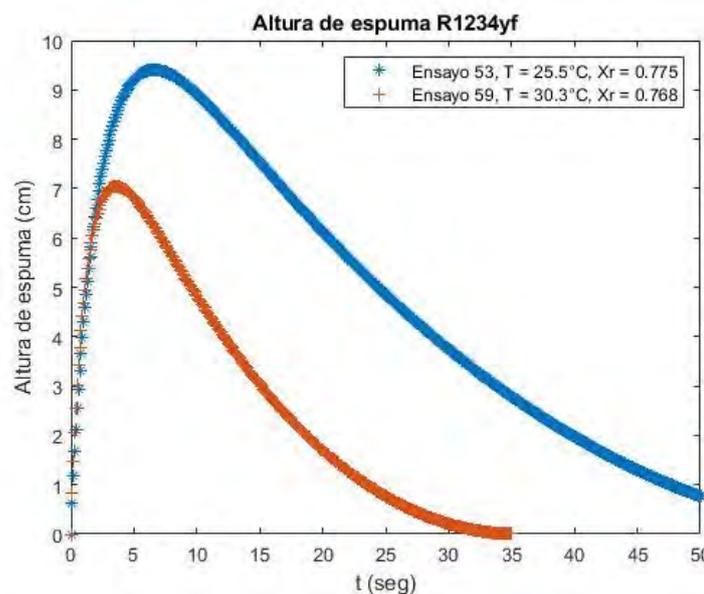


Figura 4.14. Resultados del modelo matemático para la mezcla R1234yf/POE ISO10 a diferentes niveles de temperatura.

Tabla 4.4. Comparación de entalpía y temperatura para los ensayos 53 y 59.

N° Ensayo	T (°C)	h (kJ/kg)	Densidad (kg/m ³)	hlv ² *T	viscosidad (kg/m-s)	ρ _L /μ _L
53	25.5	146	1090	6362826	0.0001601	6808244.85
59	30.3	142.1	1072	6124358	0.0001511	7094639.31

En la figura 4.15 se muestran los resultados para las mezclas R134a/POE ISO10 y R1234yf/POE ISO10 para los mismos niveles de temperatura, aproximadamente 20°C, y concentración de refrigerante, aproximadamente 0.7. Se puede notar que para la mezcla R134a/POE ISO10 la altura máxima que alcanza la capa de espuma tiene un valor igual a 6 cm, que es menor al alcanzado por la mezcla R1234yf/POE ISO10 la cual llega hasta casi 7 cm. En lo que respecta al tiempo de vida, en el caso de la mezcla R134a/POE ISO10 el proceso de formación de espuma tiene una duración de 45 segundos, mientras que para la mezcla R1234yf/POE ISO10 el proceso dura 25 segundos. En resumen, para la mezcla R134a/POE ISO10 el fenómeno de formación de espuma alcanza una altura máxima menor, pero con una mayor duración en comparación con la mezcla R1234yf/ POE ISO10 para las mismas condiciones de temperatura y concentración iniciales.

Igual que en los casos anteriores, la disminución en la altura máxima de la capa de espuma se explica a partir del valor de la entalpía de vaporización del refrigerante y la temperatura de la mezcla. Cuando la temperatura es de 20.4 °C y el refrigerante es R134a, la entalpía de vaporización, la densidad del líquido y la tensión superficial del líquido tienen valores de 181.9 kJ/kg, 1224 kg/m³ y 0.008635 N/m; mientras que para un valor de temperatura igual a 21.1 °C y como refrigerante el R1234yf, la entalpía de vaporización, la densidad del líquido y la tensión superficial tienen valores de 149.4 kJ/kg, 1106 kg/m³ y 0.006659 N/m. Como se puede observar en la ecuación 3.36, el número de Gibbs varía, al tratarse de dos sustancias distintas, de manera directa con el producto $\sigma_L^3/((\rho_L \cdot h)^2 \cdot T)$, es decir que si el producto aumenta el número de Gibbs aumenta y la tasa de nucleación por unidad de volumen disminuye como se puede concluir de la ecuación 3.37. En la tabla 4.5, se muestran los valores del mencionado

producto para los ensayos 57 y 70. En dicha tabla, se puede observar que para el ensayo 57 el producto mencionado es menor con lo cual el número de Gibbs es menor, la tasa de nucleación por unidad de volumen es mayor y la altura máxima de la capa de espuma es mayor en comparación con el ensayo 70.

En lo que respecta al tiempo de vida, su valor depende inversamente del factor ρ_L/μ_L . Es decir, que si el valor del factor es mayor entonces la tasa de drenaje de líquido a la mezcla es mayor y el tiempo de vida de la espuma formada es menor. En la tabla 4.5, se muestran valores del mencionado factor para los ensayos 57 y 60. En dicha tabla, se puede observar que para el ensayo 57 el factor es mayor con lo cual la tasa de drenaje es mayor y el tiempo de vida de la espuma es menor en comparación con el ensayo 70.

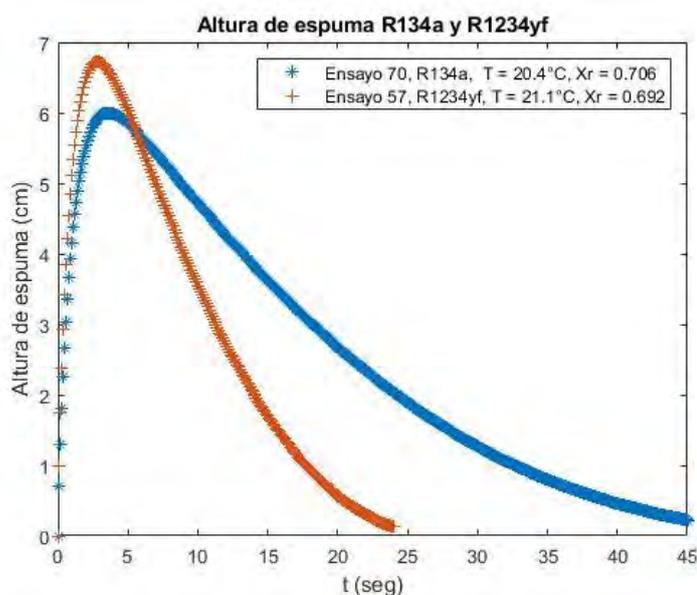


Figura 4.15. Resultados del modelo matemático para las mezclas R134a y R1234yf con aceite POE ISO10 para mismas condiciones de temperatura y concentración de refrigerante.

Tabla 4.5. Comparación de entalpía y temperatura para los ensayos 57 y 70.

N° Ensayo	T (°C)	h (kJ/kg)	Densidad (kg/m ³)	Tensión superficial (N/m)	$(\sigma_L)^3/((\rho_L \cdot h)^{2 \cdot T})$	viscosidad (kg/m-s)	ρ_L/μ_L
57	21.1	149.4	1106	0.006659	3.67723E-20	0.0001689	6548253.4
70	20.4	181.9	1224	0.008635	4.42689E-20	0.0002057	5950413.22

4.3.2. Análisis del error

En las tablas 4.1 y 4.2 se muestran los errores relativos del modelo matemático con las condiciones de entrada de los ensayos 69, 70 y 71 usando la mezcla R134a/POE ISO10, y los ensayos 53, 57 y 59 usando la mezcla R1234yf/POE ISO10. En la figura 4.16 se muestran los valores del error relativo para todo el proceso y para cada una de las etapas por separado.

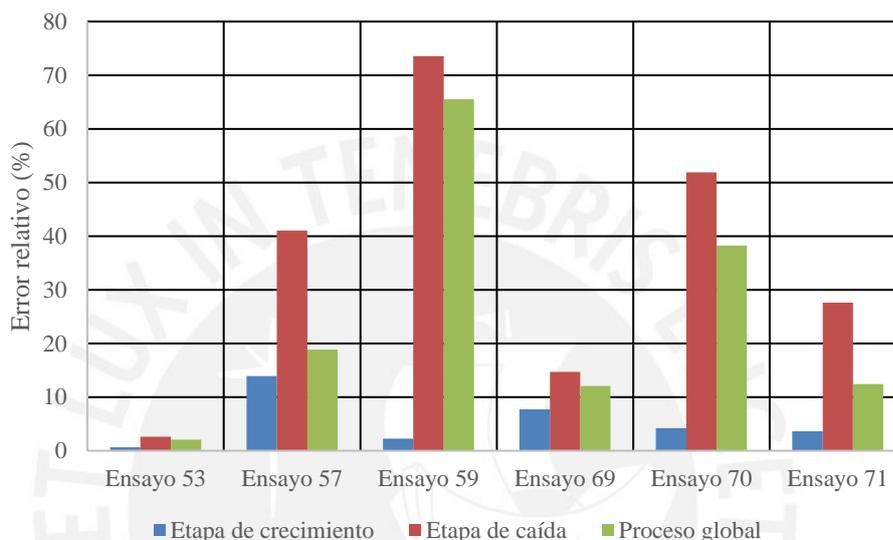


Figura 4.16. Errores relativos del modelo matemático del proceso de formación de espuma para los ensayos estudiados.

En la figura 4.16 se puede notar que el modelo matemático, en algunos ensayos, proporciona un error relativo elevado (mayor al 20%) al analizar todo el proceso de formación de espuma, pero el error disminuye, hasta valores menores al 10%, al analizar únicamente la etapa de crecimiento de la capa de espuma. Con esto se puede decir que el modelo matemático implementado simula con precisión la etapa de crecimiento, mientras que pierde precisión durante la etapa de caída de la capa de espuma.

En lo que respecta a la pérdida de precisión durante la etapa de caída se debe considerar el error que podrían tener los resultados experimentales con los cuales se realizó la validación del modelo matemático. Durante esta etapa, los resultados del modelo experimental reflejan comportamientos extraños (ensayo 59) y con mayores desviaciones (ensayos 53, 57, 69, 70 y 71), lo cual podría aumentar el error relativo del modelo matemático durante esta etapa de caída de

la capa de espuma. Además, el modelo de drenaje de refrigerante utilizado en las ecuaciones utiliza algunas constantes de ajustes, las cuales traen consigo errores que se arrastran a lo largo del desarrollo del modelo; considerando que el proceso de drenaje es el más importante durante la etapa de caída de espuma, el error del ajuste realizado influye considerablemente en la precisión del modelo matemático durante la etapa de caída de la altura de espuma, esto es una gran limitación que presenta el modelo matemático implementado.

En la tabla 4.6, se muestran los errores obtenidos por Fabio Fortkamp en su modelo implementado y se comparan con los obtenidos por el modelo del presente trabajo. Se puede notar que para los ensayos 53, 57, 69 y 71 los errores obtenidos son menores, mientras que para los ensayos 59 y 70 se obtienen errores mayores. Esto fue lo buscado en el presente trabajo, en el cual se utilizó derivadas parciales para obtener la variación de las propiedades de la mezcla respecto del tiempo y se ajustaron los coeficientes en el modelo de drenaje implementado.

Tabla 4.6. Comparación de errores obtenidos en el modelo matemático implementado y el de Fortkamp.

Ensayo	Error modelo (%)	Error Fortkamp (%)
53	2	23
57	19	35
59	65	40
69	12	17
70	38	37
71	12	24

CONCLUSIONES

- 1- Se realizó, a partir de resultados experimentales, un análisis del comportamiento de la altura de espuma formada en las mezclas aceite – refrigerante cuando son sometidas a una caída de presión. Se observó que la altura de espuma tiene dos etapas que se pudieron distinguir claramente, una etapa de crecimiento y una etapa de caída. La primera etapa coincidió con el tiempo en que la presión decae rápidamente y terminó cuando la espuma alcanzó su altura máxima, la cual es inversamente proporcional con la temperatura. Respecto a la segunda etapa, se distinguieron tres tramos en los cuales la velocidad de caída de la altura de espuma fue disminuyendo, este comportamiento guardó relación con la caída de presión, la cual, durante esta segunda etapa, fue disminuyendo con un gradiente que decrecía conforme aumentó el tiempo hasta que la presión alcanzó el equilibrio.
- 2- En un análisis, a partir de los datos experimentales, sobre la duración del ciclo de vida de la espuma formada, se pudo observar que la etapa de crecimiento de la espuma se dio de una manera rápida lo cual coincidió con los elevados gradientes de presión en los segundos iniciales del proceso de despresurización. Cuando la espuma alcanzó su altura máxima la velocidad con la cual disminuyó la presión se hacía cada vez menor, lo que generó que el tiempo que duró la caída de la altura de espuma sea mayor. Al establecer una relación con la temperatura de la mezcla, se concluyó que el tiempo útil de la espuma formada varió de manera inversamente proporcional con la temperatura, lo cual fue planteado en la hipótesis.
- 3- Se implementó un modelo matemático, el cual utilizó la ecuación de conservación de masa y teoría de difusión, para estudiar el proceso de formación de espuma en mezclas aceite – refrigerante cuando son sometidas a caídas de presión. Se estudiaron 6 mezclas de R134a/POE

ISO10 y R1234yf/POE ISO10 (3 de cada una) a diferentes condiciones iniciales, obteniéndose errores relativos menores al 10% para la etapa de crecimiento de la capa de espuma, pero mayores al 20% para todo el proceso de formación de espuma estudiado. Con esto se pudo concluir que el modelo matemático simula con precisión el crecimiento de la capa de espuma, pero tiene errores considerables durante la etapa de caída debido principalmente al uso de constantes de ajuste en el modelo de drenaje.

- 4- Se realizó un análisis de los errores relativos a lo largo del tiempo de duración del proceso, concluyendo que el modelo matemático tuvo errores relativos menores al 15% cuando la velocidad, ya sea de crecimiento o caída de la capa de espuma, era baja (menor a 0.5 cm/s); pero cuando la velocidad aumentaba el error relativo era mayor llegando a tener valores mayores al 100% para velocidades de crecimiento de la capa de espuma mayores a 1.5 cm/s. Esto tiene su origen en el hecho de que al haber una mayor velocidad de variación en la capa de espuma, esto significa una mayor caída de presión, que, en el modelo matemático implementado, se traduce en una mayor variación de la solubilidad aumentando el error del modelo implementado.
- 5- Se realizó un análisis de sensibilidad de las variables características del proceso de formación de espuma: altura máxima y tiempo de vida. Cuando se compararon dos ensayos de un mismo refrigerante con una misma concentración, se observó que, a una menor temperatura la altura máxima y el tiempo de vida de la espuma fueron mayores. Con lo cual se puede verificar lo planteado en la hipótesis respecto a que la temperatura es inversamente proporcional con las variables altura máxima y tiempo de vida de la espuma.
- 6- Cuando se compararon dos ensayos de refrigerantes distintos a las mismas condiciones de temperatura y concentración, se observó que, las variables altura máxima y tiempo de vida de la espuma dependían del tipo

de refrigerante utilizado. En el caso estudiado, se concluyó que el proceso de formación de espuma en mezclas R134a/POE ISO10 presentó una menor altura máxima de espuma, pero un mayor tiempo de vida en comparación con las mezclas R1234yf/POE ISO10.



BIBLIOGRAFÍA

- Barbosa, J. y Neto, M. (2007). Prediction of Refrigerant Absorption and Onset of Natural Convection in Lubricant Oil. ResearchGate.
- Barbosa, J. y Neto, M. (2011). Modeling the Thermodynamic Properties of Refrigerant - Oil Mixtures and the Effect of the Oil Circulation Ratio on the Performance of Vapor Compression Systems. *VI COngresso Brasileiro de Termodinamica Aplicada*. Salvador - BA: ResearchGate.
- Barbosa, J. y Neto, M. (2012). A Departure - Function Approach to Calculate Thermodynamic Properties of Refrigerant - Oil Mixtures. *International Journal of Refrigeration, VOLUME XXX*.
- Barbosa, J. y Neto, M. (2012). An Experimental Study of Refrigerant Desorption from a Refrigerant - Oil Mixture Subjected to Rapid Depressurization. ResearchGate.
- Barbosa, J. y Neto, M. (2014). Convection - Driven Absorption of R1234yf in Lubricating Oil. *International Journal of Refrigeration, 44*, 151-160.
- Barbosa, J. y Neto, M. (2008). Experimental and Theoretical Analysis of Refrigerant Absorption in Lubricant Oil. *HVAC&R RESEARCH, VOLUME 14(NUMBER 1)*.
- Brennen, C. (1995). *Cavitation and Bubble Dynamics*. New York: Oxford University Press.
- Callister, W. D. (2016). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Barcelona: Reverté.
- Cengel , Y. y Boles M. (2015). *Termodinámica (8va edición ed.)*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Dias, P. y Barbosa, J. (2012). Dynamics of Gas Bubble Growth in Oil-Refrigerant Mixtures Under Isothermal Depressurization. *Journal of the Brazilian*

Society of MEchanic, Science & Engineering, VOLUME XXXIV(NUMBER 2).

- Fernandez, D. , P. (2000). *Ciclos de refrigeración*. Biblioteca sobre Ingeniería Energética.
- Fernandez, D., P. (2000). *Refrigeración y calefacción*. Biblioteca sobre Ingeniería Energética.
- Fortkamp, F. P. y Barbosa, J. (2015). Refrigerant Desorption and Foaming in Mixtures of HFC-134a and HFO-1234yf and a Polyol Ester Lubricating Oil. *International Journal of Refrigeration*, 53, 69-79.
- Fortkamp, F. P. (2014). *Análise Experimental e Teórica da Formacao de Espuma em Misturas Óleo-Refrigerante*. Florianópolis.
- Franco, L., J. (2006). *Manual de refrigeración*. Barcelona: Reverté.
- Fukuta, M., S. J. (2017). Surface Tension Measurement of Oil/Refrigerant Mixture by Maximun Bubble Pressure Method. *International Jorunal of Refrigeration*, 73, 125-133.
- Kaviany, M. (1995). *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. Springer.
- Pilon, L., Fedorov, A., & Viskanta, R. (2002). Steady - state Thickness of liquid-gas foams. *Journal of Colloid and Interfacec Science*(n. 6), 977-990.
- Pizarro-Recabarren, R. (2015). Influence of refrigerant solubility and surface geometry on the wetting properties of lubricant oil. *SciencDirect*, 157-167.
- Pizarro-Recabarren, R. (2014). Modelação da força de adesão em válvulas de compressores considerando fenômenos interfaciais na película de óleo lubrificante. *Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)*.
- Poling, B. E. y Prausnitz, J. M. (2007). *The properties of Gases and Liquids* (5ta Edicion ed.). Boston: McGraw-Hill.

- Kiranmai, G., Koppula, J. y Edison, G. (2014). Effect of Lubricating Oil on the Performance of Vapour Compression Refrigeration System. *World Applied Sciences Journal*, 32.
- Vytautas, D. y Liutauras, V. (2017). Analysis of Lubricity and Cavitation Problem of Oil and Refrigerant Mixture for Hermetic Compressors. *International Journal of Refrigeration*, 83, 99-107.
- Yáñez, G. (20 de 11 de 2018). *Lubricantes en un sistema de refrigeración*. Obtenido de Mundo HVAC&R: <https://www.mundohvacr.com.mx/2007/08/lubricantes-en-un-sistema-de-refrigeracion/>
- Yañez, G. (20 de 11 de 2018). *Evaporador inundado de aceite*. Obtenido de Mundo HVAC&R: <https://www.gildardoyanez.com/tips/inundado-de-aceite/>
- Yogi, G., et. al. (1998). *Foaming Characteristics of Refrigerant/Lubricant Mixtures*. Florida: Air-Conditioning and Refrigeration Technology Institutes, Inc. (ARTI).