

**DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DIELECTRICA DE CADA UNA DE
LAS FASES PRESENTES EN UNA MEZCLA SATURADA DE R410A**

LIDY MARCELA ANAYA JAIMES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

**DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DIELECTRICA DE CADA UNA DE
LAS FASES PRESENTES EN UNA MEZCLA SATURADA DE R410A**

LIDY MARCELA ANAYA JAIMES

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Mecánico**

Director

**OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico, MS.c**

Co-Director

**RICARDO AUGUSTO MAZZA
Ingeniero Mecánico, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	16
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
2. JUSTIFICACIÓN	19
3. OBJETIVOS.....	20
3.1.OBJETIVO GENERAL.....	20
3.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4. MARCO TEÓRICO	21
4.1.CONCEPTOS BASICOS.....	21
4.1.1.Capacitancia	21
4.1.2.Impedancia	21
4.1.3.Constante dieléctrica.....	22
4.1.4.Flujo bifásico	22
4.1.5.Fracción de vacío	24
4.1.5.1. Incidencia de la fracción de vacío en la caída de presión y el coeficiente de transferencia de calor.....	24
4.1.5.2. Métodos de medición de la fracción de vacío	25
4.1.6.Análisis experimental de la datos obtenidos en la medición de la capacitancia en función de la temperatura.....	28

4.1.6.1. Análisis de varianza ANOVA.....	28
4.1.6.2. Incertidumbre	30
4.2.GENERALIDADES DE LOS FLUIDOS DE PRUEBA:	33
4.2.1.Aire.....	33
4.2.2.Dióxido de Carbono, CO ₂	33
4.2.3.R410a.....	34
4.3.REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	34
4.3.1.Constante dieléctrica del Aire	34
4.3.2.Constante dieléctrica del CO ₂	35
4.3.3.Constante dieléctrica del R410a.....	36
5. MONTAJE EXPERIMENTAL Y MODO DE MEDIDA A UTILIZAR	37
5.1.ELEMENTOS DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.....	37
5.1.1.Célula PVT.....	38
5.1.2.Cámara Climática	39
5.1.3.Indicador Universal de temperatura.....	40
5.1.4.Puente RCL.....	40
5.1.5.Bomba de Alta Presión	41
5.1.6.Manifold de dos vías para carga de refrigerante	41
5.2.MODO DE MEDICIÓN	42
5.2.1.Modo de medida en Paralelo (Cp)	43

5.2.2. Modo de medida en Serie (C_s)	44
5.2.3. Modo de medida utilizado	45
6. CARACTERIZACIÓN DE LA CÉLULA PVT	46
6.1. DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO DE CONSTRUCCIÓN DE LA CÉLULA PVT (FF) Y DE LA CAPACITANCIA PARASITA (C_p)	49
6.1.1. Mediciones de capacitancia total de la célula llena con aire y CO_2 en estado líquido.....	49
6.1.1.1. Aire	50
6.1.1.2. CO_2 en estado líquido	51
6.1.2. Verificación de la fase del CO_2 líquido.....	52
6.1.2.1. Cálculo del Volumen del CO_2 líquido para determinar el Delta de volumen entre el volumen líquido y el volumen total	54
6.1.3. Datos obtenidos a partir de las mediciones de capacitancia total de la célula llena de aire y CO_2 líquido	56
6.1.4. Análisis de los datos obtenidos.....	58
6.1.4.1. Análisis de Varianza	58
6.1.4.2. Cálculo de las capacitancias promedio e incertidumbre de la medición.....	61
6.1.5. Cálculo de los valores de C_p y FF	62
6.2. VALIDACIÓN DE LA ECUACIÓN DEL MODELO ELÉCTRICO DE LA CÉLULA PVT	63

7. DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DIELECTRICA DEL R410A.....	64
7.1.PROCEDIMIENTO PARA EL R410a EN ESTADO LÍQUIDO Y GASEOSO	
.....	64
7.1.1.R410a en estado líquido	64
7.1.2.R410a en estado gaseoso.....	65
7.2.VERIFICACIÓN DE LA FASE A LA CUAL SE REALIZA LA MEDICIÓN.....	66
7.3.DATOS OBTENIDOS PARA LAS MEDICIONES DE CAPACITANCIA DE LA	
CÉLULA LLENA DE R410a EN ESTADO LÍQUIDO Y EN ESTADO GASEOSO.	
.....	67
7.4.ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS	67
7.5.CÁLCULO DE LA CONSTANTE DIELECTRICA DEL R410A LÍQUIDO.....	67
7.6.CÁLCULO DE LA CONSTANTE DIELECTRICA DEL R410A EN ESTADO	
GASEOSO.....	69
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS:	70
8.1.ANÁLISIS DEL ESTADO TERMODINÁMICO DEL CO ₂ Y EL R410A.....	70
8.2.ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS DE CAPACITANCIA	75
8.3.VALIDACIÓN DE LA ECUACIÓN QUE CARACTERIZA LA CÉLULA PVT	78
8.4.ANÁLISIS DE LOS VALORES DE LA CONSTANTE DIELECTRICA	
OBTENIDA PARA EL R410A EN ESTADO LÍQUIDO Y EN ESTADO GASEOSO.	
.....	79
9. CONCLUSIONES	81

10. RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA.....	85
ANEXOS	88

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Velocidad en una tubería cuando se tiene flujo monofásico y flujo bifásico.....	25
Figura 2. Densitómetro de tres rayos gama.....	27
Figura 3. Montaje experimental identificando sus partes.....	37
Figura 4. Célula PVT con las válvulas numeradas.....	38
Figura 5. Cámara climática.....	39
Figura 6. Indicador Universal marca NOVUS modelo N1040i.....	40
Figura 7. Puente RCL auto balanceado de la marca BK Precisión, modelo 889A.....	40
Figura 8. Bomba de Teledyne ISCO modelo 260 D con Accesorios.....	41
Figura 9. Manifold de dos vías para carga de refrigerante.....	42
Figura 10. Modelo de un capacitor real.....	42
Figura 11. Esquema del modelo eléctrico de un capacitor real indicando la resistencia que tiene efecto en el modo de medida en Paralelo (C_p).....	44
Figura 12. Esquema del modelo eléctrico de un capacitor real indicando la resistencia que tiene efecto en el modo de medida en Serie (C_s).....	45
Figura 13. Desfase entre la corriente y el voltaje.....	46
Figura 14. Gráfica de la Impedancia, resistencia y reactancia capacitiva.....	46
Figura 15. Configuración 3 cables del puente RCL y rango de valores a medir.....	47
Figura 16. Conexiones entre la célula y el puente RCL.....	48
Figura 17. Procedimiento del llenado y toma de datos para el Aire.....	50
Figura 18. Procedimiento de llenado de la célula PVT y toma de datos con CO_2 líquido.....	51
Figura 19. Montaje experimental con esquema para el llenado de la célula PVT con CO_2	52
Figura 20. Corte transversal de la célula PVT con dimensiones en mm.....	53
Figura 21: Volúmenes de la célula.....	54
Figura 22. Caja negra con las variables de entrada y salida.....	55

Figura 23: Procedimiento del llenado y toma de datos con R410a en estado gaseoso	65
Figura 24. Montaje experimental para el llenado de la célula PVT con R410a en estado gaseoso.....	66
Figura 25. Estado termodinámico inicial del CO ₂	71
Figura 26. Gráfica de Presión vs Entalpia del CO ₂ resaltando el estado termodinámico al cual se realizó el llenado	71
Figura 27. Línea de volumen específico constante sobre la gráfica de P vs h del CO ₂	72
Figura 28. Estado termodinámicos iniciales del R410a líquido y gaseoso.....	73
Figura 29. Líneas de densidad constante sobre la gráfica de P vs h del R410a	75
Figura 30. Gráfica de la Capacitancia promedio del Aire vs la Temperatura de medición	76
Figura 31. Gráfica de la Capacitancia promedio del CO ₂ líquido vs la Temperatura de medición.....	76
Figura 32. Gráfica de la Capacitancia promedio del R410a en estado gaseoso vs la Temperatura de medición	77
Figura 33. Gráfica de la Capacitancia promedio del R410a en estado líquido vs la Temperatura de medición	77
Figura 34. Gráfica de la desviación de la constante dieléctrica del R410a en estado líquida obtenida por Brito et al. (2000) vs la constante dieléctrica obtenida a partir de la ecuación del modelo eléctrico de la célula PVT	78
Figura 35. Gráfica de la constante dieléctrica del R410a en estado líquido en función de la Temperatura	80
Figura 36. Gráfica de la constante dieléctrica del R410a en estado líquido en función de la Presión	80

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Variables utilizadas en el flujo bifásico.....	23
Tabla 2. Tabla ANOVA	30
Tabla 3. Resumen de los Modos de Medida.....	45
Tabla 4: Definición de la nomenclatura a utilizar en el cálculo tipo.....	55
Tabla 5: Pasos para realizar el cálculo del Delta de volumen entre el volumen de líquido y el volumen total	56
Tabla 6. Medidas de Capacitancia Promedio para cada Temperatura del Aire y del CO ₂ líquido.....	57
Tabla 7. Suma y promedio para ANOVA del aire.....	60
Tabla 8. ANOVA del aire.....	61

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. DATOS EXPERIMENTALES.....	89
ANEXO B. RESULTADOS ANÁLISIS TERMODINÁMICO.....	93
ANEXO C. TABLAS ESTADÍSTICAS.....	99
ANEXO D. RESULTADOS ANÁLISIS DE VARIANZA.....	104
ANEXO E. VALIDACIÓN DE LA ECUACIÓN.....	109
ANEXO F. VALORES DE LA CONSTANTE DIELECTRICA DEL R410a.....	112

RESUMEN

TÍTULO: "DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DIELECTRICA DE CADA UNA DE LAS FASES PRESENTES EN UNA MEZCLA SATURADA DE R410A" *

AUTORA: LIDY MARCELA ANAYA JAIMES **

PALABRAS CLAVES: Mezcla Azeotrópica, R410a, Constante dieléctrica, Presión, Temperatura.

DESCRIPCIÓN:

Este documento presenta el procedimiento realizado para obtener la constante dieléctrica (permitividad relativa) de la fase líquida y la fase gaseosa del R410a, refrigerante libre de cloro, compuesto por una mezcla azeotrópica 50/50 (porcentaje másico) de los refrigerantes R32/125.

Las medidas realizadas para el R410a fueron en función de la presión y temperatura dentro del rango de 141,01 a 263,25 psi y de 6° a 50°C para el estado gaseoso y desde 140,85 psi hasta 3022 psi y 6° a 44° para el estado líquido, manteniendo el volumen específico del R410a dentro de la célula constante (en otras palabras, no hubo variación del volumen ocupado por el R410a dentro de la célula y no se retiró ni agregó refrigerante durante el proceso de medición).

El valor de la constante dieléctrica se obtuvo a partir de la medida de capacitancia total del montaje experimental, utilizando una ecuación que caracteriza la célula PVT, la cual relaciona la constante dieléctrica y la medida de capacitancia total teniendo en cuenta el valor de la capacitancia parásita (debida a los cables de medición) y un factor de corrección por la configuración geométrica de la célula, consiguiendo valores de $1,11 \pm 0,13$ para el estado gaseoso y para el estado líquido valores dentro del rango de $11,09 \pm 0,97$ a $8,05 \pm 4,10$.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Omar Armando Gelvez Arocha

ABSTRACT

TITLE: *“DETERMINATION OF THE DIELECTRIC CONSTANT OF EACH PHASES PRESENT IN A SATURATED MIXTURED OF R410a”**

AUTHOR: LIDY MARCELA ANAYA JAIMES**

KEYWORDS: Azeotropic mixture, R410a, Dielectric constant, Pressure, Temperature.

DESCRIPTION:

This document presents the procedure performed to obtain the dielectric constant (relative permittivity) of the liquid phase and the gas phase of R410a, chlorine-free refrigerant, composed by an azeotropic mixture 50/50 (mass fraction) of R32 / 125 refrigerants.

Measurements for R410a were made as function of the pressure and temperature within the range of 141.01 to 263.25 psi and 6 ° to 50 ° C for gaseous and from 140.85 psi to 3022 psi and 6 at 44 ° for the liquid state, keeping the specific volume of R410a in the cell constant (in other words, there was no variation in the volume occupied by the R410a inside the cell and refrigerant during the measurement process was not removed or added) .

The value of the dielectric constant was obtained from the measurement of the total capacitance of the experimental setup, using an equation that characterizes the PVT cell, which relates the dielectric constant and the measure of the total capacitance considering the value of the parasitic capacitance (due to the measuring lines) and a correction factor for the geometry of the cell, obtaining values of 1.11 ± 0.13 for the gaseous state and 11.09 ± 0.97 to 8.05 ± 4.10 for the liquid state.

* Graduation thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering Director: Omar Armando Gélvez Arocha

INTRODUCCIÓN

El flujo bifásico se presenta en la mayoría de las grandes industrias, según Shoham (2006) se puede encontrar en la industria del petróleo (en la producción y el transporte de crudo y gas en tuberías horizontales, inclinadas o verticales), en la industria química (en los reactores, calderas, condensadores, evaporadores y plantas de destilación), en la industria nuclear, en las plantas de energía geotérmica (en los risers verticales) y en la industria de la refrigeración (en los evaporadores y condensadores). Dada su importancia es necesario conocer los parámetros que caracterizan este tipo de flujo como la caída de presión y la fracción de vacío para realizar un adecuado diseño de los sistemas donde este se presenta.

Una de las variables estudiadas en el flujo bifásico es la fracción de vacío, utilizada en los cálculos sobre la transferencia de calor, caída de presión y transiciones de estado en el flujo (Danes, 2012), motivo por el cual se han desarrollado diferentes técnicas para su medición entre las que se destaca la utilización de sensores de impedancia por su respuesta en el orden de los microsegundos y bajos costos en el proceso.

Un sensor de impedancia se basa en el principio que ambas fases líquida y gaseosa poseen propiedades eléctricas diferentes, proporcionando una señal de impedancia del conjunto gas-líquido de la cual se puede estimar la fracción de vacío.

Para estimar la fracción de vacío es necesario realizar una adecuada calibración del sensor de impedancia a partir de las propiedades eléctricas de las fases líquida y gaseosa del R410a, las cuales pueden ser definidas a partir constante dieléctrica.

Motivo por el cual en este trabajo se encuentra la documentación del desarrollo de un procedimiento utilizado para conocer la constante dieléctrica de la fase líquida y gaseosa del R410a necesarias para calibrar un sensor de impedancia que será utilizado en la medición de la fracción de vacío en una tubería.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El grupo de investigación “Two phase flow group” adscrito a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Estatal de Campinas, Brasil está desarrollando un sensor de impedancia que permita conocer la fracción de vacío de un flujo bifásico de R410a (en estado líquido y gaseoso) en un sistema de refrigeración, de tal manera que sea posible realizar los cálculos correspondientes a la transferencia de calor y caída de presión de una manera más precisa.

Cuando se utiliza un sensor de impedancia para medir la fracción de vacío de una mezcla, es necesario conocer la constante dieléctrica de cada una de las fases que la componen.

Los valores de la constante dieléctrica de la fase líquida del R410a es conocida en la literatura para temperaturas discretas de 0°, 10°, 20° y 30° C, por lo tanto si se quiere establecer la composición de las fases con mayor exactitud se requiere el conocimiento de dichas constantes dieléctricas en rangos de valores más estrechos.

El proyecto tiene por objetivo realizar un procedimiento para obtener los valores correspondientes a la constante dieléctrica en intervalos de 2°C desde 10 a 40°C que permitan llevar a cabo una adecuada calibración del sensor de impedancia.

2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente para el diseño de evaporadores y condensadores de un sistema de refrigeración se realizan aproximaciones conservativas de la caída de presión y de la transferencia de calor que conllevan a la utilización de equipos grandes y sobredimensionados.

La determinación de la constante dieléctrica de cada una de las fases del R410a permitirá la calibración de los sensores de impedancia que serán utilizados en la medición de la fracción de vacío del R410a en el evaporador y el condensador de un sistema de refrigeración. Los datos obtenidos a partir de estas mediciones servirán para desarrollar correlaciones más precisas para la determinación de la caída de presión y de la transferencia de calor, herramientas que permitirán a la comunidad de investigadores y diseñadores de sistemas de refrigeración el desarrollo de mejores diseños.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Contribuir al cumplimiento de los objetivos misionales de la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería Mecánica mediante el intercambio académico con la Universidad Estatal de Campinas a través de la Investigación enfocada a mejorar el diseño de equipos de transferencia de calor en sistemas de refrigeración que utilizan R410a.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinación de la constante dieléctrica de cada una de las fases presentes en una mezcla saturada de R410a para evaluar la fracción de vacío del flujo encontrado en los equipos de transferencia de calor de los sistemas de refrigeración, para lo cual se deberá:

- Conocer el funcionamiento del banco experimental existente para medición de constantes dieléctricas de fluidos monofásicos compuesto por una cámara climatizada, una célula de prueba (Célula PVT) y los elementos de medición y control requeridos.
- Caracterizar la célula PVT para determinar la capacitancia parasita (C_p) y el factor de corrección por forma (F_F) utilizando fluidos de referencia de constante dieléctrica conocida (Aire y CO2 líquido)
- Realizar el procedimiento* para medir experimentalmente la constante dieléctrica de cada una de las fases del R410a individualmente en intervalos de 2° C entre las temperaturas 10° y 40°C.

* Llenado de la célula a la presión y temperatura requerida
Comprobación de la existencia de una sola fase a partir de las propiedades termodinámicas y la configuración geométrica de la célula.
Conexión de los elementos de medición y control
Medición de la capacitancia total (CT)
Determinación de la constante dieléctrica a partir de la CT

4. MARCO TEÓRICO

4.1. CONCEPTOS BASICOS

4.1.1. Capacitancia es una propiedad que tienen los cuerpos de acumular una cantidad de energía eléctrica en proporciones definidas, esta medida siempre es positiva, se mide en [pF] y depende de la geometría del condensador y del dieléctrico introducido entre las dos superficies del condensador, siendo una magnitud constante para un capacitor dado.

4.1.2. Impedancia La impedancia (Z) es la oposición al paso de la corriente alterna. Tiene unidades de Ohmios (Ω) y es la suma de la resistencia (R , oposición debida a las resistencias) y la reactancia (X , oposición debida a las bobinas y los condensadores).

$$Z = R + jX \quad (4.1)$$

Como se puede observar en la ecuación 4.1 la impedancia es un fasor que posee magnitud y fase, donde sus magnitudes dependiendo del elemento que se opone a la corriente son la impedancia de una resistencia real, de una inductancia y de un capacitor, dadas por las siguientes fórmulas:

- Impedancia de una resistencia real:

$$Z_R = R \quad (4.2)$$

- Impedancia de una inductancia:

$$Z_L = X_L = j 2\pi * f * L \quad (4.3)$$

- Impedancia de un condensador:

$$Z_C = X_C = \frac{1}{j 2\pi f C} \quad (4.4)$$

Donde f es la frecuencia a la que se realiza la medición, R , L y C los valores de resistencia, inductancia y Capacitancia medidos, respectivamente.

4.1.3. Constante dieléctrica Define el grado de polarización eléctrica de una sustancia cuando esta es sometida a un campo eléctrico. También es llamada permitividad relativa y se obtiene a partir de la relación de la permitividad de una sustancia en relación a la permitividad del vacío:

$$\epsilon_{\text{relativa}} = \frac{\epsilon_{\text{real}}}{\epsilon_0} \quad (4.5)$$

Donde ϵ_{real} es la permitividad de la sustancia y ϵ_0 es la permitividad del vacío, la cual es igual a $8,8541878176 \left[\frac{\text{pF}}{\text{m}} \right]$.

Según Barão et al. (1996) es necesario conocer la constante dieléctrica para estudiar e interpretar las propiedades eléctricas de los fluidos polares y proporcionar valores operacionales para algunos de los parámetros de diseño de maquinaria utilizada en la industria de refrigeración y aire acondicionado

4.1.4. Flujo bifásico Cuando se habla de fase, se hace referencia al estado termodinámico de una sustancia que puede ser, sólido, líquido o gaseoso. Cuando se tienen dos fases de una misma sustancia o un fluido bi-componente (por ejemplo, agua en fase líquida y aire) fluyendo simultáneamente se puede decir que se presenta un flujo bifásico.

En la Tabla 1. Se presenta una tabla resumen de las variables utilizadas para la realización de los cálculos en un flujo bifásico según Shoham (2006).

Tabla 1. Variables utilizadas en el flujo bifásico

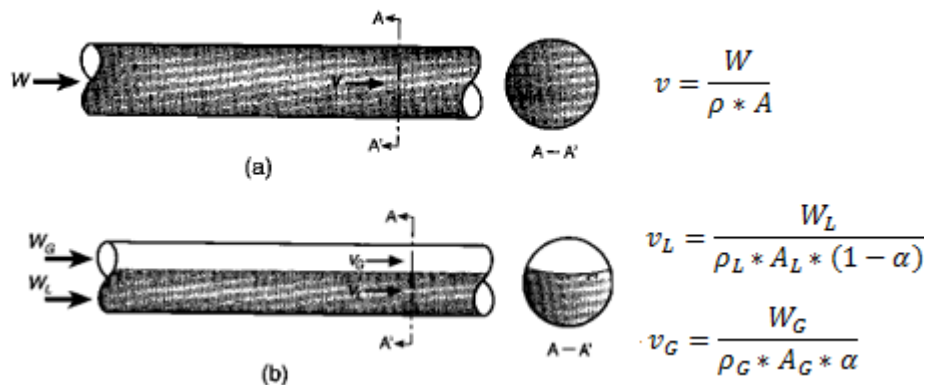
	Nombre	Unidades	Fórmula
Flujo másico	W , es la suma del flujo másico de la fase líquida y de la fase gaseosa	$\left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right]$	$W = W_L + W_G$
Flujo volumétrico	q , es la suma del flujo volumétrico de la fase líquida y de la fase gaseosa	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$	$q = q_L + q_G$
Hold up y fracción de vacío	H_L , es la fracción del volumen ocupada por la fase líquida α , es la fracción de volumen ocupada por la fase gaseosa	-	$H_L + \alpha = 1$
Velocidad de mezcla	V_M , es la rata total de flujo volumétrico de ambas fases por unidad de área	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	$\frac{q_L + q_G}{A_p} = v_{SL} + v_{SG}$
Velocidades superficiales	v_{SL} y v_{SG} , son las velocidades que tendría la fase si esta fluyera sola en la tubería	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	$v_{SL} = \frac{q_L}{A_p}$ y $v_{SG} = \frac{q_G}{A_p}$
Flujo de masa	G	$\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2\text{s}}\right]$	$\frac{W_L + W_G}{A_p} = G_L + G_G$
Velocidad actual	v , es la velocidad actual de la fase	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	$v_L = \frac{q_L}{A_L} = \frac{v_{SL}}{H_L}$ $v_G = \frac{q_G}{A_G} = \frac{v_{SG}}{1 - H_L}$
Velocidad de deslizamiento	v_{SLIP} , es la velocidad relativa entre las dos fases	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	$v_{SLIP} = v_L + v_G$
Velocidad de desviación	v_{DL} y v_{DG} , velocidad relativa de cada fase respecto a la velocidad de la mezcla	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	$v_{DL} = v_L - v_M$ $v_{DG} = v_G - v_M$
Drift Flux	J , rata de flujo de una fase por unidad de área, a través de una superficie moviéndose a la velocidad de mezcla	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	$J_L = H_L(v_L - v_M)$ $J_G = (1 - H_L)(v_G - v_M)$
Velocidad de difusión	v_{DL} y v_{DG} , velocidad de la fase relativa a la superficie en movimiento a la velocidad de mezcla	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	$v_{ML} = v_L - \frac{G}{\rho_M}$ $v_{MG} = v_G - \frac{G}{\rho_M}$ Siendo ρ_M la densidad promedio de la mezcla
Calidad	x , es el radio del flujo másico de gas entre en flujo másico total	-	$\frac{W_G}{W_G + W_L} = \frac{W_G}{W}$
Concentración de masa	c , es el radio entre la masa de la fase y la masa total en un volumen dado	-	$c_L = \frac{H_L \rho_L}{\rho_M}$ $c_G = \frac{(1 - H_L) \rho_G}{\rho_M}$
Propiedades Promedio del Fluido	ρ_M y μ_M , son la densidad y la viscosidad promedio de la mezcla		$\rho_M = \rho_L H_L + \rho_G (1 - H_L)$ $\mu_M = \mu_L H_L + \mu_G (1 - H_L)$

4.1.5. Fracción de vacío Es la fracción del volumen o de la sección transversal de la tubería ocupada por la fase gaseosa. Es un parámetro muy importante en el flujo bifásico porque a partir de él es posible determinar el valor de otras variables como la velocidad de cada una de las fases, la densidad y la viscosidad promedio de la mezcla, entre otras.

4.1.5.1. Incidencia de la fracción de vacío en la caída de presión y el coeficiente de transferencia de calor La caída de presión y el coeficiente de transferencia de calor, son dos parámetros muy importantes para el diseño de tuberías que dependen de la velocidad del fluido. En la figura 1 se puede observar que para el flujo monofásico (a) se tiene una ecuación para la velocidad, la cual puede calcularse si se conocen los datos geométricos de la tubería y las propiedades termodinámicas del fluido transportado, caso contrario ocurre con el fluido bifásico (b), donde aparece en las fórmulas para el cálculo de la velocidad de cada una de las fases la fracción de vacío, haciendo el sistema irresoluble al tener 2 ecuaciones y tres incógnitas (v_L , v_G y α).

En algunos casos para simplificar el sistema se asume que las dos fases se mueven a la misma velocidad (condición de no deslizamiento $v_L = v_G$), lo cual no es cierto en la mayoría de los casos, generando la necesidad de conocer la fracción de vacío a partir de mediciones experimentales para determinar la velocidad de cada una de las fases.

Figura 1. Velocidad en una tubería cuando se tiene flujo monofásico y flujo bifásico.



Fuente: SHOHAM, Ovadia. Mechanistic modeling of gas- liquid two-phase flow in pipes. Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2006. Modificada por el autor.

4.1.5.2. Métodos de medición de la fracción de vacío La medición de la fracción de vacío se realiza con el fin de disponer de un parámetro experimental que simplifique el cálculo de la velocidad de cada una de las fases del flujo bifásico que fluye por una tubería.

Para medir la fracción de vacío se han desarrollado diferentes técnicas entre las que podemos resaltar el cierre rápido de válvula, la técnica de absorción de rayos gamma y el método de la impedancia.

- **Cierre rápido de válvula**

Consiste en determinar la fracción de vacío a partir de la relación del volumen de una sección de tubería aislada por dos válvulas (una a cada extremo de la sección) y el volumen de líquido atrapado después del cierre rápido de estas en una condición de flujo normal.

$$V_G = V_{secciónaislada} - V_{liquido} \quad (4.6)$$

$$\alpha = \frac{V_G}{V_{secciónaislada}} \quad (4.7)$$

- **Técnica de absorción de rayos gamma**

Se basa en el principio enuncia que un rayo gama al pasar por una tubería es atenuado debido a la absorción y dispersión que ocurre de acuerdo con la ecuación exponencial de la absorción:

$$I = I_0 \exp(-\mu z) \quad (4.8)$$

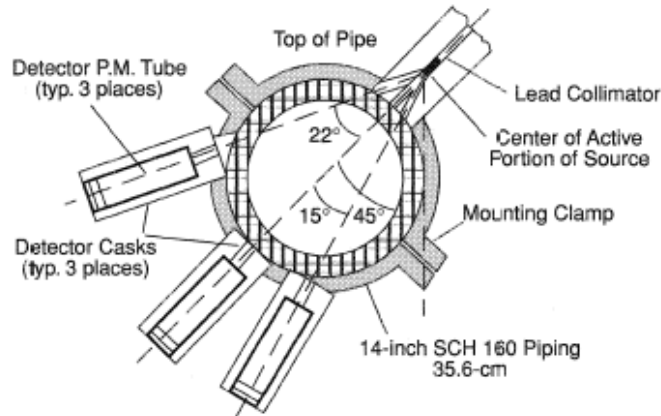
Donde I es la intensidad recibida, I_0 es la intensidad incidente, μ es el coeficiente de absorción linear y z es la distancia que recorre el rayo a través del medio absorbente.

Para poder utilizar este método es necesario conocer las intensidades recibidas I_L e I_G , las cuales se obtienen cuando el rayo pasa a través de la tubería cuando esta tiene un flujo de solo fase líquida y gaseosa respectivamente. Al conocer estas dos magnitudes y medir la intensidad recibida del rayo gama se puede determinar la fracción de vacío a partir de la ecuación:

$$\alpha = \frac{\ln I - \ln I_L}{\ln I_G - \ln I_L} \quad (4.9)$$

El valor obtenido por la ecuación 4.9 es un valor promedio de la fracción de vacío a lo largo de la distancia recorrida por el rayo dentro de la tubería, problema que puede ser aliviado mediante la utilización de diferentes haces con un densitómetro gamma de tres rayos el cual se muestra en la figura 2.

Figura 2. Densitómetro de tres rayos gama



Fuente: HEWITT, G.F. Measurement of void fraction. Handbook of Multiphase Systems. New York: McGraw-Hill, 1982.

- **Método de la Impedancia**

Consiste en conocer la fracción de vacío a partir de la medida de capacitancia o conductancia de la mezcla bifásica que se encuentra entre dos electrodos. Para relacionar la fracción de vacío α con la admitancia (A , inverso de la impedancia) se utilizan diversas ecuaciones dependiendo del fenómeno que se desea medir, por ejemplo para la dispersión homogénea de burbujas de gas en líquido se utiliza la ecuación 4.10 y para burbujas de líquido dispersas en gas la ecuación 4.11, entre otras.

$$\alpha = \left(\frac{A - A_c}{A + 2A_c} \right) * \left(\frac{\varepsilon_G + 2\varepsilon_L}{\varepsilon_G - \varepsilon_L} \right) \quad (4.10)$$

$$\alpha = \left(\frac{A\varepsilon_L - A_c\varepsilon_G}{A\varepsilon_L + 2A_c\varepsilon_G} \right) * \left(\frac{\varepsilon_L + 2\varepsilon_G}{\varepsilon_L - \varepsilon_G} \right) \quad (4.11)$$

Donde A_c es la admitancia del sistema de medición cuando este es inmerso solamente en la fase líquida, ε_G y ε_L son las conductividades del gas y del líquido

si el fluido es conductivo o la constante dieléctrica del gas y el líquido si el fluido es capacitivo.

4.1.6. Análisis experimental de la datos obtenidos en la medición de la capacitancia en función de la temperatura Al realizarse mediciones experimentales es necesario tener herramientas que permitan analizar los datos obtenidos. Debido a que en este trabajo se busca obtener mediciones de capacitancia en función de la temperatura, es necesario determinar si estos valores varían en función de la temperatura a partir de un análisis de varianza, así como la incertidumbre para conocer la precisión de la medición.

4.1.6.1. Análisis de varianza ANOVA El análisis de varianza ANOVA se realiza con el fin de determinar si los datos obtenidos dependen o no de la temperatura, en otras palabras, sirve para verificar por medios estadísticos si la capacitancia medida cambia o se mantiene constante con la variación de la temperatura.

Para la aplicación de este análisis se realizan una serie de pasos que se explican a continuación para aceptar una de las dos suposiciones planteadas (hipótesis), con un nivel de significancia de $\alpha=0,05\%$, ya sea la primera que enuncia que ningún valor de temperatura afecta el valor de capacitancia o la segunda, donde se expresa que por lo menos un valor de temperatura dará un resultado diferente en la capacitancia.

Para aceptar una de las hipótesis y rechazar la otra se aplicó el ANOVA de un solo factor, debido a que se tomaba la medida de capacitancia solamente al variar la Temperatura dentro de un rango definido (valores entre 5° y 50°C), teniendo en cuenta que es necesario que el experimento sea totalmente aleatorio, que tenga una variable independiente o factor (la temperatura), varios niveles o tratamientos de la variable independiente ($5^{\circ}, 10^{\circ}, 15^{\circ}, 20^{\circ}, 25^{\circ}, 30^{\circ}, 35^{\circ}, 40^{\circ}, 45^{\circ}$ y 50° para las mediciones de aire y CO_2), ningún ruido y que se haya realizado una aplicación aleatoria de los tratamientos.

El análisis de varianza consta de los siguientes pasos:

- Definir el problema a solucionar, el rango de interés, los especímenes de prueba o réplicas y la aleatoriedad de las pruebas

- Seleccionar las variables independientes y el número de tratamientos a variar:
En este trabajo se maneja como variable independiente la temperatura.

El número de tratamientos a variar depende de la prueba realizada siendo 10 para el aire y el CO₂ líquido, 20 para el R410a líquido y 23 para el R410a gaseoso.

- Seleccionar las variables dependientes y sus unidades:

La variable dependiente es la capacitancia con unidades de [pF]

- Seleccionar el diseño experimental que se ajuste al problema o caso:

Se selecciona el diseño completamente aleatorio de un solo factor con las siguientes hipótesis:

H₀: Con un nivel de significancia de $\alpha=0,05\%$ todas las temperaturas darán el mismo resultado en la capacitancia.

H₁: Con un nivel de significancia de $\alpha=0,05\%$ por lo menos un valor de temperatura dará un resultado diferente en la capacitancia

- Ejecutar el experimento

- Calcular la sumatoria y los promedios totales y para cada tratamiento

- Realizar la tabla ANOVA

Tabla 2. Tabla ANOVA

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	σ^2	F calculada	F _{tabla}
Tratamientos	$a - 1$	SCT_r	$\frac{SCT_r}{a - 1}$	$\frac{\sigma_{tratamientos}^2}{\sigma_{error}^2}$	
Error	$a(n - 1)$	$SCT - SCT_r$	$\frac{SCT - SCT_r}{a(n - 1)}$		
Total	$an - 1$	SCT			

Donde a es el número de tratamientos, n el número de réplicas por tratamiento y σ^2 es la varianza. La suma de cuadrados es determinada a partir de las siguientes fórmulas:

$$SCT_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a Y_i^2 - \frac{Y^2}{an} \quad (4.12)$$

$$SCT = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2 - \frac{Y^2}{an} \quad (4.13)$$

Y la F de la tabla se obtiene de la tabla C2 en el ANEXO C entrando por la fila que corresponde al valor de $a(n-1)$ y la columna $(a-1)$.

- Finalmente se compara la Fcalculada y la Ftabla así:

Si $F_{cal} > F_{tabla}$: H_0 se rechaza y H_1 se acepta

Si $F_{cal} < F_{tabla}$: H_0 se acepta y H_1 se rechaza

4.1.6.2. Incertidumbre

Se puede definir la incertidumbre como el intervalo de valores que se pueden obtener al realizar la medición experimental de la capacitancia total de la célula PVT a condiciones específicas (por ejemplo, llena de CO_2 , a una temperatura de $20^\circ C$ y una presión de 1400 psi), en este trabajo se calcula después de

realizar el análisis de varianza debido a que la cantidad de datos a tener en cuenta en su cálculo varía dependiendo de la hipótesis aceptada, por ejemplo, si se acepta la hipótesis H_0 que enuncia que todos los valores de temperatura darán el mismo resultado en la capacitancia, se debe realizar un promedio de todos los datos de medidos, obteniéndose un solo valor de capacitancia para todo el rango de temperatura trabajado y se calcula la incertidumbre para este valor, en caso contrario, donde se acepta la hipótesis H_1 que dice que al menos un valor de temperatura dará un resultado diferente en la capacitancia se debe realizar el cálculo de incertidumbre para cada valor de temperatura en el cual se realizaron mediciones.

A continuación se presentan las ecuaciones a utilizar para calcular el rango de incertidumbre cuando se tienen muestras grandes (número de datos mayor a 30) y muestras pequeñas (número de datos menor a 30), así mismo se presenta la fórmula para calcular la incertidumbre de cálculos realizados a partir de valores con incertidumbre.

- **Cálculo de la incertidumbre para muestras grandes**

Según Navidi (2006), si una muestra aleatoria X_1, \dots, X_n es grande ($n > 30$), tiene una población con media μ y desviación estándar σ , por lo que \bar{X} es aproximadamente normal, el intervalo de confianza 100 (1- α) % para μ es:

$$\bar{X} \pm z_{\frac{\alpha}{2}} \sigma_{\bar{x}} \quad (4.14)$$

Donde $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, siendo n el número de datos. Cuando no se conoce el valor de σ , se puede aproximar al valor de la desviación estándar muestral s.

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}} \quad (4.15)$$

En particular se tiene de la ecuación 4.15 que:

$\bar{X} \pm \frac{s}{\sqrt{n}}$ es intervalo de confianza de 68% para μ

$\bar{X} \pm 1,645 \frac{s}{\sqrt{n}}$ es intervalo de confianza de 90% para μ

$\bar{X} \pm 1,96 \frac{s}{\sqrt{n}}$ es intervalo de confianza de 95% para μ

$\bar{X} \pm 2,58 \frac{s}{\sqrt{n}}$ es intervalo de confianza de 99% para μ

$\bar{X} \pm 3 \frac{s}{\sqrt{n}}$ es intervalo de confianza de 99,7% para μ

- **Cálculo de la incertidumbre de una muestra pequeña de una población**

Según Navidi (2006), si la muestra aleatoria X_1, \dots, X_n es pequeña (por ejemplo $n < 30$) y tiene una población con media μ , se aplica la distribución t de Student con $(n-1)$ grados de libertad obteniendo un intervalo de confianza con nivel de confianza de $100(1-\alpha) \%$ para μ es:

$$\bar{X} \pm t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.16)$$

Donde $t_{n-1, \frac{\alpha}{2}}$ se obtiene de la tabla C.1 del ANEXO C, entrando por la columna correspondiente a $\frac{\alpha}{2}$ y por la fila $(n-1)$, \bar{X} es el valor promedio, s la varianza y n el número de datos.

- **Propagación de incertidumbres**

Algunas magnitudes importantes no pueden ser medidas directamente y es necesario calcularlas a partir de otras magnitudes que pueden ser medidas y varían dentro de un rango conocido como incertidumbre.

Al realizar operaciones con variables que poseen incertidumbre en la medida, se debe tener en cuenta que esta incertidumbre se propaga dependiendo de la

incidencia que tenga esta variable. En este trabajo el cálculo de la propagación de incertidumbres se va a realizar con el software EES que utiliza el método descrito en NIST Technical Note 1297 (Taylor B.N. and Kuyatt, C.E., Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, National Institute of Standards and Technology Technical Note 1297, 1994), donde se asume que las mediciones individuales son al azar y no están correlacionadas, determinando la incertidumbre de la cantidad calculada a partir de la ecuación:

$$U_y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i}\right)^2 U_{X_i}^2} \quad (4.17)$$

Donde Y es la cantidad calculada, $X_1, \dots, X_i, \dots, X_n$ son las variables medidas, U_y la incertidumbre de la cantidad calculada y U_{X_i} la incertidumbre de cada variable medida.

4.2. GENERALIDADES DE LOS FLUIDOS DE PRUEBA:

4.2.1. Aire Es una mezcla homogénea de nitrógeno, oxígeno y otras sustancias como el dióxido de carbono, hidrógeno y gases nobles, cuyas proporciones varían dependiendo de la altitud. Es un fluido incoloro, inodoro e insípido, de menor peso y densidad que el agua.

4.2.2. Dióxido de Carbono, CO₂ Es un gas con fórmula molecular CO₂ cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono. Su punto crítico se encuentra a una presión de 7,2825 [MPa] y temperatura de 304,21 [K] y es caracterizado por tener propiedades químicas inertes, alta disponibilidad, facilidad de manejo y por ser un solvente no inflamable con baja toxicidad.

Es uno de los gases de efecto invernadero (GEI) que ayuda a que la temperatura del planeta sea tolerable y es la primera fuente de carbono para la vida. Por otro

lado, si se tiene un exceso de CO₂ se aumenta el efecto invernadero, incrementando el calor en la tierra debido a la reducción de la emisión de calor hacia el espacio.

Es ampliamente usado en la industria, se puede encontrar como agente extintor en forma de nieve carbónica, en las bebidas carbonatadas para darles efervescencia, como abono en agricultura, como refrigerante en máquinas frigoríficas, como moderador de algunos reactores nucleares, como agente de contraste en Radiología, entre otros.

4.2.3. R410a Es una mezcla azeotrópica de dos gases hidrofluorocarbonados HFC (50% dediflorometano, R32, y 50% de pentafluoroetano R125) utilizada como refrigerante en equipos de aire acondicionado de baja y media potencia. Es un refrigerante que no contribuye a la reducción de la capa de ozono al tener un ODP (potencial de destrucción del ozono) igual a cero, como es un refrigerante HFC su eficiencia frigorífica es igual o superior a un refrigerante HCFC, su GWP (Efecto invernadero directo) es de 1740, prácticamente igual que el del R22 que es 1700 y no es tóxico, explosivo ni inflamable en caso de fugas. Industrialmente se vende bajo las denominaciones comerciales de Forane 410A, Puron, EcoFluor R410, DuPont SUVA 401a, Genetron R410A y AZ-20, y debe ser cargado al sistema de refrigeración en fase líquida debido a que el R32 y el R125 tiene puntos de ebullición diferentes.

4.3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.3.1. Constante dieléctrica del Aire El 1 de julio de 1934 en la Revista APS Journals se publicó un artículo denominado DEPENDENCE OF THE DIELECTRIC COEFFICIENT OF AIR UPON PRESSURE AND FREQUENCY, en el cual A. R. Jordan, James W. Broxon y Frank C. Walz determinaron la constante dieléctrica del aire a presiones de hasta 170 atmosferas (18°C) y frecuencias de hasta 70000 ciclos, utilizando un puente de capacitancia-resistencia que proporciona una protección adecuada de los efectos de los

aislantes sólidos, obteniendo valores para la constante dieléctrica del aire entre 1,000589 y 1,000593 , lo que es menos de 1% considerando que se encuentra dentro del error experimental.

En el artículo denominado THE DIELECTRIC CONSTANT OF AIR AT RADIOFREQUENCIES, desarrollado por L.G. Hector y H. L. Schultz en 1935, se realizó la medición de la constante dieléctrica del aire con una frecuencia de 900.000 ciclos por segundo con el método “heterodyne beat frequency”, obteniendo un valor de $1,00058986 \pm 0,00000050$ a una temperatura y presión normal.

4.3.2. Constante dieléctrica del CO₂ En el artículo publicado en el 2003, DIELECTRIC PERMITTIVITY OF EIGHT GASES MEASURED WITH CROSS CAPACITORS, realizado por J.W. Schmidt y M.R. Moldover, se muestran los datos experimentales obtenidos de la medición de la constante dieléctrica del CO₂ para dos isotermas (0°C y 30°C) variando la presión en el rango de 0 a 7MPa, utilizando un capacitor de cuatro anillos. A partir de los valores de presión y temperatura se puede afirmar que se realizaron mediciones de la constante dieléctrica del dióxido de carbono en estado gaseoso presentando valores entre 1,0000001 y 1,0649073.

En 2004 se publicó un artículo denominado SUPERCRITICAL AND NEAR-CRITICAL CO₂ IN GREEN CHEMICAL SYNTHESIS AND PROCESSING, desarrollado por Eric J, Beckman donde mencionan que la constante dieléctrica del dióxido de carbono es de aproximadamente 1,5 para el estado líquido y en estado supercrítico presenta valores entre 1,1 y 1,5 dependiendo de la densidad.

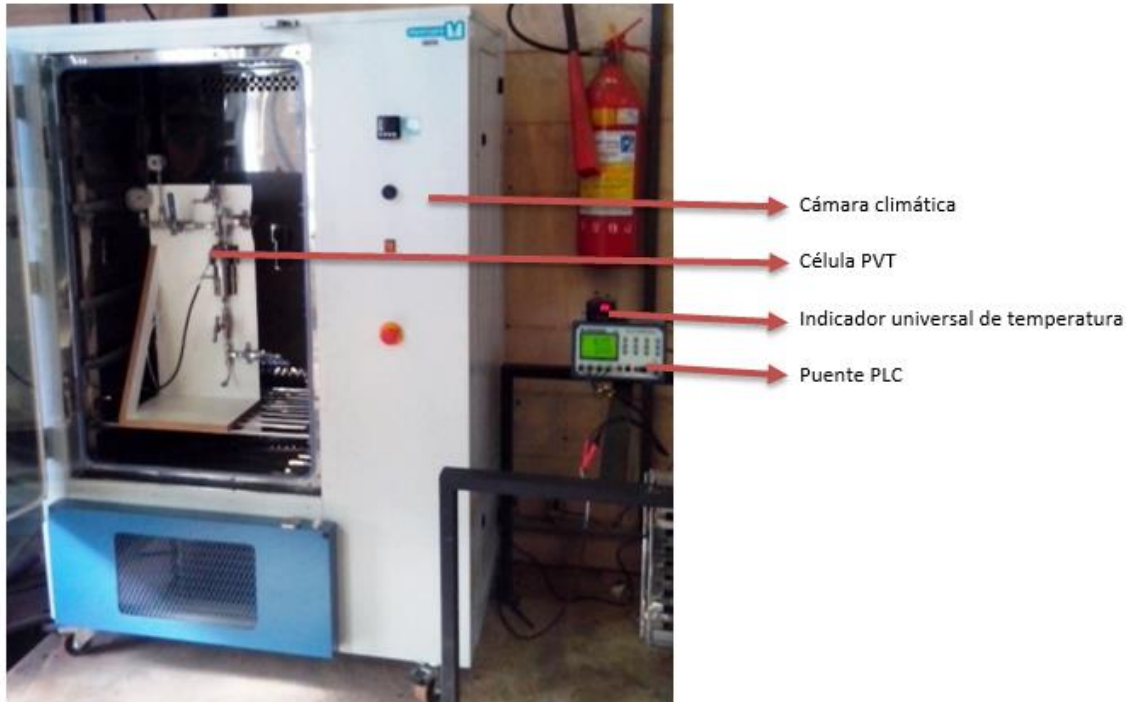
En el artículo MEASURING THE STATIC DIELECTRIC CONSTANTS OF PURE CARBON DIOXIDE AND CARBON DIOXIDE MIXED WITH ETHANOL AND TOLUENE AT ELEVATED PRESSURES, desarrollado por A. Wesch, N. Dahmen, y K.H. Ebert en 2010, se presentan las mediciones de la constante dieléctrica estática del CO₂ tanto en estado líquido como en estado gaseoso. Se realizaron las mediciones para tres isotermas 293 K, 313 K y 336 K variando la

presión desde 0,1 MPa hasta 30 MPa obteniendo para el CO₂ gaseoso valores de la constante dieléctrica de 1,0 hasta 1,09 y para el CO₂ líquido valores desde 1,52 hasta 1,60.

4.3.3. Constante dieléctrica del R410a En el artículo denominado DIELECTRIC CONSTANT OF THE NEARLY AZEOTROPIC MIXTURE R410, desarrollado por F.E. Brito, A.N. Gurova, U.V. Mardolcar y C.A. Nieto de Castro en el 2000, se presentan los datos de la constante dieléctrica del R410a en estado líquido en función de la presión y temperatura entre 2 a 16 [Mpa] y 217 a 304 [K] respectivamente, con intervalos de temperatura de 10[K], usando un método de capacitancia directa. Los valores de la constante dieléctrica en función de la temperatura varían entre 20 y 7, con una repetitividad estimada de $\pm 0,01\%$ y una incertidumbre de $\pm 0,1\%$

5. MONTAJE EXPERIMENTAL Y MODO DE MEDIDA A UTILIZAR

Figura 3. Montaje experimental identificando sus partes

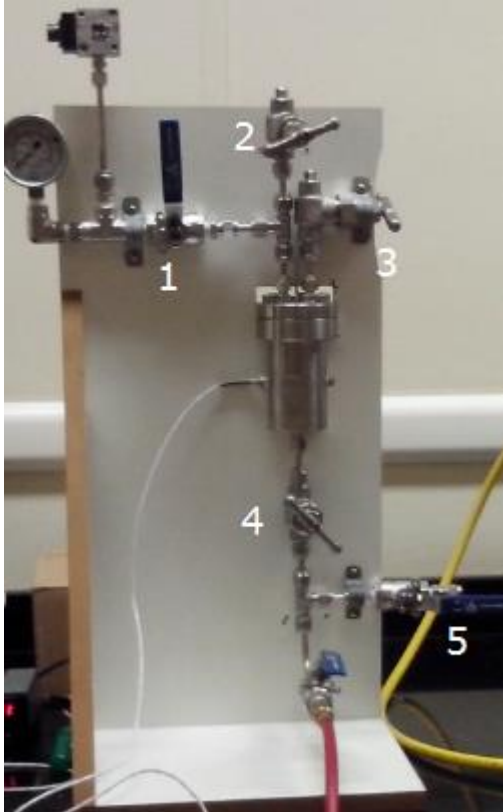


5.1. ELEMENTOS DEL MONTAJE EXPERIMENTAL

El montaje experimental consta de 4 elementos principales que se pueden identificar en la Figura 3, y dos elementos secundarios que son la bomba de alta presión y el manifold para carga de refrigerante utilizados en el proceso de llenado de la célula.

5.1.1. Célula PVT

Figura 4. Célula PVT con las válvulas numeradas



La célula PVT recibe su nombre, gracias a que permite obtener medidas de presión y temperatura a un volumen específico contante, además de eso al poseer dos electrodos posibilita la realización de medidas de capacitancia total.

Cuenta con una termocupla que permite conocer la temperatura del fluido que se encuentra en el interior de la célula, así mismo dispone de un manómetro hermético con escala de 600 psi (si se desea trabajar con presiones mayores a este valor se recomienda cerrar la válvula 1, ver figura 4) para realizar la medidas de presión, por otro lado cuenta con un electrodo en su interior aislado del cuerpo de la célula (que actúa como un segundo electrodo, siendo el primero el cuerpo de la célula). Al estar los dos electrodos en contacto con el fluido de prueba (material dieléctrico) se puede obtener una medida de capacitancia.

5.1.2. Cámara Climática La cámara climática es un equipo de laboratorio cuya función es permitir la realización de pruebas en condiciones ambientales controladas, específicamente, la cámara climática utilizada permite mantener la temperatura estable en un rango de 0° a 60°C durante el tiempo necesario para que el fluido dentro la célula PVT pueda alcanzar la temperatura deseada.

La cámara climática posee un gabinete de acero 1020 con tratamiento anticorrosivo y pintura electrostática en epoxi, una unidad de refrigeración con compresor hermético y sistema de ventilación de aire forzado, para el control de la temperatura cuenta con un sensor tipo PT100, revestido con una varilla rígida de AISI304, un microprocesador PID con indicación digital y un sistema de seguridad para la temperatura con alarma audiovisual y apagado automático para temperaturas de 2°C por debajo y por encima del set-point mínimo y máximo respectivamente.

En la figura 5 se presenta la cámara climática utilizada la cual es de la marca Marconi, modelo MA1415/300/E, configurada sobre pedido a partir del modelo MA1415/780.

Figura 5. Cámara climática



5.1.3. Indicador Universal de temperatura El indicador universal se utiliza para presentar el valor de temperatura medido por la termocupla localizada dentro de la célula PVT.

Está compuesto por un display donde se puede visualizar el valor de temperatura y una serie de botones para su calibración.

Figura 6. Indicador Universal marca NOVUS modelo N1040i



5.1.4. Puente RCL El puente RCL permite realizar medidas de capacitancia a valores de voltaje y frecuencia dentro del rango de 50mV hasta 1V y 100 Hz hasta 200KHz respectivamente en configuración serie o paralelo, logrando medir valores de capacitancia entre 0.003 pF y 80.00 mF y visualizarlas en el display.

Figura 7. Puente RCL auto balanceado de la marca BK Precisión, modelo 889A



5.1.5. Bomba de Alta Presión La bomba de Alta Presión tiene como función elevar la presión del CO₂ y del R410a para poder realizar el llenado de la célula con estos fluidos en estado líquido. Al trabajar en un rango de presión y temperatura de 10 a 7500 psi y 5 a 40°C respectivamente, es apta para la realización del llenado de CO₂ a 20°C y 1400 psi y del R410 a 20°C y a 890 psi.

Figura 8. Bomba de Teledyne ISCO modelo 260 D con Accesorios

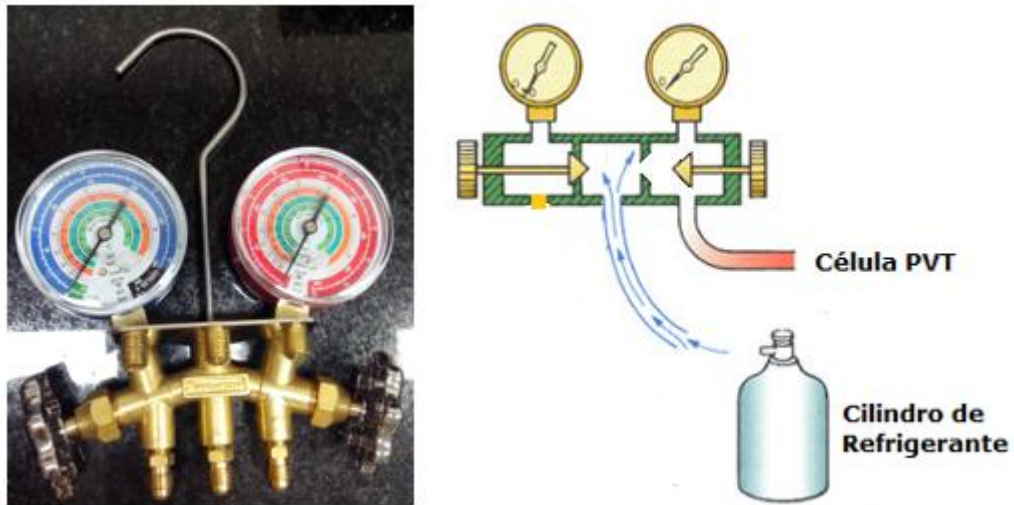


Fuente: TELEDYNE ISCO SYRINGE PUMPS. Technical Reference. 260D High Pressure Syringe Pump. Lincoln – Nebraska, E.U, 2014

5.1.6. Manifold de dos vías para carga de refrigerante Su función es permitir el paso del R410a desde el cilindro hasta la célula de pruebas, posibilitando de esta manera realizar el llenado de la célula con R410 en estado gaseoso a la presión del cilindro que contenía el refrigerante.

El manifold consta de dos manómetros, uno de alta y uno de baja que alcanzan una presión de 0 a 800 de color rojo y de -30 a 500 psi de color azul respectivamente.

Figura 9. Manifold de dos vías para carga de refrigerante

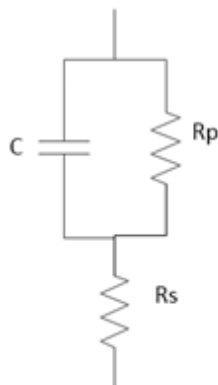


Fuente: JOHNSON, Bill. Btu Buddy Notebook. New York: Cengage Learning, 2009. p. 32. modificada por el autor.

5.2. MODO DE MEDICIÓN

En el mundo real no se tiene cargas puramente resistivas o capacitivas, motivo por el cual el modelo eléctrico de un capacitor real se representa fácilmente como una combinación de cargas resistivas y capacitivas en serie o en paralelo, previendo pérdidas por la resistencia del cable de conexión y por conductividad en el dieléctrico.

Figura 10. Modelo de un capacitor real



Dependiendo del valor de la capacitancia a medir y la frecuencia de excitación para la medición, una de las dos resistencias puede ser despreciada generando dos modos de medida.

Dado que la constante dieléctrica se va a determinar a partir de medidas de capacitancia, es importante conocer los modos de medición que tiene el instrumento de medida (puente RCL), los cuales son el modo de medida en serie (C_s) y el modo de medida en paralelo (C_p) para escoger el que mejor se adapte al experimento.

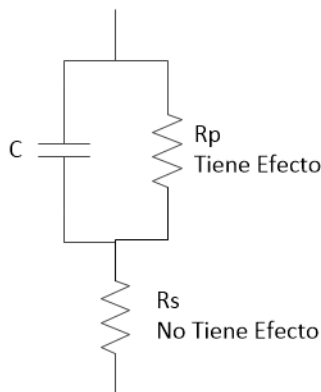
Debido a que se espera obtener medidas de capacitancia del orden de los pF, a continuación se presentan las características de cada uno para conocer cuál de los dos es el adecuado para realizar la medición.

Es importante resaltar que para simplificar el manejo matemático, cálculos y análisis es conveniente trabajar con impedancia en el modo de medida en serie y con admitancia (recíproco de la impedancia) en el modo de medida en paralelo.

5.2.1. Modo de medida en Paralelo (C_p) Se utiliza para medir pequeños valores de capacitancia del objeto de estudio, en otras palabras, valores elevados de impedancia, debido a que estas dos magnitudes son inversamente proporcionales.

En este modo de medida el valor de la reactancia capacitiva X_c es elevado (por ser inversamente proporcional a la capacitancia) en comparación con el valor de pérdida R_s , pudiéndose despreciar este último. Así mismo, el valor de R_p será significativo y se debe tener en cuenta en los cálculos.

Figura 11. Esquema del modelo eléctrico de un capacitor real indicando la resistencia que tiene efecto en el modo de medida en Paralelo (Cp)



Teniendo:

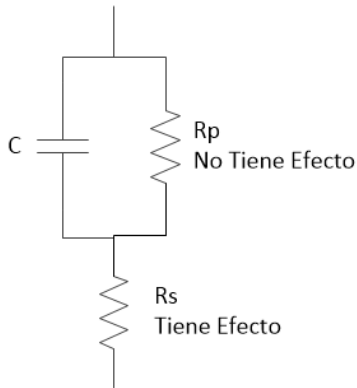
$$y = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{jX_c} = G + jB \quad (5.1)$$

Donde y es la admitancia, R_p el valor de la resistencia en paralelo, G es la conductancia (inverso de la resistencia), B , la susceptancia (que puede ser capacitiva o inductiva) y X_c , la reactancia capacitiva dada por la fórmula:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (5.2)$$

5.2.2. Modo de medida en Serie (Cs) Se utiliza para medidas de capacitancia altas del objeto de estudio, donde el valor de la reactancia capacitiva X_c es bajo y el valor de R_s significativo, pudiéndose despreciar R_p debido a que existe un valor mayor de corriente.

Figura 12. Esquema del modelo eléctrico de un capacitor real indicando la resistencia que tiene efecto en el modo de medida en Serie (Cs)



Teniendo:

$$z = R_s + jX_c \quad (5.3)$$

$$z = R_s + j \frac{1}{2\pi f C} \quad (5.4)$$

Donde z es la impedancia, R_s el valor de la resistencia en serie y X_c la reactancia capacitiva.

5.2.3. Modo de medida utilizado Como se puede observar en la tabla 3, para medidas de capacitancias e impedancia del orden de pF y KΩ respectivamente, a una frecuencia de 200 KHZ, se debe utilizar el modo de medida en paralelo.

Tabla 3. Resumen de los Modos de Medida

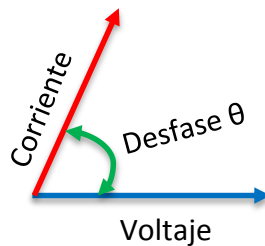
Modo de Medida	Valor de capacitancia medido	Frecuencia de medición
En paralelo Cp	Desde algunos pF hasta algunos nF	Hasta 1Mhz
En serie Cs	Por encima de decenas de nF	Hasta 1MHz

6. CARACTERIZACIÓN DE LA CÉLULA PVT

El valor la constante dieléctrica de cada una de las fases de un fluido como el R410a se obtiene a partir de la medida de la capacitancia de un circuito RC formado por la célula PVT que actúa como capacitor y el R410a confinado dentro de ella que actúa como dieléctrico. Esta medida de capacitancia se puede obtener gracias a que el puente RCL permite excitar el circuito RC con un señal de voltaje alterno de frecuencia conocida y a su vez medir el valor del voltaje, la corriente (utilizando un amperímetro y un voltímetro que se pueden observar en la figura 15), y el desfase entre estos dos. Cuando se conoce el voltaje V_{rms} , la corriente I_{rms} , su desfase θ y la frecuencia de excitación f es posible determinar el valor de la impedancia Z a partir de la siguiente fórmula:

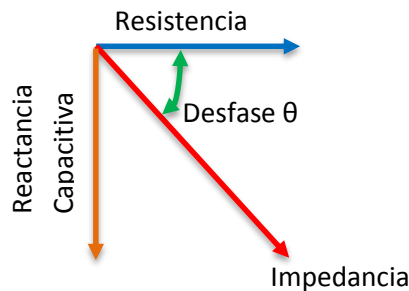
$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{Z} \text{sen}(2 * \pi * f * t + \theta) \quad (6.1)$$

Figura 13. Desfase entre la corriente y el voltaje



De igual forma al conocer el valor de impedancia se puede obtener el valor de la capacitancia C , a partir de la determinación de la reactancia capacitiva X_c así:

Figura 14. Gráfica de la Impedancia, resistencia y reactancia capacitiva

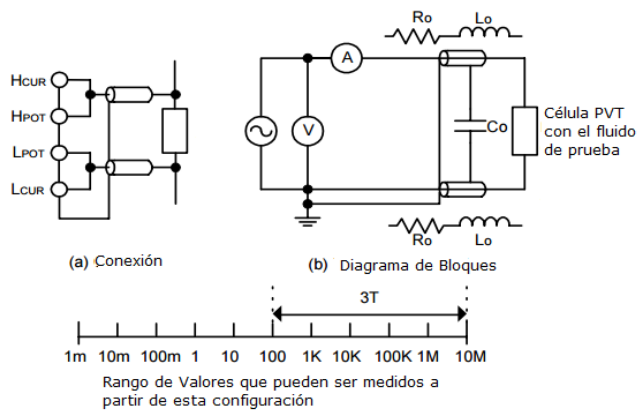


$$X_c = Z * \text{sen}(\theta) \quad (6.2)$$

$$X_c = \frac{1}{2 * \pi * f * C} \quad (6.3)$$

Se utilizó una configuración de 3 cables para realizar la medición con el puente RCL, la cual reduce los efectos de la capacitancia parasita debida al instrumento y del cable de medida, proporcionando una lectura más precisa de los pequeños valores de capacitancia a medir. La figura 15 muestra la configuración mencionada y el rango de valores que se puede medir a partir de esta configuración, donde Ro, Lo y Co corresponden a las parasitas resistivas, inductivas y capacitivas de la punta de prueba.

Figura 15. Configuración 3 cables del puente RCL y rango de valores a medir

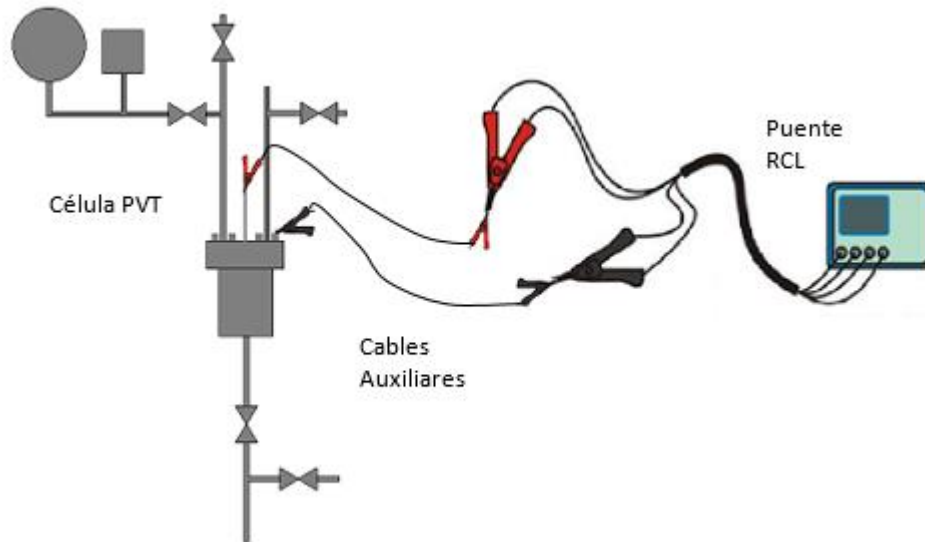


Fuente: BK PRECISION ELECTRONIC TEST INSTRUMENTS. Technical Reference. Bench LCR/ESR Meter with Component Test. Model # 889A. Yorba Linda – California, E.U, 2004. Modificado por el autor

La medida de capacitancia del puente RCL además de la configuración de los cables depende de varios factores como la frecuencia, la configuración de la célula y la longitud de los cables auxiliares utilizados. Según lo informado en el manual de operación generalmente se utilizan frecuencias de 1 KHz o mayores para medir capacitancias del orden de los 0,01µF o menores, como la medida

de capacitancia esperada es del orden de los pF se recomienda utilizar la frecuencia más alta ofrecida por el puente RCL que es de 200KHz

Figura 16. Conexiones entre la célula y el puente RCL



La incidencia de la configuración de la célula y la longitud de los cables auxiliares, depende de la célula y los cables utilizados durante la medición, dado que son parámetros experimentales se debe realizar una calibración para obtener estos dos parámetros.

Según A.Wesch et al. (2010) para poder hacer la calibración se considera que la capacitancia total medida por el puente RCL se divide en dos partes, siendo la primera la capacitancia parasita C_p (incidencia de los cables de medición en la medida de capacitancia) y la segunda que es el producto de la constante dieléctrica del fluido con el que se ha llenado la célula ε y un factor de forma F_F , que hace referencia a la configuración geométrica de la célula PVT utilizada.

$$C_T = C_p + \varepsilon * F_F \quad (6.4)$$

Para poder determinar la constante dieléctrica a partir de la medida de la capacitancia total es necesario determinar los valores experimentales de las

constantes C_p y F_F junto con sus incertidumbres a partir de dos fluidos de calibración.

6.1. DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO DE CONSTRUCCIÓN DE LA CÉLULA PVT (F_F) Y DE LA CAPACITANCIA PARASITA (C_p)

Según S. Feja (2012) la célula de testes debe ser calibrada al vacío y llena de un fluido de calibración. Debido a que no se disponían de los elementos necesarios para generar vacío en la célula esta se calibró con dos fluidos a los que se les conocía su constante dieléctrica el aire y el CO₂ líquido

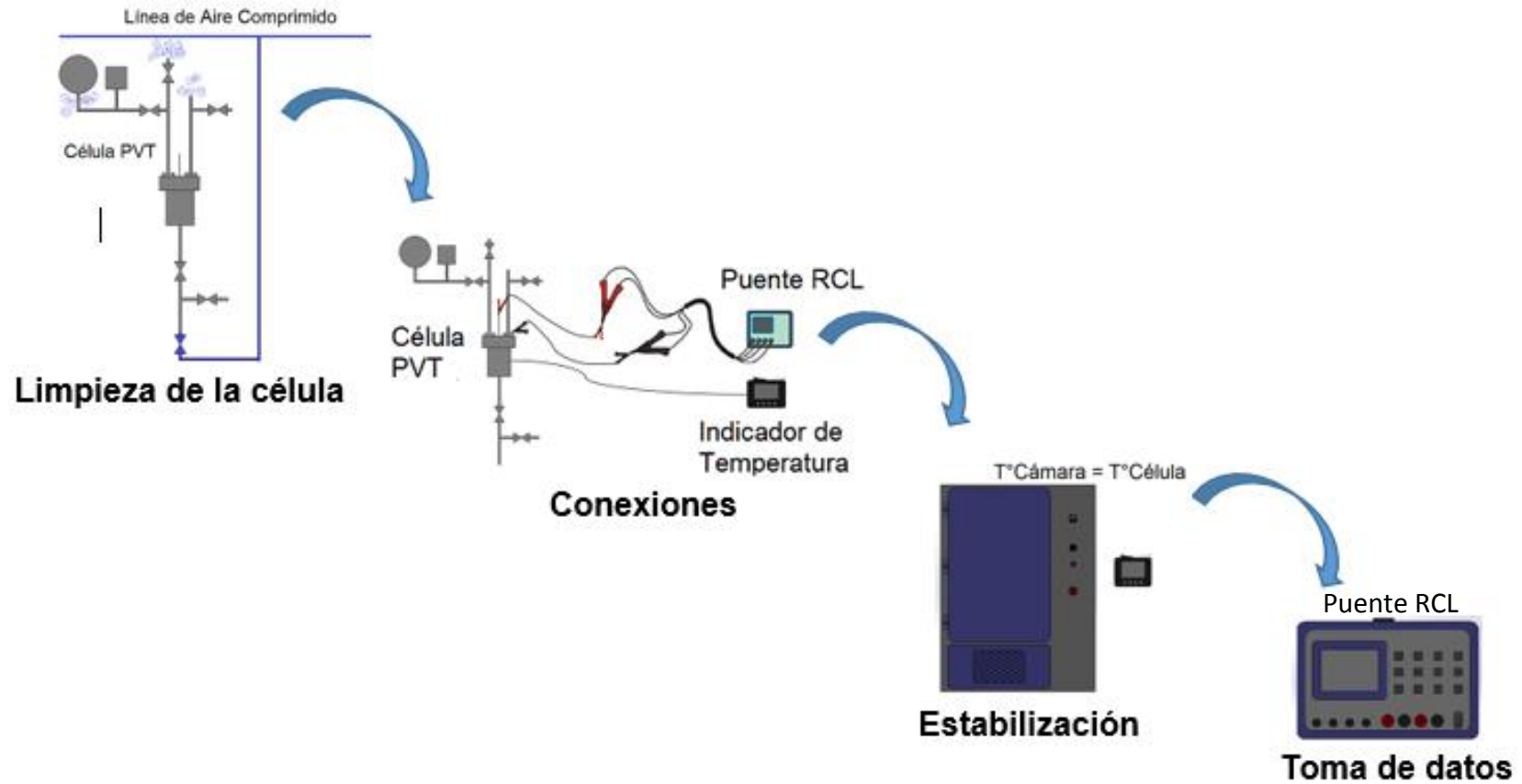
Según L.G. Hector y H. L. Schultz (1935) la constante dieléctrica del aire es $1,00058986 \pm 0,00000050$ y según A. Wesch et al (2010) la del CO₂ líquido es $1,52 \pm 0,0225$ a una presión y temperatura de 10,8 MPa y 293 K respectivamente. Se toma este valor de la constante dieléctrica del dióxido de carbono líquido porque el llenado de la célula se realizó a una presión y temperatura de 9,65 MPa y 293,15 K.

Dado que la constante dieléctrica del aire y del CO₂ líquido son conocidas se puede determinar el valor de F_F y C_p a partir de la medida de la capacitancia total de la célula llena con cada uno de los fluidos, para lo cual es necesario realizar estas mediciones.

6.1.1. Mediciones de capacitancia total de la célula llena con aire y co₂ en estado líquido Para realizar las mediciones de la capacitancia total es necesario llenar de la célula con los fluidos de prueba, realizar las conexiones de los sistemas de medición, esperar el tiempo necesario para que la célula alcance el equilibrio termodinámico con la cámara climática y tomar el valor de capacitancia visualizado en el display del puente RCL, a continuación se enuncia cómo se realizó este procedimiento para cada uno de los dos fluidos de calibración:

6.1.1.1. Aire

Figura 17. Procedimiento del llenado y toma de datos para el Aire



6.1.1.2. CO₂ en estado líquido

Figura 18. Procedimiento de llenado de la célula PVT y toma de datos con CO₂ líquido

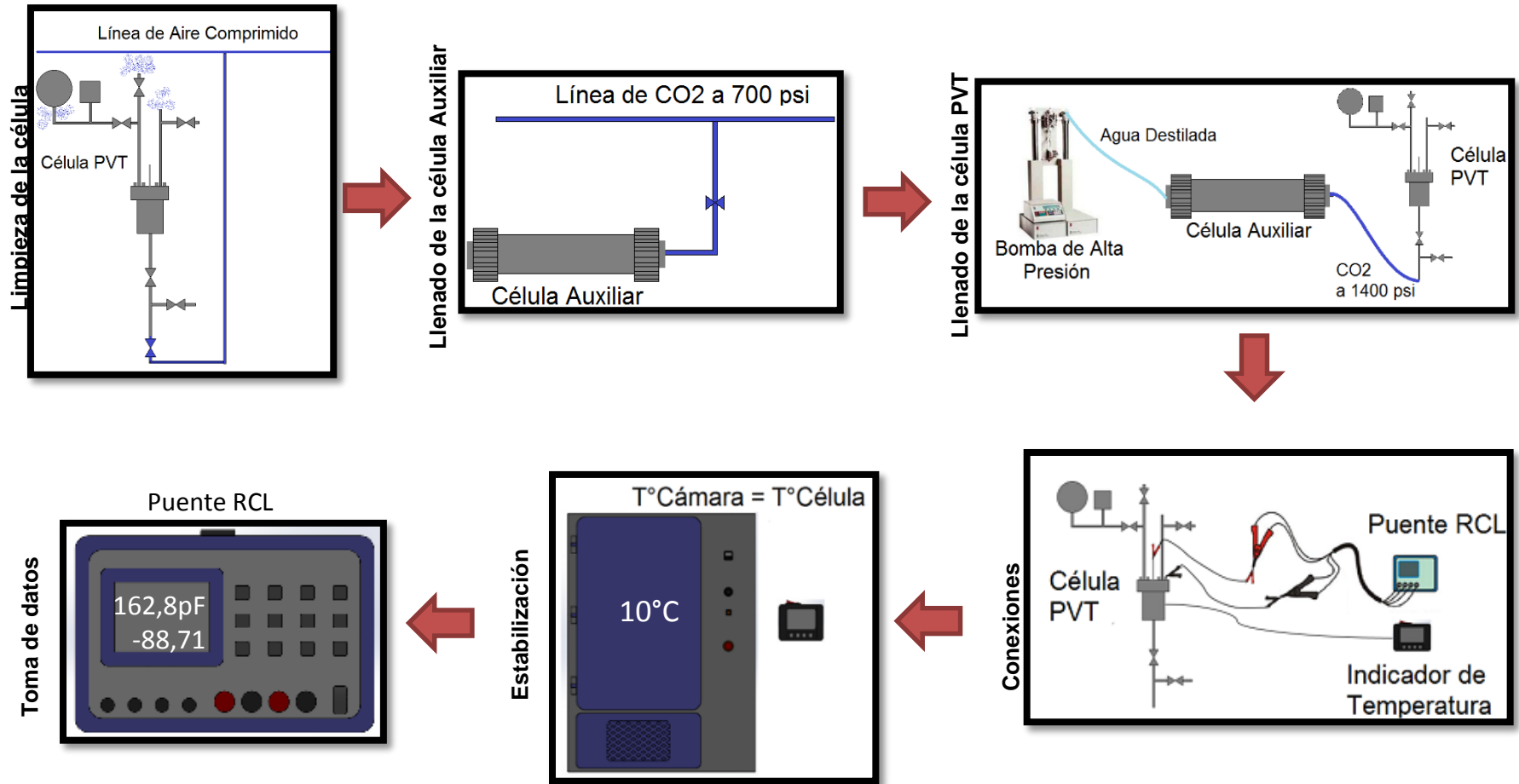


Figura 19. Montaje experimental con esquema para el llenado de la célula PVT con CO₂



6.1.2. Verificación de la fase del CO₂ líquido Cuando se llena la célula con CO₂ en estado líquido al 100 %, se puede presentar una pequeña evaporación dentro de la célula alcanzándose a formar burbujas de gas debido a la variación de la presión y temperatura durante el proceso de medición, motivo por el cual se debe verificar que el electrodo interno de la célula esté totalmente inmerso en el líquido. Para garantizar esto se debe determinar termodinámicamente el volumen de líquido presente dentro de la célula, y este volumen debe ser mayor al volumen total, que corresponde a la suma del volumen efectivo de la célula y el volumen de aseguramiento, así:

$$V_{\text{líquido}} > V_{\text{Total}} \quad (6.5)$$

$$V_{\text{Total}} = V_{\text{célula}} + V_{\text{aseguramiento}} \quad (6.6)$$

Donde $V_{\text{célula}}$ es un parámetro fijo calculado a partir de las dimensiones internas de la célula:

$$V_{célula} = \frac{\pi}{4 \cdot 1000 \frac{mm^3}{mL}} [(\phi_{ext}^2 - \phi_{in}^2) * A_I + \phi_{ext}^2 * (A_T - A_I)] \quad (6.7)$$

Cuyas dimensiones se pueden obtener de la figura 20:

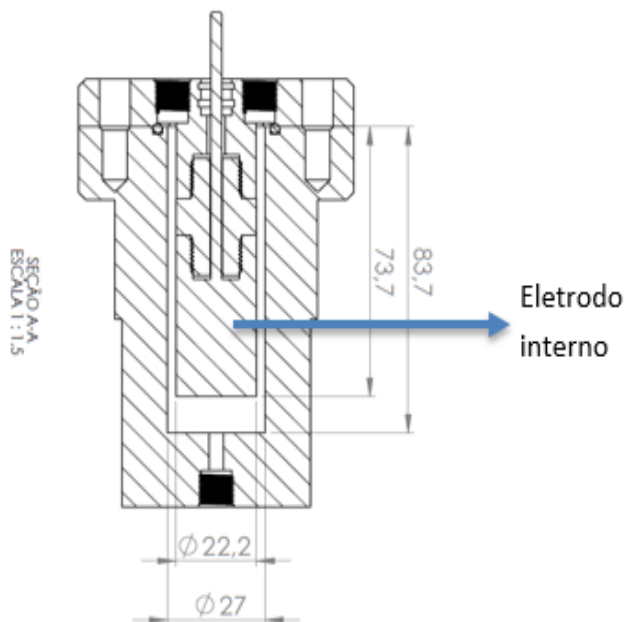
$$\phi_{in} = 22,2[mm]$$

$$\phi_{ext} = 27[mm]$$

$$A_T = 83,7[mm]$$

$$A_I = 73,7[mm]$$

Figura 20. Corte transversal de la célula PVT con dimensiones en mm



Fuente: Grupo de investigación 2PFG modificado por el autor.

Así mismo, el volumen de aseguramiento es el volumen de las conexiones inferiores si se supone que las conexiones superiores e inferiores es la suma del volumen de las conexiones inferiores y una pequeña parte del volumen de las conexiones superiores como se puede observar en la figura 21 y se calcula a partir de la mitad de la diferencia del volumen total y el volumen efectivo de la célula más un delta de volumen referente a las conexiones superiores, siendo el

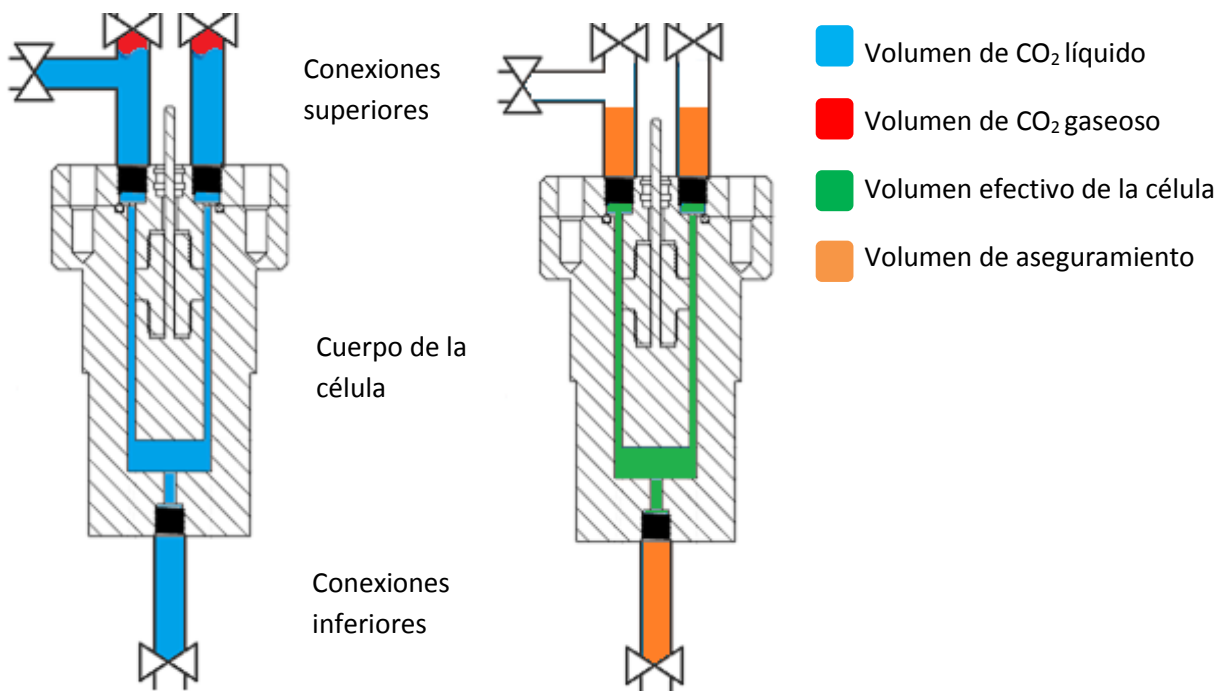
volumen total de la célula un parámetro conocido igual a 31,94[mL], que corresponde al volumen de la célula más el volumen de las conexiones

$$V_{aseguramiento} = \frac{V_{TC} - V_{célula}}{2} + \Delta V_{sup} = \frac{31,94[mL] - 19,39[mL]}{2} + \Delta V_{sup} \quad (6.8)$$

$$V_{aseguramiento} = 7,78[mL] + \Delta V_{sup} \quad (6.9)$$

Para facilidad en los cálculos se toma un $V_{aseguramiento} = 10[mL]$ con un ΔV_{sup} de 2,22[mL], de tal manera que se garantice que el nivel de líquido esté en las conexiones superiores de la célula y el electrodo esté totalmente inmerso en CO₂ en estado líquido.

Figura 21: Volúmenes de la célula

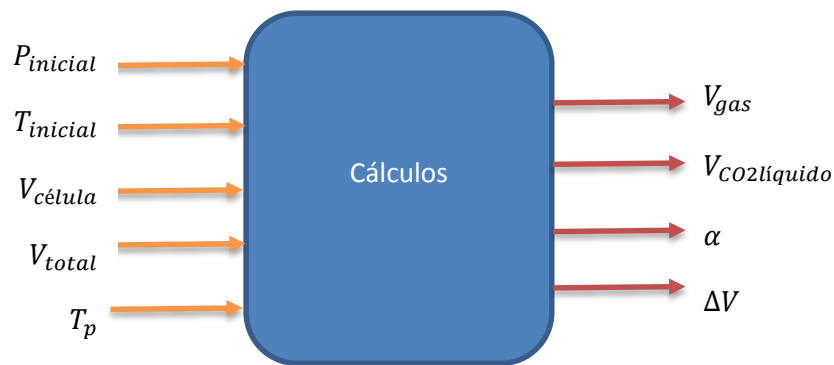


6.1.2.1. Cálculo del Volumen del CO₂ líquido para determinar el Delta de volumen entre el volumen de líquido y el volumen total A continuación encuentra el procedimiento para calcular el volumen ocupado por la fase líquida $V_{líquido}$ y por la fase gaseosa V_{gas} , la fracción de vacío α y la diferencia de

volumen total ΔV , presentándose los resultados en el ANEXO B tabla B1. Todos los valores de propiedades termodinámicas se calcularon con el software Refprop.

En la figura 22 se presenta una caja negra donde se resaltan como variables de entrada las magnitudes conocidas y como variables de salida las magnitudes que se desean conocer después de realizar el cálculo del volumen del CO₂ líquido dentro de la célula.

Figura 22. Caja negra con las variables de entrada y salida



Para poder determinar estas variables de salida es necesario realizar una serie de cálculos que se encuentran registrados en la tabla 5. En la tabla 4 se definen las variables utilizadas para facilitar la realización de los cálculos.

Tabla 4: Definición de la nomenclatura a utilizar en el cálculo tipo

v_i	Volumen específico a las condiciones iniciales
P_i	Presión de llenado
T_i	Temperatura de llenado
Refprop	Los cálculos se realizan con el software Refprop
$masa_{CO_2}$	Masa en kilogramos del CO ₂ dentro de la célula
v_c	Volumen interno de la célula
P_p	Presión actual del CO ₂
T_p	Temperatura actual del CO ₂
X_p	Calidad de la mezcla actual del CO ₂
$masa_{gas}$	Masa en Kg de la fase gaseosa del CO ₂

Tabla 4. Continuación

$masa_l$	Masa en Kg de la fase líquida del CO ₂
v_{lsat}	Volumen del líquido saturado a T_p
v_{gsat}	Volumen del vapor saturado a T_p
V_{gas}	Volumen ocupado por la fase gaseosa dentro de la célula
$V_{liquido}$	Volumen ocupado por la fase líquida dentro de la célula
α	Fracción de vacío
V_{total}	Es la suma del volumen de aseguramiento y l volumen de la célula sin conexiones

Tabla 5: Pasos para realizar el cálculo del Delta de volumen entre el volumen te líquido y el volumen total

Pasos	Fórmula	Cálculos	Resultados
1	$v_i = f(P_i, T_i)$	Refprop	$v_i = 0,001174 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$
2	$masa_{CO_2} = \frac{v_c}{v_i}$	$masa_{CO_2} = \frac{0,00003193[m^3]}{0,001174 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]}$	$masa_{CO_2} = 0,0272 [Kg]$
3	$P_p = f(v_i, T_p)$	Refprop	$P_p = 596,63 [psi]$
4	$X_p = f(v_i, T_p)$	Refprop	$X_p = 0,0064051$
5	$masa_{gas} = X_p * masa_{CO_2}$	$masa_{gas} = 0,0064051 * 0,0272 [Kg]$	$masa_{gas} = 0,00017423 [Kg]$
6	$masa_l = masa_{CO_2} - masa_{gas}$	$masa_l = 0,0272 [Kg] - 0,00017423 [Kg]$	$masa_{liquido} = 0,02703 [Kg]$
7	$v_{lsat} = f(T_p)$	Refprop	$v_{lsat} = 0,0011278 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$
8	$v_{gsat} = f(T_p)$	Refprop	$v_{gsat} = 0,00883350 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$
9	$V_{gas} = v_{gsat} * masa_{gas}$	$V_{gas} = 0,00883350 \left[\frac{m^3}{Kg} \right] * 0,00017423 [Kg]$	$V_{gas} = 1,452 * 10^{-6} [m^3]$
10	$V_{liquido} = v_{lsat} * masa_{liquido}$	$V_{liquido} = 0,00883350 \left[\frac{m^3}{Kg} \right] * 0,02703 [Kg]$	$V_{liquido} = 3,048 * 10^{-5} [m^3]$
11	$\alpha = \frac{V_{gas}}{V_{liquido} + V_{gas}}$	$\alpha = \frac{1,452 * 10^{-6} [m^3]}{3,048 * 10^{-5} [m^3] + 1,452 * 10^{-6} [m^3]}$	$\alpha = 0,05$
12	$\Delta V = V_{liquido} - V_{total}$	$V = 3,048 * 10^{-5} [m^3] - 2,939 * 10^{-5} [m^3]$	$\Delta V = 1,09 * 10^{-6} [m^3]$

Como se puede observar en la fila 12 de la tabla 5, el delta de volumen dio un valor positivo, garantizando que la célula y las conexiones inferiores tienen CO₂ en estado líquido y no una mezcla de líquido y gas.

6.1.3. Datos obtenidos a partir de las mediciones de capacitancia total de la célula llena de aire y CO₂ líquido Para cada fluido se tomaron 20 medidas de capacitancia variando la temperatura de 5 en 5°C desde 5°C hasta 50°C

registrando 2 valores para cada temperatura las cuales se pueden encontrar en el ANEXO A, tabla A1 para el aire y tabla A2 para el CO₂ líquido.

En la tabla 6 se muestra el promedio de las medidas de capacitancia para cada temperatura y cada uno de los fluidos.

Ejm: Para el aire a una temperatura de 5°C se obtuvieron las siguientes medidas de capacitancia:

$$Medida1 = 160,6[pF]$$

$$Medida2 = 161,9[pF]$$

Y un promedio de:

$$Promedio = \frac{Medida1+Medida2}{2} = 161,25[pF] \quad (6.10)$$

Tabla 6. Medidas de Capacitancia Promedio para cada Temperatura del Aire y del CO₂ líquido

Temperatura [°C]	Capacitancia Aire [pF]	Capacitancia CO₂ [pF]
5	161,25	170,26
10	162,65	170,21
15	163,05	170,89
20	162,60	170,36
25	161,60	169,87
30	161,80	170,06
35	162,30	169,97
40	162,90	169,71
45	162,95	169,51
50	162,85	170,52

6.1.4. Análisis de los datos obtenidos El Análisis de los datos obtenidos consta de dos partes, en la primera se verifica si las medidas de capacitancia dependen de la variación de la temperatura a partir de un análisis de varianza y en la segunda se calcula el rango de incertidumbre de la medida.

6.1.4.1. Análisis de Varianza Con este análisis se busca verificar la hipótesis de que la medida de capacitancia no varía al cambiar la temperatura.

A continuación se presenta una serie de pasos que corresponden al análisis de varianza para el Aire, no se presenta uno para CO₂ líquido debido a que se realiza de la misma manera. Los resultados de este análisis están tabulados ANEXO D, tabla D1 para el Aire y D2 para el CO₂ en estado líquido.

Cálculo tipo para el Aire:

- **Problema a solucionar:**

La capacitancia medida varía significativamente con la temperatura

- **Rango de interés:**

5-50°C

- **Especímenes de prueba o réplicas:**

2

- **Orden de las pruebas:**

Aleatorio

- **Variable Independiente:**

Temperatura

- **Tratamientos:**

5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 °C

- **Variable dependiente:**

Capacitancia

- **Unidades de la variable dependiente:**

[pF]

- **Selección del diseño experimental que se ajuste al problema o caso:**

Diseño completamente aleatorio de un solo factor.

- **Hipótesis:**

H₀: Con un nivel de significancia de $\alpha=0,05\%$ todas las temperaturas darán el mismo resultado en la capacitancia.

H₁: Con un nivel de significancia de $\alpha=0,05\%$ por lo menos un valor de temperatura dará un resultado diferente en el capacitancia

- **Datos del experimento:**

Para el aire se registraron 20 medidas (2 para cada valor) variándose la temperatura conforme la tabla A1 del ANEXO A.

- **Cálculo de las sumas y de los promedios para cada tratamiento y globales**

Ejemplo: Para una temperatura de 5°C se tienen dos valores de capacitancia 160,6 [pF] y 161,9 [pF], obteniendo una suma y un promedio de:

$$suma = 160.6[pF] + 161.9[pF] = 322,5 [pF] \quad (6.11)$$

$$promedio = \frac{160.6[pF]+161.9[pF]}{2} = 161,25 [pF] \quad (6.12)$$

La tabla 7 muestra los resultados de la suma y el promedio para cada uno de los tratamientos.

Tabla 7. Suma y promedio para ANOVA del aire

Tratamiento	Suma [pF]	Promedio [pF]
5,00	322,5	161,25
10,00	325,3	162,65
15,00	326,1	163,05
20,00	325,2	162,6
25,00	323,2	161,6
30,00	323,6	161,8
35,00	324,6	162,3
40,00	325,8	162,9
45,00	325,9	162,95
50,00	325,7	162,85
Total	3247,9	162,395

• **Tabla ANOVA:**

Se calculan los valores de la Tabla ANOVA del aire a partir de las fórmulas de la Tabla 2, siendo:

$$a = 10$$

$$n = 2$$

Donde la F de la tabla se obtiene de la tabla C2 en el ANEXO C entrando por la fila que corresponde al valor de 10 y la columna 9 para un nivel de significancia de $\alpha=0,05$ y la suma de cuadrados de los tratamientos y totales se calculan a partir de las ecuaciones 4.12 y 4.13 respectivamente, obteniendo los resultados registrados en la tabla 8.

Tabla 8. ANOVA del aire

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	σ^2	Fcal	Ftabla
Tratamientos	9	7,22	0,80	1,96	3,02
Error	10	4,10	0,41		
Total	19	11,33			

- **Comparación de las F y resultado del análisis de varianza ANOVA**

F de la tabla es mayor a la F calculada, por lo tanto, se acepta la hipótesis H_0 que enuncia que con un nivel de significancia de $\alpha=0,05$ todos los valores de temperatura darán el mismo resultado en la capacitancia. En otras palabras la medida de capacitancia no depende de la temperatura.

6.1.4.2. Cálculo de las capacitancias promedio e incertidumbre de la medición

- **Promedios**

Se obtiene el valor promedio de 162,6 [pF] y 170,13 [pF] a partir de la suma de las medidas de capacitancia para el aire y para el CO_2 de la tabla A1 del ANEXO A dividida entre 20 (número de datos).

- **Incertidumbre**

Para calcular la incertidumbre de la medida se utiliza la ecuación 4.16 y no la 4.14 debido a que es una muestra pequeña con un número de datos de $n=20$.

$$\bar{X} \pm t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6.13)$$

Donde $t=2,262$ se obtiene de la tabla C1 en el ANEXO C, para un nivel de significancia de $\alpha=0,05\%$, en la fila $n-1=9$ y la columna $\frac{\alpha}{2}=0,025$, s es el valor de la desviación estándar muestral y n el número de datos de la muestra.

Resolviendo la ecuación para el aire se obtiene:

$$\bar{X} \pm t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} = \bar{X} \pm t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} * \frac{\sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}} \quad (6.13)$$

$$\bar{X} \pm t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} = 162,4 \pm 2,262 * \frac{0,77}{\sqrt{10}}$$

$$\bar{X} \pm t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} = 162,4 \pm 0,391 [pF]$$

Realizando el mismo procedimiento para el CO₂ líquido tenemos:

$$170,13 \pm 0,282 [pF]$$

6.1.5. Cálculo de los valores de Cp y F_F Resolviendo la ecuación 6.4. para los dos fluidos de prueba teniendo en cuenta la incertidumbre, obtenemos los siguientes resultados con ayuda del software EES

$F_F = 14,88 \pm 1,13$		
$C_{ta} = 162,4 \pm 0,391$	$\partial \alpha / \partial C_{ta} = -1,925$	44,37 %
$C_{tc} = 170,1 \pm 0,282$	$\partial \alpha / \partial C_{tc} = 1,925$	23,08 %
$ea = 1,001 \pm 5,000E-07$	$\partial \alpha / \partial ea = 28,65$	0,00 %
$ec = 1,52 \pm 0,0225$	$\partial \alpha / \partial ec = -28,65$	32,54 %

CP = 147,5±1,421		
Cta = 162,4±0,391	$\partial CP / \partial C_{ta} = 2,926$	64,80 %
Ctc = 170,1±0,282	$\partial CP / \partial C_{tc} = -1,926$	14,61 %
ea = 1,001±5,000E-07	$\partial CP / \partial e_a = -43,55$	0,00 %
ec = 1,52±0,0225	$\partial CP / \partial e_c = 28,67$	20,59 %

Finalmente tenemos un valor de F_F y C_p de:

$$F_F = 14,88 \pm 1,13 [pF]$$

$$C_p = 147,5 \pm 1,421 [pF]$$

6.2. VALIDACIÓN DE LA ECUACIÓN DEL MODELO ELÉCTRICO DE LA CÉLULA PVT

Para la validación del modelo eléctrico se utilizó la siguiente regresión lineal que se obtuvo a partir de los valores de constante dieléctrica en función de la presión y temperatura obtenidos por F.E. Brito et al. (2000), valores que se pueden observar en la tabla E1 del ANEXO E.

$$\varepsilon = 1,15 + 4,81 * 10^{-4} * P - 2,91 * 10^{-8} * P^2 - 1,05 * T + 2,47 * 10^{-4} * T^2 + 3,69 * 10^{-6} * P * T \quad (6.14)$$

Los resultados de la constante dieléctrica obtenidos a partir de la ecuación anterior para las presiones y temperaturas trabajadas se encuentran en la Tabla E2 del ANEXO E. Así mismo, en la tabla E3 del ANEXO E se pueden observar los valores de la constante dieléctrica del R410a que están dentro del rango de presión y temperaturas trabajado en el artículo, los cuales son calculados a partir de la ecuación del modelo eléctrico de la célula PVT.

7. DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DIELECTRICA DEL R410A

Para determinar la constante dieléctrica del R410a se debe realizar el llenado de la célula con el R410a tanto en estado líquido como en estado gaseoso, verificar que solo se está realizando la medición de capacitancia de una sola fase y no de una mezcla, analizar los datos obtenidos para saber si los valores de capacitancia dependen de la temperatura para saber si se debe calcular un valor de constante dieléctrica (junto con el rango de incertidumbre) para cada valor de temperatura a la que se realizó la medición o se puede obtener un solo valor de constante dieléctrica para todo el rango de temperatura.

7.1. PROCEDIMIENTO PARA EL R410a EN ESTADO LÍQUIDO Y GASEOSO

7.1.1. R410a en estado líquido

El llenado de la célula con R410a estado líquido se realiza de la misma forma como se realizó el llenado de la célula con CO₂ en estado líquido (descrito en el numeral 6.1.1.2), diferenciándose en que la presión de llenado no es 1400 psi como en el caso del CO₂ sino 890 psi.

7.1.2. R410a en estado gaseoso

Figura 23: Procedimiento del llenado y toma de datos con R410a en estado gaseoso

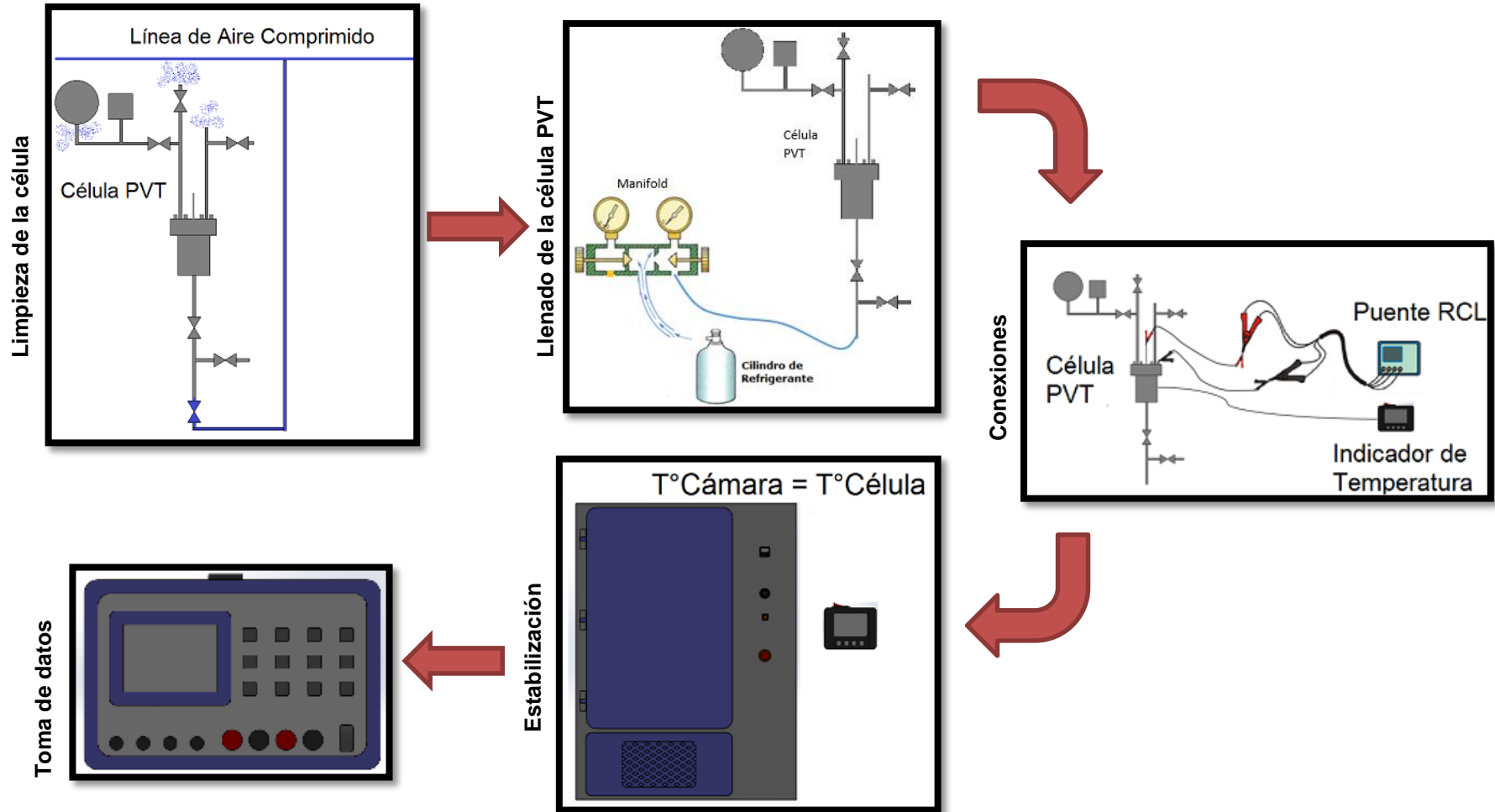
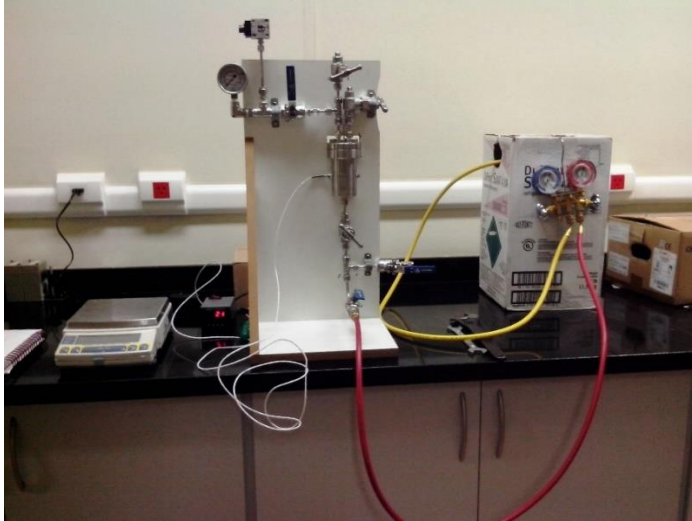


Figura 24. Montaje experimental para el llenado de la célula PVT con R410a en estado gaseoso



7.2. VERIFICACIÓN DE LA FASE A LA CUAL SE REALIZA LA MEDICIÓN

Para verificar que se están realizando medidas de R410a líquido y R410a gaseoso se realiza el mismo procedimiento descrito en el numeral 6.1.2. para el R410a en estado líquido, para el R410a en estado gaseoso se presenta una pequeña variación en el cálculo del delta de volumen que ya no se calcula con el volumen de aseguramiento sino con el volumen de la zona sin inserto (espacio entre la cara inferior del electrodo interno y el fondo de la célula) que según las dimensiones de figura 20 es igual a:

$$V_{sinserto} = 5,726 [mL]$$

Obteniendo que el nuevo delta de volumen será:

$$\Delta V = V_{sinserto} - V_{liquido} \quad (7.1)$$

De tal manera que el delta de volumen de positivo si el líquido no está en contacto con el electrodo y no tiene incidencia en la medida.

Los resultados de la verificación de la fase para las medidas de R410a en estado líquido y R410a en estado gaseoso se encuentran en el ANEXO B en las tablas B2 y B3 respectivamente.

7.3. DATOS OBTENIDOS PARA LAS MEDICIONES DE CAPACITANCIA DE LA CÉLULA LLENA DE R410a EN ESTADO LÍQUIDO Y EN ESTADO GASEOSO.

Los datos obtenidos en la medición de capacitancia total de la célula cuando esta estaba llena de R410a en estado líquido y en estado gaseoso se encuentran registrados en las tablas A3 y A4 del ANEXO A respectivamente.

7.4. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS

Para el R410a se va a realizar el mismo análisis que se realizó para el CO₂ en estado líquido en el numeral 6.1.4. obteniendo que para el R410a en estado líquido (resultados en la Tabla D3 del ANEXO D) que la constante dieléctrica es dependiente de la temperatura, motivo por el cual se debe calcular el valor de la constante dieléctrica (junto con su rango de incertidumbre) para cada valor de temperatura al cual se realizó la medida de capacitancia.

Para el R410a en estado gaseoso se puede afirmar a partir del resultado del análisis de varianza (tabla D4 del ANEXO D) que el valor de la constante dieléctrica no depende de la presión ni de la temperatura, por lo tanto se obtuvo un solo valor de la constante dieléctrica a partir de la ecuación del modelo eléctrico de la célula PVT utilizando como capacitancia total el promedio de todos los valores de capacitancia obtenidos. El resultado se puede observar en la Tabla F2 del ANEXO F.

7.5. CÁLCULO DE LA CONSTANTE DIELECTRICA DEL R410A LÍQUIDO

A continuación se muestra el cálculo tipo de la constante dieléctrica del R410a en estado líquido para una temperatura de 6,2°C en el cual se determina el rango de incertidumbre para el promedio de las dos medidas de capacitancia obtenidas

en este valor de temperatura y el cálculo de la constante dieléctrica utilizando la ecuación 6.4. y la propagación de incertidumbre. Este cálculo se realizó para cada uno de los valores de temperatura a los cuales se realizaron las mediciones de capacitancia, registrándose los resultados en la Tabla F1 del ANEXO F

Para el cálculo del rango de incertidumbre de la medida de capacitancia se debe tomar un valor de $t = 12,706$, de la tabla C1 en el ANEXO C, para un nivel de significancia de $\alpha = 0,05\%$, en la fila $n-1=1$ y la columna $\frac{\alpha}{2} = 0,025$, y un valor promedio de las dos medidas de capacitancias obtenidas a esta temperatura:

$$\bar{X} = \frac{313,1 + 312,0}{2} = 312,55$$

Resolviendo la ecuación 4.16 para calcular la incertidumbre de la capacitancia total se obtiene un valor de capacitancia de $312,55 \pm 6,99 [pF]$ así:

$$\bar{X} \pm t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} = \bar{X} \pm t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} * \frac{\sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}}$$

$$\bar{X} \pm t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} = 312,6 \pm 12,706 * \frac{0,778}{\sqrt{2}}$$

$$\bar{X} \pm t_{n-1, \frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} = 312,55 \pm 6,99 [pF]$$

Utilizando EES y aplicando la ecuación 6.4 se determina la constante dieléctrica para el R410a a una temperatura de $6,2 \text{ }^\circ\text{C}$ teniendo en cuenta la propagación de incertidumbre obteniendo un valor de $11,09 \pm 0,9692$

$F_F = 14,88 \pm 1,13$	$\partial e / \partial F_F = -0,7454$	75,54 %
$C_p = 147,5 \pm 1,421$	$\partial e / \partial C_p = -0,0672$	0,97 %
$CT = 312,6 \pm 6,99$	$\partial e / \partial CT = 0,0672$	23,49 %
$e = 11,09 \pm 0,9692$		

7.6. CÁLCULO DE LA CONSTANTE DIELECTRICA DEL R410A EN ESTADO GASEOSO

Para el cálculo de la incertidumbre de la capacitancia total medida no se puede utilizar la distribución t de student debido a que $n > 30$. Como la muestra es de $n = 46$, según Navidi (2006) se utiliza la ecuación 4.14 para calcular el intervalo de confianza de la medida así:

$$\bar{X} \pm z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} = \bar{X} \pm z_{\frac{\alpha}{2}} * \frac{\sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}}}{\sqrt{n}}$$

$$\bar{X} \pm z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} = 163,97 \pm 1,96 * \frac{1,28}{\sqrt{46}}$$

$$\bar{X} \pm z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} = 163,97 \pm 0,37 [pF]$$

Utilizando el valor de capacitancia total de $163,97 \pm 0,37$ y utilizando el software EES para el cálculo de la propagación de incertidumbres, se obtiene la constante dieléctrica del R410a en estado gaseoso con intervalo de confianza de $1,107 \pm 0,1296$

$F_F = 14,88 \pm 1,13$	$\partial e / \partial F_F = -0,07439$	42,05 %
$C_p = 147,5 \pm 1,421$	$\partial e / \partial C_p = -0,0672$	54,27 %
$CT = 164 \pm 0,37$	$\partial e / \partial CT = 0,0672$	3,68 %
$e = 1,107 \pm 0,1296$		

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS:

Inicialmente se planteó realizar el cálculo de los valores de C_p y α a partir de las mediciones de la capacitancia total de la célula llena con aire y con agua. Debido a que el agua es un fluido resistivo se obtenían valores de impedancia muy pequeños con valores de capacitancia negativos que no eran adecuados para realizar la calibración. El mismo efecto pasó al tomar medidas de capacitancia con agua destilada y agua des-ionizada dando paso a escoger un fluido que fuera capacitivo como el aire y tuviera una constante dieléctrica conocida. El fluido escogido fue el CO_2 en estado líquido cuya constante dieléctrica es diferente a la constante dieléctrica del aire (motivo por el cual no se escogió el CO_2 gaseoso que tiene una constante dieléctrica prácticamente igual a la del aire) gracias a su disponibilidad dentro de las instalaciones de la UNICAMP.

8.1. ANÁLISIS DEL ESTADO TERMODINÁMICO DEL CO_2 Y EL R410A.

Al realizar el llenado de la célula con el fluido de prueba CO_2 líquido, R410a líquido y R410a gaseoso, era necesario garantizar que el fluido estuviera en el estado termodinámico deseado (no tener un estado donde se presente una mezcla de fases) para realizar una medición acertada de la capacitancia de cada fase.

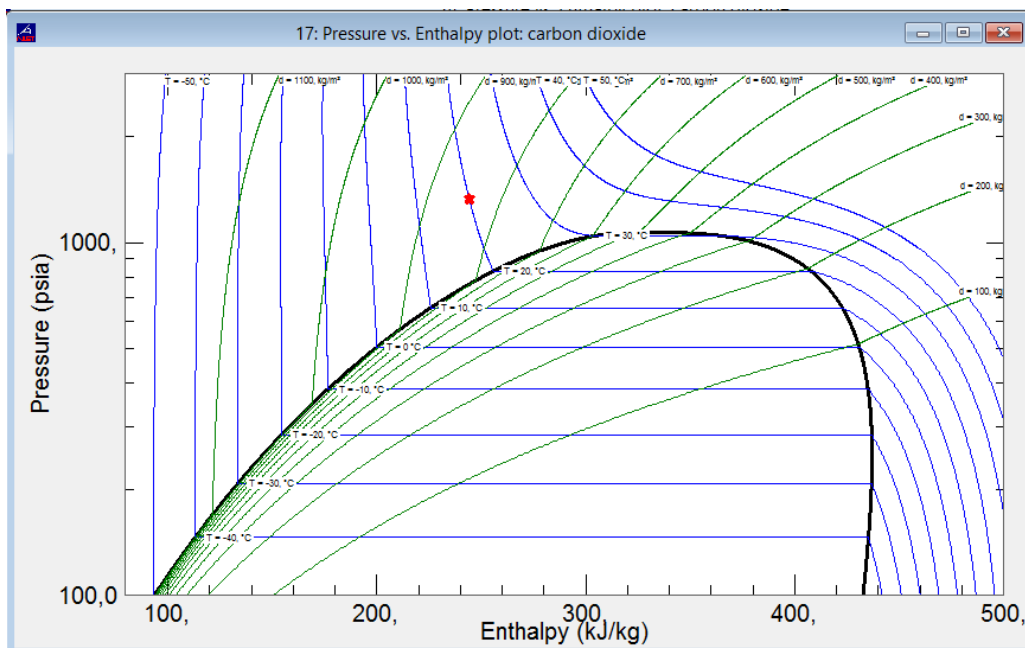
Para garantizar que el CO_2 estuviera en estado líquido, se monitorizó la temperatura y la presión de llenado, 20°C y 1400 psi respectivamente. Esta presión se escogió porque para un rango en el que podía variar la temperatura ambiente (20 y 30°C) el CO_2 estaría en estado líquido, en la gráfica de Presión vs Entalpia obtenida con el software Refprop (figura 26) se puede observar que a esta presión y temperatura (y en valores cercanos a esta temperatura) el CO_2

se encuentra en estado líquido, así mismo en la figura 26 se puede observar que en este estado termodinámico el CO₂ se encuentra como líquido sub-enfriado.

Figura 25. Estado termodinámico inicial del CO₂

	Temperature (°C)	Pressure (psia)	Volume (m³/kg)	Quality (kg/kg)
1	20,000	1400,0	0,0011738	Subcooled

Figura 26. Gráfica de Presión vs Entalpia del CO₂ resaltando el estado termodinámico al cual se realizó el llenado

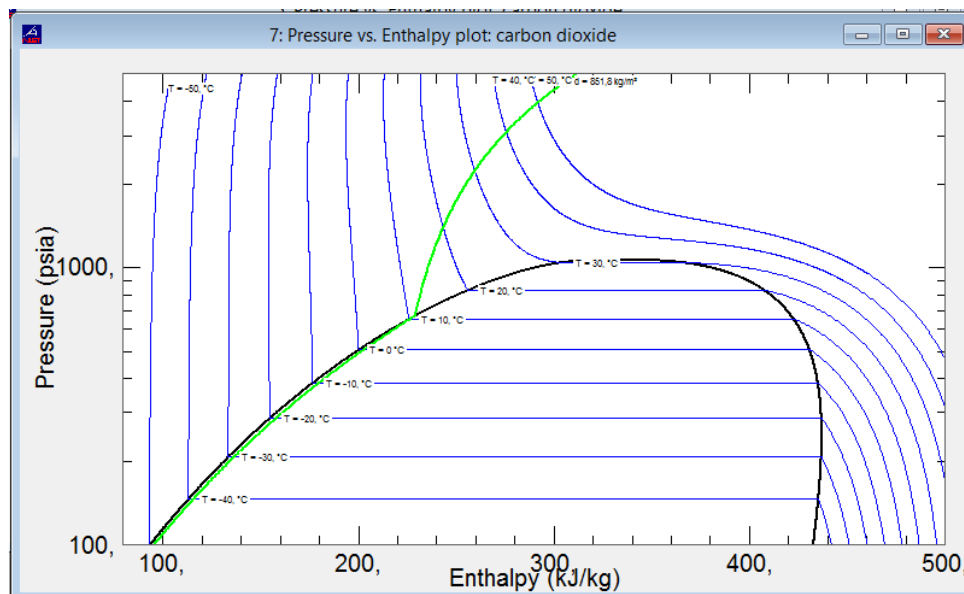


Como no se agrega ni se retira masa y el volumen dentro de la célula no varía, todas las mediciones se hacen a volumen específico constante de $0,0011738 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$ lo que equivale a una densidad de $851,9 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$. Si se traza una

línea de densidad constante (línea verde en la figura 27) sobre la gráfica P vs h se puede observar que para temperaturas entre 10° y 50°C el CO₂ va a estar en estado líquido. Así mismo, para temperaturas menores a 10°C la línea de densidad constante cruza la línea de saturación entrando al domo, lo cual indica que se empieza a formar una pequeña cantidad de gas dentro de la célula. Para garantizar que esta pequeña cantidad de CO₂ en estado gaseoso no afecte la medida de capacitancia se realizaron los cálculos que se encuentran enunciados en el numeral 6.1.2. donde se obtuvo como resultado que la cantidad de gas que se formó quedó en las conexiones superiores de la célula y no tuvo contacto con el electrodo.

Dado que se tiene formación de gas es necesario darle tiempo suficiente a la célula para estabilizarse (para cada dato se esperó un tiempo de 4 horas aproximadamente), de tal manera que si en cualquier momento se forma una pequeña burbuja de gas, ella tenga tiempo de posicionarse en la parte superior (conexiones) y no afecte el resultado de la medición.

Figura 27. Línea de volumen específico constante sobre la gráfica de P vs h del CO₂



Como se puede ver en la tabla B1 del Anexo B para temperaturas mayores a la temperatura crítica $T_c = 30,98 [^{\circ}C]$ el estado del CO_2 da indefinido si se calcula a partir de las propiedades termodinámicas, en otras palabras para temperaturas mayores a T_c no se tiene certeza si el fluido está solamente en estado gaseoso o en estado líquido ni se conoce la calidad en caso de haber una mezcla. Si se analizan los datos obtenidos en Tabla A2 del ANEXO A se puede observar que no hubo una variación en la medida de capacitancia para temperaturas mayores a T_c esto puede tener explicación en que el CO_2 siempre se mantuvo en la parte izquierda del domo y nunca se pasó por el punto crítico ubicado a una presión y temperatura de 5511.4 [psi] y 30,98 [$^{\circ}C$] respectivamente lo cual permitió que el CO_2 se siguiera comportando como líquido sub-enfriado.

Las medidas de la capacitancia para el R410a también se realizaron a volumen específico constante (densidad constante). Como se ha mencionado en capítulos anteriores la temperatura y presión de llenado fue de 20 [$^{\circ}C$] y 890 [psi] para el R410a en estado líquido y 23[$^{\circ}C$] y 225[psi] para el R410a en estado gaseoso. Como se puede observar en la figura 28, siendo el punto 1 el estado inicial del R410a líquido y el punto dos el del gaseoso, el llenado de la célula se hizo con líquido sub-enfriado y vapor sobrecalentado.

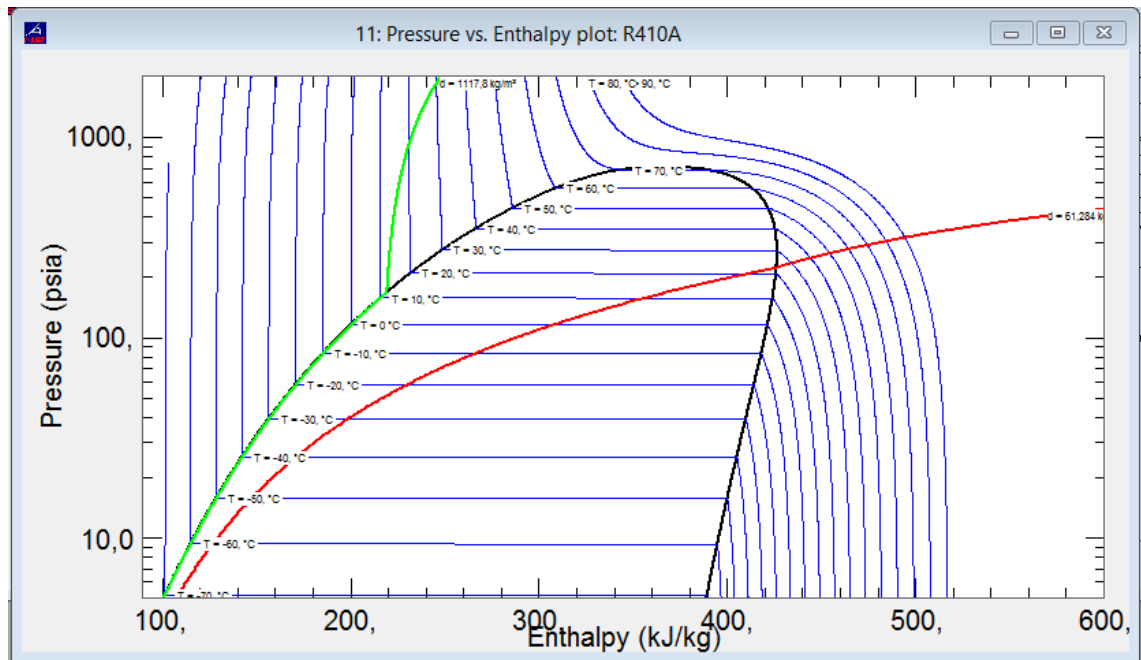
Figura 28. Estado termodinámicos iniciales del R410a líquido y gaseoso

	Temperature ($^{\circ}C$)	Pressure (psia)	Density (kg/m 3)	Volume (m 3 /kg)	Quality (kg/kg)
1	20,000	890,00	1117,8	0,00089465	Subcooled
2	23,000	225,00	61,284	0,016318	Superheated

A medida que se iba variando la temperatura, el estado termodinámico del R410 líquido cambiaba siguiendo la línea verde en la figura 29 (Línea de volumen específico constante) Si se sigue el recorrido por esta línea se puede observar que para temperaturas entre 12,5° y 50°C aproximadamente el R410a se encuentra en la zona de líquido sub-enfriado entrando al domo a temperaturas menores a 12,5°C, así mismo la gráfica indica que el vapor generado es muy pequeño debido a que la línea verde está muy cercana a la línea de líquido saturado, esto se puede corroborar con los resultados de los cálculos presentados en la tabla B2 del ANEXO B, donde las fracciones de vacío no superan el 0,3 (en otras palabras dentro de la célula no alcanza a haber un 3% de contenido de volumen de gas).

Lo mismo sucede con el R410a en estado gaseoso, si se observa la línea roja de la figura 29 se puede deducir que para temperaturas mayores a una temperatura de aproximadamente 23°C el R410a se presenta como vapor sobrecalentado y para temperaturas menores a este valor entra en el domo empezando a formar líquido. Como se puede evidenciar en la tabla B3 del ANEXO B no se alcanza a formar más de un 3% de volumen de líquido dentro de la célula, esto no se puede evidenciar claramente en la figura 29 debido a que el eje X de la gráfica está en unidad de masa [KJ/Kg] y, por ejemplo, a una temperatura de 10 °C aproximadamente el 30% de la masa de R410a está en estado líquido. Para entender mejor este fenómeno se debe tener en cuenta el volumen ocupado por unidad de masa del líquido y de vapor saturado (volumen específico) que para una temperatura de 10 °C el cual es de $0,008862 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$ y $0,02386 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$ respectivamente. Como se puede ver el vapor saturado ocupa mayor volumen por unidad de masa que el líquido saturado motivo por el cual el 30% de masa de líquido no alcanza a ocupar más del 2% del volumen interno total de la célula PVT.

Figura 29. Líneas de densidad constante sobre la gráfica de P vs h del R410a



8.2. ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS DE CAPACITANCIA

Según el análisis ANOVA cuyo cálculo tipo se encuentra en el numeral 6.1. y los resultados en el ANEXO D, se puede afirmar que la medida de capacitancia para el aire, el CO_2 en estado líquido y el R410a en estado gaseoso no varían significativamente con la temperatura, en otras palabras sin importar la temperatura a la que se tome la medición el valor de la capacitancia va a ser aproximadamente el mismo como se puede observar en las figuras 31, 32 y 33 donde al graficar la medida de capacitancia en función de la temperatura se obtiene una línea horizontal.

Figura 30. Gráfica de la Capacitancia promedio del Aire vs la Temperatura de medición

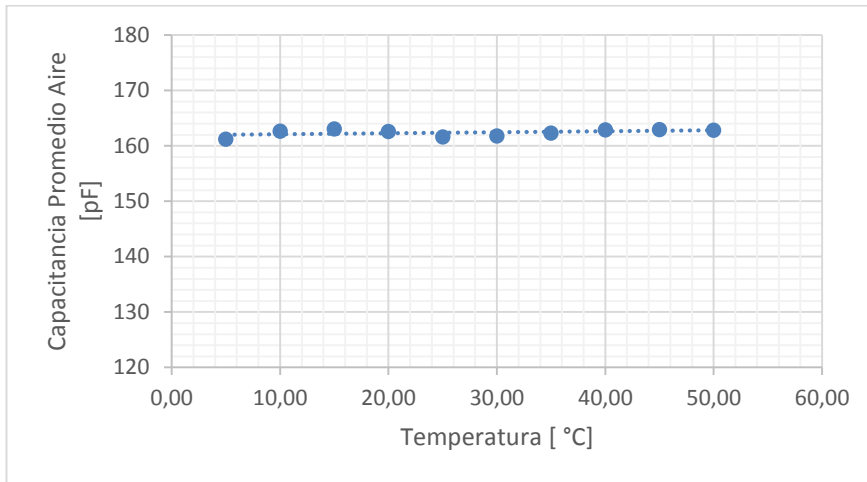


Figura 31. Gráfica de la Capacitancia promedio del CO2 líquido vs la Temperatura de medición

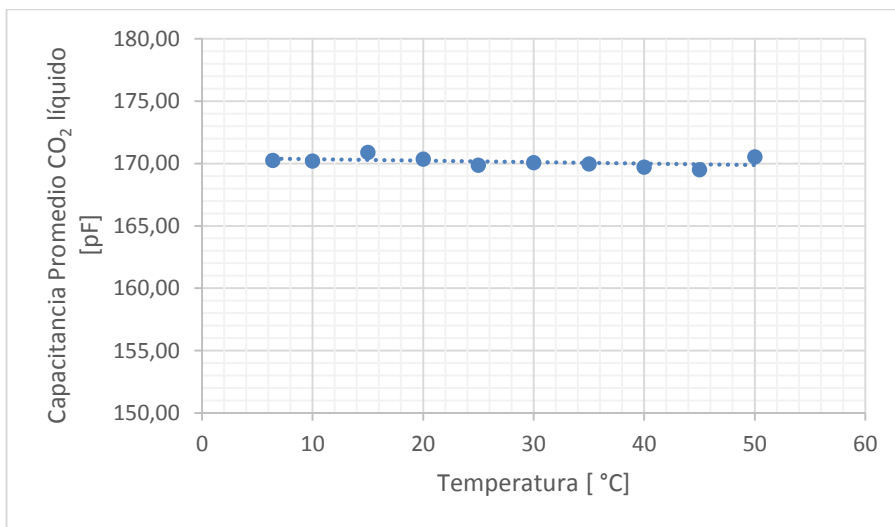
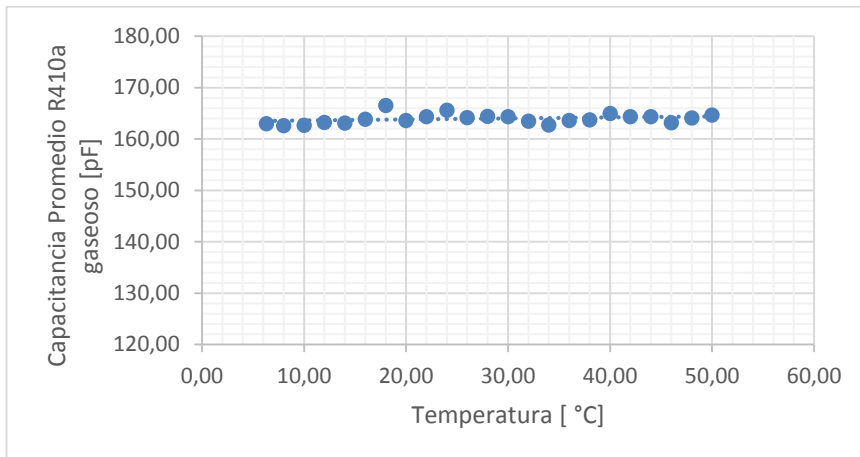
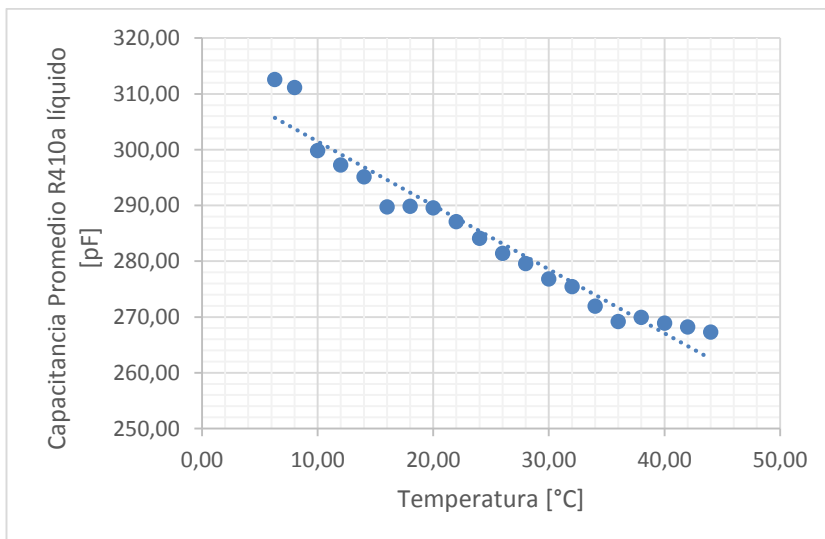


Figura 32. Gráfica de la Capacitancia promedio del R410a en estado gaseoso vs la Temperatura de medición



Otro fenómeno acontece con el R410a en estado líquido, como se puede observar en la gráfica 34 el valor de la capacitancia disminuye a medida que la temperatura aumenta, razón por la cual del análisis de varianza ANOVA se obtuvo como resultado que por lo menos un valor de temperatura dará un resultado diferente en la capacitancia con un nivel de significancia de $\alpha=0,05$.

Figura 33. Gráfica de la Capacitancia promedio del R410a en estado líquido vs la Temperatura de medición

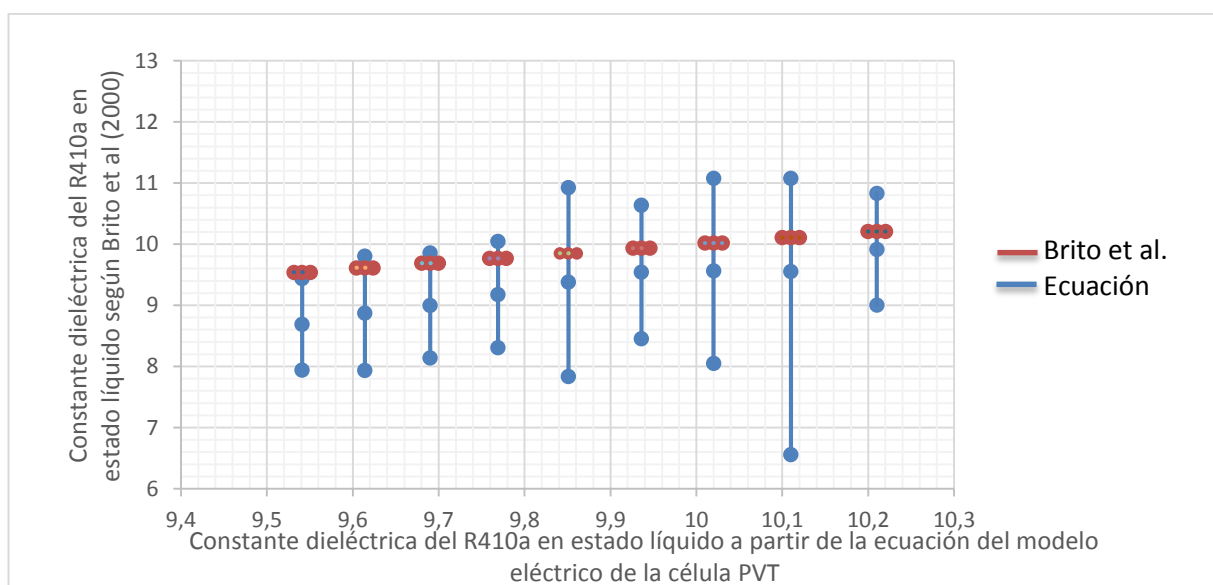


8.3. VALIDACIÓN DE LA ECUACIÓN QUE CARACTERIZA LA CÉLULA PVT

Para la verificación de la ecuación 6.4. Se utilizaron las medidas de capacitancia total de la célula PVT llena con R410a líquido que estaban dentro del rango de presión y temperatura de 290 a 2321 psi y de 0° a 30°C respectivamente. Los valores de la constante dieléctrica del R410a dentro de estos rangos de presión y temperatura se encuentran en el artículo de Brito et al (2000). Para validar la ecuación del modelo eléctrico de la célula PVT se realizó una gráfica de desviación (figura 34) con el fin de verificar que los valores presentados en el artículo y los obtenidos a partir de este trabajo se crucen en el rango de incertidumbre para cada medida, debido a que las dos fuentes son experimentales no se puede validar a partir del margen de error.

Como se puede observar en la figura 35 el rango de incertidumbre de los valores de la constante dieléctrica se cruzan lo cual valida la ecuación del modelo eléctrico de la célula PVT.

Figura 34. Gráfica de la desviación de la constante dieléctrica del R410a en estado líquida obtenida por Brito et al. (2000) vs la constante dieléctrica obtenida a partir de la ecuación del modelo eléctrico de la célula PVT



Cabe resaltar que la causa de que el intervalo de incertidumbre de la constante dieléctrica obtenida en este trabajo sea amplio se debe a que para cada temperatura se tomaron solamente dos valores de capacitancia debido al poco tiempo disponible para realizar las medidas, para obtener valores menores de incertidumbre es necesario realizar muestras de tamaño muestral grande ($n > 30$) y aplicar la ecuación 4,14 para el intervalo de incertidumbre.

8.4. ANÁLISIS DE LOS VALORES DE LA CONSTANTE DIELECTRICA OBTENIDA PARA EL R410A EN ESTADO LÍQUIDO Y EN ESTADO GASEOSO.

En la figura 35 y en la figura 36 se puede observar que la constante dieléctrica del R410a es inversamente proporcional tanto a la presión como a la temperatura si se mantiene un volumen de fluido constante dentro de la célula de pruebas, resultados coherentes porque al variar la temperatura manteniendo el volumen constante es necesario que la presión aumente para alcanzar el equilibrio termodinámico.

En el artículo de Brito et al (2000) se hicieron pruebas separadas para la presión y la temperatura obteniendo que la constante dieléctrica es inversamente proporcional a la temperatura en una condición de presión constante y volumen variable y directamente proporcional a la presión a una condición de temperatura constante y volumen variable. Lo cual indica que es acertado obtener que la constante dieléctrica del R410a en estado líquido es inversamente proporcional a la temperatura bajo las condiciones de presión variable y volumen específico constante

Figura 35. Gráfica de la constante dieléctrica del R410a en estado líquido en función de la Temperatura

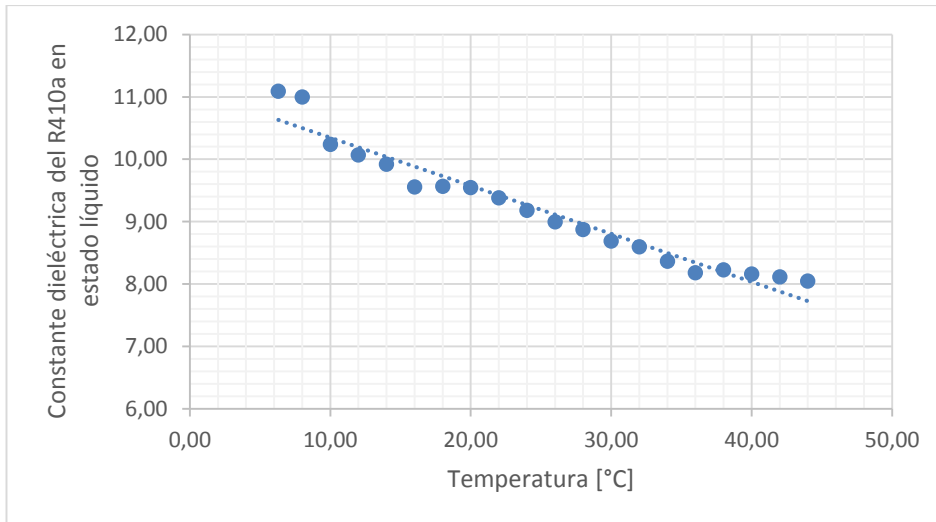
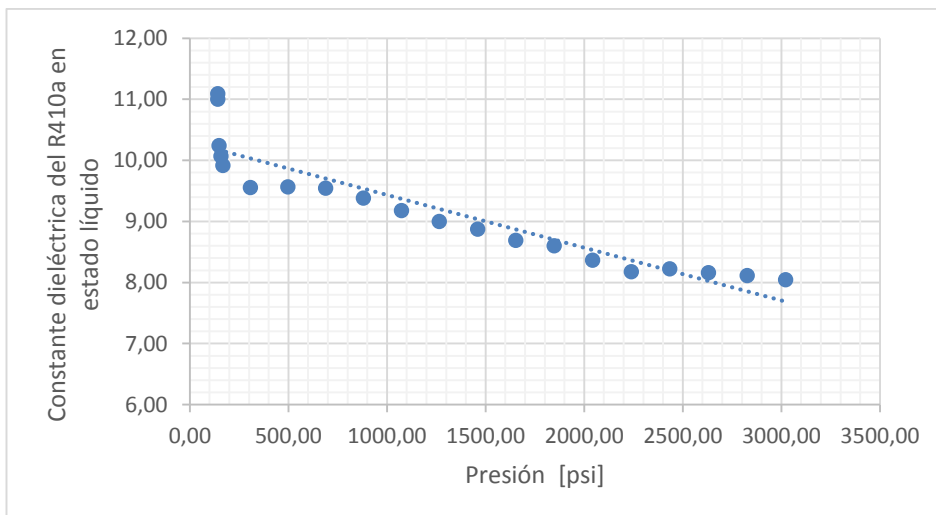


Figura 36. Gráfica de la constante dieléctrica del R410a en estado líquido en función de la Presión



9. CONCLUSIONES

Se determinó el valor de la constante dieléctrica para las fases del R410a a partir de la medida de capacitancia total del montaje experimental a partir de la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{C_T - C_p}{F_F}$$

C_p la capacitancia parasita de los cables de medición y F_F el factor de corrección por la configuración geométrica de la célula PVT que toman valores de $14,88 \pm 1,13$ y $147,5 \pm 1,421$ respectivamente y C_T es el valor de capacitancia medido, obteniendo valores de $1,11 \pm 0,13$ para el R410a en estado gaseosos y valores dentro del rango de $11,09 \pm 0,97$ hasta $8,05 \pm 4,10$ para el R410a en estado líquido.

Los valores de la constante dieléctrica obtenidos pueden ser aceptados tanto para el estado líquido como para el estado gaseoso, debido a que las constantes dieléctricas enunciadas por Brito et al (2000) en el rango de presión y temperatura de 290 a 2320 psi y $0,09^\circ\text{C}$ a $30,61^\circ\text{C}$ respectivamente, abarcan dentro de su rango de incertidumbre los valores de constante dieléctrica obtenidos en este trabajo para el R410a en estado líquido, así mismo para el R410a en estado gaseoso se esperaba que la constante dieléctrica tomara un valor del orden de la constante dieléctrica del aire que es $1,00058986 \pm 0,00000050$.

Durante la toma de datos se observó que el valor de la capacitancia medida variaba en función de la frecuencia de medición, en otras palabras, para frecuencias del orden de los 100 Hz el valor de capacitancia variaba dentro de un rango que iba desde los pF hasta los nF, a medida que se incrementaba la frecuencia de medición este rango dentro del cual variaba la medida iba disminuyendo considerablemente hasta obtener valores prácticamente

constantes para una frecuencia de 200 KHz (frecuencia a la cual se realizó la adquisición de datos)

Se observó que el valor de la constante dieléctrica del R410a en estado gaseoso no varía en función de la temperatura, es decir, para cualquier valor de temperatura dentro del rango trabajado es el mismo, caso contrario ocurre con el valor de la constante dieléctrica del R410a en estado líquido el cual es inversamente proporcional a la temperatura a una condición de volumen específico constante.

A través del intercambio académico en la Universidad Estatal de Campinas en la modalidad de pasantía de investigación gracias al convenio UIS-UNICAMP, logré mejorar mi capacidad de adaptabilidad, resolución de problemas, toma de decisiones, comunicación oral y escrita en una lengua extranjera y trabajo en equipo de carácter interdisciplinario al trabajar en conjunto con técnicos y profesionales pertenecientes al área de la ingeniería mecánica e ingeniería electrónica.

10. RECOMENDACIONES

Antes de realizar el llenado de la célula con el fluido de prueba es importante abrirla y limpiarla para retirar cualquier residuo que haya quedado de una toma de datos anterior, así mismo cuando se está haciendo el llenado se debe drenar el aire que queda atrapado en su interior para tener solamente dentro de la célula el fluido de prueba.

Se sugiere empezar a realizar la medición por la temperatura más alta, de esta manera se garantiza la presencia de solo líquido o solo gas, dado que para la temperatura más baja en todos los casos, el estado termodinámico se posiciona dentro del domo en la gráfica P vs h habiendo formación de burbujas de gas en el líquido o viceversa.

Aunque la célula alcanzaba el valor de temperatura del set point de la cámara climática en una hora cuando se cambiaba el set point en 2° y dos horas cuando se cambiaba en 5°C se recomienda dar un tiempo de estabilización de 4 horas para cada dato de tal manera que cualquier burbuja de gas o de líquido que se forme cuando se toman medidas de solo fase líquida o gaseosa respectivamente, tenga el tiempo suficiente para localizarse en las conexiones superiores para el gas o inferiores para el líquido y no tenga incidencia en el valor de capacitancia a medir.

Se recomienda realizar las mediciones sin variar el montaje experimental, no agregar ni retirar piezas a la célula, utilizar siempre los mismo cables de conexión y conectarlos en el mismo lugar para evitar cualquier variación en el valor del C_p o del F_F de la ecuación que conlleven a un valor erróneo de la constante dieléctrica obtenida a partir de la medida de capacitancia. Si por algún motivo se alteró la configuración de la célula o se sustituyeron los cables de medición se aconseja obtener de nuevo los valores de C_p y de F_F , utilizando fluidos capacitivos si el fluido de interés es capacitivo o con fluidos resistivos si este es resistivo.

Se recomienda utilizar un indicador de temperatura que permita visualizar valores decimales para realizar una medida más precisa de la temperatura del fluido dentro de la célula disminuyendo así el rango de incertidumbre.

BIBLIOGRAFÍA

ABBOTT, Andrew; EARDLEY, Christopher A. and TOOTH, Richard. Relative Permittivity Measurements of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC 134a), Pentafluoroethane (HFC 125), and Difluoromethane (HFC 32). En: Journal of Chemical & Engineering Data. 1999. Vol 44 N° 1, p 112-115.

BARÃO, M.T; MARDOLCAR, U.V. and NIETO DE CASTRO, C.A. Dielectric constant and dipole moments of 1,1,1-trifluoro-2,2-dichloroethane (HCFC 123) and 1,1-difluoroethane (HFC 152a) in the liquid phase. En: Fluid Phase Equilibria. Septiembre, 1998. Vol. 150-151, p 753-762.

BECKMAN, Eric. Supercritical and near-critical CO₂ in green chemical synthesis and processing. En: The Journal of Supercritical Fluids. Marzo, 2004. Vol. 28, p. 121-191.

BRITO, F.E. et al. Dielectric Constant of the Nearly Azeotropic Mixture R410A¹. En: International Journal of Thermophysics. Marzo, 2000. Vol. 21, p. 415-427.

CORREA, Fernanda Cristina. Sistema embarcado para medidas de escoamento bifásico gás-líquido. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Campinas. Campinas, São Paulo, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico, 2009.

DANÉS, Leandro Henschel. Medição de Parâmetros de Escoamento bifásico Gás-líquido utilizando Sensores de Impedância. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Campinas. Campinas, São Paulo, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico, 2012.

FEJA, S. Measurement of electrical properties of refrigerants and refrigerant–oil mixtures. En: International Journal of Refrigeration. Agosto, 2012. Vol. 35 N°5, p. 1367-1371.

FLORA, Bruno Fagundes. Sensor de impedâncias de anéis para medida de fração de vazio em escoamento gás-líquido. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Campinas. Campinas, São Paulo, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Térmica e Fluidos, 2011.

HECTOR, L.G and SCHULTZ, H.L. The Dielectric Constant of Air at Radiofrequencies. En: Journal of Applied Physics. Noviembre, 1936. Vol. 7 N° 4, p.133.

HEWITT, G.F. Measurement of void fraction. Handbook of Multiphase Systems. New York: McGraw-Hill, 1982.

JOHNSON, Bill. Btu Buddy Notebook. New York: Cengage Learning, 2009. p. 32

KEYES, Frederick and KIRKWOOD, John. The Dielectric Constant of Carbon Dioxide as a Function of Temperature and Density. En: APS Journals. Agosto, 1930. Vol. 36 N° 231.

MICHELS, A. and MICHELS, C. The Influence of Pressure on the Dielectric Constant of Carbon Dioxide up to 1000 Atmospheres between 25° and 150° C. En: Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Mayo,1993. Vol. 231, p. 409-434.

NAVIDI, William. Estadística para ingenieros. México D.F: The McGraw-Hill, 2006.

BK PRECISION ELECTRONIC TEST INSTRUMENTS. Technical Reference. Bench LCR/ESR Meter with Component Test. Model # 889A. Yorba Linda – California, E.U, 2004.

RIBEIRO, A.P.C. and NIETO DE CASTRO, C.A. Dielectric properties of liquid refrigerants: Facts and trends. En: International Journal of Refrigeration. 2011. Vol. 34, p. 393-401.

SCHMIDT, J.W. and MOLDOVER, M. R. Dielectric Permittivity of Eight Gases Measured with Cross Capacitors. En: International Journal of Thermophysics. Marzo, 2003. Vol. 24 N° 2, p. 375-403.

SHOHAM, Ovdia. Mechanistic modeling of gas- liquid two-phase flow in pipes. Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers, 2006. p. 1-24

TELEDYNE ISCO SYRINGE PUMPS. Technical Reference. 260D High Pressure Syringe Pump. Lincoln – Nebraska, E.U, 2014

WESCH, A; DAHMEN, N. and EBERT, K. Measuring the Static Dielectric Constants of Pure Carbon Dioxide and Carbon Dioxide Mixed with Ethanol and Toluene at Elevated Pressures. En: Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie. August, 1996. Vol 100, p. 1368-1371.

ANEXOS

ANEXO A. DATOS EXPERIMENTALES

Tabla A1. Datos experimentales del Aire

T [°C]	Capacitancia [pF]	Capacitancia [pF]	Fase
5,00	160,60	161,90	-88,60
10,00	162,80	162,50	-88,71
15,00	163,00	163,10	-88,42
20,00	163,20	162,00	-88,68
25,00	162,20	161,00	-88,42
30,00	162,60	161,00	-88,30
35,00	162,60	162,00	-88,34
40,00	163,00	162,80	-88,24
45,00	162,60	163,30	-88,21
50,00	162,70	163,00	-88,63

Tabla A2. Datos experimentales del CO₂ líquido

T [°C]	Capacitancia [pF]	Capacitancia [pF]	Fase
6,4	169,37	171,14	-87,58
10	169,77	170,64	-87,63
15	171,43	170,34	-87,31
20	170,37	170,34	-88,34
25	169,80	169,94	-88,09
30	170,07	170,04	-87,47
35	170,20	169,74	-85,49
40	169,97	169,44	-88,55
45	169,77	169,24	-88,28
50	170,60	170,44	-87,88

Tabla A3. Datos experimentales del R410a líquido

Tc [°C]	Capacitancia [pf]	Capacitancia [pf]	θ
6,20	313,10	312,00	-81,38
8,00	310,80	311,50	-79,82
10,00	299,60	300,07	-79,13
12,00	298,20	296,33	-79,69
14,00	294,50	295,70	-80,36
16,00	286,30	293,10	-80,23
18,00	288,30	291,40	-80,30
20,00	290,50	288,60	-84,04
22,00	288,70	285,50	-84,05
24,00	284,70	283,50	-84,10
26,00	282,00	280,80	-83,91
28,00	280,30	278,80	-84,30
30,00	277,20	276,40	-84,71
32,00	276,00	274,90	-84,74
34,00	273,20	270,70	-84,16
36,00	269,80	268,60	-84,86
38,00	273,90	265,90	-84,89
40,00	273,30	264,50	-84,92
42,00	272,70	263,70	-85,13
44,00	272,00	262,50	-85,39

Tabla A4. Datos experimentales R410a gaseoso

T [°C]	Capacitancia [pf]	Capacitancia [pf]	θ
6,30	162,60	163,40	-87,74
8,00	162,10	163,10	-88,64
10,00	162,50	162,90	-88,93
12,00	163,10	163,40	-88,49
14,00	162,60	163,70	-88,56
16,00	164,30	163,40	-88,33
18,00	169,60	163,50	-88,51
20,00	164,10	163,20	-89,32
22,00	164,60	164,20	-89,40
24,00	164,20	167,10	-89,56
26,00	164,00	164,40	-89,22
28,00	164,70	164,20	-88,99
30,00	164,60	164,10	-89,29
32,00	163,40	163,60	-89,17
34,00	162,50	163,00	-89,43
36,00	163,70	163,60	-89,27
38,00	163,50	164,00	-89,25
40,00	163,80	166,20	-89,70
42,00	165,00	163,80	-89,21
44,00	163,30	165,40	-86,02
46,00	163,00	163,40	-89,24
48,00	164,20	164,10	-88,86
50,00	165,60	163,80	-88,69

ANEXO B. RESULTADOS ANÁLISIS TERMODINÁMICO

Tabla B1. Análisis Termodinámico del CO₂ líquido

Presión de llenado	1400,00	[psi]		
Temperatura de llenado	20,00	[°C]		
Volumen de la célula	19,39	[mL]	0,00001939	[m ³]
Volumen específico	0,001174	[m ³ /Kg]		
Volumen llenado	31,930000	[mL]	0,00003193	[m ³]
Masa	0,027202249	[Kg]	27,2022491	[g]
Vol de aseguramiento	0,00002939			
Delta de aseguramiento	0,00001			

T[°C]	v [m ³ /Kg]	P [psi]	Calidad	visat [m ³ /Kg]	vgsat [m ³ /Kg]	Mgas [Kg]	Mliquido [Kg]	Vgas [m ³]	Vliquido [m ³]	α	Dif de volumen [m ³]
6,4	1,17E-03	596,63	6,41E-03	1,13E-03	8,34E-03	1,74E-04	2,70E-02	1,45E-06	3,05E-05	0,05	1,09E-06
10	1,17E-03	652,99	2,04E-03	1,16E-03	7,40E-03	5,55E-05	2,71E-02	4,10E-07	3,15E-05	0,01	2,14E-06
15	1,17E-03	981,67	Subenfriado	1,22E-03	6,22E-03	0,00	2,72E-02	0,00	3,19E-05	0,00	2,54E-06
20	1,17E-03	1398,10	Subenfriado	1,29E-03	5,15E-03	0,00	2,72E-02	0,00	3,19E-05	0,00	2,54E-06
25	1,17E-03	1818,90	Subenfriado	1,41E-03	4,12E-03	0,00	2,72E-02	0,00	3,19E-05	0,00	2,54E-06
30	1,17E-03	2242,70	Subenfriado	1,69E-03	2,90E-03	0,00	2,72E-02	0,00	3,19E-05	0,00	2,54E-06
35	1,17E-03	2668,60	Indefinido	supercritico							
40	1,17E-03	3096,10	Indefinido								
45	1,17E-03	3524,80	Indefinido								
50	1,17E-03	3954,30	Indefinido								

liquido

Tabla B2. Análisis Termodinámico del R410a líquido

Peso célula vacía	5814,2	[g]	5,8142	[kg]
Peso célula con R410a	5849,9	[g]	5,8499	[kg]
Peso del R410a	35,70	[g]	0,0357	[Kg]
Presión de llenado	890,00	[psi]		
Temperatura de llenado	20,00	[°C]		
Volumen del conjunto	42,43	[mL]	0,00004243	[m ³]
Volumen de la célula	19,39	[mL]	0,00001939	[m ³]
Volumen específico	0,00089465	[m ³ /Kg]		
Volumen llenado	0,000032	[m ³]	31,939005	[mL]
Volumen de la conexiones inhabilitadas (via manómetro)	10,49	[mL]		
Vol de aseguramiento	0,00002939	[m ³]		
Delta de aseguramiento	0,00001	[m ³]		

T[°C]	v [m ³ /Kg]	P [psi]	Calidad	vlsat [m ³ /Kg]	vgsat [m ³ /Kg]	Mgas [Kg]	Mliquido [Kg]	Vgas [m ³]	Vliquido [m ³]	α	Dif de volumen [m ³]
6,2	8,95E-04	140,85	8,21E-04	8,74E-04	2,69E-02	2,93E-05	3,57E-02	7,87E-07	3,12E-05	0,02	1,77E-06
6,30	8,95E-04	141,28	8,12E-04	8,74E-04	2,68E-02	2,90E-05	3,57E-02	7,76E-07	3,12E-05	0,02	1,79E-06
8,00	8,95E-04	148,72	6,33E-04	8,79E-04	2,54E-02	2,26E-05	3,57E-02	5,73E-07	3,14E-05	0,02	1,99E-06
10,00	8,95E-04	157,84	3,85E-04	8,86E-04	2,39E-02	1,37E-05	3,57E-02	3,28E-07	3,16E-05	0,01	2,23E-06
12,00	8,95E-04	167,38	9,01E-05	8,93E-04	2,24E-02	3,22E-06	3,57E-02	7,22E-08	3,19E-05	0,00	2,49E-06
14,00	8,95E-04	307,12	Subenfriado	9,00E-04	2,11E-02	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06
16,00	8,95E-04	497,22	Subenfriado	9,08E-04	1,99E-02	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06

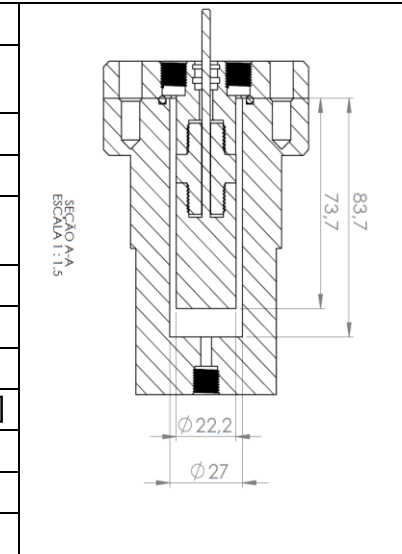
Estado líquido

Tabla B2. Continuación

18,00	8,95E-04	688,23	Subenfriado	9,15E-04	1,87E-02	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	Estado líquido
20,00	8,95E-04	880,04	Subenfriado	9,23E-04	1,76E-02	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
22,00	8,95E-04	1072,60	Subenfriado	9,31E-04	1,66E-02	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
24,00	8,95E-04	1265,70	Subenfriado	9,40E-04	1,56E-02	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
26,00	8,95E-04	1459,40	Subenfriado	9,49E-04	1,47E-02	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
28,00	8,95E-04	1653,60	Subenfriado	9,58E-04	1,39E-02	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
30,00	8,95E-04	1848,20	Subenfriado	9,68E-04	1,31E-02	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
32,00	8,95E-04	2043,20	Subenfriado	9,78E-04	1,23E-02	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
34,00	8,95E-04	2238,60	Subenfriado	9,89E-04	1,16E-02	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
36,00	8,95E-04	2434,10	Subenfriado	1,00E-03	1,09E-02	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
38,00	8,95E-04	2630,00	Subenfriado	1,01E-03	1,03E-02	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
40,00	8,95E-04	2826,00	Subenfriado	1,02E-03	9,69E-03	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
42,00	8,95E-04	3022,10	Subenfriado	1,04E-03	9,11E-03	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
44,00	8,95E-04	3218,40	Subenfriado	1,05E-03	8,57E-03	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
46,00	8,95E-04	3414,70	Subenfriado	1,07E-03	8,05E-03	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
48,00	8,95E-04	3611,20	Subenfriado	1,08E-03	7,56E-03	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	
50,00	8,95E-04	3807,60	Subenfriado	1,10E-03	7,08E-03	0,00E+00	3,57E-02	0,00E+00	3,19E-05	0,00	2,55E-06	

Tabla B3. Análisis termodinámico del R410a gaseoso

Peso célula vacía	5814,2	[g]	5,8142	[kg]	
Peso célula con R410a	5816,8	[g]	5,8168	[kg]	
Peso del R410a	2,60	[g]	0,0026	[Kg]	
Presión de llenado	225,00	[psi]			
Temperatura de llenado	23,00	[°C]			
Volumen de la célula	19,39	[mL]	0,00001939	[m ³]	
Volumen específico	0,016318	[m ³ /Kg]			
Volumen llenado	0,000042	[m ³]	42,426800	[mL]	
Altura Total	83,7	[mm]	Volumen de la zona sin inserto	5725,55	[mm ³]
Altura Inserto	73,7	[mm]		0,00000573	[m ³]
Diametro mayor	27,0	[mm]		5,725	[mL]
Diametro menor	22,2	[mm]			



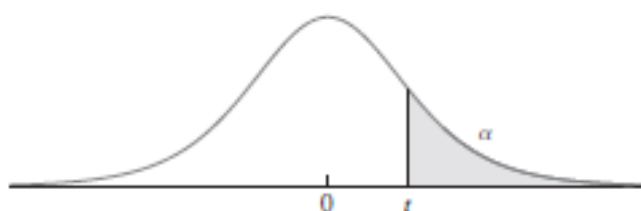
T[°C]	v [m ³ /Kg]	P [psi]	Calidad	v _{lsat} [m ³ /Kg]	v _{gsat} [m ³ /Kg]	M _{gas} [Kg]	M _{liquido} [Kg]	V _{gas} [m ³]	V _{liquido} [m ³]	α	Dif de volumen [m ³]	Estado gaseoso
6,30	1,63E-02	141,01	5,96E-01	8,74E-04	2,68E-02	1,55E-03	1,05E-03	4,15E-05	9,17E-07	0,98	4,81E-06	
8,00	1,63E-02	148,42	6,30E-01	8,79E-04	2,54E-02	1,64E-03	9,62E-04	4,16E-05	8,46E-07	0,98	4,88E-06	
10,00	1,63E-02	157,51	6,72E-01	8,86E-04	2,39E-02	1,75E-03	8,54E-04	4,17E-05	7,56E-07	0,98	4,97E-06	
12,00	1,63E-02	167,00	7,16E-01	8,93E-04	2,24E-02	1,86E-03	7,38E-04	4,18E-05	6,59E-07	0,98	5,07E-06	
14,00	1,63E-02	176,92	7,63E-01	9,00E-04	2,11E-02	1,98E-03	6,16E-04	4,19E-05	5,55E-07	0,99	5,17E-06	
16,00	1,63E-02	187,27	8,13E-01	9,08E-04	1,99E-02	2,11E-03	4,86E-04	4,20E-05	4,41E-07	0,99	5,28E-06	
18,00	1,63E-02	198,07	8,66E-01	9,15E-04	1,87E-02	2,25E-03	3,48E-04	4,21E-05	3,18E-07	0,99	5,41E-06	

Tabla B3. Continuación

20,00	1,63E-02	209,33	9,23E-01	9,23E-04	1,76E-02	2,40E-03	2,01E-04	4,22E-05	1,85E-07	1,00	5,54E-06	Estado gaseoso
22,00	1,63E-02	221,06	9,83E-01	9,31E-04	1,66E-02	2,56E-03	4,40E-05	4,24E-05	4,10E-08	1,00	5,68E-06	
24,00	1,63E-02	226,49	Sobrecalentado	9,40E-04	1,56E-02	2,60E-03	0,00	4,24E-05	0,00	1,00	5,73E-06	
26,00	1,63E-02	229,46	Sobrecalentado	9,49E-04	1,47E-02	2,60E-03	0,00	4,24E-05	0,00	1,00	5,73E-06	
28,00	1,63E-02	232,40	Sobrecalentado	9,58E-04	1,39E-02	2,60E-03	0,00	4,24E-05	0,00	1,00	5,73E-06	
30,00	1,63E-02	235,32	Sobrecalentado	9,68E-04	1,31E-02	2,60E-03	0,00	4,24E-05	0,00	1,00	5,73E-06	
32,00	1,63E-02	238,20	Sobrecalentado	9,78E-04	1,23E-02	2,60E-03	0,00	4,24E-05	0,00	1,00	5,73E-06	
34,00	1,63E-02	241,06	Sobrecalentado	9,89E-04	1,16E-02	2,60E-03	0,00	4,24E-05	0,00	1,00	5,73E-06	
36,00	1,63E-02	243,90	Sobrecalentado	1,00E-03	1,09E-02	2,60E-03	0,00	4,24E-05	0,00	1,00	5,73E-06	
38,00	1,63E-02	246,72	Sobrecalentado	1,01E-03	1,03E-02	2,60E-03	0,00	4,24E-05	0,00	1,00	5,73E-06	
40,00	1,63E-02	249,52	Sobrecalentado	1,02E-03	9,69E-03	2,60E-03	0,00	4,24E-05	0,00	1,00	5,73E-06	
42,00	1,63E-02	252,30	Sobrecalentado	1,04E-03	9,11E-03	2,60E-03	0,00	4,24E-05	0,00	1,00	5,73E-06	
44,00	1,63E-02	255,06	Sobrecalentado	1,05E-03	8,57E-03	2,60E-03	0,00	4,24E-05	0,00	1,00	5,73E-06	
46,00	1,63E-02	257,80	Sobrecalentado	1,07E-03	8,05E-03	2,60E-03	0,00	4,24E-05	0,00	1,00	5,73E-06	
48,00	1,63E-02	260,53	Sobrecalentado	1,08E-03	7,56E-03	2,60E-03	0,00	4,24E-05	0,00	1,00	5,73E-06	
50,00	1,63E-02	263,25	Sobrecalentado	1,10E-03	7,08E-03	2,60E-03	0,00	4,24E-05	0,00	1,00	5,73E-06	

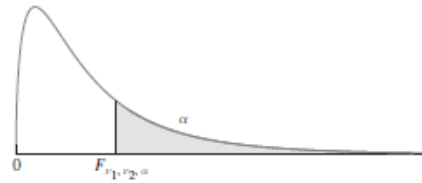
ANEXO C. TABLAS ESTADÍSTICAS

Tabla C1: Puntos porcentuales superiores para la distribución t de Student



ν	α								
	0.40	0.25	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
1	0.325	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.309	636.619
2	0.289	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.277	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.271	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.267	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.265	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.263	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.262	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.261	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.260	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.260	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.259	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.259	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.258	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.258	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.258	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.257	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.257	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.257	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.257	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.257	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.256	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.256	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.256	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.256	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.256	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.256	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.256	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.256	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.256	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
35	0.255	0.682	1.306	1.690	2.030	2.438	2.724	3.340	3.591
40	0.255	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
60	0.254	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
120	0.254	0.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.160	3.373
∞	0.253	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291

Tabla C2: Puntos porcentuales superiores para la distribución F



v_2	α	v_1								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0.100	3.29	2.92	2.73	2.61	2.52	2.46	2.41	2.38	2.35
	0.050	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02
	0.010	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94
	0.001	21.04	14.91	12.55	11.28	10.48	9.93	9.52	9.20	8.96
11	0.100	3.23	2.86	2.66	2.54	2.45	2.39	2.34	2.30	2.27
	0.050	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90
	0.010	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63
	0.001	19.69	13.81	11.56	10.35	9.58	9.05	8.66	8.35	8.12
12	0.100	3.18	2.81	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28	2.24	2.21
	0.050	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80
	0.010	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39
	0.001	18.64	12.97	10.80	9.63	8.89	8.38	8.00	7.71	7.48
13	0.100	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16
	0.050	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71
	0.010	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19
	0.001	17.82	12.31	10.21	9.07	8.35	7.86	7.49	7.21	6.98
14	0.100	3.10	2.73	2.52	2.39	2.31	2.24	2.19	2.15	2.12
	0.050	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65
	0.010	8.86	6.51	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03
	0.001	17.14	11.78	9.73	8.62	7.92	7.44	7.08	6.80	6.58
15	0.100	3.07	2.70	2.49	2.36	2.27	2.21	2.16	2.12	2.09
	0.050	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59
	0.010	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89
	0.001	16.59	11.34	9.34	8.25	7.57	7.09	6.74	6.47	6.26
16	0.100	3.05	2.67	2.46	2.33	2.24	2.18	2.13	2.09	2.06
	0.050	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54
	0.010	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78
	0.001	16.12	10.97	9.01	7.94	7.27	6.80	6.46	6.19	5.98
17	0.100	3.03	2.64	2.44	2.31	2.22	2.15	2.10	2.06	2.03
	0.050	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49
	0.010	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68
	0.001	15.72	10.66	8.73	7.68	7.02	6.56	6.22	5.96	5.75
18	0.100	3.01	2.62	2.42	2.29	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00
	0.050	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46
	0.010	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60
	0.001	15.38	10.39	8.49	7.46	6.81	6.35	6.02	5.76	5.56
19	0.100	2.99	2.61	2.40	2.27	2.18	2.11	2.06	2.02	1.98
	0.050	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42
	0.010	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52
	0.001	15.08	10.16	8.28	7.27	6.62	6.18	5.85	5.59	5.39
20	0.100	2.97	2.59	2.38	2.25	2.16	2.09	2.04	2.00	1.96
	0.050	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39
	0.010	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46
	0.001	14.82	9.95	8.10	7.10	6.46	6.02	5.69	5.44	5.24

Tabla C2: Puntos porcentuales superiores para la distribución F (continuación)

v_2	α	v_1								
		10	12	15	20	25	30	40	50	60
10	0.100	2.32	2.28	2.24	2.20	2.17	2.16	2.13	2.12	2.11
	0.050	2.98	2.91	2.85	2.77	2.73	2.70	2.66	2.64	2.62
	0.010	4.85	4.71	4.56	4.41	4.31	4.25	4.17	4.12	4.08
	0.001	8.75	8.45	8.13	7.80	7.60	7.47	7.30	7.19	7.12
11	0.100	2.25	2.21	2.17	2.12	2.10	2.08	2.05	2.04	2.03
	0.050	2.85	2.79	2.72	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.49
	0.010	4.54	4.40	4.25	4.10	4.01	3.94	3.86	3.81	3.78
	0.001	7.92	7.63	7.32	7.01	6.81	6.68	6.52	6.42	6.35
12	0.100	2.19	2.15	2.10	2.06	2.03	2.01	1.99	1.97	1.96
	0.050	2.75	2.69	2.62	2.54	2.50	2.47	2.43	2.40	2.38
	0.010	4.30	4.16	4.01	3.86	3.76	3.70	3.62	3.57	3.54
	0.001	7.29	7.00	6.71	6.40	6.22	6.09	5.93	5.83	5.76
13	0.100	2.14	2.10	2.05	2.01	1.98	1.96	1.93	1.92	1.90
	0.050	2.67	2.60	2.53	2.46	2.41	2.38	2.34	2.31	2.30
	0.010	4.10	3.96	3.82	3.66	3.57	3.51	3.43	3.38	3.34
	0.001	6.80	6.52	6.23	5.93	5.75	5.63	5.47	5.37	5.30
14	0.100	2.10	2.05	2.01	1.96	1.93	1.91	1.89	1.87	1.86
	0.050	2.60	2.53	2.46	2.39	2.34	2.31	2.27	2.24	2.22
	0.010	3.94	3.80	3.66	3.51	3.41	3.35	3.27	3.22	3.18
	0.001	6.40	6.13	5.85	5.56	5.38	5.25	5.10	5.00	4.94
15	0.100	2.06	2.02	1.97	1.92	1.89	1.87	1.85	1.83	1.82
	0.050	2.54	2.48	2.40	2.33	2.28	2.25	2.20	2.18	2.16
	0.010	3.80	3.67	3.52	3.37	3.28	3.21	3.13	3.08	3.05
	0.001	6.08	5.81	5.54	5.25	5.07	4.95	4.80	4.70	4.64
16	0.100	2.03	1.99	1.94	1.89	1.86	1.84	1.81	1.79	1.78
	0.050	2.49	2.42	2.35	2.28	2.23	2.19	2.15	2.12	2.11
	0.010	3.69	3.55	3.41	3.26	3.16	3.10	3.02	2.97	2.93
	0.001	5.81	5.55	5.27	4.99	4.82	4.70	4.54	4.45	4.39
17	0.100	2.00	1.96	1.91	1.86	1.83	1.81	1.78	1.76	1.75
	0.050	2.45	2.38	2.31	2.23	2.18	2.15	2.10	2.08	2.06
	0.010	3.59	3.46	3.31	3.16	3.07	3.00	2.92	2.87	2.83
	0.001	5.58	5.32	5.05	4.78	4.60	4.48	4.33	4.24	4.18
18	0.100	1.98	1.93	1.89	1.84	1.80	1.78	1.75	1.74	1.72
	0.050	2.41	2.34	2.27	2.19	2.14	2.11	2.06	2.04	2.02
	0.010	3.51	3.37	3.23	3.08	2.98	2.92	2.84	2.78	2.75
	0.001	5.39	5.13	4.87	4.59	4.42	4.30	4.15	4.06	4.00
19	0.100	1.96	1.91	1.86	1.81	1.78	1.76	1.73	1.71	1.70
	0.050	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	2.00	1.98
	0.010	3.43	3.30	3.15	3.00	2.91	2.84	2.76	2.71	2.67
	0.001	5.22	4.97	4.70	4.43	4.26	4.14	3.99	3.90	3.84
20	0.100	1.94	1.89	1.84	1.79	1.76	1.74	1.71	1.69	1.68
	0.050	2.35	2.28	2.20	2.12	2.07	2.04	1.99	1.97	1.95
	0.010	3.37	3.23	3.09	2.94	2.84	2.78	2.69	2.64	2.61
	0.001	5.08	4.82	4.56	4.29	4.12	4.00	3.86	3.77	3.70

Tabla C2: Puntos porcentuales superiores para la distribución F (continuación)

TABLA A.7 Puntos porcentuales superiores para la distribución F (continuación)

v_2	α	v_1								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	0.100	2.96	2.57	2.36	2.23	2.14	2.08	2.02	1.98	1.95
	0.050	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37
	0.010	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40
	0.001	14.59	9.77	7.94	6.95	6.32	5.88	5.56	5.31	5.11
22	0.100	2.95	2.56	2.35	2.22	2.13	2.06	2.01	1.97	1.93
	0.050	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34
	0.010	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35
	0.001	14.38	9.61	7.80	6.81	6.19	5.76	5.44	5.19	4.99
23	0.100	2.94	2.55	2.34	2.21	2.11	2.05	1.99	1.95	1.92
	0.050	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32
	0.010	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30
	0.001	14.20	9.47	7.67	6.70	6.08	5.65	5.33	5.09	4.89
24	0.100	2.93	2.54	2.33	2.19	2.10	2.04	1.98	1.94	1.91
	0.050	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30
	0.010	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26
	0.001	14.03	9.34	7.55	6.59	5.98	5.55	5.23	4.99	4.80
25	0.100	2.92	2.53	2.32	2.18	2.09	2.02	1.97	1.93	1.89
	0.050	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28
	0.010	7.77	5.57	4.68	4.18	3.85	3.63	3.46	3.32	3.22
	0.001	13.88	9.22	7.45	6.49	5.89	5.46	5.15	4.91	4.71
26	0.100	2.91	2.52	2.31	2.17	2.08	2.01	1.96	1.92	1.88
	0.050	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27
	0.010	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18
	0.001	13.74	9.12	7.36	6.41	5.80	5.38	5.07	4.83	4.64
27	0.100	2.90	2.51	2.30	2.17	2.07	2.00	1.95	1.91	1.87
	0.050	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25
	0.010	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15
	0.001	13.61	9.02	7.27	6.33	5.73	5.31	5.00	4.76	4.57
28	0.100	2.89	2.50	2.29	2.16	2.06	2.00	1.94	1.90	1.87
	0.050	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24
	0.010	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12
	0.001	13.50	8.93	7.19	6.25	5.66	5.24	4.93	4.69	4.50
29	0.100	2.89	2.50	2.28	2.15	2.06	1.99	1.93	1.89	1.86
	0.050	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22
	0.010	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09
	0.001	13.39	8.85	7.12	6.19	5.59	5.18	4.87	4.64	4.45
30	0.100	2.88	2.49	2.28	2.14	2.05	1.98	1.93	1.88	1.85
	0.050	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21
	0.010	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07
	0.001	13.29	8.77	7.05	6.12	5.53	5.12	4.82	4.58	4.39
31	0.100	2.87	2.48	2.27	2.14	2.04	1.97	1.92	1.88	1.84
	0.050	4.16	3.30	2.91	2.68	2.52	2.41	2.32	2.25	2.20
	0.010	7.53	5.36	4.48	3.99	3.67	3.45	3.28	3.15	3.04
	0.001	13.20	8.70	6.99	6.07	5.48	5.07	4.77	4.53	4.34

ANEXO D. RESULTADOS ANÁLISIS DE VARIANZA

Tabla D1. Análisis de Varianza Aire

T [°C]	Capacitancia [pF]	Capacitancia [pF]	Suma	Promedio
5,00	160,6	161,9	322,5	161,25
10,00	162,8	162,5	325,3	162,65
15,00	163	163,1	326,1	163,05
20,00	163,2	162	325,2	162,6
25,00	162,2	161	323,2	161,6
30,00	162,6	161	323,6	161,8
35,00	162,6	162	324,6	162,3
40,00	163	162,8	325,8	162,9
45,00	162,6	163,3	325,9	162,95
50,00	162,7	163	325,7	162,85
			3247,9	162,395

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	σ^2	Fcal	Ftabla
Tratamientos	9	7,22	0,80	1,96	3,02
Error	10	4,11	0,41		<
Total	19	11,33			

F de la tabla es mayor a la F calculada por lo tanto, con un nivel de significancia de $\alpha=0,05$ todos los valores de temperatura darán el mismo resultado en la capacitancia

Tabla D2. Análisis de Varianza CO₂ líquido

T [°C]	Capacitancia [pF]	Capacitancia [pF]	Suma	Promedio
6,4	169,37	171,14	340,51	170,26
10	169,77	170,64	340,41	170,21
15	171,43	170,34	341,776667	170,89
20	170,37	170,34	340,71	170,36
25	169,80	169,94	339,743333	169,87
30	170,07	170,04	340,11	170,06
35	170,20	169,74	339,94	169,97
40	169,97	169,44	339,41	169,71
45	169,77	169,24	339,01	169,51
50	170,60	170,44	341,04	170,52
			3402,67	170,13

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	σ^2	Fcal	Ftabla
Tratamientos	9	2,94	0,33	1,11	3,02
Error	10	2,96	0,30		<
Total	19	5,90			

F de la tabla es mayor a la F calculada por lo tanto, con un nivel de significancia de $\alpha=0,05$ todos los valores de temperatura darán el mismo resultado en la capacitancia.

Tabla D3. Análisis de Varianza R410a líquido

T [°C]	Capacitancia [pF]	Capacitancia [pF]	Suma	Promedio
6,30	313,10	312,00	625,10	312,55
8,00	310,80	311,50	622,30	311,15
10,00	299,60	300,07	599,67	299,83
12,00	298,20	296,33	594,53	297,27
14,00	294,50	295,70	590,20	295,10
16,00	286,30	293,10	579,40	289,70
18,00	288,30	291,40	579,70	289,85
20,00	290,50	288,60	579,10	289,55
22,00	288,70	285,50	574,20	287,10
24,00	284,70	283,50	568,20	284,10
26,00	282,00	280,80	562,80	281,40
28,00	280,30	278,80	559,10	279,55
30,00	277,20	276,40	553,60	276,80
32,00	276,00	274,90	550,90	275,45
34,00	273,20	270,70	543,90	271,95
36,00	269,80	268,60	538,40	269,20
38,00	273,90	265,90	539,80	269,90
40,00	273,30	264,50	537,80	268,90
42,00	272,70	263,70	536,40	268,20
44,00	272,00	262,50	534,50	267,25
			11369,60	284,24

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	σ^2	Fcal	Ftabla
Tratamientos	19	7361,773778	387,46	38,37	2,14
Error	20	201,9511111	10,10		>
Total	39	7563,724889			

F de la tabla es mayor a la F calculada por lo tanto, con un nivel de significancia de $\alpha=0,05$ por lo menos un valor de temperatura dará un resultado diferente en la capacitancia

Tabla D4. Análisis de Varianza del R410a gaseoso

T [°C]	Capacitancia [pF]	Capacitancia [pF]	Suma	Promedio
6,30	162,60	163,40	326,00	163,00
8,00	162,10	163,10	325,20	162,60
10,00	162,50	162,90	325,40	162,70
12,00	163,10	163,40	326,50	163,25
14,00	162,60	163,70	326,30	163,15
16,00	164,30	163,40	327,70	163,85
18,00	169,60	163,50	333,10	166,55
20,00	164,10	163,20	327,30	163,65
22,00	164,60	164,20	328,80	164,40
24,00	164,20	167,10	331,30	165,65
26,00	164,00	164,40	328,40	164,20
28,00	164,70	164,20	328,90	164,45
30,00	164,60	164,10	328,70	164,35
32,00	163,40	163,60	327,00	163,50
34,00	162,50	163,00	325,50	162,75
36,00	163,70	163,60	327,30	163,65
38,00	163,50	164,00	327,50	163,75
40,00	163,80	166,20	330,00	165,00
42,00	165,00	163,80	328,80	164,40
44,00	163,30	165,40	328,70	164,35
46,00	163,00	163,40	326,40	163,20
48,00	164,20	164,10	328,30	164,15
50,00	165,60	163,80	329,40	164,70
			7542,50	163,97

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	σ^2	Fcal	Ftabla
Tratamientos	22	40,48	1,84	1,27	2,03
Error	23	33,37	1,45		<
Total	45	73,84			

F de la tabla es mayor a la F calculada por lo tanto, con un nivel de significancia de $\alpha=0,05$ todos los valores de temperatura darán el mismo resultado en la capacitancia

ANEXO E. VALIDACIÓN DE LA ECUACIÓN

Tabla E1. Valores de la constante dieléctrica del R410a líquido en función de la presión y temperatura publicados en el artículo DIELECTRIC CONSTANT OF THE NEARLY AZEOTROPIC MIXTURE R410A

Dielectric Constant of the Nearly Azeotropic Mixture R410a						
T [°C]	P [psi]	30,61	20,16	10,11	-0,09	
		T [K]	303,76	293,31	283,26	273,06
Presion en [Mpa]	16	2320,60	9,69	10,56	11,44	12,71
	15	2175,56	9,64	10,51	11,39	12,33
	14	2030,52	9,58	10,45	11,34	12,29
	13	1885,49	9,52	10,40	11,29	12,24
	12	1740,45	9,45	10,34	11,23	12,19
	11	1595,41	9,39	10,28	11,18	12,14
	10	1450,38	9,31	10,22	11,12	12,09
	9	1305,34	9,23	10,15	11,06	12,03
	8	1160,30	9,16	10,08	10,00	11,98
	7	1015,26	9,09	10,03	10,93	11,93
	6	870,23	9,01	9,94	10,88	11,86
	5	725,19	8,90	9,86	10,80	11,81
	4	580,15	8,81	9,78	10,72	11,73
	3	435,11	8,70	9,70	10,67	11,69
2	290,08	8,59	9,60	10,59	11,65	

Tabla E2. Valores de la constante dieléctrica obtenidos a partir de la regresión que relaciona los datos registrados en el artículo de Brito et al (2000)

T [°C]	P [psi]	ϵ	$\Delta\epsilon$	ϵ_{\min}	ϵ_{\max}
14,00	307,12	10,21	0,0102	10,20	10,22
16,00	497,22	10,11	0,0101	10,10	10,12
18,00	688,23	10,02	0,01	10,01	10,03
20,00	880,04	9,94	0,0099	9,93	9,95
22,00	1072,60	9,85	0,0099	9,84	9,86
24,00	1265,70	9,77	0,0098	9,76	9,78
26,00	1459,40	9,69	0,0097	9,68	9,70
28,00	1653,60	9,61	0,0096	9,60	9,62
30,00	1848,20	9,54	0,0095	9,53	9,55

Tabla E3. Valores de la constante dieléctrica obtenidos a partir de la ecuación del modelo eléctrico de la célula PVT

T [°C]	P [psi]	C [pf]	C[pF]	Promedio	t	s	n	ΔC	ϵ	$\Delta\epsilon$	ϵ_{\min}	ϵ_{\max}
14,00	307,12	294,50	295,70	295,10	12,71	0,85	2,00	7,62	9,92	0,92	9,00	10,83
16,00	497,22	286,30	293,10	289,70	12,71	4,81	2,00	43,20	9,56	2,99	6,56	12,55
18,00	688,23	288,30	291,40	289,85	12,71	2,19	2,00	19,69	9,57	1,51	8,05	11,08
20,00	880,04	290,50	288,60	289,55	12,71	1,34	2,00	12,07	9,55	1,09	8,45	10,64
22,00	1072,60	288,70	285,50	287,10	12,71	2,26	2,00	20,33	9,38	1,54	7,84	10,93
24,00	1265,70	284,70	283,50	284,10	12,71	0,85	2,00	7,62	9,18	0,87	8,31	10,05
26,00	1459,40	282,00	280,80	281,40	12,71	0,85	2,00	7,62	9,00	0,86	8,14	9,86
28,00	1653,60	280,30	278,80	279,55	12,71	1,06	2,00	9,53	8,87	0,93	7,94	9,81
30,00	1848,20	277,20	276,40	276,80	12,71	0,57	2,00	5,08	8,69	0,75	7,94	9,44

ANEXO F. VALORES DE LA CONSTANTE DIELÉCTRICA DEL R410a

Tabla F1. Valores de la Constante Dieléctrica del R410a líquido en función de la Presión y la Temperatura

T [°C]	P [psi]	C [pf]	C [pf]	Promedio	t	s	n	ΔC	ϵ	$\Delta\epsilon$	ϵ_{min}	ϵ_{max}
6,30	140,85	313,10	312,00	312,55	12,71	0,78	2,00	6,99	11,09	0,97	10,12	12,06
8,00	141,28	310,80	311,50	311,15	12,71	0,49	2,00	4,45	11,00	0,89	10,11	11,89
10,00	148,72	299,60	300,07	299,83	12,71	0,33	2,00	2,96	10,24	0,81	9,43	11,05
12,00	157,84	298,20	296,33	297,27	12,71	1,32	2,00	11,86	10,07	1,11	8,96	11,18
14,00	167,38	294,50	295,70	295,10	12,71	0,85	2,00	7,62	9,92	0,92	9,00	10,83
16,00	307,12	286,30	293,10	289,70	12,71	4,81	2,00	43,20	9,56	2,99	6,56	12,55
18,00	497,22	288,30	291,40	289,85	12,71	2,19	2,00	19,69	9,57	1,51	8,05	11,08
20,00	688,23	290,50	288,60	289,55	12,71	1,34	2,00	12,07	9,55	1,09	8,45	10,64
22,00	880,04	288,70	285,50	287,10	12,71	2,26	2,00	20,33	9,38	1,54	7,84	10,93
24,00	1072,60	284,70	283,50	284,10	12,71	0,85	2,00	7,62	9,18	0,87	8,31	10,05
26,00	1265,70	282,00	280,80	281,40	12,71	0,85	2,00	7,62	9,00	0,86	8,14	9,86
28,00	1459,40	280,30	278,80	279,55	12,71	1,06	2,00	9,53	8,87	0,93	7,94	9,81
30,00	1653,60	277,20	276,40	276,80	12,71	0,57	2,00	5,08	8,69	0,75	7,94	9,44
32,00	1848,20	276,00	274,90	275,45	12,71	0,78	2,00	6,99	8,60	0,81	7,79	9,41
34,00	2043,20	273,20	270,70	271,95	12,71	1,77	2,00	15,88	8,36	1,25	7,12	9,61
36,00	2238,60	269,80	268,60	269,20	12,71	0,85	2,00	7,62	8,18	0,81	7,37	8,99
38,00	2434,10	273,90	265,90	269,90	12,71	5,66	2,00	50,82	8,23	3,47	4,75	11,70
40,00	2630,00	273,30	264,50	268,90	12,71	6,22	2,00	55,91	8,16	3,81	4,35	11,97
42,00	2826,00	272,70	263,70	268,20	12,71	6,36	2,00	57,18	8,11	3,89	4,22	12,01
44,00	3022,10	272,00	262,50	267,25	12,71	6,72	2,00	60,35	8,05	4,10	3,95	12,15

Tabla F2. Valor de la Constante Dieléctrica del R410a en estado gaseoso

T [°C]	P [psi]	C [pf]	C [pf]	xi-X		(xi-X)^2		s	t	n	ΔC	ε	Δε	ε _{min}	ε _{max}
6,30	141,01	162,60	163,40	-1,37	-0,57	1,87	0,32	1,28	2,02	46,00	0,38	1,11	0,13	0,98	1,24
8,00	148,42	162,10	163,10	-1,87	-0,87	3,49	0,75								
10,00	157,51	162,50	162,90	-1,47	-1,07	2,15	1,14								
12,00	167,00	163,10	163,40	-0,87	-0,57	0,75	0,32								
14,00	176,92	162,60	163,70	-1,37	-0,27	1,87	0,07								
16,00	187,27	164,30	163,40	0,33	-0,57	0,11	0,32								
18,00	198,07	169,60	163,50	5,63	-0,47	31,73	0,22								
20,00	209,33	164,10	163,20	0,13	-0,77	0,02	0,59								
22,00	221,06	164,60	164,20	0,63	0,23	0,40	0,05								
24,00	226,49	164,20	167,10	0,23	3,13	0,05	9,81								
26,00	229,46	164,00	164,40	0,03	0,43	0,00	0,19								
28,00	232,40	164,70	164,20	0,73	0,23	0,54	0,05								
30,00	235,32	164,60	164,10	0,63	0,13	0,40	0,02								
32,00	238,20	163,40	163,60	-0,57	-0,37	0,32	0,13								
34,00	241,06	162,50	163,00	-1,47	-0,97	2,15	0,94								
36,00	243,90	163,70	163,60	-0,27	-0,37	0,07	0,13								
38,00	246,72	163,50	164,00	-0,47	0,03	0,22	0,00								
40,00	249,52	163,80	166,20	-0,17	2,23	0,03	4,98								
42,00	252,30	165,00	163,80	1,03	-0,17	1,07	0,03								
44,00	255,06	163,30	165,40	-0,67	1,43	0,45	2,05								
46,00	257,80	163,00	163,40	-0,97	-0,57	0,94	0,32								
48,00	260,53	164,20	164,10	0,23	0,13	0,05	0,02								
50,00	263,25	165,60	163,80	1,63	-0,17	2,67	0,03								
		Promedio	163,97			Suma	73,84								

