

PAULO CHRISTIAN SEDREZ

**Caracterização experimental de  
propriedades dielétricas de misturas  
óleo-refrigerante**

**Florianópolis  
Maio de 2014**



PAULO CHRISTIAN SEDREZ

**Caracterização experimental de propriedades  
dielétricas de misturas óleo-refrigerante**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Universidade Federal de Santa Catarina  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Jader Riso Barbosa, Jr., Ph.D.

Florianópolis  
Maio de 2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sedrez, Paulo Christian

Caracterização experimental de propriedades dielétricas de misturas óleo-refrigerante / Paulo Christian Sedrez ; orientador, Jader Riso Barbosa Junior - Florianópolis, SC, 2014.

100 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Mistura óleo-refrigerante. 3. Propriedades elétricas. 4. Permissividade relativa. 5. Fator de dissipação. I. Barbosa Junior, Jader Riso. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

PAULO CHRISTIAN SEDREZ  
**Caracterização experimental de propriedades  
dielétricas de misturas óleo-refrigerante**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Área de concentração em Engenharia e Ciência Térmicas

sendo aprovada em sua forma final.

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora**

---

Prof. Jader Riso Barbosa, Jr., Ph.D.  
Orientador

---

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr.

---

Prof. Cesar Jose Deschamps, Ph.D

---

Prof. Marcelo Lobo Heldwein, Dr. sc. ETH



*Este trabalho é dedicado à Bianca, a mulher da minha vida.*



# AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Jader Riso Barbosa Jr. pela orientação impecável.

À CNPq e à Petrobrás, pelo suporte financeiro.

Aos professores do POSMEC pelo conhecimento transmitido.

Aos funcionários do POSMEC e do POLO por todo o apoio logístico.

Aos técnicos do POLO, em especial Pedro Cardoso, Marcelo Ribeiro e William Longen pela ajuda no projeto e construção da bancada.

Aos companheiros e amigos de POLO, em especial: Daniel, Fábio, Pizarro, Moises, Trevizolli, Fernando, Jaime, Pedro, Dalton e Pablo.

Aos meus colegas e amigos de faculdade, pela ajuda mútua em nos fazermos engenheiros, em especial Bruno Terêncio.

À minha família, minha mãe Maike, meu pai Paulo e meu irmão Anderson pelo apoio incondicional.

À minha namorada Bianca, por todo o amor e compreensão até mesmo nos momentos mais difíceis.



*“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo.”  
(Winston Churchill)*



# RESUMO

O conhecimento de propriedades elétricas de misturas de fluidos é necessário quando se deseja projetar sistemas em que tais misturas entram em contato direto com componentes portadores de carga elétrica. Este é o caso, por exemplo, dos compressores herméticos de refrigeração, nos quais a mistura óleo-refrigerante no interior da carcaça escoa continuamente sobre o motor elétrico. Propriedades elétricas de misturas também são importantes no projeto de sistemas de detecção de fases em escoamentos multifásicos, como sensores de impedância ou capacitivos para a determinação da fração de vazio em escoamentos bifásicos em dutos. O objetivo deste trabalho é desenvolver um aparato experimental e um procedimento de medição que permita caracterizar propriedades elétricas (permissividade relativa e fator de dissipação) de misturas de óleos e substâncias voláteis sob condições variadas de pressão e temperatura. A bancada experimental, baseada em normas alemã e americanas foi validada a partir de dados experimentais de substâncias puras disponíveis na literatura. Resultados foram gerados para misturas de óleo lubrificante poliol éster (POE) ISO 10 e refrigerantes 134a e 1234yf sob condições controladas de temperatura (25 a 55 °C) e solubilidade (0 a 100 %). Correlações empíricas foram utilizadas para a predição da permissividade relativa das misturas, com desvios RMS em relação aos resultados experimentais inferiores a 1 %.

**Palavras-chaves:** Mistura óleo-refrigerante, propriedades elétricas, permissividade relativa, fator de dissipação.



# ABSTRACT

Electrical properties of fluid mixtures are needed in the design of systems in which the process streams or working fluids come into direct contact with electrically live parts. This is the case, for instance, of hermetic refrigeration compressors, in which the refrigerant-lubricating oil mixture inside the crankcase wets the electric motor continuously. Electrical properties of fluid mixtures are also important in the design of phase fraction detectors, like impedance and capacitance void fraction sensors for two-phase flow in pipes. The purpose of this dissertation is to develop an experimental apparatus and an experimental procedure to measure electrical properties (dissipation factor and relative permittivity) of mixtures involving volatile substances (liquefied gases and refrigerants) and oils under different pressure and temperature conditions. The experimental apparatus was designed and built following the recommendations of the German and American standards for measurements of electrical properties of fluids. The procedure was verified against data for pure substances available in the open literature. Experimental results were generated for mixtures of polyol ester (POE) ISO 10 lubricating oil and refrigerants 134a and 1234yf for temperatures and solubilities ranging from 25 to 55 °C and 0 to 100 %. Empirical correlations were used to predict the relative permittivity of the mixtures, with RMS deviations with respect to the experimental data lower than 1 %.

**Keywords:** Oil-refrigerant mixture, electrical properties, relative permittivity, dissipation factor.



# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelagem do circuito equivalente do meio dielétrico	30
Figura 2 – Ângulo de fase $\delta$ entre a permissividade relativa complexa e a permissividade relativa . . . . .	32
Figura 3 – Esquema do aparato experimental: (1) célula de medição de propriedades elétricas, (2) reservatório de equilíbrio, (3) bomba de engrenagens e motor elétrico, (4) banho termostático, (5) tanque de água, (6) estrutura de proteção de alumínio e acrílico e (7) válvula de serviço . . . . .	39
Figura 4 – Foto do aparato experimental . . . . .	40
Figura 5 – Reservatório de equilíbrio . . . . .	41
Figura 6 – Motor elétrico e bomba de engrenagens responsável pela circulação da mistura . . . . .	41
Figura 7 – Banho termostático . . . . .	42
Figura 8 – Célula de medição de propriedades elétricas e o reservatório de pressão: (1) eletrodo interno, (2) eletrodo externo, (3) eletrodos guarda, (4) isolamento elétrico de teflon, (5) isolamento elétrico de teflon, (6) fluido testado, (7) passador, (8) anel de vedação, (9) carcaça do reservatório, (10) flange externo e (11) flange interno . . . . .	44
Figura 9 – Representação qualitativa do campo elétrico de capacitores . . . . .	45
Figura 10 – Célula de medição de propriedades elétricas proposta por Feja (2012). A foto da esquerda mostra os eletrodos desmontados e a da direita os eletrodos encaixados.	45
Figura 11 – Desenho da célula de medição construída . . . . .	46
Figura 12 – Vista explodida da célula de medição: (1) isolamento elétrico superior, (2) eletrodo guarda superior, (3) eletrodo externo (receptor), (4) eletrodo interno (emissor), (5) isolamento elétrico intermediário, (6) isolamento elétrico externo e (7) isolamento elétrico superior . . . . .	47

Figura 13 – Vista explodida da célula de medição: (1) isolamento elétrico superior, (2) eletrodo guarda superior, (3) eletrodo externo (receptor), (4) eletrodo interno (emissor), (5) isolamento elétrico intermediário, (6) isolamento elétrico externo, (7) eletrodo guarda inferior e (8) isolamento elétrico inferior . . . . .	48
Figura 14 – Detalhe do acoplamento das peças da célula de medição	49
Figura 15 – Foto do eletrodo guarda superior . . . . .	49
Figura 16 – Detalhes da célula de medição montada na barra rosqueada presa à tampa do reservatório de equilíbrio . . . . .	50
Figura 17 – Conector Swagelok modelo SS-400-1-4 . . . . .	51
Figura 18 – Conexão <i>feedthrough</i> construída . . . . .	51
Figura 19 – Conexão <i>feedthrough</i> com o cabo coaxial montado . . . . .	52
Figura 20 – Conexões <i>feedthrough</i> fixadas à tampa . . . . .	52
Figura 21 – Configuração de cabos de três terminais. . . . .	53
Figura 22 – Dispositivo testador de fluidos (DTF) Agilent . . . . .	54
Figura 23 – Cabo que conecta o medidor LCR à célula de medição	55
Figura 24 – Placa de ouro para correção da medição de impedância	55
Figura 25 – Diagrama $p$ - $T$ - $x$ para a mistura R-134a/POE ISO 10. Dados experimentais e resultados da Lei de Raoult e da equação de estado de Peng e Robinson (1976), França (2013) . . . . .	61
Figura 26 – Diagrama $p$ - $T$ - $x$ para a mistura R-1234yf/POE ISO 10. Dados experimentais e resultados da Lei de Raoult e da equação de estado de Peng e Robinson (1976), França (2013) . . . . .	62
Figura 27 – Esquema processo de medição de volume interno, Gonçalves, Melo e Cardoso (2000) . . . . .	63
Figura 28 – Resultados da permissividade relativa da água . . . . .	71
Figura 29 – Resultados experimentais de varredura de frequência para água . . . . .	72
Figura 30 – Permissividade relativa do R134a saturado líquido . . . . .	74
Figura 31 – Resultados da permissividade relativa do R1234yf saturado líquido . . . . .	74
Figura 32 – Permissividade relativa do óleo POE ISO 10 em função da temperatura . . . . .	76
Figura 33 – Permissividade relativa da mistura R-134a/Óleo POE ISO 10 em função da temperatura e da concentração global . . . . .	77
Figura 34 – Curvas de nível de permissividade relativa da mistura R-134a/óleo POE ISO 10 em função de temperatura e da solubilidade. . . . .	80

Figura 35 – Fator de dissipação da mistura R-134a/Óleo POE ISO 10 em função da temperatura e da concentração global . . . . .	80
Figura 36 – Permissividade relativa da mistura R-1234yf/óleo POE ISO 10 em função da temperatura e concentração global. . . . .	81
Figura 37 – Curvas de nível da permissividade relativa da mistura R-1234yf/óleo POE ISO 10 em função de temperatura e da solubilidade. . . . .	84
Figura 38 – Fator de dissipação da mistura R-1234yf/óleo POE ISO 10 em função da temperatura e da concentração global . . . . .	84
Figura 39 – Representação gráfica das correlações ajustadas para permissividade relativa das substâncias puras . . . .	86
Figura 40 – Predição da permissividade relativa calculada pela correlação de Bottcher (1952) . . . . .	87
Figura 41 – Predição da polarização por unidade de volume da mistura utilizando a Regra de Oster (1946) . . . . .	90



# LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Dimensões dos diâmetros internos e externos das peças da célula de medição . . . . .	46
Tabela 2	–	Permissividade relativa - testes preliminares. . . . .	55
Tabela 3	–	Valores máximos do desvio padrão adotado como condição de estabilidade . . . . .	58
Tabela 4	–	Resultados de permissividade relativa para o óleo POE ISO 10 e as respectivas incertezas. . . . .	75
Tabela 5	–	Resultados de permissividade relativa e fator de dissipação para a mistura R-134a/Óleo POE ISO 10 em função da concentração global e da temperatura. . . . .	78
Tabela 6	–	Resultados de solubilidade para a mistura R-134a/Óleo POE ISO 10 em função da concentração global e da temperatura. . . . .	79
Tabela 7	–	Coefficientes angulares das retas de ajuste da permissividade relativa em função da temperatura para as diversas concentrações globais da mistura R-134a/Óleo POE ISO 10 . . . . .	79
Tabela 8	–	Resultados de permissividade relativa e fator de dissipação para a mistura R-1234yf/POE ISO 10 em função da temperatura e concentração global. . . . .	82
Tabela 9	–	Resultados de solubilidade para a mistura R-1234yf/POE ISO 10 em função da temperatura e concentração global. . . . .	83
Tabela 10	–	Coefficientes angulares das retas de ajuste da permissividade relativa em função da temperatura para as diversas concentrações globais da mistura R-1234yf/Óleo POE ISO 10 . . . . .	83
Tabela 11	–	Coefficientes ajustados para correlacionar a permissividade relativa das substâncias puras . . . . .	85
Tabela 12	–	Análise estatística do desempenho das correlações para o cálculo da permissividade relativa. . . . .	88



# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Romanos

$C$	Capacitância	F
$C_o$	Capacitância da célula em vácuo	F
$C_p$	Capacitância em paralelo	F
$z_r$	Concentração global	
$\vec{I}$	Corrente	A
$D$	Fator de dissipação	
$x_i$	Fração mássica do componente i	
$j$	Constante imaginária	
$Z$	Impedância	$\Omega$
$Z_C$	Impedância capacitiva	$\Omega$
$Z_R$	Impedância resistiva	$\Omega$
$u(i)$	Incerteza expandida associada à variável i	
$u_c(i)$	Incerteza relativa à calibração da variável i	
$u_s(i)$	Incerteza relativa à repetibilidade da variável i	
$m_i$	Massa do componente i	kg
$\bar{x}$	Média	
$f$	Frequência	Hz
$P$	Pressão absoluta	bar
$p_i$	Polarização do componente i	
$R$	Resistência	$\Omega$
$S$	Desvio padrão	
$S\%$	Desvio padrão percentual	%

$x_r$	Solubilidade do componente i	
$\tilde{x}_i$	Solubilidade molar do componente i	
$T$	Temperatura absoluta	K
$\vec{V}$	Tensão	V
$V$	Volume interno do aparato experimental	$m^3$
$V_i$	Volume do componente i	$m^3$
$V_p$	Volume padrão	$m^3$
$\tilde{v}_i$	Volume molar do componente i	$m^3/kmol_{(i)}$

### Símbolos Gregos

$\delta$	Angulo de fase	rad
$\rho_i$	Densidade do componente i	$kg/m^3$
$\varepsilon_r''$	Dissipação elétrica	
$\omega$	Frequência angular	$rad/s$
$\varepsilon_o$	Permissividade absoluta do vácuo	F/m
$\varepsilon_r'$	Permissividade relativa	
$\varepsilon_i'$	Permissividade relativa do componente i puro	
$\varepsilon_{r,c}'$	Permissividade relativa calculada	
$\varepsilon_r^*$	Permissividade relativa complexa	
$\phi_i$	Fração volumétrica do componente i	

### Abreviaturas

<i>AAD</i>	Desvio médio absoluto
<i>Bias</i>	Erro sistemático
<i>BNC</i>	Conector coaxial (Bayonet Neill–Concelman)
<i>CAD</i>	<i>Computer-Aided Design</i>
<i>DTF</i>	Dispositivo Testador de Fluidos
<i>HCFC</i>	Clorodifluorometano

*HFC* Clorofluorocarboneto

*LCR* Indutância (L), Capacitância (C) e Resistência (R)

*PID* Proporcional, Integral e Diferencial

*RMS* Desvio médio quadrático

*RTD* *Resistance Temperature Detector*



# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO . . . . .	27
1.1	Motivação e Justificativa . . . . .	27
1.2	Objetivos . . . . .	28
1.3	Fundamentos Teóricos . . . . .	29
1.4	Estrutura do documento . . . . .	32
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .	33
2.1	Propriedades Elétricas de Refrigerantes e suas Mistas . . . . .	33
2.2	Regras de Mistura para a Permissividade Relativa . . . . .	36
3	APARATO EXPERIMENTAL . . . . .	39
3.1	Descrição da Bancada . . . . .	39
3.2	Célula Capacitiva . . . . .	42
3.3	Conexão do tipo <i>Feedtrough</i> . . . . .	51
3.4	Medidor LCR . . . . .	53
3.5	Procedimento Experimental . . . . .	57
3.6	Cálculo de solubilidade . . . . .	59
3.7	Medição do Volume Interno . . . . .	61
3.8	Avaliação de Incertezas . . . . .	64
3.8.1	Incertezas de Temperatura e Pressão . . . . .	64
3.8.2	Propagação de Incerteza da Determinação do Volume Interno . . . . .	65
3.8.3	Propagação de Incerteza do Cálculo de Solubilidade . . . . .	67
3.8.4	Propagação de Incerteza de Medição de Propriedades Elétricas . . . . .	69
3.9	Validação Experimental . . . . .	71
4	RESULTADOS . . . . .	75
4.1	Ensaio com Óleo POE ISO 10 . . . . .	75
4.2	Ensaio com a Mistura R-134a/Óleo POE ISO 10 . . . . .	76
4.3	Ensaio com a Mistura R-1234yf/Óleo POE ISO 10 . . . . .	81
4.4	Comparação com Correlações . . . . .	85
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .	91

5.1	Conclusões . . . . .	91
5.2	Recomendações para Trabalhos Futuros . . . . .	92
	REFERÊNCIAS . . . . .	93

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação e Justificativa

Ao longo dos anos, a caracterização de propriedades de materiais dielétricos tem sido impulsionada pelo projeto de componentes, equipamentos e sistemas elétricos, onde estes são usados como isolantes de condutores elétricos. Contudo, a determinação de propriedades dielétricas, como a constante dielétrica (permissividade relativa) e o fator de dissipação, é cada vez mais importante para o desenvolvimento de tecnologias de medição, controle e automação de processos, já que a variação de propriedades dielétricas muitas vezes se manifesta em resposta a variações de propriedades físico-químicas do próprio material ou do processo a ser medido ou controlado (VENKATESH; RAGHAVAN, 2005).

A variação de permissividade relativa de óleos lubrificantes tem sido aproveitada com crescente frequência para o monitoramento de mudanças na composição química por contaminação (umidade ou partículas), oxidação ou evaporação de frações ou componentes mais leves, (CAREY; HAYZEN, 2001; LINDNER, 2013; ZHU; HE; BECHHOEFER, 2013). Na indústria de alimentos, variações de permissividade relativa permitem desde a comprovação de adulteração de alimentos (GUO et al., 2011) até o controle da qualidade de produtos agrícolas e o monitoramento do nível de umidade em alimentos mais sensíveis a variações de condições ambientais (LIZHI; TOYODA; IHARA, 2008).

A identificação de novas utilidades para substâncias orgânicas, como óleos vegetais, depende da caracterização de propriedades dielétricas a fim de estabelecer alguns parâmetros limitantes da aplicação ou do processo. Por exemplo, na substituição de óleos minerais por vegetais como isolantes em transformadores e sistemas elétricos (PECOVSKA-GJORGJEVICH; ANDONOVSKI; VELEVSKA, 2012), a determinação do teor de umidade é um fator importante para correlacionar a rigidez dielétrica do óleo. A tensão de ruptura dielétrica é altamente influenciada por impurezas, como água, gases dissolvidos e material particulado. A permissividade relativa pode ser usada também no monitoramento de reações de transesterificação necessárias à produção de biocombustíveis (CORACH; SORICETTI; ROMANO, 2013). Estudos sobre a influência de propriedades elétricas de ácidos graxos visando aplicações na indústria farmacêutica foram apresentados por

Sousa et al. (2010).

Em sistemas de refrigeração, propriedades elétricas de misturas de óleo e refrigerantes são parâmetros que devem ser conhecidos, já que estas misturas entram em contato direto com componentes energizados. Este é o caso, por exemplo, dos compressores herméticos de refrigeração, nos quais a mistura óleo-refrigerante no interior da carcaça escoa continuamente sobre o motor elétrico. Portanto, deve-se garantir que o isolamento elétrico do meio dielétrico seja adequado.

Propriedades elétricas de misturas também são importantes no projeto de sistemas de detecção de fases em escoamentos multifásicos, como sensores de impedância ou capacitivos para a determinação da fração de vazio em escoamentos bifásicos em dutos (GALDIANO, 2010; FLORA, 2011; ROSA; FLORA; SOUZA, 2012). Tais escoamentos encontram aplicações em diversos setores das indústrias petroquímica, nuclear e de refrigeração. No desenvolvimento destas tecnologias de medição, as permissividades relativas das fases líquido e gás são usadas como parâmetros de entrada para dimensionar circuitos eletrônicos e sensores, sendo necessária uma diferença significativa entre as permissividades relativas das fases para que a técnica de medição seja viável.

Nesse contexto, insere-se o presente trabalho, o qual tem a missão de gerar dados experimentais acerca de propriedades elétricas (permissividade relativa e fator de dissipação) de misturas de óleos e substâncias voláteis sob várias condições de pressão e temperatura.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é a caracterização experimental de permissividade relativa e do fator de dissipação (parâmetro secundário) de misturas de refrigerantes R-134a e R-1234yf e óleo lubrificante POE ISO 10 em função da temperatura e da concentração (solubilidade) do refrigerante na mistura. Tais fluidos foram escolhidos por serem amplamente utilizados em sistemas de refrigeração e possuem um base de dados de propriedades termo-físicas consideráveis disponíveis. Uma vez que o aparato experimental esteja consolidado será possível realizar medições com outras substâncias.

Para cumprir este objetivo, as seguintes metas foram traçadas:

1. Projetar e construir uma bancada experimental para medição de propriedades dielétricas de misturas contendo componentes voláteis;

2. Validar o procedimento de medição com dados experimentais disponíveis na literatura;
3. Realizar experimentos para quantificar a permissividade relativa e o fator de dissipação das misturas R-134a/óleo POE ISO 10 e R-1234yf/óleo POE ISO 10, para temperaturas entre 25 e 55 °C e concentrações globais de refrigerante entre 10 e 80% (em massa);
4. Avaliar o desempenho de correlações e métodos de predição da permissividade relativa que não disponham de parâmetros de ajuste empíricos.

### 1.3 Fundamentos Teóricos

A determinação das grandezas de interesse neste trabalho, ou seja, a permissividade relativa (constante dielétrica) e o fator de dissipação, depende da medição direta da impedância, a qual será executada em uma seção de testes que atua como um capacitor. Este componente é composto por duas placas ou eletrodos e um meio dielétrico. As placas do capacitor são constituídas de bons condutores elétricos. Já o meio dielétrico é um isolante à passagem de corrente elétrica. A função do capacitor é armazenar carga elétrica no meio dielétrico. No contexto do presente trabalho, os meios dielétricos são os fluidos cujas propriedades elétricas serão determinadas, ou seja, óleo, fluidos refrigerantes e suas respectivas misturas a diferentes composições.

A impedância do meio dielétrico,  $\vec{Z}$ , é definida como a relação entre a tensão,  $\vec{V}$ , e corrente,  $\vec{I}$ , no mesmo. Assim (SIMS, 1999):

$$\vec{Z} = \frac{\vec{V}}{\vec{I}} \quad (1.1)$$

sendo que ambas sejam senoidais e o sistema esteja em regime permanente (estático).

A impedância de componentes reais pode ser modelada por uma parcela de impedância resistiva,  $\vec{Z}_R$ , que é igual a resistência,  $R$ , e outra reativa, denominada impedância capacitiva,  $\vec{Z}_C$ , calculada por:

$$\vec{Z}_C = -j \frac{1}{\omega C} \quad (1.2)$$

onde  $C$  é capacitância, em farad (F),  $j$  é a constante imaginária, igual a  $\sqrt{-1}$  e  $\omega$  é a frequência angular em rad/s, dada em função da frequência,  $f$ , em hertz (Hz) por:

$$\omega = 2\pi f \quad (1.3)$$

A resistência é caracterizada pela dissipação direta de energia elétrica sob forma de calor e luz. Já a reatância armazena essa energia em forma de campo elétrico ou magnético.

Para um capacitor ideal, a impedância é dada puramente por reatância capacitiva. Nesse caso, a medição de permissividade relativa tem uma incerteza menor. Entretanto, componentes reais nunca são puramente capacitivos, existindo sempre parcelas resistivas. Por esse motivo, os equipamentos destinados a medir impedância com baixa incerteza, denominados medidores LCR (Indutância, Capacitância e Resistência) medem sempre o vetor impedância. Ou seja, estes equipamentos têm capacidade de medir ambas as componentes da impedância.

Para valores de impedância elevados (tipicamente da ordem de  $M\Omega$ ) como é o caso das misturas caracterizadas no presente trabalho (FEJA, 2012), o guia de medição de impedâncias fornecido por Agilent Technologies (2006) recomenda a modelagem do meio dielétrico como um circuito em paralelo. Este modelo é considerado mais fisicamente consistente, pois a dissipação elétrica ocorre simultaneamente à absorção de energia no dielétrico. Tal circuito contém uma parcela resistiva (resistência  $R$ ), associada às perdas elétricas da célula de medição, e outra capacitiva (capacitância  $C_p$ ), que representa a energia acumulada em forma de campo elétrico. O circuito equivalente é mostrado na Figura 1.

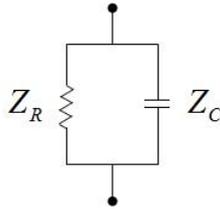


Figura 1 – Modelagem do circuito equivalente do meio dielétrico

A impedância,  $Z$ , do circuito é dada por:

$$\frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{\bar{Z}_R} + \frac{1}{\bar{Z}_C} = \frac{1}{R} - \frac{j\omega C_p}{j} \quad (1.4)$$

Manipulando a Equação 1.4, chega-se à seguinte expressão:

$$\frac{1}{Zj\omega C_o} = \frac{C_p}{C_o} - \frac{j}{R\omega C_o} \quad (1.5)$$

onde  $C_o$  é capacitância medida com o vácuo como meio dielétrico, em farad (F).

O termo do lado esquerdo da Equação 1.5 é definido como a permissividade relativa complexa,  $\varepsilon_r^*$ , ou seja:

$$\varepsilon_r^* = \frac{1}{Zj\omega C_o} \quad (1.6)$$

e o primeiro termo do lado direito é a permissividade relativa,  $\varepsilon'_r$ . Quando um capacitor possui um meio dielétrico que não é o vácuo, sua capacitância,  $C_p$ , tem valor superior em relação a um capacitor que utilize o vácuo,  $C_o$ . A razão entre as capacitâncias é definida como a permissividade relativa,  $\varepsilon'_r$ , que é sempre maior ou igual à unidade. Esta propriedade intensiva do material relaciona o deslocamento elétrico e o campo elétrico, ou seja, é uma medida da resistência encontrada quando se forma um campo elétrico. Pode-se dizer ainda, que a permissividade relativa indica a quantidade de energia armazenada em um dielétrico quando o mesmo está sob influência de um campo elétrico variável em relação a um capacitor que utilize o vácuo, sendo dada por:

$$\varepsilon'_r = \frac{C_p}{C_o} \quad (1.7)$$

O segundo termo do lado direito é a dissipação elétrica ( $\varepsilon''_r$ ) dada por:

$$\varepsilon''_r = \frac{j}{R\omega C_o} \quad (1.8)$$

O fator de dissipação,  $D$ , é definido como a tangente do ângulo de fase formado entre o vetor permissividade relativa complexa e a permissividade relativa, ou seja (ver Figura 2):

$$D = \tan \delta = \tan \frac{\varepsilon''_r}{\varepsilon'_r} \quad (1.9)$$

O fator de dissipação está associado às perdas de energia quando o dielétrico é submetido a um campo elétrico. Deseja-se portanto minimizar este parâmetro durante as medições de permissividade relativa, garantindo assim que a impedância seja predominantemente capacitiva e a incerteza de medição seja reduzida. Isto é feito variando-se a frequência de medição.

A equação da impedância total pode ser reescrita em função da impedância capacitiva do fator de dissipação da seguinte maneira:

$$Z = Z_C \sqrt{1 + D^2} \quad (1.10)$$

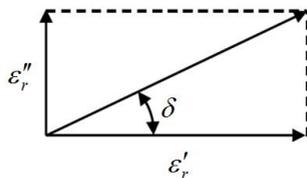


Figura 2 – Ângulo de fase  $\delta$  entre a permissividade relativa complexa e a permissividade relativa

## 1.4 Estrutura do documento

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos encontrados na literatura sobre a determinação experimental da permissividade relativa de refrigerantes e misturas óleo-refrigerante. No Capítulo 3, o aparato experimental projetado e construído neste trabalho é descrito em detalhes, assim como o procedimento experimental e sua validação. O Capítulo 4 apresenta os resultados experimentais para as duas misturas óleo-refrigerante e o desempenho de correlações propostas para o cálculo da permissividade relativa de misturas. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Propriedades Elétricas de Refrigerantes e suas Misturas

Apesar da enorme quantidade de trabalhos teóricos e experimentais sobre propriedades dielétricas de líquidos e gases, de uma forma geral, o número de trabalhos sobre a caracterização experimental de permissividade relativa de fluidos refrigerantes é baixo. Esse número se torna ainda menor quando se considera a avaliação de misturas de refrigerantes e óleos lubrificantes.

Normas alemãs e norte-americanas propõem recomendações para a determinação de permissividade relativa que podem ser aproveitadas para a caracterização de misturas óleo-refrigerante. A norma alemã DIN (2005) descreve com detalhes a montagem e preparação de aparatos para a medição de permissividade relativa e fator de dissipação de fluidos. São descritos também os procedimentos de limpeza e a escolha adequada do solvente a ser empregado entre diferentes baterias de testes. O documento também aborda o equacionamento das variáveis medidas e os critérios de regime permanente. A norma também ilustra as geometrias de diferentes células de medição.

A norma norte-americana ASTM D924 (2008) descreve o procedimento experimental, o equacionamento das variáveis medidas e mostra o conceito de uma célula de medição de dois terminais. Outras normas também abordam a medição de propriedades elétricas, como a norma ASTM D150 (2011), que mostra métodos de teste para medição de permissividade relativa, fator de dissipação e ângulo de fase de materiais sólidos. O relatório de pesquisa ASTM D27 (2003) relata os resultados de diferentes laboratórios para as propriedades elétricas que empregaram a metodologia descrita na norma ASTM D924 (2008).

Em um artigo de revisão, Ribeiro e Nieto de Castro (2011) relatam os principais trabalhos de caracterização experimental de permissividade relativa e propriedades dielétricas de fluidos refrigerantes realizados entre 1995 e 2009 pelo grupo do Departamento de Química e Bioquímica da Universidade de Lisboa. Ao todo, dezoito substâncias diferentes (HCFC, HFC e suas misturas) tiveram suas fases líquidas analisadas em temperaturas variando entre 202 e 303 K. Em poucos casos, propriedades da fase vapor foram caracterizadas (somente para o R-134a), em temperaturas de até 323 K. Ribeiro e Nieto de Castro

(2011) discutem também a utilização de modelos baseados em equações de estado para determinar a permissividade relativa e o momento dipolo de fluidos refrigerantes.

A técnica experimental utilizada pelo grupo português (MARDOLCAR; NIETO DE CASTRO; SANTOS, 1992; BARÃO et al., 1995; BARÃO; MARDOLCAR; NIETO DE CASTRO, 1998; BRITO et al., 2000; RIBEIRO et al., 2007; RIBEIRO; NIETO DE CASTRO; MARDOLCAR, 2008) consiste essencialmente em uma célula capacitiva com dois eletrodos para medição de propriedades dielétricas e um eletrodo guarda para reduzir as distorções de borda e capacitâncias parasitas. A célula é posicionada hermeticamente no interior de uma câmara pressurizada a fim de permitir a avaliação do efeito da pressão sobre as propriedades dielétricas. Este conceito de célula de medição foi adotado no presente trabalho e será discutido em maiores detalhes na Seção 3.2.

Tanaka et al. (1999) geraram dados experimentais de permissividade relativa e resistividade dos fluidos refrigerantes HFCs líquidos puros (R-236ea e R-245fa) numa faixa de temperaturas de 293 a 343 K, com pressões de até 50 MPa. Foi utilizada uma célula de medição de cilindros concêntricos de três terminais com uma frequência de 100 kHz. Os resultados de permissividade relativa foram correlacionados a partir da expressão empírica proposta por Owen e Brinkley Jr. (1943), com coeficientes de ajuste diferentes para cada temperatura.

Abbott et al. (1999) mediram a permissividade relativa dos refrigerantes R-134a, R-32 e R-125 em função da temperatura (303 a 403 K) e da pressão (4 a 30 MPa) para a fase líquida e na região supercrítica. Uma célula pressurizada com volume interno de  $15 \text{ cm}^3$  foi utilizada. Os eletrodos de placas retangulares fabricados em níquel possuíam cada um área superficial de  $7,5 \text{ cm}^2$  e o espaçamento entre as placas foi de 1 mm. A frequência de realização dos testes foi de 65 kHz. Os resultados apresentaram boa concordância com os de Barão et al. (1995), sendo a dependência da permissividade relativa com relação à pressão,  $(\partial \epsilon'_r / \partial P)_T$ , sempre positiva, e a dependência da permissividade relativa com relação à temperatura,  $(\partial \epsilon'_r / \partial T)_P$ , sempre negativa para todas as condições investigadas. A permissividade relativa, por meio da função  $(\epsilon'_r - 1) / (2\epsilon'_r + 1)$ , apresentou uma relação aproximadamente linear com a densidade reduzida,  $\rho / \rho_c$ , onde  $\rho_c$  é a densidade no ponto crítico.

Meurer, Pietsch e Haacke (2001) apresentaram dados de permissividade relativa, condutividade elétrica e tensão de ruptura dielétrica para o R-134a e misturas R-404A, R-407C, R-410A e R-507. A seção de testes para a determinação da permissividade relativa da fase

líquida saturada consistia de um capacitor de placas paralelas. Uma frequência de operação de 1 kHz foi utilizada. A quantidade de dados experimentais obtida por Meurer, Pietsch e Haacke (2001) foi bastante limitada, visto que dados apenas para temperaturas entre 23 e 26 °C foram apresentados.

Em seu estudo sobre lubrificação e desgaste de mancais de compressores de refrigeração, Tuomas (2006) apresentou medições experimentais da permissividade relativa das misturas R-134a/óleo POE e R-22/óleo mineral (naftênico). O efeito da introdução de aditivos anti-desgaste (éster fosfato a 0,25% e ácido fosfato a 1,5%) foi avaliado para a mistura R-134a/óleo. A seção de testes para a determinação da permissividade relativa consistia em um capacitor de placas paralelas com espaçamento entre elas de 0,1 mm. A frequência do sinal e a área das placas não foram informadas. A temperatura dos testes foi de  $40 \pm 1^\circ\text{C}$  e a pressão variou de acordo com a concentração da mistura óleo-refrigerante, sendo de aproximadamente 3, 7 e 10 bar para o R-134a (solubilidades de 8, 19 e 35%), e 5, 9 e 12 bar para o R-22 (solubilidades de 7, 14 e 27%). Os resultados experimentais demonstraram que a permissividade relativa do óleo mineral puro (cerca de 2,9) é menor que a do óleo POE puro (cerca de 3,9). Foi observado que a permissividade relativa aumentou com a concentração de refrigerante nas misturas, sendo os valores mais elevados para as misturas com R-134a. A presença dos aditivos anti-desgaste não exerceram influência significativa sobre os valores de permissividade relativa.

Feja (2012) mediu experimentalmente propriedades elétricas (permissividade relativa, fator de dissipação e resistividade dc) de fluidos refrigerantes e misturas óleo-refrigerante. Os fluidos refrigerantes R-134a, R-1234yf, R-152, R-744 e as misturas com o óleo lubrificante POE ISO 80 foram medidos. O projeto do experimento e os testes foram conduzidos de acordo com a norma alemã DIN (2005). A célula de medição de propriedades elétricas empregada possuía dois terminais, ou seja, não utilizava um eletrodo guarda para eliminar ou reduzir os efeitos de borda. Seus eletrodos são de geometria cilíndrica e existe uma abertura rosqueada para medição de temperatura na lateral do eletrodo externo. Conforme será detalhado na Seção 3.2, no projeto de Feja (2012), os próprios eletrodos têm a função de suportar o carregamento mecânico causado pela pressão de teste. Como em outros trabalhos experimentais, a permissividade decresceu com a temperatura e aumentou com a pressão/solubilidade. Contudo, dados detalhados da mistura foram apresentados somente para a mistura R-152/POE ISO 80. Dados experimentais para refrigerantes puros foram apresentados para temperaturas entre 20 e 90 °C.

## 2.2 Regras de Mistura para a Permissividade Relativa

Correlações para determinar a permissividade relativa de soluções líquidas são expressas em função da fração volumétrica de cada componente,  $\phi_i$ . A fração volumétrica é definida como o volume do componente,  $V_i$ , dividido pelo volume total dos componentes, *antes de misturar*. Logo, para o componente 1 de uma mistura binária:

$$\phi_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (2.1)$$

Desta forma:

$$\phi_1 + \phi_2 = 1 \quad (2.2)$$

Em função das massas dos componentes em solução e das densidades dos componentes *puros*, tem-se que:

$$\phi_1 = \frac{m_1/\rho_1}{m_1/\rho_1 + m_2/\rho_2} \quad (2.3)$$

Manipulando a Equação 2.3, em função da solubilidade definida como a fração mássica de um componente na mistura líquida, obtém-se que:

$$\phi_1 = \frac{x_1/\rho_1}{x_1/\rho_1 + x_2/\rho_2} \quad (2.4)$$

Shin, Tsui e Yeung (1989) apresentam uma relação de regras de mistura para a determinação da permissividade relativa de soluções binárias em função das frações volumétricas dos componentes. A expressão devida a Bottcher (1945) *apud* (SHIN; TSUI; YEUNG, 1989) é uma simples ponderação com relação às frações volumétricas. Assim:

$$\varepsilon'_r = \phi_1 \varepsilon'_1 + \phi_2 \varepsilon'_2 \quad (2.5)$$

A relação de Beer-Kraszewski (KRASZEWSKI, 1977) é do tipo assintótica na forma:

$$\varepsilon_r'^{1/2} = \phi_1 \varepsilon_1'^{1/2} + \phi_2 \varepsilon_2'^{1/2} \quad (2.6)$$

Da mesma forma, a expressão devida a Landau e Lifshitz (1960) possui um diferente expoente assintótico:

$$\varepsilon_r'^{1/3} = \phi_1 \varepsilon_1'^{1/3} + \phi_2 \varepsilon_2'^{1/3} \quad (2.7)$$

Lichtenecker, e Rother (1931) *apud* (SHIN; TSUI; YEUNG, 1989) propuseram uma expressão logarítmica para calcular a permissividade relativa da solução:

$$\ln \varepsilon'_r = \phi_1 \ln \varepsilon'_1 + \phi_2 \ln \varepsilon'_2 \quad (2.8)$$

Bruggeman (1935) *apud* (SHIN; TSUI; YEUNG, 1989) propõe uma regra de mistura mais elaborada, conforme a relação a seguir:

$$\frac{(\varepsilon'_2 - \varepsilon'_r)^3}{\varepsilon'_r/\varepsilon'_1} = \phi_1^3 (\varepsilon'_2 - \varepsilon'_1) \quad (2.9)$$

A dedução da equação de Bruggeman (1935) é apresentada por Campbell (1990) em seu trabalho sobre as propriedades dielétricas de tecidos biológicos.

A clássica equação de Clausius-Mossotti para a permissividade relativa de substâncias não-polares é dada por (SHIN; TSUI; YEUNG, 1989):

$$\frac{\varepsilon'_r - 1}{\varepsilon'_r + 2} = \phi_1 \frac{\varepsilon'_1 - 1}{\varepsilon'_1 + 2} + \phi_2 \frac{\varepsilon'_2 - 1}{\varepsilon'_2 + 2} \quad (2.10)$$

A expressão devida a Wiener (1912) *apud* (SHIN; TSUI; YEUNG, 1989) consiste em uma variação da equação de Clausius-Mossotti, com um coeficiente de ajuste  $b$ .

$$\frac{\varepsilon'_r - 1}{\varepsilon'_r + b} = \phi_1 \frac{\varepsilon'_1 - 1}{\varepsilon'_1 + b} + \phi_2 \frac{\varepsilon'_2 - 1}{\varepsilon'_2 + b} \quad (2.11)$$

onde  $b \neq 2$ .

A correlação de Kubo e Nakamuro (1953) *apud* (SHIN; TSUI; YEUNG, 1989) é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{3\varepsilon'_2}{c_1\varepsilon'_2 + c_2} \ln \frac{\varepsilon'_2 - \varepsilon'_r}{\varepsilon'_2 - \varepsilon'_1} - \frac{c_1\varepsilon'_2 - 2c_1}{c_1\varepsilon'_2 + c_2} \ln \frac{c_1\varepsilon'_r + c_2}{c_1\varepsilon'_1 + c_2} = \ln \phi_1 \quad (2.12)$$

onde  $c_1 = \frac{4\pi}{9\sqrt{3}}$  e  $c_2 = 3 - c_1$ .

É importante afirmar que existem métodos mais recentes e mais fisicamente detalhados para calcular a permissividade relativa de fluidos, como os baseados nos formalismos de Kirkwood-Frölich, Vedam e na equação de estado de Baron-Buep (RIBEIRO; NIETO DE CASTRO, 2011). Entretanto, por se tratar de um primeiro trabalho neste tema, estas teorias não serão abordadas.



# 3 APARATO EXPERIMENTAL

## 3.1 Descrição da Bancada

O aparato experimental construído contém os componentes necessários para a caracterização de propriedades elétricas de misturas sob condições controladas de pressão, temperatura e concentração é ilustrado esquematicamente na Figura 3. A Figura 4 mostra uma foto da bancada experimental.

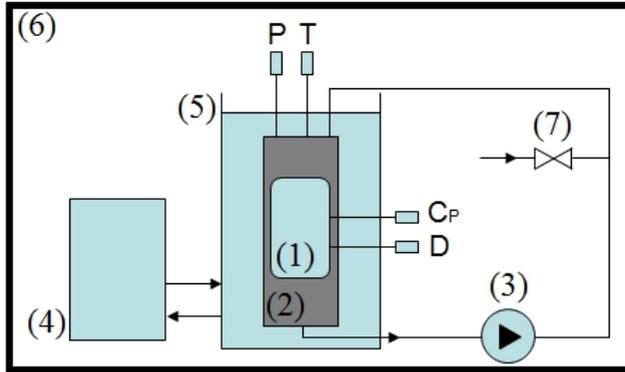


Figura 3 – Esquema do aparato experimental: (1) célula de medição de propriedades elétricas, (2) reservatório de equilíbrio, (3) bomba de engrenagens e motor elétrico, (4) banho termostático, (5) tanque de água, (6) estrutura de proteção de alumínio e acrílico e (7) válvula de serviço

O componente principal da bancada é a célula capacitiva (1), que será descrita em detalhes na Seção 3.2. A célula é inserida em um vaso de pressão, que atua como um reservatório de equilíbrio (2), conforme descrito por Marcelino Neto (2011). O reservatório de equilíbrio é fabricado de aço inoxidável AISI 316L, com um diâmetro externo de 132 mm, 400 mm de altura, 15 mm de espessura de parede. Fotografias do reservatório são mostradas na Figura 5, que mostra em detalhe o sulco para posicionamento do anel de vedação em sua flange superior.

A circulação e homogeneização da mistura líquida é realizada com o auxílio de uma bomba de engrenagens (3), da marca Micropump (modelo GC-M25JF5S6), mostrada na Figura 6. A rotação da bomba é

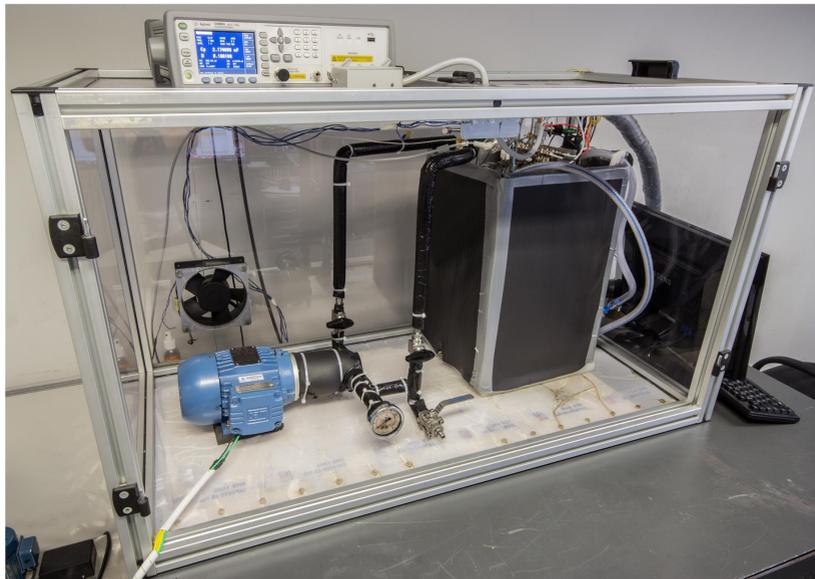


Figura 4 – Foto do aparato experimental

controlada por um inversor de frequência. As tubulações que conectam os componentes são do mesmo material do reservatório. Um banho termostático (4), fabricado pela Marconi (modelo MA - 184), mostrado na Figura 7, estabelece a temperatura de equilíbrio da mistura por meio da circulação de água de refrigeração/aquecimento no tanque de água (5), onde o reservatório de equilíbrio é totalmente submerso. O tanque é equipado também com uma resistência elétrica para diminuir o tempo de variação de temperatura entre diferentes condições de teste. A potência dissipada nesse componente é controlada por uma rotina PID em ambiente LabView (National Instruments). Para tanto, foi utilizado um circuito integrado para conversão de sinal de tensão (saída da placa de aquisição de sinais) para sinal de corrente (entrada do relé de estado sólido). Este circuito é alimentado por uma fonte de tensão contínua de 24 V. O relé de estado sólido modula a tensão de entrada de 220 V proporcionalmente a saída da placa de aquisição de sinais (0 a 10 V).

Para uma mistura saturada no interior do reservatório, a pressão interna será função da temperatura de equilíbrio estabelecida pelo banho termostático e das massas de fluido inseridas no reservatório. Desse modo, a pressão de saturação da mistura é a variável dependente. A circulação da mistura líquida promovida pela bomba de engrenagens



Figura 5 – Reservatório de equilíbrio



Figura 6 – Motor elétrico e bomba de engrenagens responsável pela circulação da mistura

faz com que o equilíbrio termodinâmico seja atingido com maior rapidez, comparado à difusão pura entre os componentes, sem agitação mecânica.

No interior do reservatório de equilíbrio, a mistura líquida é forçada pela bomba a circular continuamente entre os dois eletrodos da célula de medição, e assim são realizadas as medições das propriedades elétricas da mistura. Na sequência, o líquido passa para a parte inferior do reservatório de equilíbrio, onde é recolhido pela sucção da bomba de engrenagens. Todos os componentes são cobertos por mantas de isolamento térmico.

Por medida de segurança, todos os componentes pressurizados



Figura 7 – Banho termostático

são confinados em uma gaiola de proteção (6) fabricada em perfis de alumínio e policarbonato, a fim de evitar acidentes caso ocorra a falha de algum componente e uma depressurização repentina.

Um transdutor de pressão (Wika, modelo P-30) e um RTD (marca Omega, modelo PR-17-2-100-1/16-6E) são usados para as medições de pressão,  $P$ , e de temperatura,  $T$ , no reservatório de equilíbrio. A temperatura da água no tanque, por sua vez, é medida por quatro termopares distribuídos simetricamente ao redor do reservatório de equilíbrio. Na célula de medição são realizadas as medições de capacitância,  $C_P$ , e fator de dissipação,  $D$ , com o auxílio de um medidor LCR a ser descrito na Seção 3.4. Um sistema de aquisição de dados do fabricante *National Instruments* (chassi NI SCXI-1000 e módulos: NI SCXI-1303; NI SCXI-1302 e NI SCXI-1306) efetua a conversão dos sinais e envia os dados medidos no experimento para um computador, onde estes são gravados.

### 3.2 Célula Capacitiva

O objetivo desta seção é apresentar em detalhes o projeto e a construção do dispositivo de medição de propriedades elétricas de misturas óleo-refrigerante desenvolvido nesta dissertação. Inicialmente, alguns conceitos e recomendações propostos por outros autores serão

discutidos no sentido de contextualizar e justificar algumas decisões específicas para este estudo. Em seguida, os aspectos construtivos do sistema serão mostrados detalhadamente.

Além de atender às recomendações das normas alemã (DIN, 2005) e norte-americana (ASTM D924, 2008), a célula capacitiva para medição de propriedades dielétricas construída nesta dissertação foi projetada com base no sistema desenvolvido por Mardolcar, Nieto de Castro e Santos (1992). O diagrama esquemático da célula desenvolvida por aqueles autores é mostrado na Figura 8. Por ser uma célula de três terminais os efeitos de distorção nas extremidades do eletrodo são reduzidos. O capacitor mostrado na Figura 9 (a) ilustra qualitativamente o campo elétrico gerado entre dois eletrodos desprotegidos. É possível observar que as linhas de campo situadas na borda e entre as paredes externas não são uniformes. Além disso, elas são fontes de capacitâncias parasitas, pois atravessam diversos componentes que não são o meio dielétrico a ser testado. Por outro lado, a Figura 9 (b) mostra o campo elétrico gerado no mesmo capacitor com um eletrodo guarda ligado ao terra, envolvendo totalmente o eletrodo emissor. A título de informação, para a célula construída no presente trabalho, a medição de capacitância sem eletrodos guarda apresentou valores 10% superiores em relação aos medidos com os eletrodos protegidos.

Na célula capacitiva de Feja (2012), mostrada na Figura 10, os eletrodos têm tanto a função de terminais para as medições de capacitância, como a de suportar as pressões causadas pelo confinamento dos fluidos refrigerantes testados. Nessa configuração, a conexão entre os terminais do medidor LCR e os eletrodos da célula é facilmente realizada, uma vez que tal conexão não representa uma fonte de vazamentos. Entretanto, a função de vaso de pressão conferida aos eletrodos na célula de Feja (2012) implica o uso de uma quantidade maior de aço inoxidável para a construção dos eletrodos, o que, por sua vez, reduz a faixa de frequências de operação da célula, segundo o fabricante do medidor LCR.

No conceito de célula desenvolvido por Mardolcar, Nieto de Castro e Santos (1992), se faz necessário um reservatório (vaso de pressão) para confinar a célula de medição. A vantagem desta abordagem é a possibilidade de se utilizar eletrodos mais delicados, ou seja, de parede fina, o que permite uma faixa de frequências de operação mais ampla. A desvantagem, contudo, é a necessidade de se empregar conexões, denominadas *passadores* ou *feedthroughs*, para conduzir o sinal dos cabos que comunicam o medidor LCR e os eletrodos, sem que haja contato elétrico com a blindagem elétrica do reservatório. As conexões desenvolvidas especificamente neste trabalho serão descritas na Seção 3.3.

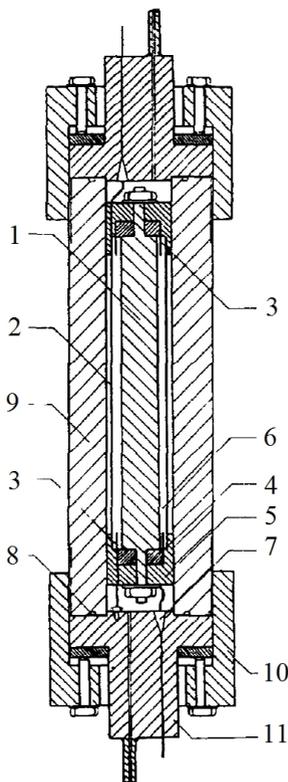


Figura 8 – Célula de medição de propriedades elétricas e o reservatório de pressão: (1) eletrodo interno, (2) eletrodo externo, (3) eletrodos guarda, (4) isolamento elétrico de teflon, (5) isolamento elétrico de teflon, (6) fluido testado, (7) passador, (8) anel de vedação, (9) carcaça do reservatório, (10) flange externo e (11) flange interno

Uma vantagem adicional da utilização de um reservatório externo à célula capacitiva é que este funciona também como uma gaiola de Faraday, eliminando a interferências de fontes externas sobre a medição das propriedades elétricas. Por outro lado, uma desvantagem de menor importância neste conceito de célula é a incerteza adicional causada pela necessidade de se empregar uma extensão aos cabos que conectam o medidor de impedância aos eletrodos. Esta parcela, no entanto, é bastante inferior em relação às demais. Para a célula desenvolvida neste trabalho, foi usada um extensão pouco menor que 150 mm,

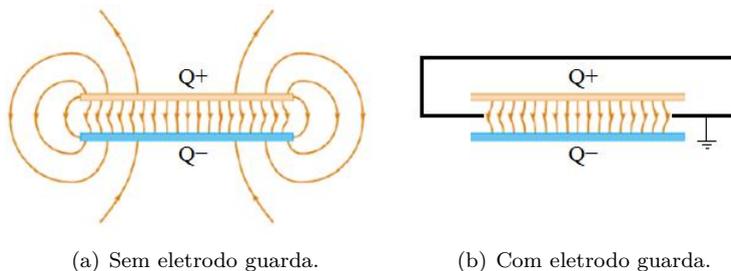


Figura 9 – Representação qualitativa do campo elétrico de capacitores



Figura 10 – Célula de medição de propriedades elétricas proposta por Feja (2012). A foto da esquerda mostra os eletrodos desmontados e a da direita os eletrodos encaixados.

sendo a parcela de incerteza associada calculada de acordo com o manual do medidor de impedância (AGILENT TECHNOLOGIES, 2010) foi inferior a 0,01 %.

Com relação ao presente projeto, os eletrodos da célula capacitiva de cilindros concêntricos foram construídos a partir de tubos de aço inoxidável ANSI 304 de parede fina, sendo os eletrodos do mesmo comprimento. O aço inox é um dos materiais recomendados pela norma ASTM D924 (2008). Embora não seja um dos melhores condutores elétricos como ouro, prata ou platina, o mesmo apresenta condutividade elétrica razoável. Além disso, tem custo reduzido em relação aos anteriores e apresenta excelente estabilidade geométrica por sofrer pouca corrosão e deformação.

Para garantir o posicionamento correto e o isolamento elétrico dos eletrodos da célula, foram empregadas peças de poliacetal, por se

tratar de um polímero de fácil usinabilidade e alta estabilidade dimensional. A Figura 11 mostra um desenho em CAD da célula de medição montada, com as peças poliméricas encaixadas em suas posições.

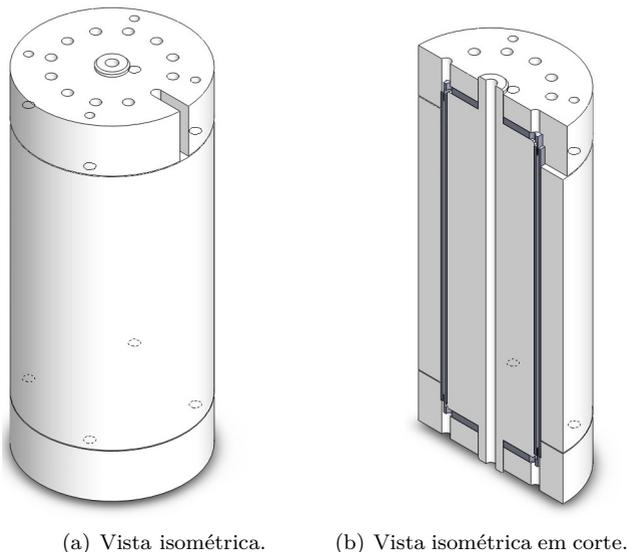


Figura 11 – Desenho da célula de medição construída

A Figura 12 ilustra a vista explodida com a respectiva nomenclatura dos componentes. A Figura 13 mostra uma vista de seção de  $90^\circ$  da vista explodida. A Tabela 1 mostra os diâmetros dos componentes da célula na direção radial. Os eletrodos interno e externo possuem espessura de 1,5 mm e são separados um do outro pela mesma distância quando montados.

Tabela 1 – Dimensões dos diâmetros internos e externos das peças da célula de medição

Peça	$D_I$ [mm]	$D_E$ [mm]
Isolamento elétrico intermediário	$6,80 \pm 0,10$	$60,45 \pm 0,05$
Eletrodo interno	$60,50 \pm 0,05$	$63,50 \pm 0,05$
Eletrodo guarda	$64,50 \pm 0,05$	$65,50 \pm 0,05$
Eletrodo externo	$66,50 \pm 0,05$	$69,50 \pm 0,05$
Isolamento elétrico externo	$69,55 \pm 0,05$	$100,50 \pm 0,10$

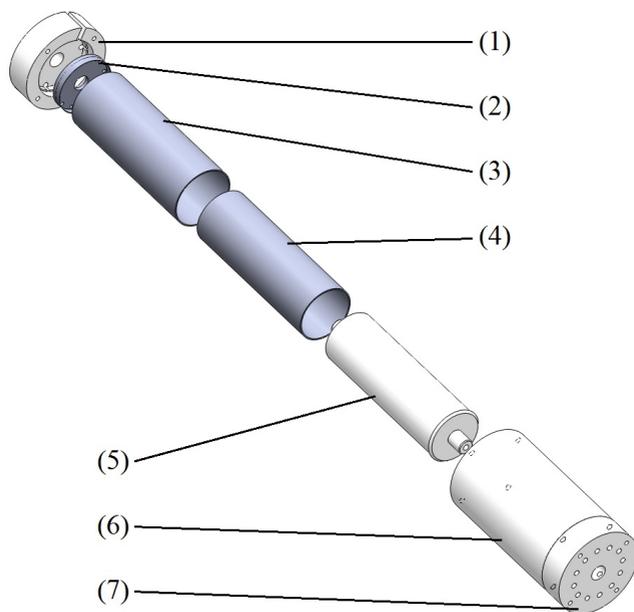


Figura 12 – Vista explodida da célula de medição: (1) isolamento elétrico superior, (2) eletrodo guarda superior, (3) eletrodo externo (receptor), (4) eletrodo interno (emissor), (5) isolamento elétrico intermediário, (6) isolamento elétrico externo e (7) isolamento elétrico superior

Em cada uma das extremidades dos eletrodos são posicionados os eletrodos guardas. A extremidade do eletrodo guarda, que possui espessura de 0,5 mm, se posiciona no espaço entre os eletrodos interno e externo para reduzir o efeito de borda, tal acoplamento é mostrado na Figura 14. Devido às dimensões reduzidas nesta região específica da célula, bastante cuidado foi tomado ao especificar as tolerâncias. Caso o eletrodo guarda entre em contato com qualquer um dos eletrodos, a medição é totalmente comprometida. A estratégia empregada foi de referenciar todos os componentes em relação ao isolamento elétrico intermediário.

Foram realizados vários furos radiais nas peças de isolamento elétrico superior e inferior e nos eletrodos guardas superior e inferior para permitir a passagem de mistura de óleo-refrigerante a ser testada somente pelo canal entre os eletrodos. Em todos os testes, garantiu-se que o nível de líquido fosse superior ao topo da célula, de maneira que

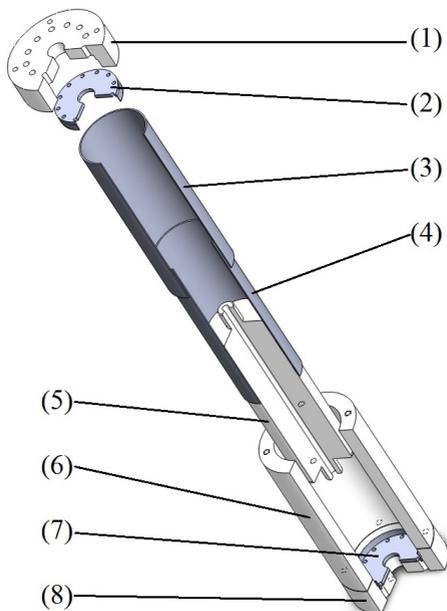


Figura 13 – Vista explodida da célula de medição: (1) isolamento elétrico superior, (2) eletrodo guarda superior, (3) eletrodo externo (receptor), (4) eletrodo interno (emissor), (5) isolamento elétrico intermediário, (6) isolamento elétrico externo, (7) eletrodo guarda inferior e (8) isolamento elétrico inferior

o volume útil da célula fosse completamente preenchido pela mistura. Tentou-se minimizar, na medida do possível, os espaços vazios além do volume entre os eletrodos. Desse modo, reduz-se a quantidade de fluido necessário para operar o aparato experimental. Além disso, no eletrodo guarda superior, um dos furos tem a função de permitir que o fio condutor do eletrodo interno saia do confinamento elétrico proporcionado pelos eletrodos guardas. A Figura 15 mostra fotos do eletrodo guarda superior com o fio condutor soldado.

O isolamento elétrico intermediário possui um furo passante na direção longitudinal por onde passa uma barra rosqueada. Essa barra metálica é presa na tampa do reservatório de equilíbrio e tem as funções de fixar a célula de medição no reservatório de equilíbrio e fazer a ligação elétrica dos eletrodos guarda ao terra da bancada. Estes detalhes podem ser vistos na compilação de fotos da célula montada mostrada na

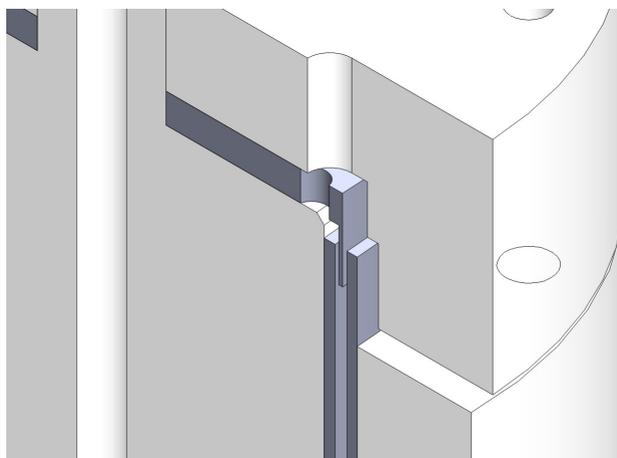


Figura 14 – Detalhe do acoplamento das peças da célula de medição

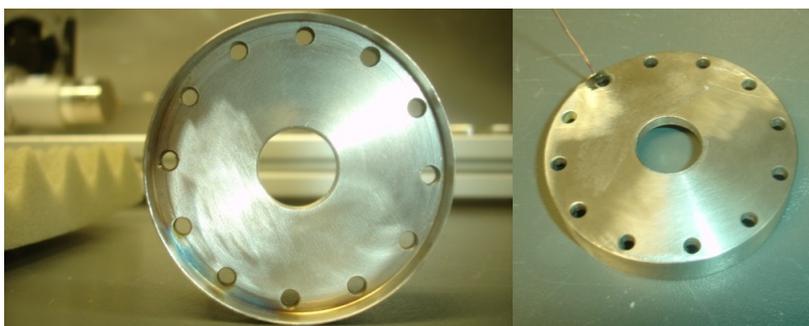


Figura 15 – Foto do eletrodo guarda superior

Figura 16. A fiação foi feita com cabos coaxiais rígidos, para que os fios condutores operassem com blindagem elétrica. A serpentina de cobre mostrada nas fotos é um trocador de calor interno por onde circula água do sistema de aquecimento/refrigeração. Com este trocador de calor, é possível variar a temperatura da mistura com maior rapidez.

O fechamento da célula é feito com 8 parafusos M5, cujas rosças foram cortadas no isolamento elétrico externo. Deixou-se uma folga de 1 mm para realizar o aperto, isto é, o comprimento do isolamento elétrico externo é cerca de 1 mm menor do que o valor nominal da soma dos comprimentos de projeto dos demais componentes. Isso garante que os isolamentos elétricos superior e inferior exerçam o esforço necessário

para manter os eletrodos sempre na mesma posição.

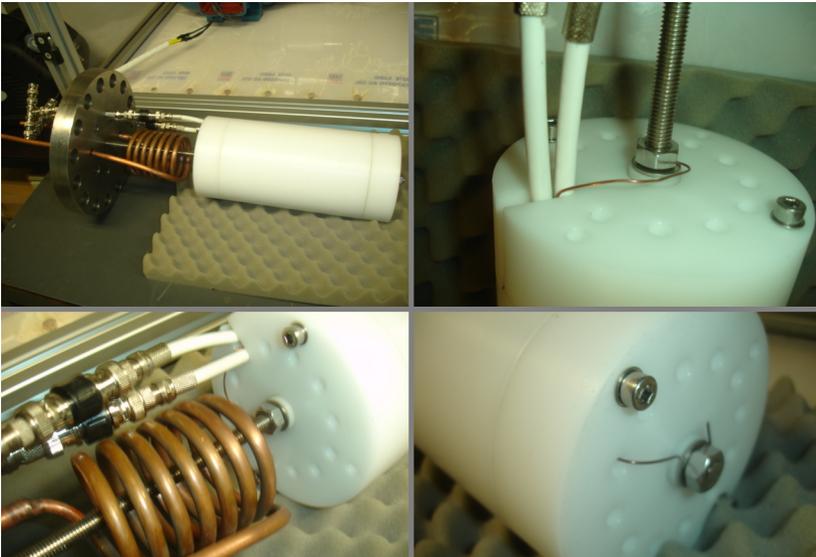


Figura 16 – Detalhes da célula de medição montada na barra rosqueada presa à tampa do reservatório de equilíbrio

### 3.3 Conexão do tipo *Feedtrough*

Para transmitir os sinais de excitação do eletrodo emissor e os de resposta do eletrodo receptor para dentro e fora do reservatório, foi necessário desenvolver uma conexão elétrica específica, denominada *feedtrough*. As conexões disponíveis comercialmente não se mostraram apropriadas, além de possuírem um custo elevado. Esta seção descreve o processo de fabricação desenvolvido neste trabalho.

Um conector Swagelok (Figura 17) é a peça principal da conexão *feedtrough*, a fim de conferir rigidez e vedação pela rosca externa. O interior do conector foi preenchido com cola estrutural de alto desempenho. O conjunto foi submetido a um processo de cura, em um forno aquecido a 160 °C, por três horas. Em seguida, um furo passante com metade do diâmetro interno da conexão foi feito na cola curada. Aplicou-se novamente o adesivo posicionando o fio rígido condutor no eixo central da conexão. A Figura 18 mostra a conexão após a segunda cura.



Figura 17 – Conector Swagelok modelo SS-400-1-4



Figura 18 – Conexão *feedtrough* construída

Testes foram realizados com auxílio de uma bomba mecânica para pressurizar um recipiente com água e vedado pela conexão *feedtrough*. O sistema suportou uma pressão de 150 bar. Além disso, um teste de estanqueidade mostrou que a conexão desenvolvida foi capaz de selar um pequeno reservatório de aço inox contendo nitrogênio a uma pressão de aproximadamente 40 bar, sem qualquer evidência de vazamento por um período de três dias.

Após a certificação de que a conexão *feedthrough* não apresenta vazamentos, a mesma é conectada a um cabo coaxial, conforme mostrado na Figura 19. A Figura 20 mostra a montagem da conexão *feedthrough* na tampa do reservatório de pressão em uma abertura com rosca NPT 1/4".

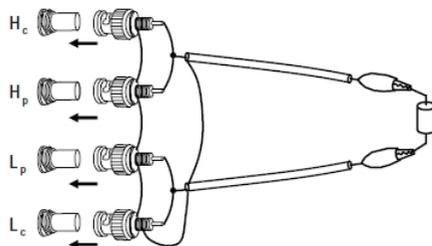


Figura 19 – Conexão *feedthrough* com o cabo coaxial montado

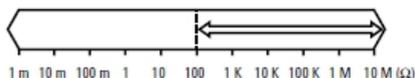


Figura 20 – Conexões *feedthrough* fixadas à tampa

A ligação elétrica e a blindagem elétrica dos cabos é de três terminais (dois de sinal e um de terra), tendo sido efetuada conforme a indicação do fabricante do medidor LCR, conforme mostrado na Figura 21 (a). Tal configuração é a mais indicada para a faixa de frequências e impedâncias testadas, ilustrada na Figura 21 (b). Detalhes sobre os diferentes tipo de ligação estão disponíveis no manual de medição de impedâncias (AGILENT TECHNOLOGIES, 2006).



(a) Esquema das conexões.



(b) Típica faixa de impedância.

Figura 21 – Configuração de cabos de três terminais.

### 3.4 Medidor LCR

Para a medição de impedâncias, foi utilizado um medidor LCR fabricado pela Agilent Technologies, modelo E4980A. Com o intuito de dominar a técnica de medição e validar procedimentos experimentais, o equipamento foi por vezes utilizado em conjunto com um dispositivo testador de fluidos (DTF), modelo 16452A, fornecido pelo mesmo fabricante. O DTF é mostrado na foto da Figura 22 e consiste em um capacitor com dois eletrodos planos, circulares e paralelos.

O medidor LCR caracteriza a impedância dos componentes testados com diferentes parâmetros de saída, que são medidos sempre em pares. Desse modo, é possível obter as duas componentes do vetor impedância. Isso é necessário já que nenhum componente elétrico possui impedância ideal, isto é, puramente resistiva, capacitiva ou indutiva. Para o presente trabalho, os parâmetros escolhidos para a medição foram as variáveis de interesse, isto é, a capacitância em paralelo,  $C_p$ , e o fator de dissipação,  $D$ , conforme descrito na Seção 1.3.



Figura 22 – Dispositivo testador de fluidos (DTF) Agilent

Para realizar medições com o DTF, conecta-se os quatro terminais do medidor LCR ( $H_{CUR}$ ,  $H_{POT}$ ,  $L_{CUR}$  e  $L_{POT}$ ) ao DTF por meio do cabo fabricado pela Agilent, modelo 16048G, que suporta uma temperatura de até  $150^\circ\text{C}$  (mostrado na Figura 23). Na sequência, realiza-se a correção SHORT, que consiste em montar o DTF com uma placa fabricada em ouro (impedância desprezível), fornecida junto com o DTF (ver Figura 24), desse modo os eletrodos ficam curto-circuitados. Em seguida, o próprio medidor LCR realiza as rotinas internas e salva os coeficientes de correção. Retira-se então a placa de ouro e a célula é montada novamente. Finalmente, mede-se a capacitância da célula evacuada para depois preencher o DTF com o fluido a ser testado.

Com o objetivo de dominar o uso dos equipamentos citados acima, foram realizadas medições preliminares com água e óleos lubrificantes POE ISO 68 e AB ISO 32. A permissividade da água foi obtida diretamente do programa REFPROP 8 (Lemmon e Huber (2007)). No entanto, não foram encontrados na literatura valores para os óleo testa-

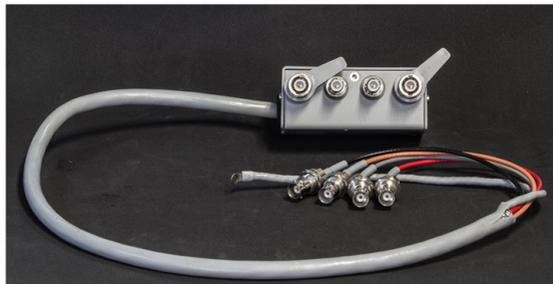


Figura 23 – Cabo que conecta o medidor LCR à célula de medição



Figura 24 – Placa de ouro para correção da medição de impedância

dos até o momento da redação desta dissertação. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2. Os testes foram realizados na temperatura ambiente de  $22,7 \pm 0,5^\circ\text{C}$  e em pressão atmosférica. Um tempo mínimo de 30 minutos foi necessário para garantir a estabilização do sistema. A frequência de medição foi de 1 MHz, a tensão foi de 1 V e foi empregado o espaçador de 2 mm.

Tabela 2 – Permissividade relativa - testes preliminares.

Substância	$\epsilon'_{r,exp}$	$\epsilon'_{r,ref}$	Diferença [%]
Ar	1,00	1,00	0%
Água	76,2	79,2	3,8%
Óleo POE ISO 68	3,71	-	-
Óleo AB ISO 32	2,29	-	-

Embora as medições preliminares tenham apresentado valores bastante aceitáveis, o DTF opera somente à pressão atmosférica. Segundo o fabricante, qualquer diferença de pressão entre as partes in-

terna e externa danificaria permanentemente o dispositivo. Desta forma, o mesmo é incapaz de operar com um fluido refrigerante volátil, impossibilitando assim a incorporação do mesmo ao aparato experimental. Em etapas preliminares do projeto, cogitou-se ainda posicionar o DTF totalmente submerso no reservatório de equilíbrio, de modo que não existisse gradiente de pressão entre os meios interno e externo. Tal arranjo, entretanto, não foi recomendado pelo fabricante. Por esse motivo, foi necessário projetar e construir a célula de medição de propriedades elétricas mostrada na Seção 3.2, de modo que o sistema de medição fosse capaz de suportar as condições de pressão e temperatura atingidas nas misturas óleo-refrigerante e que, principalmente, fornecesse resultados confiáveis.

## 3.5 Procedimento Experimental

A primeira etapa a ser realizada, antes mesmo de montar o aparato experimental, é a de limpeza dos componentes. Todas as normas consultadas apontaram como uma das maiores causas de erros na caracterização de propriedades elétricas a presença de impurezas. Todas as peças são lavadas individualmente com detergente e bem enxaguadas. Em seguida, após a secagem ao ar livre as peças são limpas com solvente R-141b. Conforme recomenda a norma alemã (DIN, 2005), durante todo o processo de limpeza foram utilizadas luvas de latex, de modo a evitar a contaminação dos componentes com a gordura corporal e protege-se as mãos dos fluidos empregados, que são agressivos à pele.

Após realizar a montagem, conecta-se os cabos de sinal das diferentes grandezas medidas aos respectivos componentes de medição e liga-se o sistema de aquisição e o computador da bancada. O programa de aquisição de dados foi desenvolvido em LabView e precisa estar em operação antes de se prosseguir. Os sinais de temperatura, pressão e de propriedades elétricas são mostrados em gráficos. Uma sub-rotina realiza a comunicação do LabView com o medidor LCR, permitindo o controle das funções do E4980A e a transmissão das medições diretamente para o computador. Os resultados são salvos em um arquivo de texto e são processados posteriormente.

Em seguida, realiza-se a correção de SHORT, descrita na Seção 3.4. A célula de medição já acoplada à tampa é inserida no reservatório de equilíbrio. 15 parafusos M16 dão o aperto necessário para selar o reservatório. O restante da tubulação do aparato experimental é montada e apertada. Um teste de vazamento utilizando nitrogênio é realizado a uma pressão de aproximadamente 10 bar. Os sinais de pressão e temperatura são observados por um período mínimo de 4 horas. Caso seja confirmada a estanqueidade realiza-se vácuo na tubulação interna.

Com o aparato pronto para a carga de fluidos, estes são inseridos por meio de cilindros de carga. Nos testes de misturas, primeiramente coloca-se a carga de óleo e, em seguida, realiza-se outra evacuação. Desse modo, a diferença de pressão entre o cilindro de carga e o reservatório de equilíbrio garante a passagem de refrigerante para dentro do reservatório. Após o cilindro de carga ser conectado e a tubulação intermediária ser evacuada, as válvulas do cilindro de carga e de serviço são abertas. O motor elétrico da bomba é acionado e a temperatura do banho é ajustada em 25 °C, que corresponde à temperatura mínima de testes. Esta temperatura é escolhida porque a solubilidade do refrigerante no óleo é inversamente proporcional à temperatura e, desse modo,

aproveita-se uma maior quantidade de carga de refrigerante. O cilindro de carga permanece conectado ao experimento por um longo tempo, até que a pressão se estabilize. Este é o indicador de que a absorção de gás refrigerante na pela fase líquida chegou ao fim, e o cilindro de carga pode ser desacoplado.

Medições foram realizadas para temperaturas entre 25 e 55 °C (nominais), em intervalos de 7,5 °C. Em todos os testes realizados e para todas as variáveis medidas, calculou-se o desvio padrão percentual,  $S\%$ , que consiste na razão percentual do desvio padrão,  $S$ , em relação à média,  $\bar{x}$ , da variável em questão, ou seja:

$$S\% = \frac{S \times 100}{\bar{x}} \quad (3.1)$$

O parâmetro definido pela Equação 3.1 foi considerado como uma condição de estabilidade do teste experimental. Os valores máximos deste indicador para que o teste fosse considerado válido, ou seja, em uma condição de equilíbrio estável, são mostrados na Tabela 3. A maioria dos testes apresentou valores bastante inferiores aos limites mostrados, e as medições apresentaram estabilidade aceitável. Um dos motivos para esta característica é a alta inércia térmica proporcionada pelo reservatório de equilíbrio e pela água de circulação. Além disso, tomou-se bastante cuidado no aterramento do aparato e a blindagem dos fios condutores do medidor LCR. Os detalhes de avaliação de incertezas são mostrados na Seção 3.8.

Tabela 3 – Valores máximos do desvio padrão adotado como condição de estabilidade

Variável	$S\%$ [%]
Temperatura	0,15
Pressão	0,10
Capacitância	0,075
Fator de dissipação	0,40

Os testes salvos são inicialmente processados no Excel e posteriormente realiza-se o cálculo de solubilidade e a propagação de incertezas no Matlab. Uma planilha do Excel armazena os resultados finais do processamento.

### 3.6 Cálculo de solubilidade

A concentração mássica global do refrigerante no interior do reservatório,  $z_r$ , é calculada pela razão entre a massa de refrigerante e a massa total, ou seja:

$$z_r = \frac{m_r}{m_r + m_o} \quad (3.2)$$

A existência de uma camada (ou capa) de vapor acima da mistura líquida no interior do reservatório faz com que a solubilidade, definida como a fração mássica de refrigerante dissolvida na mistura líquida, seja diferente da concentração mássica global. Como a pressão de vapor de óleos lubrificantes é muitas vezes menor que as dos fluidos refrigerantes para as temperaturas comumente encontradas em sistemas de refrigeração (ASHRAE HANDBOOK, 2010), a fração mássica do refrigerante na fase vapor é suposta igual à unidade e, da mesma forma, todo o óleo encontra-se na fase líquida.

Do ponto de vista prático, a capa de vapor é importante para garantir a segurança de operação do aparato experimental. Caso o volume de gás livre seja nulo, a fase líquida passa a se comportar como líquido comprimido e, nessa condição, o aumento de pressão é muito abrupto para uma pequena variação de temperatura. No entanto, com a presença da capa de vapor, a massa de refrigerante contida nessa camada de vapor deve ser descontada da massa de refrigerante total no cálculo da solubilidade em cada condição de teste.

O método empregado para calcular a solubilidade,  $x_r$ , foi adaptado do trabalho de (SEETON, 2009). Este método necessita que sejam fornecidos como dados de entrada o volume interno do aparato experimental,  $V$ , a densidade da fase líquida,  $\rho_l$ , a massa total de refrigerante,  $m_r$ , a massa total de óleo,  $m_o$ , e a densidade do vapor,  $\rho_v$ .

O volume interno foi medido com base em um procedimento a ser descrito em detalhes na Seção 3.7. As massas de fluido são medidas com uma balança de precisão com resolução de 0,01 g. A densidade do vapor foi calculada utilizando as equações de estado disponíveis no REFPROP 8 (LEMMON; HUBER, 2007).

A densidade do líquido é calculado pela regra do volumes aditivos, assumindo que a fase líquida se comporta como uma solução ideal. Logo,

$$\rho_l = \left( \frac{x_r}{\rho_{r,l}} + \frac{1 - x_r}{\rho_o} \right)^{-1} \quad (3.3)$$

onde  $\rho_{r,l}$  corresponde à densidade do refrigerante líquido puro e  $\rho_o$  é a densidade do óleo puro, ambos avaliados na temperatura do teste. A densidade do óleo puro foi calculada em função da temperatura em Kelvin, pela seguinte equação:

$$\rho_o = -0,0071(T - 273,15)^2 - 0,1715(T - 273,15) + 960,39 \quad (3.4)$$

É importante ressaltar que a hipótese de solução ideal para a mistura líquida é apropriada, visto que dados de equilíbrio de fase para as misturas R-134a/POE ISO 10 e R-1234yf/POE ISO 10 obtidos por França (2013) e Marcelino Neto, França e Barbosa Jr. (2014) apresentaram pequenos desvios médios (menores que 6,5%) com relação à Lei de Raoult para a pressão de vapor da mistura para temperaturas entre 13 e 80 °C. Apesar de desvios menores terem sido obtidos utilizando a equação de estado de Peng e Robinson (1976) com um parâmetro de interação binária, a boa concordância com a Lei de Raoult já justifica a adoção da hipótese de volumes aditivos para calcular a densidade da mistura líquida. As Figuras 25 e 26 mostram os diagramas de fases das misturas avaliadas no presente trabalho.

A massa de refrigerante contida no vapor  $m_v$  é calculada pela seguinte equação, que define a massa total do sistema como a soma das massas nas fases líquida e vapor e o volume total do sistema como a soma dos volumes das fases líquida e vapor. Logo:

$$m_v = \left( V - \frac{m_r + m_o}{\rho_l} \right) \left( \frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right)^{-1} \quad (3.5)$$

Como a solubilidade é definida pela seguinte equação:

$$x_r = \frac{m_r - m_v}{m_r + m_o - m_v} \quad (3.6)$$

é necessário um processo iterativo para resolver as Equações (3.3)-(3.6). Neste processo, a estimativa inicial de solubilidade é a concentração global. Calcula-se a massa de refrigerante dissolvido na fase líquida e, com as densidades de cada componente calculadas em função da pressão e da temperatura (LEMMON; HUBER, 2007), é possível obter o volume de líquido. Com os volumes total e de líquido obtêm-se o volume de vapor. Com a densidade do vapor obtida pela equação de estado (LEMMON; HUBER, 2007), calcula-se a massa contida na fase de vapor pela Equação 3.5. Por fim, a Equação 3.6 fornece o valor atualizado de solubilidade e o processo de cálculo é repetido até a convergência.

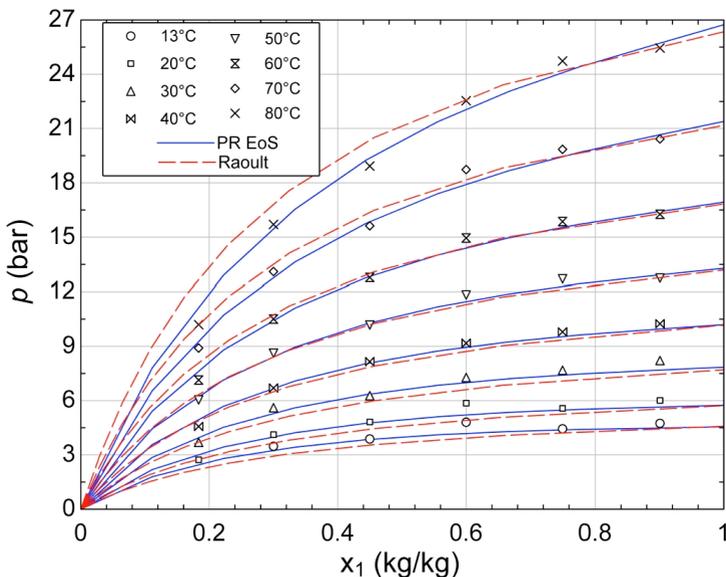


Figura 25 – Diagrama  $p$ - $T$ - $x$  para a mistura R-134a/POE ISO 10. Dados experimentais e resultados da Lei de Raoult e da equação de estado de Peng e Robinson (1976), França (2013)

É importante salientar que a minimização da altura da capa de gás, inserindo uma quantidade adequada de cada componente, reduz as incertezas experimentais e garante que os eletrodos da célula capacitiva estarão sempre cobertos pela mistura óleo-refrigerante.

### 3.7 Medição do Volume Interno

Um esquema do processo de medição do volume interno do sistema é apresentado na Figura 27. Neste caso, o sistema não compreende somente o reservatório em si, mas todas as válvulas, tubos, conexões e a própria cavidade interna da bomba de engrenagens, o que dificulta a determinação do volume por métodos gravimétricos. O método da expansão do gás consiste em expandir um gás contido em um reservatório de volume conhecido (volume padrão),  $V_p$ , para o sistema de volume  $V$ , inicialmente em vácuo, cujo valor se deseja determinar.

Após a expansão do gás entre os estados 1 e 2, o volume interno pode ser obtido a partir da seguinte equação, admitindo comportamento de gás ideal e igualando as massas de gás entre os estados 1 e

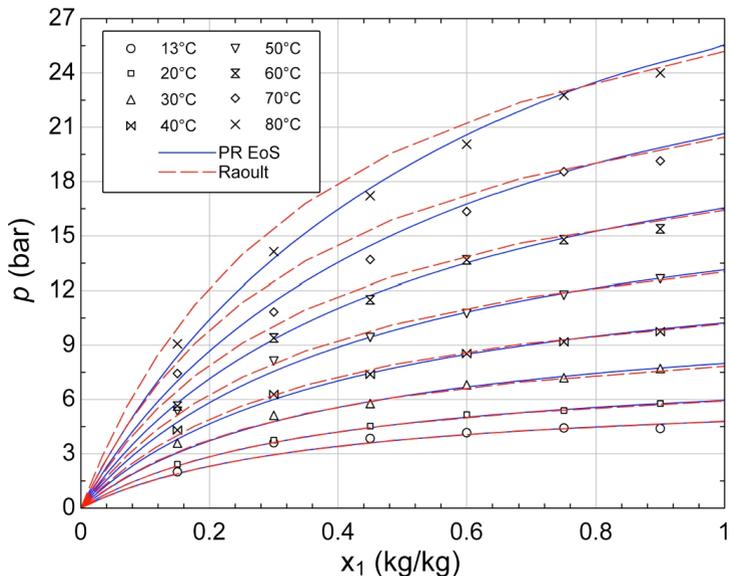


Figura 26 – Diagrama  $p$ - $T$ - $x$  para a mistura R-1234yf/POE ISO 10. Dados experimentais e resultados da Lei de Raoult e da equação de estado de Peng e Robinson (1976), França (2013)

2:

$$V = V_p \left[ \left( \frac{P_1}{P_2} \right) \left( \frac{T_2}{T_1} \right) - 1 \right] \quad (3.7)$$

Nos ensaios realizados, manteve-se a temperatura ambiente controlada durante todo o tempo, ou seja,  $T_1 = T_2$ , o que permite simplificar a análise.

Recomenda-se que, para reduzir a incerteza de medição do volume interno, deve-se empregar um volume padrão da mesma ordem de magnitude do volume interno. Nesta análise, utilizou-se como volume padrão um cilindro de aço inoxidável, da marca Swagelok, com volume interno nominal de 2250 ml. O verdadeiro volume interno deste cilindro foi determinado por uma análise gravimétrica, ou seja, através da medição da massa de água deionizada contida no seu interior. Neste procedimento, os seguintes passos foram seguidos:

- limpeza e evacuação do cilindro;

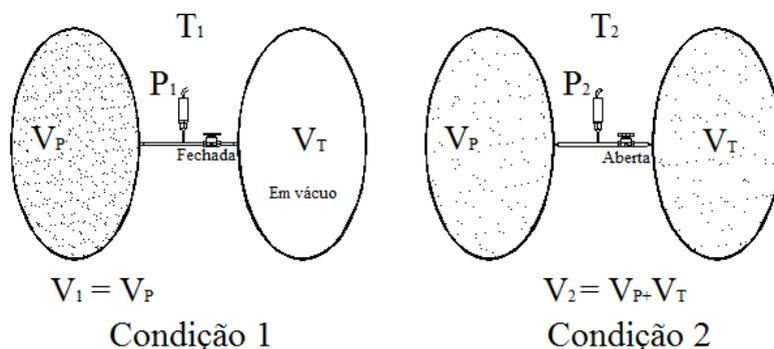


Figura 27 – Esquema processo de medição de volume interno, Gonçalves, Melo e Cardoso (2000)

- pesagem do cilindro evacuado;
- colocação da água destilada succionada pelo vácuo, evitando a penetração de ar no cilindro;
- fechamento da válvula do cilindro;
- pesagem final do cilindro carregado com água destilada;
- determinação do volume interno através da seguinte expressão:

$$V_p = \frac{(m_f - m_i)}{\rho_a} \quad (3.8)$$

onde  $m_i$  é a massa inicial do cilindro padrão evacuado (kg),  $m_f$  é a massa final do cilindro completamente cheio de água destilada (kg) e  $\rho_a$  é a densidade da água na temperatura ambiente ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

O gás empregado no procedimento de medição de volume interno foi o nitrogênio. Tal procedimento foi realizado apenas uma vez. A temperatura do teste foi a ambiente, aproximadamente  $21,7^\circ\text{C}$ . As pressões inicial e final foram aproximadamente de 40 bar e 20 bar. Nessa faixa o fator de compressibilidade varia de 0,996 a 0,997, valores muito próximos da unidade, o que corrobora a hipótese de gás ideal utilizada.

Os valores de incerteza associados a este procedimento de determinação de volume interno são apresentados na Seção 3.8.2.

O valor obtido para o volume padrão de acordo com a análise gravimétrica foi de  $2229 \pm 2,0$  ml. O volume interno determinado pelo método da expansão do gás foi de  $1478 \pm 8,8$  ml.

### 3.8 Avaliação de Incertezas

A análise de incertezas é imprescindível em qualquer trabalho experimental. A incerteza é um parâmetro associado com o resultado de uma medição e caracteriza a dispersão e confiabilidade dos valores medidos. Através da incerteza, tem-se uma indicação da qualidade do resultado, além da garantia quanto à comparação com resultados de outras fontes (GUM, 2008).

A probabilidade de abrangência adotada para as incertezas calculadas no presente trabalho foi de 95 %. Desta forma, foi empregado um coeficiente de abrangência da Distribuição  $t$  de Student de infinitos graus de liberdade de 1,96 nas incertezas das variáveis experimentais.

A incerteza relativa ao sistema de aquisição de dados é da ordem de 1% das demais parcelas e portanto foi desconsiderada. Também foi avaliada a correlação entre todas variáveis medidas através do cálculo do coeficiente de correlação. Os valores obtidos foram inferiores a 0,05 em módulo, indicando fraca correlação (GUM, 2008).

#### 3.8.1 Incertezas de Temperatura e Pressão

O transdutor de temperatura RTD foi calibrado na faixa de temperaturas de 5 a 95 °C. Foram empregados termômetros padrão calibrados pela Fundação CERTI da UFSC para cada faixa de temperaturas. A incerteza combinada da medição de temperatura  $u(T)$  é dada pela seguinte equação:

$$u(T) = \pm \sqrt{u_c(T)^2 + u_p(T)^2 + u_s(T)^2} \quad (3.9)$$

onde  $u_c(T)$  é a incerteza relativa à calibração (seu valor é de 0,17 °C, obtido pela Equação 3.10),  $u_p(T)$  é a incerteza do termômetro padrão (que vale 0,045 °C), obtida do relatório de calibração do termômetro e  $u_s(T)$  é a incerteza relativa à dispersão de medição ou o desvio padrão de temperatura  $S(T)$ . A incerteza relativa ao ajuste de calibração da temperatura é dada por:

$$u_c(T) = \pm \sqrt{\frac{\sum (T_p - T_c)^2}{N - (1 + GP)}} \quad (3.10)$$

onde  $T_p$  é a temperatura do termômetro padrão,  $T_c$  é a temperatura medida corrigida,  $N$  é o número de pontos de calibração e  $GP$  é o grau do polinômio empregado na correção, neste caso 2.

A incerteza de temperatura é, portanto, calculada para cada teste pela seguinte equação:

$$u(T) = \pm \sqrt{0,031 + u_s(T)^2} \quad (3.11)$$

O transdutor de pressão empregado é do tipo manométrico, do Fabricante Wika, modelo P-30, e possui faixa de medição de 0 a 60 bar. O produto foi adquirido com calibração especial e a sua incerteza é de  $\pm 0,05\%$  do valor final da faixa de medição, o que representa  $\pm 3000$  Pa. O intervalo de confiança também não foi informado no relatório de calibração. Portanto, dividiu-se a incerteza do transdutor pelo coeficiente de abrangência correspondente à distribuição retangular ( $\sqrt{3}$ ). A incerteza combinada associada ao transdutor de pressão  $u(P)$  para cada teste é dada por uma parcela respectiva à calibração e outra devido ao desvio padrão da pressão  $S(P)$  de cada teste, calculada em Pa pela seguinte expressão:

$$u(P) = \pm \sqrt{3,0 \times 10^6 + u_s(P)^2} \quad (3.12)$$

### 3.8.2 Propagação de Incerteza da Determinação do Volume Interno

O procedimento de medição do volume interno  $V$  foi descrito na Seção 3.7. A incerteza do método da expansão do gás pode ser avaliada através da combinação das incertezas de medição das grandezas efetivamente medidas no processo ( $V_P$ ,  $P_1$ ,  $T_1$ ,  $P_2$  e  $T_2$ ), conforme mostrado nas equações a seguir:

$$u(V) = \pm \sqrt{\left[ \frac{\partial V}{\partial V_P} u(V_P) \right]^2 + \left[ \frac{\partial V}{\partial P_1} u(P_1) \right]^2 + A} \quad (3.13)$$

$$A = \left[ \frac{\partial V}{\partial V_P} u(T_1) \right]^2 + \left[ \frac{\partial V}{\partial V_P} u(P_2) \right]^2 + \left[ \frac{\partial V}{\partial V_P} u(T_2) \right]^2 \quad (3.14)$$

As incertezas de medição  $u(V_P)$ ,  $u(P_1)$ ,  $u(T_1)$ ,  $u(P_2)$  e  $u(T_2)$  são oriundas do sistema e do processo de medição empregados. Na medição da massa do volume de água no volume padrão, utilizou-se uma balança de precisão eletrônica, marca Marte, modelo UX4200H, com faixa de medição de 0 a 4,2 kg e incerteza de  $\pm 0,01$  g, segundo o manual do fabricante. Devido às fontes de incerteza do processo de pesagem em si, como o posicionamento do cilindro de carga sobre o

prato não ser exatamente o mesmo em cada medição, será empregada uma incerteza dez vezes superior à do manual, ou seja,  $\pm 0,1$  g. Isto leva a uma incerteza de  $\pm 1$  ml no volume padrão. A incerteza associada à medição de pressão é obtida pela Equação 3.12. Cabe lembrar que as grandezas  $T_1$  e  $T_2$  foram mantidas constantes. Ainda assim, estas foram incluídas na análise da incerteza de medição para investigar os seus efeitos. Seus valores foram calculados empregando a Equação 3.11. Os valores das incertezas de medição são os seguintes:

- incerteza de medição de  $V_p - u(V_p) = \pm 1,0 \text{ ml} = \pm 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ ;
- incerteza de medição de  $P_1 - u(P_1) = \pm 1800 \text{ Pa}$ ;
- incerteza de medição de  $T_1 - u(T_1) = \pm 0,18 \text{ K}$ ;
- incerteza de medição de  $P_2 - u(P_2) = \pm 1800 \text{ Pa}$ ;
- incerteza de medição de  $T_2 - u(T_2) = \pm 0,18 \text{ K}$ ;

As parcelas da incerteza de medição do volume interno  $V$  foram avaliadas a partir da combinação de incerteza na Equação 3.7 como segue:

$$\frac{\partial V}{\partial V_p} u(V_p) = \frac{V}{V_p} u(V_p) \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial V}{\partial P_1} u(P_1) = \frac{(V + V_p)}{P_1} u(P_1) \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial V_T}{\partial T_1} u(T_1) = \frac{(V + V_p)}{T_1} u(T_1) \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial V}{\partial P_2} u(P_2) = \frac{(V + V_p)}{P_2} u(P_2) \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial V}{\partial T_2} u(T_2) = \frac{(V + V_p)}{T_2} u(T_2) \quad (3.19)$$

Substituindo as Equações 3.15 - 3.19 nas Equações 3.13 e 3.14 e rearranjando, obtêm-se a seguinte equação:

$$u(V) = \pm \sqrt{V^2 \left[ \frac{u(V_p)}{V_p} \right]^2 + (V + V_p)^2 B} \quad (3.20)$$

onde

$$B = \left[ \frac{u(P_1)}{P_1} \right]^2 + \left[ \frac{u(T_1)}{T_1} \right]^2 + \left[ \frac{u(P_2)}{P_2} \right]^2 + \left[ \frac{u(T_2)}{T_2} \right]^2 \quad (3.21)$$

O valor calculado da incerteza do volume interno do sistema é  $u(V) = \pm 4,5$  ml, o que corresponde a aproximadamente 0,3% do valor do volume interno medido.

### 3.8.3 Propagação de Incerteza do Cálculo de Solubilidade

O método de cálculo da solubilidade foi apresentado e discutido na Seção 3.6. Este parâmetro é dado em função das massas de refrigerante, de óleo e vapor. Sua incerteza de medição é obtida pela equação a seguir:

$$u(x_r) = \pm \sqrt{\left[ \frac{\partial x_r}{\partial m_r} u(m_r) \right]^2 + \left[ \frac{\partial x_r}{\partial m_o} u(m_o) \right]^2 + \left[ \frac{\partial x_r}{\partial m_v} u(m_v) \right]^2} \quad (3.22)$$

onde  $u(m_r)$ ,  $u(m_o)$  e  $u(m_v)$  são as incertezas associadas à medição das massas de refrigerante, óleo e vapor, respectivamente, e as derivadas parciais são apresentadas abaixo:

$$\frac{\partial x_r}{\partial m_r} = \frac{m_o}{(m_r + m_o - m_v)^2} \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial x_r}{\partial m_o} = \frac{(m_v - m_r)}{(m_r + m_o - m_v)^2} \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial x_r}{\partial m_v} = \frac{-m_o}{(m_r + m_o - m_v)^2} \quad (3.25)$$

As medições de  $m_r$  e  $m_o$  foram realizadas diretamente com a balança digital descrita na Sub-seção 3.8.2. Portanto suas incertezas são obtidas diretamente do manual do fabricante e valem  $\pm 0,1$  g. A massa do vapor é calculada pela Equação 3.5, de modo que é função do volume interno,  $V$ , da massa total,  $m_t$ , e das densidades do líquido,  $\rho_l$ , e do vapor,  $\rho_v$ . Sua incerteza é dada, então, pela seguinte equação:

$$u(m_v) = \pm \sqrt{\left[ \frac{\partial m_v}{\partial V} u(V) \right]^2 + \left[ \frac{\partial m_v}{\partial m_t} u(m_t) \right]^2 + C} \quad (3.26)$$

onde

$$C = \left[ \frac{\partial m_v}{\partial \rho_l} u(\rho_l) \right]^2 + \left[ \frac{\partial m_v}{\partial \rho_v} u(\rho_v) \right]^2 \quad (3.27)$$

e as respectivas derivadas parciais são:

$$\frac{\partial m_v}{\partial V} = \left( \frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right)^{-1} \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial m_v}{\partial m_t} = \frac{-1}{\rho_l} \left( \frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right)^{-1} \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial m_v}{\partial \rho_l} = \left( \frac{1}{\rho_l} \right)^2 \left[ m_t \left( \frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right) - \left( V - \frac{m_t}{\rho_l} \right) \right] \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial m_v}{\partial \rho_v} = \left( V - \frac{m_t}{\rho_l} \right) \left( \frac{1}{\rho_v} \right)^2 \left( \frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right)^{-2} \quad (3.31)$$

A incerteza associada à densidade do vapor  $u(\rho_v)$  é obtida através da avaliação da incerteza combinada desta propriedade em função das incertezas atribuídas aos parâmetros medidos que a definem (APREA; FILIPPO; MASTRULLO, 1997). Esta variável é função da pressão e da temperatura,  $\rho_v(P, T)$ , que possuem incertezas atribuídas às suas respectivas medições, ou seja,  $u(T)$  e  $u(P)$ . Tais incertezas devem ser consideradas para o cálculo da incerteza da densidade do vapor conforme mostrado na equação abaixo:

$$u(\rho_v) = \pm \sqrt{u(\rho_v)_P^2 + u(\rho_v)_T^2} \quad (3.32)$$

onde  $u(\rho_v)_P$  é incerteza relativa à incerteza da pressão e  $u(\rho_v)_T$  é incerteza relativa à incerteza da temperatura. Estas incertezas são obtidas a partir de uma média aritmética entre as propriedades calculadas com um incremento positivo e outro negativo. Tais incrementos correspondem às incertezas associadas com as medições de temperatura ou pressão, conforme mostram as equações a seguir:

$$u(\rho_v)_P = \frac{|\rho_v(P + u(P), T) - \rho_v(P - u(P), T)|}{2} \quad (3.33)$$

$$u(\rho_v)_T = \frac{|\rho_v(P, T + u(T)) - \rho_v(P, T - u(T))|}{2} \quad (3.34)$$

onde  $u(T)$  é obtido para cada teste pela Equação 3.11 e  $u(P)$  é obtido pela Equação 3.12.

A densidade do líquido  $\rho_l$ , por sua vez, foi calculada com base na regra de mistura apresentada na Equação 3.3, que depende das densidades do refrigerante líquido saturado,  $\rho_{r,l}$ , do óleo,  $\rho_o$ , e da solubilidade. Nesta análise foi considerado que a solubilidade é constante. Posteriormente, esta parcela de incerteza será incorporada na incerteza de solubilidade. A incerteza combinada da densidade do líquido é portanto:

$$u(\rho_l) = \pm \sqrt{\frac{\partial \rho_l}{\partial \rho_{r,l}} u(\rho_{r,l})^2 + \frac{\partial \rho_l}{\partial \rho_o} u(\rho_o)^2} \quad (3.35)$$

As incertezas básicas de  $\rho_{r,l}(P, T)$  e  $\rho_o(T)$  são calculadas com a mesma abordagem apresentada no cálculo da incerteza de  $\rho_v$ , conforme mostrado abaixo:

$$u(\rho_{r,l}) = \pm \sqrt{u(\rho_{r,l})_P^2 + u(\rho_{r,l})_T^2} \quad (3.36)$$

$$u(\rho_{r,l})_P = \frac{|\rho_{r,l}(P + u(P), T) - \rho_{r,l}(P - u(P), T)|}{2} \quad (3.37)$$

$$u(\rho_{r,l})_T = \frac{|\rho_{r,l}(P, T + u(T)) - \rho_{r,l}(P, T - u(T))|}{2} \quad (3.38)$$

$$u(\rho_o) = u(\rho_o)_T = \frac{|\rho_o(P, T + u(T)) - \rho_o(P, T - u(T))|}{2} \quad (3.39)$$

### 3.8.4 Propagação de Incerteza de Medição de Propriedades Elétricas

A permissividade relativa é função das capacitâncias da mistura e da célula evacuada (Equação 1.7), sua incerteza de medição  $u(\varepsilon'_r)$  é calculada pela equação abaixo:

$$u(\varepsilon'_r) = \pm \sqrt{\left[ \frac{\partial \varepsilon'_r}{\partial C_p} u(C_p) \right]^2 + \left[ \frac{\partial \varepsilon'_r}{\partial C_o} u(C_o) \right]^2} \quad (3.40)$$

onde  $u(C_p)$  é a incerteza da medição de capacitância do fluido e  $u(C_o)$  é a incerteza de medição da capacitância da célula vazia.

A incerteza associada à capacitância do fluido possui dois termos, um depende do instrumento  $u_i(C_P)$  e outro da incerteza relativa à repetibilidade de medição  $u_s(C_P)$ , ou seja:

$$u(C_P) = \pm \sqrt{u_i(C_P)^2 + u_s(C_P)^2} \quad (3.41)$$

onde a incerteza referente à medição,  $u_s(C_P)$ , consiste no desvio padrão da variável em relação à média.

O cálculo da incerteza referente ao medidor LCR,  $u_i(C_P)$ , é dado na forma percentual em relação ao valor medido,  $A_i(C_P)$ , ou seja:

$$u_i(C_P) = \frac{C_P A_i(C_P)}{100} \quad (3.42)$$

Conforme descrito no manual do equipamento (Agilent Technologies (2010)), a obtenção das incertezas percentuais consiste na soma da incerteza relativa percentual,  $A_r(C_P)$ , e da incerteza de calibração percentual,  $A_c(C_P)$ :

$$A_i(C_P) = A_r(C_P) + A_c(C_P) \quad (3.43)$$

A incerteza relativa percentual é calculada por:

$$A_r(C_P) = \left[ \left( A_b + \frac{Z_S}{|Z|} \right) 100 + Y_o |Z| 1000 \right] k_T \quad (3.44)$$

onde os valores de  $A_b$ ,  $Z_S$ ,  $Y_o$  e  $k_T$  são tabelados e dependem da impedância, frequência e temperatura do medidor LCR. O parâmetro  $|Z|$  é a impedância medida, que para a configuração de medição do medidor LCR pode ser calculada em função da frequência  $f$ , da capacitância  $C_P$  e do fator de dissipação  $D$ , conforme a equação abaixo:

$$|Z| = \frac{1}{2\pi f C_P} \sqrt{1 + D^2} \quad (3.45)$$

A incerteza de calibração  $A_c(C_P)$  também obtida com base em valores tabelados dependentes da impedância e da frequência.

Para o cálculo da incerteza de medição da impedância da célula vazia  $u(C_o)$  empregam-se as mesmas equações e procedimentos utilizados no cálculo da incerteza de medição da célula preenchida com fluido  $u(C_P)$  descritas acima.

Segundo o manual do medidor LCR, a incerteza do fator de dissipação,  $D$ , é calculada com base na incerteza percentual do instrumento de medição,  $A_i(C_P)$ , conforme mostra a seguinte equação:

$$u_i(D) = \frac{A_i(C_P)}{100} \quad (3.46)$$

Caso o fator de dissipação seja maior do que 0,1, o lado direito da Equação 3.46 deve ser multiplicado por  $(1 + D)$ .

### 3.9 Validação Experimental

A validação do aparato experimental desenvolvido foi realizada inicialmente com água deionizada. As medições com o DTF e a célula desenvolvida foram comparadas com os valores obtidos diretamente do programa REFPROP 8 (LEMMON; HUBER, 2007). Estes valores são mostrados na Figura 28.

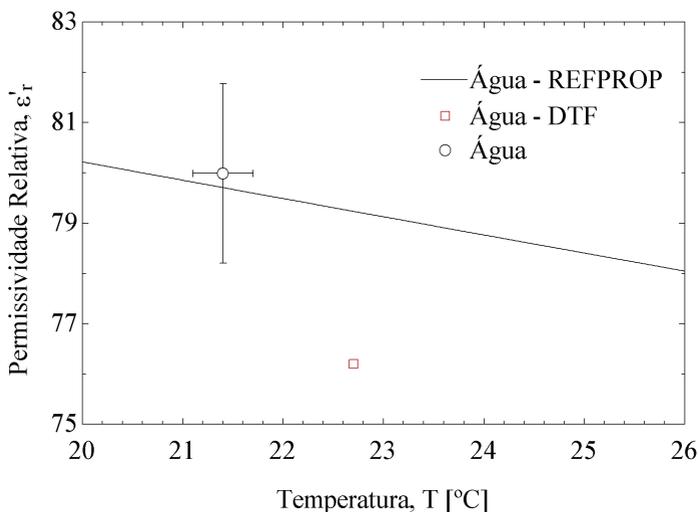


Figura 28 – Resultados da permissividade relativa da água

Os desvios em relação à curva foram de 3,8% para o DTF e 0,2% para a célula de medição desenvolvida, para as temperaturas de 22,7 e 21,4 °C, respectivamente. O pequeno desvio com relação ao valor de referência dá forte evidência da adequação do projeto da célula capacitiva.

Foi realizado um ensaio de varredura de frequência para toda a faixa permitida pelo medidor LCR, ou seja, de 20 Hz a 2 MHz, como mostra a Figura 29. Para frequências baixas, observa-se a ocorrência do efeito denominado *double layer effect* (MDUKHIN; DERJAGUIN, 1974), que consiste na polarização das moléculas, o que provoca uma interferência no resultado medido. Tal efeito é claramente observado

para a água em frequências menores que 100 kHz. Para frequências mais elevadas, a impedância reativa deixa de ser capacitiva e passa a ser indutiva, contaminando a medição de permissividade relativa. Tal comportamento não é observado na Figura 29, pois a frequência máxima do medidor LCR utilizado é relativamente baixa. Por isso, deve-se selecionar uma frequência intermediária para cada fluido na qual a permissividade relativa não varie fortemente com a frequência. No presente trabalho, portanto, a frequência de medição empregada foi de 2 MHz (linha tracejada vermelha). Do ponto de vista prático, por exemplo, um medidor de fração de vazio ou dispositivo similar que venha a utilizar os resultados de permissividade relativa gerados neste trabalho deverão empregar frequências de teste iguais ou similares a esta. A variação de capacitância da célula evacuada na faixa de frequência é desprezível e pode ser considerada constante (aproximadamente 205 pF). As respectivas incertezas não foram mostradas, pois devido à escala logarítmica não são perceptíveis visualmente.

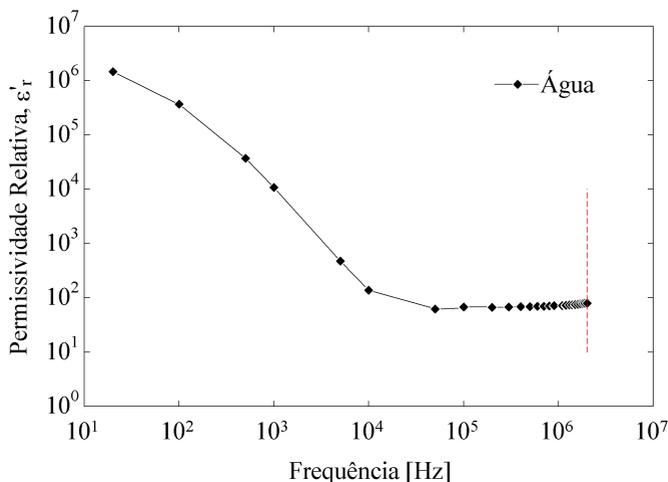


Figura 29 – Resultados experimentais de varredura de frequência para água

Não foi possível realizar mais testes com água devido ao alto nível de corrosão e conseqüente contaminação ocorridos. A junção dos fios condutores de cobre com os eletrodos de aço inox foi feita com uma brasagem utilizando o material de adição conhecido como solda prata. Este procedimento causa deposição de óxidos na liga que, em contato

com a água, oxidam rapidamente. Além disso, as conexões BNC empregadas também apresentaram indícios de corrosão, por possuírem ligas de baixa qualidade. Os resultados foram fortemente afetados para tempos maiores do que 30 minutos após colocada a massa de água dentro do reservatório. Isto tornava necessário a desmontagem de todos os componentes, polimento das soldas, substituição dos conectores BNC, limpeza das peças e remontagem do aparato. Foram feitas tentativas de aplicação de solução de bicarbonato de sódio nas soldas, porém a corrosão continuou ocorrendo, o que inviabilizou testes de validação em diferentes temperaturas.

Diante do exposto acima, o restante do exercício de validação do aparato experimental foi realizado com os próprios fluidos refrigerantes puros R-134a e R-1234yf, que não causam corrosão nos eletrodos. Desta forma, foi medida a permissividade relativa da fase líquida de cada fluido saturado. Os dados de referência para o R-134a foram retirados de Barão, Maldocar e Nieto de Castro (1996) e de Feja (2012). Os resultados do primeiro autor foram extrapolados em função da pressão, pois em seu trabalho o fluido foi testado na região de líquido comprimido. Os pontos experimentais do presente trabalho para o R-134a são mostrados na Figura 30 com as respectivas barras de incerteza. A frequência utilizada foi de 1 kHz e a tensão de 1 V, ambas idênticas ao trabalho de Feja (2012). Tal frequência é, pelo menos, o dobro do limite a partir do qual o *double layer effect* é representativo. De uma forma geral, observa-se uma excelente concordância com os dados de referência da literatura.

O fluido R-1234yf é um potencial substituto para o R-134a em sistemas de refrigeração. Seu potencial de aquecimento global (GWP) é bastante inferior ao do R-134a e, por isso, vários trabalhos têm sido publicados no sentido de ampliar a caracterização experimental das propriedades deste fluido, principalmente quando em misturas com óleos lubrificantes. Com relação à permissividade relativa, o único trabalho identificado na literatura aberta foi o de Feja (2012). No entanto, os dados deste autor são bastante limitados com relação ao efeito da concentração de óleo lubrificante na permissividade relativa. A comparação dos dados experimentais deste trabalho para a permissividade relativa do R-1234yf puro com os dados de Feja (2011) é mostrada na Figura 31. Novamente, uma concordância muito boa é observada.

Em suma, os resultados obtidos com a célula de medição mostraram valores e tendências bastante satisfatórias em relação aos dados já publicados de outros autores. Considera-se, portanto, que o aparato experimental de medição de propriedades elétricas projetado e construído no presente trabalho devidamente validado.

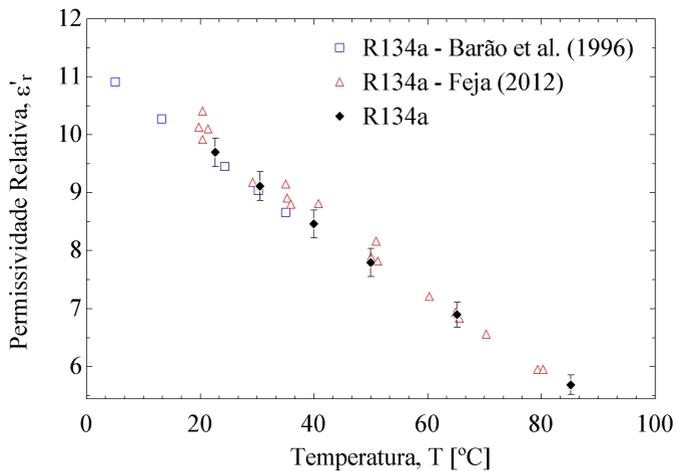


Figura 30 – Permissividade relativa do R134a saturado líquido

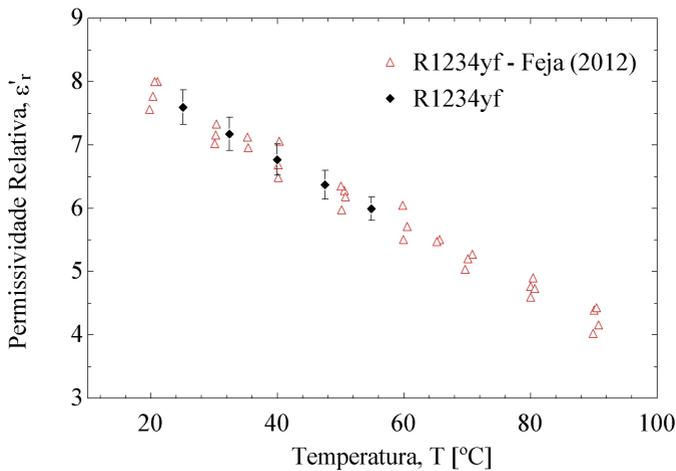


Figura 31 – Resultados da permissividade relativa do R1234yf saturado líquido

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Ensaios com Óleo POE ISO 10

Resultados dos ensaios de determinação da permissividade relativa do óleo poliol éster (POE) ISO 10 em função da temperatura são mostrados na Figura 32. As medições foram realizadas para uma frequência de 1 kHz. Tanto os valores absolutos quanto a ligeira queda da permissividade relativa com a temperatura são compatíveis com dados e tendências relatadas na literatura para óleos vegetais (LIZHI; TOYODA; IHARA, 2008; CORACH; SORICHETTI; ROMANO, 2013) e óleos lubrificantes de refrigeração (FEJA, 2012). Observa-se uma excelente repetibilidade dos dados experimentais para as duas sequências de testes exibidas na figura. É importante salientar que a segunda bateria de testes foi realizada meses após a primeira. Nesse período de tempo, o aparato experimental foi operado com outros fluidos, tendo sido também desmontado completamente várias vezes. Os valores numéricos dos resultados mostrados no gráfico da Figura 32 são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados de permissividade relativa para o óleo POE ISO 10 e as respectivas incertezas.

	$T$ [°C]	$\epsilon'_r$ [-]
POE ISO 10	$25,1 \pm 0,3$	$3,52 \pm 0,10$
	$32,7 \pm 0,4$	$3,49 \pm 0,09$
	$40,2 \pm 0,4$	$3,46 \pm 0,09$
	$47,8 \pm 0,4$	$3,43 \pm 0,09$
	$55,5 \pm 0,4$	$3,40 \pm 0,09$
POE ISO 10 - Rep	$23,8 \pm 0,4$	$3,53 \pm 0,10$
	$30,1 \pm 0,4$	$3,51 \pm 0,09$
	$40,0 \pm 0,4$	$3,47 \pm 0,09$
	$50,1 \pm 0,4$	$3,42 \pm 0,09$

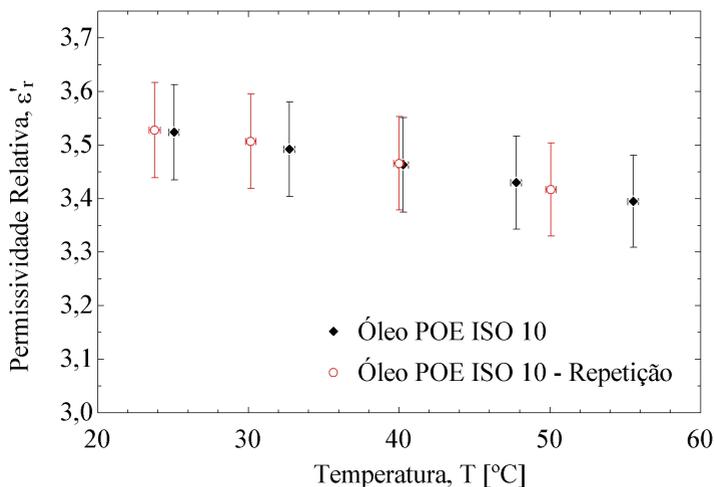


Figura 32 – Permissividade relativa do óleo POE ISO 10 em função da temperatura

## 4.2 Ensaios com a Mistura R-134a/Óleo POE ISO 10

A Figura 33 apresenta os resultados experimentais da permissividade relativa da mistura R-134/POE ISO 10 em função da temperatura e da concentração global de refrigerante na mistura (Equação 3.2). Os dados apresentados na figura são mostrados na Tabela 5, juntamente com o fator de dissipação e a solubilidade calculada para cada condição, conforme o método apresentado na Seção 3.6 (Equação 3.6). Os dados foram obtidos a uma frequência de 1 kHz.

As solubilidades de cada condição de teste e suas respectivas incertezas são mostradas na Tabela 6.

Os valores de permissividade relativa da mistura aumentam de acordo com a fração mássica de refrigerante, estando confinados aos limites estabelecidos para os componentes puros. Com o aumento de temperatura, a permissividade relativa diminui, seguindo também a tendência observada em trabalhos anteriores que caracterizaram óleos puros (LIZHI; TOYODA; IHARA, 2008; FEJA, 2012; CORACH; SO-RICETTI; ROMANO, 2013). Esta tendência é mais pronunciada para frações mássicas de refrigerante superiores. Para se ter uma melhor

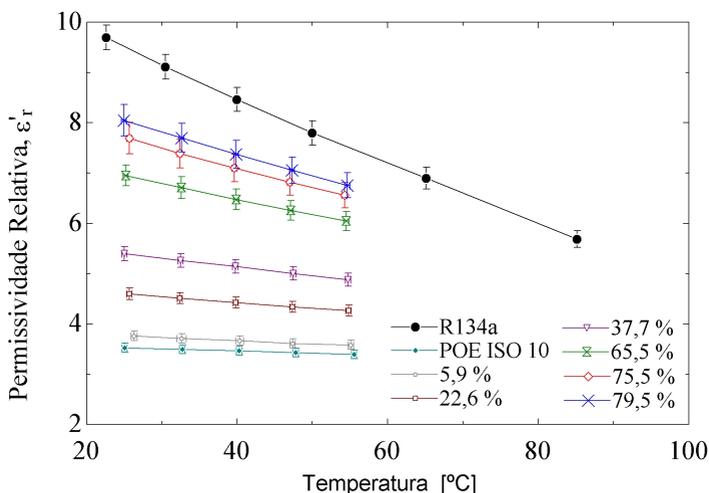


Figura 33 – Permissividade relativa da mistura R-134a/Óleo POE ISO 10 em função da temperatura e da concentração global

compreensão deste efeito do ponto de vista quantitativo, foram ajustadas retas para os componentes puros e também para cada concentração global. Os módulos dos coeficientes angulares de cada ajuste,  $\left| \frac{d\epsilon'_r}{dT} \right|$ , são mostrados na Tabela 7. Observa-se claramente que os mesmos são sempre crescentes à medida que a concentração global aumenta.

Observou-se também que, com o aumento da concentração global, a incerteza associada à medição de permissividade relativa foi superior em relação às concentrações inferiores. As incertezas percentuais foram, em média, de 1,3%, 1,3%, 1,3%, 1,6%, 2,0% e 2,2% para cada concentração global em ordem crescente. Isto se deu pelo fato dos fatores de dissipação medidos do refrigerante serem muito superiores em relação aos do óleo. Tais valores foram, em média, cerca de 750 vezes maiores. Conforme discutido na Seção 1.3, a incerteza de medição aumenta com o fator de dissipação devido ao aumento das perdas elétricas. Para reduzir esta incerteza, seria necessário utilizar uma frequência de teste diferente.

A Figura 34 mostra uma representação em curva de nível dos resultados. Fica evidente a partir do gráfico, que a solubilidade tem mais influência no valor de permissividade em relação à temperatura.

O comportamento do fator de dissipação em função da concen-

Tabela 5 – Resultados de permissividade relativa e fator de dissipação para a mistura R-134a/Óleo POE ISO 10 em função da concentração global e da temperatura.

$z_r = 5,9\%$			$z_r = 22,6\%$		
$T$ [°C]	$\varepsilon'_r$ [-]	$D$ [-]	$T$ [°C]	$\varepsilon'_r$ [-]	$D$ [-]
26,3±0,4	3,76±0,09	0,01 ±0,03	25,7±0,3	4,60±0,11	0,25±0,03
32,6±0,6	3,71±0,09	0,01 ±0,03	32,4±0,3	4,51±0,11	0,28±0,03
40,3±0,5	3,67±0,09	0,02 ±0,03	39,8±0,3	4,43±0,11	0,32±0,03
47,4±0,4	3,61±0,09	0,03 ±0,03	47,3±0,3	4,34±0,11	0,36±0,03
55,1±0,3	3,58±0,09	0,04 ±0,03	54,8±0,3	4,27±0,11	0,40±0,03
$z_r = 37,7\%$			$z_r = 65,5\%$		
$T$ [°C]	$\varepsilon'_r$ [-]	$D$ [-]	$T$ [°C]	$\varepsilon'_r$ [-]	$D$ [-]
25,0±0,3	5,39±0,14	1,54±0,07	25,2±0,3	6,95±0,21	4,61±0,2
32,5±0,3	5,26±0,14	1,62±0,07	32,6±0,4	6,71±0,22	6,22±0,2
39,7±0,3	5,14±0,14	1,70±0,07	39,9±0,4	6,48±0,21	5,75±0,2
47,4±0,3	5,00±0,13	1,70±0,07	47,1±0,4	6,26±0,20	5,27±0,2
54,7±0,3	4,88±0,13	1,72±0,07	54,5±0,3	6,04±0,19	4,97±0,2
$z_r = 75,5\%$			$z_r = 79,5\%$		
$T$ [°C]	$\varepsilon'_r$ [-]	$D$ [-]	$T$ [°C]	$\varepsilon'_r$ [-]	$D$ [-]
25,7±0,3	7,69±0,32	13,4±0,6	24,9±0,3	8,05±0,36	16,3±0,8
32,4±0,3	7,39±0,29	11,4±0,5	32,6±0,3	7,70±0,36	17,0±0,8
39,6±0,4	7,10±0,28	10,9±0,5	39,8±0,3	7,37±0,33	15,5±0,7
47,0±0,4	6,82±0,26	10,3±0,4	47,3±0,3	7,06±0,31	14,4±0,7
54,3±0,4	6,56±0,25	9,69±0,4	54,6±0,4	6,76±0,29	13,1±0,6

tração global e da temperatura é mostrado na Figura 35. Contrariando o observado para a permissividade relativa, os valores de fator de dissipação para altas concentrações globais não estiveram confinados entre os valores limites dos componentes puros. Para concentrações globais iguais ou maiores a 65,5 % os fatores de dissipação medidos foram superiores aos obtidos para o refrigerante puro. Não se tem uma explicação exata para o que causou este efeito. É possível que a interação dos componentes em relação aos mecanismos de perdas elétricas não seja tão linear quando comparado ao comportamento da permissividade relativa. Além disso, existe a possibilidade de uma montagem inadequada da célula de medição durante os testes com R-134a puro, uma vez que as tendências dos resultados de permissividade e do fator de dissipação das misturas parecem coerentes. Uma eventual correção para o fator de dissipação do R-134a puro implicaria em uma curva de fator de

Tabela 6 – Resultados de solubilidade para a mistura R-134a/Óleo POE ISO 10 em função da concentração global e da temperatura.

$z_r = 5,9 \%$		$z_r = 22,6 \%$	
$T [^{\circ}\text{C}]$	$x_r [\%]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$x_r [\%]$
26,3±0,4	5,54±0,03	25,7±0,3	21,73±0,02
32,6±0,6	5,44±0,03	32,4±0,3	21,60±0,02
40,3±0,5	5,43±0,03	39,8±0,3	21,42±0,03
47,4±0,4	5,34±0,03	47,3±0,3	21,23±0,03
55,1±0,3	5,22±0,03	54,8±0,3	21,05±0,03
$z_r = 37,7 \%$		$z_r = 65,5 \%$	
$T [^{\circ}\text{C}]$	$x_r [\%]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$x_r [\%]$
25,0±0,3	37,07±0,02	25,2±0,3	64,65±0,02
32,5±0,3	36,96±0,02	32,6±0,4	64,47±0,02
39,7±0,3	36,85±0,02	39,9±0,4	64,24±0,02
47,4±0,3	36,77±0,03	47,1±0,4	63,98±0,03
54,7±0,3	36,67±0,03	54,5±0,3	63,66±0,03
$z_r = 75,5 \%$		$z_r = 79,5 \%$	
$T [^{\circ}\text{C}]$	$x_r [\%]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$x_r [\%]$
25,7±0,3	75,21±0,01	24,9 ±0,3	79,36±0,01
32,4±0,3	75,17±0,01	32,6 ±0,3	79,36±0,01
39,6±0,4	75,12±0,02	39,8 ±0,3	79,36±0,01
47,0±0,4	75,07±0,02	47,3 ±0,3	79,37±0,01
54,3±0,4	75,02±0,02	54,6 ±0,4	79,38±0,01

Tabela 7 – Coeficientes angulares das retas de ajuste da permissividade relativa em função da temperatura para as diversas concentrações globais da mistura R-134a/Óleo POE ISO 10

$z [\%]$	0	5,9	22,6	37,7	65,5	75,5	79,5	100
$\frac{d\varepsilon_r'}{dT} \left[ \frac{10^{-3}}{K} \right]$	4,3	6,2	11,4	17,4	31,0	39,6	43,6	63,7

dissipação para o R-134a superior à obtida experimentalmente. Caso um erro tenha acontecido, vale ressaltar que os valores obtidos de permissividade relativa não foram comprometidos, pois os mesmos foram comparados aos resultados de outros trabalhos publicados, conforme discutido na Seção 3.9 e mostrado na Figura 30.

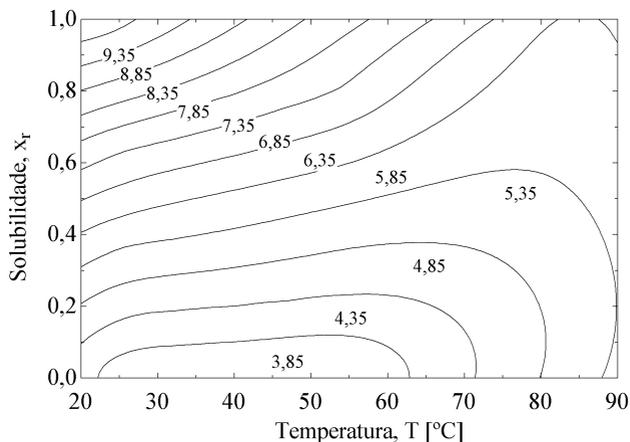


Figura 34 – Curvas de nível de permissividade relativa da mistura R-134a/óleo POE ISO 10 em função de temperatura e da solubilidade.

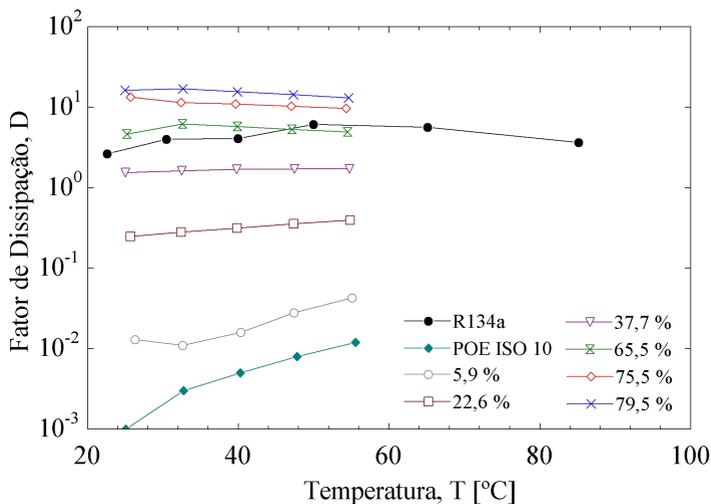


Figura 35 – Fator de dissipação da mistura R-134a/Óleo POE ISO 10 em função da temperatura e da concentração global

### 4.3 Ensaios com a Mistura R-1234yf/Óleo POE ISO 10

O procedimento de medição do fator de dissipação para a mistura R-1234yf/óleo POE ISO 10 foi o mesmo empregado para a medição do par R-134a/óleo POE ISO 10. A frequência utilizada foi de 1 kHz. A Figura 36 ilustra os resultados em função da temperatura e da concentração global. Como pode ser visto, o comportamento das curvas é semelhante àquele para a mistura envolvendo o R-134a, com a permissividade relativa aumentando com a concentração global e diminuindo levemente com a temperatura. Contudo, os valores da permissividade relativa para uma dada concentração global e temperatura são ligeiramente menores que os da mistura com R-134a em virtude da menor permissividade relativa do R-1234yf. A Tabela 8 mostra os valores experimentais e suas respectivas incertezas. Os resultados de solubilidade dos testes envolvendo o R-1234yf são mostrados na Tabela 9.

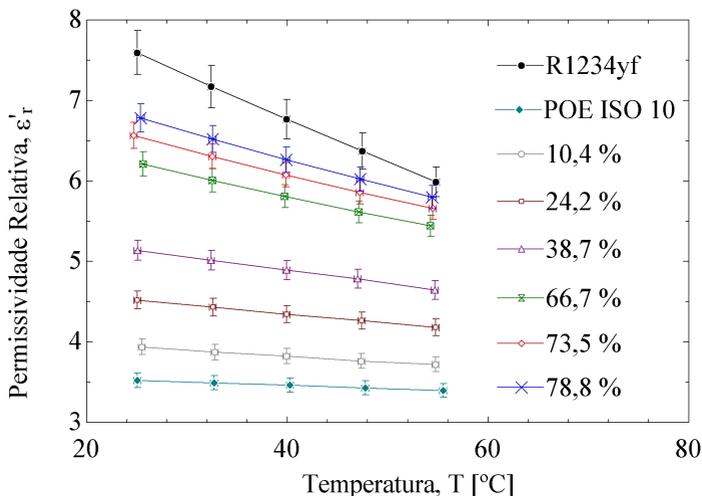


Figura 36 – Permissividade relativa da mistura R-1234yf/óleo POE ISO 10 em função da temperatura e concentração global.

O comportamento da permissividade relativa dessa mistura é semelhante ao observado na mistura anterior. A mesma análise apresentada na Seção 4.2 foi realizada e os valores dos módulos das inclinações das retas ajustadas são mostradas na Tabela 10.

Tabela 8 – Resultados de permissividade relativa e fator de dissipação para a mistura R-1234yf/POE ISO 10 em função da temperatura e concentração global.

$z_r = 10,4 \%$			$z_r = 24,2 \%$		
$T$ [°C]	$\varepsilon'_r$ [-]	$D$ [-]	$T$ [°C]	$\varepsilon'_r$ [-]	$D$ [-]
25,5±0,3	3,94±0,10	0,00±0,01	25,0±0,3	4,52±0,11	0,02±0,01
32,8±0,4	3,71±0,10	0,00±0,01	32,6±0,3	4,43±0,11	0,02±0,01
39,9±0,3	3,83±0,10	0,00±0,01	39,9±0,3	4,34±0,11	0,03±0,01
47,4±0,3	3,76±0,09	0,00±0,01	47,4±0,3	4,27±0,11	0,03±0,01
54,7±0,3	3,72±0,09	0,00±0,01	54,8±0,3	4,18±0,10	0,03±0,01
$z_r = 38,7 \%$			$z_r = 66,7 \%$		
$T$ [°C]	$\varepsilon'_r$ [-]	$D$ [-]	$T$ [°C]	$\varepsilon'_r$ [-]	$D$ [-]
25,1±0,3	5,14±0,12	0,11±0,01	25,6±0,4	6,21±0,15	0,71±0,02
32,4±0,3	5,02±0,12	0,12±0,01	32,5±0,4	6,01±0,15	0,70±0,02
39,9±0,3	4,89±0,12	0,12±0,01	39,7±0,4	5,81±0,14	0,64±0,02
47,0±0,3	4,79±0,12	0,12±0,01	47,1±0,4	5,62±0,14	0,58±0,02
54,7±0,3	4,65±0,12	0,12±0,01	54,2±0,3	5,44±0,13	0,52±0,02
$z_r = 73,5 \%$			$z_r = 78,8 \%$		
$T$ [°C]	$\varepsilon'_r$ [-]	$D$ [-]	$T$ [°C]	$\varepsilon'_r$ [-]	$D$ [-]
24,7±0,3	6,57±0,16	1,33±0,03	25,4±0,4	6,78±0,17	2,02±0,04
32,5±0,4	6,31±0,16	1,19±0,03	32,5±0,4	6,52±0,17	1,77±0,04
39,8±0,3	6,08±0,15	1,05±0,03	39,9±0,4	6,27±0,16	1,49±0,03
47,2±0,4	5,86±0,14	0,91±0,02	47,2±0,3	6,02±0,15	1,25±0,03
54,5±0,4	5,66±0,14	0,80±0,02	54,4±0,4	5,80±0,14	1,06±0,03

Gráficos de contorno e superfície ilustrando a dependência da permissividade relativa da mistura R-1234yf/POE ISO 10 com relação à temperatura e à solubilidade são apresentados na Figura 37. No geral, tendências semelhantes às da mistura envolvendo o R-134a são observadas.

Os resultados experimentais do fator de dissipação da mistura R-1234yf/POE ISO 10 são apresentados no gráfico da Figura 38. Os valores de fator de dissipação do R-1234yf puro foram superiores em todas temperaturas àqueles das misturas, efeito não observado no par R-134a/POE ISO 10. Observou-se ainda que as curvas do óleo puro e da mistura de concentração global de 10,4% se cruzaram. As incertezas de medição associada ao fator de dissipação dessas duas curvas são, em média, três vezes superiores aos valores medidos, conforme mostra a Tabela 8. A causa disso reside na pequena magnitude dos valores

Tabela 9 – Resultados de solubilidade para a mistura R-1234yf/POE ISO 10 em função da temperatura e concentração global.

$z_r = 10,4 \%$		$z_r = 24,2 \%$	
$T$ [°C]	$x_r$ [%]	$T$ [°C]	$x_r$ [%]
25,5±0,3	9,50±0,03	25,0±0,3	24,17±0,02
32,8±0,4	9,37±0,03	32,6±0,3	24,17±0,02
39,9±0,3	9,23±0,03	39,9±0,3	22,69±0,03
47,4±0,3	9,08±0,03	47,4±0,3	22,47±0,04
54,7±0,3	8,92±0,03	54,8±0,3	22,23±0,04
$z_r = 38,7 \%$		$z_r = 66,7 \%$	
$T$ [°C]	$x_r$ [%]	$T$ [°C]	$x_r$ [%]
25,1±0,3	38,16±0,02	25,6±0,4	65,82±0,02
32,4±0,3	38,08±0,02	32,5±0,4	65,65±0,02
39,9±0,3	37,98±0,03	39,7±0,4	65,43±0,03
47,0±0,3	37,87±0,03	47,1±0,4	65,17±0,03
54,7±0,3	37,80±0,04	54,2±0,3	64,87±0,04
$z_r = 73,5 \%$		$z_r = 78,8 \%$	
$T$ [°C]	$x_r$ [%]	$T$ [°C]	$x_r$ [%]
24,7±0,3	73,14±0,02	25,4±0,4	78,67±0,01
32,5±0,4	73,08±0,02	32,5±0,4	78,66±0,01
39,8±0,3	73,01±0,02	39,9±0,4	78,67±0,01
47,2±0,4	72,93±0,02	47,2±0,3	78,68±0,02
54,5±0,4	72,85±0,02	54,4±0,4	78,72±0,02

Tabela 10 – Coeficientes angulares das retas de ajuste da permissividade relativa em função da temperatura para as diversas concentrações globais da mistura R-1234yf/Óleo POE ISO 10

$z$ [%]	0	10,4	24,2	38,7	66,7	73,5	78,8	100
$\frac{d\epsilon'_r}{dT}$ [ $\frac{10^{-3}}{K}$ ]	4,3	7,0	11,4	16,5	26,9	30,5	33,8	53,8

de fator de dissipação medidos nessa região (da ordem de  $10^{-3}$ ). Na prática, para fatores de dissipação tão reduzidos, a influência da parcela dissipativa na impedância medida é desprezível, uma vez que o termo dentro da raiz da Equação 1.10 é aproximadamente igual a um.

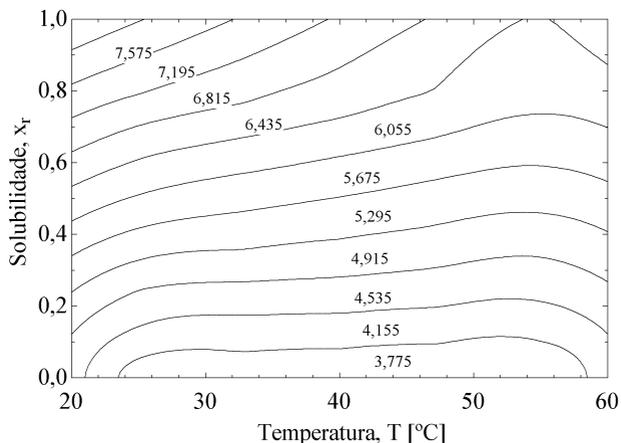


Figura 37 – Curvas de nível da permissividade relativa da mistura R-1234yf/óleo POE ISO 10 em função de temperatura e da solubilidade.

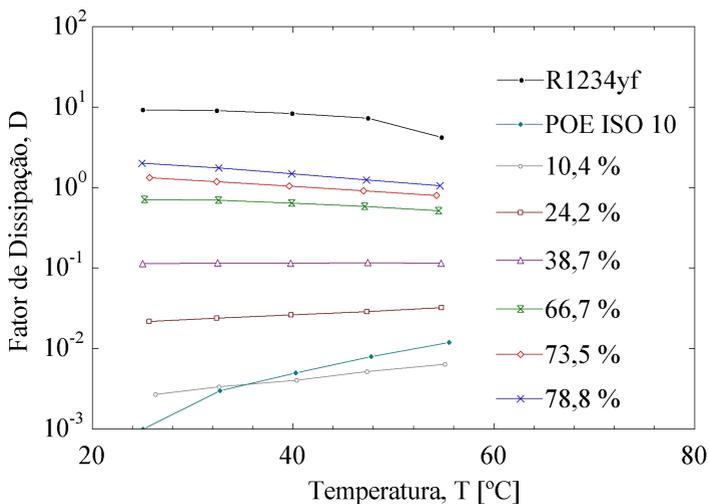


Figura 38 – Fator de dissipação da mistura R-1234yf/óleo POE ISO 10 em função de temperatura e da concentração global

É importante ressaltar que, do ponto de vista prático, os dados apresentados nesta seção são úteis para o projeto e dimensionamento de sensores de medição de fração volumétrica de fases (fração de vazio) em escoamentos multifásicos. Geralmente, para um projeto adequado do sensor (do ponto de vista da discriminação entre as fases), é necessário que a diferença entre as permissividades relativas das fases líquida e vapor seja maior que 3 (GALDIANO, 2010). Admitindo que a permissividade relativa da fase vapor seja próxima da unidade (como é o caso para a maioria dos gases), esta condição é atendida até para misturas mais ricas em óleo lubrificante.

## 4.4 Comparação com Correlações

Esta seção apresenta uma avaliação do desempenho das correlações descritas na Seção 2.2 para a determinação da permissividade relativa de misturas líquidas. Conforme observado anteriormente, a permissividade relativa das substâncias puras é inversamente proporcional à temperatura. Portanto, para correlacionar esta propriedade para o óleo puro, R-134a e R-1234yf, será empregada uma função empírica sugerida por Brito et al. (2000), conforme mostra a seguinte equação:

$$\varepsilon'_{r,c} = k_0 + \frac{k_1}{T} \quad (4.1)$$

onde  $\varepsilon'_{r,c}$  é permissividade relativa calculada,  $k_0$  e  $k_1$  são constantes empíricas e  $T$  é a temperatura em kelvin. Os valores obtidos para as constantes empíricas são mostrados na Tabela 11, tendo estes valores sido determinados por meio de rotinas de minimização de parâmetros por mínimos quadrados disponíveis no programa EES (Klein (2013)). As correlações podem ser visualizadas na Figura 39.

Tabela 11 – Coeficientes ajustados para correlacionar a permissividade relativa das substâncias puras

	$k_0$	$k_1$
POE ISO 10	2,149	410,7
R-134a	-13,115	6751,9
R-1234yf	-10,044	5261,2

A Tabela 12 apresenta uma comparação do desempenho das correlações apresentadas no Capítulo 2. O desempenho é quantificado por meio dos seguintes parâmetros estatísticos: desvio médio absoluto

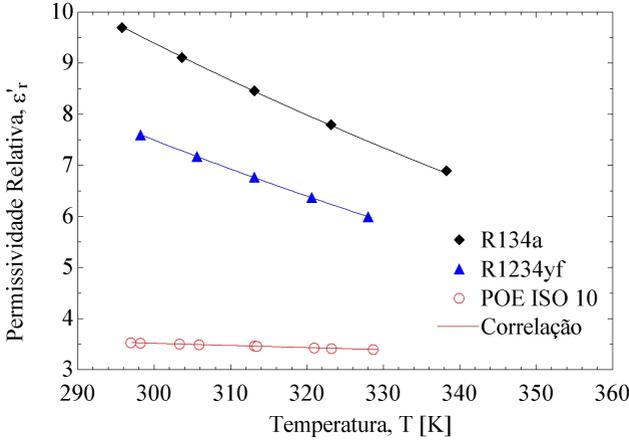


Figura 39 – Representação gráfica das correlações ajustadas para permissividade relativa das substâncias puras

(*AAD*), desvio médio quadrático (*RMS*) e *Bias*. Estas variáveis estatísticas são definidas como:

$$AAD = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(\varepsilon'_{r,c,i} - \varepsilon'_{r,e,i})^2}{(\varepsilon'_{r,e,i})^2} \right| \quad (4.2)$$

$$RMS = \frac{100}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\varepsilon'_{r,c,i} - \varepsilon'_{r,e,i})^2}{(\varepsilon'_{r,e,i})^2}} \quad (4.3)$$

$$Bias = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon'_{r,c,i} - \varepsilon'_{r,e,i}}{\varepsilon'_{r,e,i}} \quad (4.4)$$

onde  $n$  é o número de pontos experimentais e os sub-índices  $c$  e  $e$  representam os valores calculados e experimentais, respectivamente. O parâmetro *AAD* retrata o valor absoluto do erro em relação aos dados experimentais e serve como uma primeira avaliação da dispersão dos erros. Contudo, o *AAD* é menos sensível a valores que possuem grandes afastamentos. Neste caso, o *RMS* torna-se mais representativo, sendo uma boa medida de precisão. O *Bias* reporta a tendenciosidade geral do erro e não é modificado pela repetição dos experimentos (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2004).

Para ambas as misturas, a correlação que apresentou os menores desvios em relação aos valores experimentais foi a proposta por Bottcher (1945), mostrada na Equação 2.5. Os desvios médios foram menores do que  $\pm 7,5\%$ . Vale ressaltar que as regras de mistura aqui avaliadas não utilizam nenhum coeficiente de ajuste, sendo a permissividades relativas das misturas correlacionadas somente com os valores de fração volumétrica de cada componente (Equação 2.1). O desempenho da correlação de Bottcher é ilustrado na Figura 40.

Conforme o esperado, a correlação de Clausius-Mossotti (SHIN; TSUI; YEUNG, 1989), mostrada na Equação 2.10, não previu a permissividade da mistura com erros reduzidos, visto que se trata de uma correlação específica para substâncias não-polares e os fluidos testados são polares.

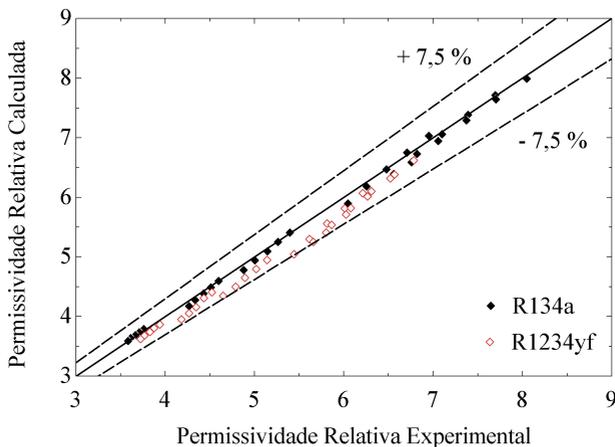


Figura 40 – Predição da permissividade relativa calculada pela correlação de Bottcher (1952)

Tabela 12 – Análise estatística do desempenho das correlações para o cálculo da permissividade relativa.

	R-134a/POE ISO 10			R-1234yf/POE ISO 10		
	AAD [%]	RMS [%]	Bias [%]	AAD [%]	RMS [%]	Bias [%]
Bottcher (1945)	0,01	0,20	-0,57	0,19	0,79	-4,04
Kraszewski (1977)	0,17	0,76	-3,89	0,38	1,13	-5,96
Landau e Lifshitz (1960)	0,28	0,97	-4,99	0,46	1,24	-6,60
Lichtenecker, e Rother (1931)	0,58	1,39	-7,15	0,65	1,48	-7,86
Bruggeman (1935)	0,22	0,86	-4,38	0,43	1,20	-6,35
Clausius-Mossotti	1,14	1,95	-10,0	0,94	1,77	-9,41
Wiener (1912)	1,48	2,22	-11,4	1,13	1,94	-10,3
Kubo e Nakamuro (1953)	3,59	3,46	17,0	1,17	1,98	8,58
Oster (1946)	0,10	0,57	2,51	0,18	0,76	-3,60

A última linha da Tabela 12 mostra o desempenho estatístico da chamada Regra de Oster (OSTER, 1946) para a polarização da mistura,  $p_m$ . Para uma substância pura a polarização por unidade de volume  $p_i$  é calculada em função da permissividade relativa  $\varepsilon_{r,i}$  pela seguinte equação:

$$p_i = \frac{(\varepsilon'_{r,i} - 1)(2\varepsilon'_{r,i} + 1)}{9\varepsilon'_{r,i}} \quad (4.5)$$

Pela Regra de Oster (1946), a polarização de uma mistura binária,  $p_{m,o}$ , é dada por:

$$p_{m,o} = \frac{\tilde{x}_1\tilde{v}_1p_1 + \tilde{x}_2\tilde{v}_2p_2}{\tilde{x}_1\tilde{v}_1 + \tilde{x}_2\tilde{v}_2} \quad (4.6)$$

onde  $\tilde{x}_i$  é a solubilidade molar do componente  $i$  e  $\tilde{v}_i$  é o seu volume molar em  $\text{m}^3/\text{k mol}_{(i)}$ .

A polarização da mistura calculada a partir dos dados experimentais,  $p_m$ , é obtida por,

$$p_m = \frac{(\varepsilon'_{r,m} - 1)(2\varepsilon'_{r,m} + 1)}{9\varepsilon'_{r,m}} \quad (4.7)$$

Os valores de polarização por unidade de volume foram calculados pelas Equações 4.7 e 4.6 e comparados entre si. Esta comparação é mostrada na Figura 41. Como pode ser observado, há uma boa concordância entre os dados experimentais e o modelo de Oster (1946), evidenciando a comportamento próximo da idealidade exibido pelas misturas aqui investigadas.

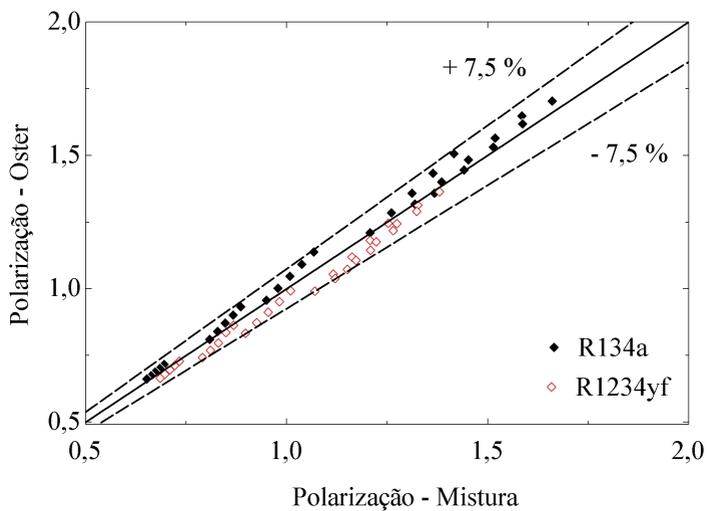


Figura 41 – Predição da polarização por unidade de volume da mistura utilizando a Regra de Oster (1946)

# 5 CONCLUSÕES E RECOMEN- DAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

## 5.1 Conclusões

Esta dissertação apresentou os resultados de um projeto de pesquisa dedicado à caracterização experimental de propriedades dielétricas (permissividade relativa e fator de dissipação) de misturas de óleos lubrificantes e fluidos refrigerantes. Tais propriedades são importantes para o projeto de sistemas em que tais substâncias entram em contato direto com componentes portadores de carga elétrica. Sensores de fração de vazio não intrusivos baseados na impedância das fases para a caracterização de escoamentos multifásicos em tubulações também são dimensionados levando em conta tais propriedades.

Resultados foram gerados para misturas de óleo lubrificante polioli éster (POE) ISO 10 e refrigerantes R-134a e R-1234yf sob condições controladas de temperatura (25 a 55 °C) e solubilidade (0 a 100 %). Para tanto, foi projetado e construído um aparato experimental especificamente para realizar as medições.

A bancada experimental, cujo projeto foi baseado nas normas alemã (DIN, 2005) e norte-americana (ASTM D924, 2008) e em trabalhos da literatura (MARDOLCAR; NIETO DE CASTRO; SANTOS, 1992), foi validada a partir de dados experimentais de substâncias puras (água, R-134a e R-1234yf). Foi proposto um procedimento experimental para determinar as propriedades de misturas óleo-refrigerante em função da solubilidade, o qual exibiu incertezas experimentais compatíveis com estudos similares apresentados na literatura.

Os resultados experimentais demonstraram um comportamento similar para as duas misturas, com valores de permissividade relativa ligeiramente inferiores para a mistura R-1234yf/POE ISO 10 devido à menor permissividade do R-1234yf puro. Ambas as misturas exibiram um aumento da permissividade com a concentração e uma redução em função da temperatura, resultados estes que são compatíveis com observações experimentais relatadas por outros autores (FEJA, 2012).

Os dados experimentais de permissividade relativa foram comparados a regras de misturas baseadas na fração volumétrica propostas

na literatura. Nenhum dos métodos avaliados dispunha de parâmetros de ajuste empíricos. Observou-se uma boa concordância com os dados experimentais pela maioria das regras avaliadas, com os melhores desempenhos sendo exibidos pelo método de Bottcher (1945) e pela Regra de Oster (1946) para a polarização da mistura. Ambos os métodos exibiram desvios médios quadráticos RMS inferiores a  $\pm 1\%$ .

## 5.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

As seguintes recomendações são feitas para trabalhos nesta linha de pesquisa:

1. Caracterizar as propriedades elétricas de outras misturas, por exemplo, aquelas envolvendo hidrocarbonetos, dióxido de carbono e R-410A, dada a gama de aplicações destes refrigerantes em sistemas de refrigeração;
2. Aprimorar o projeto da célula de medição, de modo que a desmontagem, limpeza e remontagem possa ser simplificada:
  - estudar a possibilidade de construir as peças de isolamento elétrico com material cerâmico, pois as peças de poliacetal apresentam alguma absorção de fluidos, causando interferência mecânica elevada entre os diferentes componentes;
  - desenvolver uma ligação entre os fios condutores e os eletrodos que não utilize soldagem, possibilitando a caracterização de substâncias que causem corrosão;
  - Incorporar ao circuito equipamentos que possibilitem a medição simultânea de densidade e de solubilidade. . . .
3. Realizar um estudo referente as teorias de polarização das moléculas das substâncias medidas, como a de Kirkwood-Frölich, Vedam e a equação de estado de Baron-Buep. Possibilitando correlacionar os resultados de maneira mais fundamentada.

# REFERÊNCIAS

- ABBOTT, A. P.; EARDLEY, C. A.; ; TOOT, R. Relative permittivity measurements of 1,1,1,2-tetrafluoroethane (HFC 134a), pentafluoroethane (HFC 125), and difluoromethane (HFC 32). *J. Chem. Eng.*, v. 44, p. 112–115, 1999.
- AGILENT TECHNOLOGIES. *Impedance Measurement Handbook*: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>. [S.l.], 2006.
- AGILENT TECHNOLOGIES. *Agilent E4980A Precision LCR Meter User's Guide*. [S.l.], 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Research Report D-27-1015*: Standard test method for dissipation factor (or power factor) and relative permittivity (dielectric constant) of electrical insulating liquids. Philadelphia, US, 2003.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D 924*: Standard test method for dissipation factor (or power factor) and relative permittivity (dielectric constant) of electrical insulating liquids. Philadelphia, US, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D 150*: Standard test methods for AC loss characteristics and permittivity (dielectric constant) of solid electrical insulation. Philadelphia, US, 2011.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC. *Chapter 12 Lubricants in Refrigerant Systems*. [S.l.], 2010.
- APREA, C.; FILIPPO, R.; MASTRULLO, R. The uncertainties in measuring vapour compression plant performances. *Measurement*, Florianópolis, Brasil, v. 21, n. 3, p. 65–70, 1997.
- BARÃO, M. T.; MALDOCAR, U. V.; NIETO DE CASTRO, C. A. The dielectric constant of liquid HFC 134a and HCFC 142b. *International Journal of Thermophysics*, Boulder, Colorado, U.S.A., v. 17, n. 3, 1996.

- BARÃO, M. T.; MARDOLCAR, U. V.; 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. *Fluid Phase Equilibria*, v. 150-151, p. 753–762, 1998.
- BARÃO, M. T.; NIETO DE CASTRO, C. A.; MARDOLCAR, U. V.; OKAMBAWA, R.; St-Arnaud, J. M. Dielectric constant, dielectric virial coefficients and dipole moments of HFC-134a. *J. Chem. Eng.*, v. 40, p. 1242–1248, 1995.
- BOTTCHER, C. J. F. The dielectric constant of crystalline powders. *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas*, v. 64, p. 47–51, 1945.
- BRITO, F. E.; GUROVA, A. N.; MARDOLCAR, U. V.; NIETO DE CASTRO, C. A. Dielectric constant of the nearly azeotropic mixture R410A. *Int. J. Thermophys*, v. 21, p. 415–427, 2000.
- BRUGGEMAN, D. A. G. Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen. *Annalen.Physik.*, v. 24, p. 637, 1935.
- CAMPBELL, A. M. *Measurements and Analysis of the Microwave Dielectric Properties of Tissues*. Tese (Doutorado) — University of Glasgow, Scotland, UK, 1990.
- CAREY, A. A.; HAYZEN, A. J. The dielectric constant and oil analysis. *Practicing Oil Analysis*, September ([www.machinerylubrication.com/Read/226](http://www.machinerylubrication.com/Read/226)), 2001.
- CORACH, J.; SORICHETTI, P. A.; ROMANO, S. D. Electrical properties of vegetable oils between 20 Hz and 2 MHz. *International Journal of Hydrogen Research*, v. 30, p. 1–5, 2013.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *DIN 60247: Insulating liquids - measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor ( $\tan \delta$ ) and d.c. resistivity*. Berlim, 2005.
- FEJA, S. Measurement of electrical properties of refrigerants and refrigeranteoil mixtures. *International Journal of Refrigeration*, v. 35, p. 1367–1371, 2012.
- FLORA, B. F. *Sensor de impedância de anéis para medida de fração de vazio em escoamento gás-líquido*. Dissertação — UNICAMP, Campinas, Brasil, 2011.

- FRANÇA, R. M. *Caracterização do equilíbrio de fases das misturas R-134a/POE ISO 10 e R-1234yf/POE ISO 10*. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) — Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, Brasil, 2013.
- GALDIANO, E. dos S. *Contribuição ao Estudo de um Medidor Não-Invasivo da Espessura da Camada de Água em um Escoamento Anular Óleo – Água*. Dissertação — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2010.
- GONÇALVES, J. M.; MELO, C.; CARDOSO, R. Medição do volume interno de componentes de sistemas de refrigeração. Florianópolis, Brasil, 2000.
- GUM, I. *Avaliação de dados de Medição - Guia para a expressão de incerteza de medição*, Brasil, 2008.
- GUO, W.; LIU, Y.; ZHU, X.; WANG, S. Dielectric properties of honey adulterated with sucrose syrup. *Journal of Food Engineering*, v. 107, p. 1–7, 2011.
- KLEIN, S. Engineering equation solver. *Professional Version*, 2013.
- KRASZEWSKI, A. Prediction of the dielectric properties of two-phase mixtures. *Journal of Microwave Power.*, v. 12, n. 3, p. 216–222, 1977.
- KUBO, M.; NAKAMURO, S. Electrodynamics of continuous media. *Pergamon Press, Oxford*, v. 26, p. 318, 1953.
- LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. Electrodynamics of continuous media. *Pergamon Press, Oxford*, 1960.
- LEMMON, E. W.; HUBER, M. L. NIST standard reference database 23: Reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, version 8.0. *National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg, MD., 2007.
- LICHTENECKER, K.; ; ROTHER, K. Dieherleitung des logarithmischenmischungenesetzes eus allgemeinen prinzipien der stationaren stromung. *Physik.Zeithschr.*, v. 32, p. 255, 1931.
- LINDNER, M. Oil condition monitoring using electrical conductivity. *Machinery Lubrication*, June (<http://www.machinerylubrication.com/Read/29407>), 2013.

- LIZHI, H.; TOYODA, K.; IHARA, I. Dielectric properties of edible oils and fatty acids as a function of frequency, temperature, moisture and composition. *Journal of Food Engineering*, v. 88, p. 151–158, 2008.
- MARCELINO NETO, M. A. *Termodinâmica e Fenômenos de Absorção em Misturas de Óleos Lubrificantes e Fluidos Refrigerantes de Baixo Impacto Ambiental*. Tese (Doutorado) — Departamento de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2011.
- MARCELINO NETO, M. A.; FRANÇA, R. M.; BARBOSA JR., J. R. Convection-driven absorption of R-1234yf in lubricating oil. *International Journal of Refrigeration*, sub-judice, 2014.
- MARDOLCAR, U. V.; NIETO DE CASTRO, C. A.; SANTOS, F. J. V. Dielectric constant measurements of toluene and benzene. *Elsevier Science Publishers B.V.*, Amsterdam, v. 5, 1992.
- MDUKHIN, S.; DERJAGUIN, B. Electrokinetic phenomena. *J. Willey and Sons*, 1974.
- MEURER, C.; PIETSCH, G.; HAACKE, M. Electrical properties of CFC- and HCFC-substitutes. *International Journal of Refrigeration*, v. 24, p. 171–175, 2001.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. *Estatística Aplicada à Engenharia*. Brasil: Livros Técnicos e Científicos, 2004.
- OSTER, G. The dielectric properties of liquid mixtures. *J. Am. Chem. Soc.*, Florianópolis, Brasil, v. 68, n. 10, p. 2036–2041, 1946.
- OWEN, B. B.; Brinkley Jr., S. R. The effect of pressure upon the dielectric constant of liquids. *Phys. Rev.*, v. 64:32, 1943.
- PECOVSKA-GJORGJEVICH, M.; ANDONOVSKI, A.; VELEVSKA, J. Dielectric constant and induced dipole moment of edible oils subjected to conventional heating. *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, v. 31, n. 2, p. 285–294, 2012.
- PENG, D. Y.; ROBINSON, D. A new two-constant equation of state. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 1, p. 59–64, 1976.
- RIBEIRO, A. P. C.; NIETO DE CASTRO, C. A. Dielectric properties of liquid refrigerants: Facts and trends. *International Journal of Refrigeration*, v. 34, p. 393–401, 2011.

RIBEIRO, A. P. C.; NIETO DE CASTRO, C. A.; MARDOLCAR, U. V. Relative permittivity and dipole moments of replacement refrigerant mixtures (R408A and R409A) in the liquid state. *J. Chem. Eng.*, v. 53, p. 378–387, 2008.

RIBEIRO, A. P. C.; NIETO DE CASTRO, C. A.; PAI-PANANDIKER, R. S.; MARDOLCAR, U. V. Relative permittivities of 1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropane (HFC-227ea), 1,1,1,2,3,3-hexafluoropropane (HFC-236ea), and 1,1,1,3,3-pentafluorobutane (HFC-365mfc) in the liquid phase. *J. Chem. Eng.*, v. 52, p. 2041–2049, 2007.

ROSA, E. S.; FLORA, B. F.; SOUZA, M. A. S. F. Design and performance prediction of an impedance void meter applied to the petroleum industry. *Meas. Sci. Technol.*, v. 23, n. 055304, p. 14, 2012.

SEETON, C. J. *CO<sub>2</sub>-lubricant two-phase flow patterns in small horizontal wetted wall channels; the effects of refrigerant/lubricant thermophysical properties*. Tese (Doutorado) — University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA, 2009.

SHIN, F. G.; TSUI, W. L.; YEUNG, Y. Y. Dielectric constant of binary mixtures. *Journal of Materials Science Letters*, Hong Kong, 1989.

SIMS, F. Engineering formulas interactive: Conversions, definitions, and tables. *Elsevier*, v. 1, p. 101–102, 1999.

SOUSA, F. F. de; MOREIRA, S. G. C.; SILVA, S. J. S. da; NERO, J. D.; Alcantara Jr., P. Dielectric properties of oleic acid in liquid phase. *Journal of Bionanoscience*, v. 3, p. 1–4, 2010.

TANAKA, Y.; MATSUO, S.; SOTANI, T.; KONDO, T.; MATSUO, T. Relative permittivity and resistivity of liquid HFC refrigerants under high pressure. *International Journal of Thermophysics*, Boulder, Colorado, U.S.A., v. 20, n. 1, 1999.

TUOMAS, R. *Properties of Oil and Refrigerant Mixtures-Lubrication of ball bearings in refrigeration compressors*. Tese (Doutorado) — Lulea University of Technology, Illinois, USA, 2006.

VENKATESH, M. S.; RAGHAVAN, G. S. V. An overview of dielectric properties measuring techniques. *Canadian Biosystems Engineering/Le génie des biosystèmes au Canada*, Canada, v. 45, p. 7.15 – 7.30, 2005.

WIENER, O. Die theorie des mischkörpers für das feld der stationären strömung. *Abh. Math.-Phys. Kl., königl.sächs. Ges. Wiss.*, v. 32, p. 507–604, 1912.

ZHU, J.; HE, D.; BECHHOEFER, E. Survey of lubrication oil condition monitoring, diagnostics, and prognostics techniques and systems. *Journal of Chemical Science and Technology*, v. 2, n. 3, p. 100–115, 2013.